

esencial
**COSTA
RICA**



DESARROLLO DE PORTAFOLIOS TÉCNICOS PARA LA MARICULTURA EN COSTA RICA



Contenido

Abreviaturas	5
1. Introducción.....	9
2. Marco de Referencia	11
3. Portafolio 1 y 2: Cultivo de Pepinos de Mar y Macroalgas.....	13
3.1. Infraestructura requerida.....	13
3.1.1. Pepinos de mar	13
3.1.2. Macroalgas.....	15
3.2. Investigación y desarrollo.....	17
3.2.1. Pepinos de mar	17
3.2.2. Macroalgas.....	18
3.3. Tecnologías disponibles	19
3.3.1 Pepinos de mar	19
3.3.2 Macroalgas.....	21
3.4. Condiciones y zonas de factibilidad para producir.....	23
3.4.1. Pepinos de mar	24
3.4.2. Macroalgas	27
3.5. Desarrollo del cultivo y especies a cultivar	29
3.5.1. Pepinos	29
3.5.2. Macroalgas.....	35
3.6. Desarrollo y establecimiento del cultivo	39
3.6.1. Pepinos de mar	39
3.6.2. Macroalgas	46
3.7. Análisis de productos y demanda	50
3.7.1 Pepino de mar	50

3.7.2. Macroalgas.....	53
3.8. Capital humano	56
3.9. Cadena de valor	57
3.10. Industrialización	68
3.10.1 Pepino de mar	68
3.10.2. Macroalgas.....	70
3.11. Estructura de costos	73
3.12. Insumos.....	89
3.13. Financiamiento local	90
3.14. Tramitología y legislación	93
3.15. Incentivos del sector.....	97
3.16. Valor agregado a través del conocimiento.....	98
3.17. Principales hallazgos.....	101
4. Portafolio 3: Evaluación de Capacidad Instalada en Maricultura	104
4.1. Inventario de infraestructura.....	104
4.2. Condiciones y zonas de factibilidad para la producción.....	104
4.3. Estructura de costos.....	105
4.4. Soporte de investigación y desarrollo	125
4.5. Capital humano	126
4.6. Insumos.....	128
4.7. Financiamiento Local	138
4.8. Tramitología y legislación	139
4.9. Cadena de valor	145
4.10. Potencial de relacionamiento y encadenamientos.....	151
4.11. Organizaciones de coordinación y apoyo.....	152
4.12. Servicios de apoyo y financiamiento	152

4.13. Incentivos del sector.....	153
4.14. Características generales del sector	154
4.15. Indicadores macroeconómicos.....	155
4.16. Logística de exportación.....	158
4.17. Gobernanza e instituciones	165
4.18. Análisis Comparativo.....	169
4.19. Motivadores de consumo y tendencias globales	174
4.20. Brechas de conocimiento y capacidades	183
4.21. Obstáculos y barreras de entrada para nuevas empresas.....	185
4.22. Principales Hallazgos	186
5. Conclusiones y Recomendaciones.....	214
6. Bibliografía.....	219
7. Anexos	234

Créditos

Coordinación del proyecto:

Dra. María del Milagro Carvajal Oses, Estación de Biología Marina

Lic. Alex Ponce Rojas, Centro de Desarrollo Gerencial

Equipo consultor:

Dra. María del Milagro Carvajal Oses

Ph.D. Ángel Herrera Ulloa

Mag. Elman Calvo Elizondo

Mag. Rebeca Quesada Céspedes

Mag. José David Ulloa Soto

Agradecimiento:

Lic. Emmanuel Esquivel Murillo

Revisado por:

Ariana Quirós Morera, Programa Descubre - Promotora de Comercio Exterior de Costa Rica (PROCOMER)

Abreviaturas

AIoT: Artificial Intelligence of Things

BCR: Banco de Costa Rica

BFT: Biofloc Technology

BID: Banco Interamericano de Desarrollo

BNCR: Banco Nacional de Costa Rica

CCSS: Caja Costarricense de Seguro Social

CELIEM: Centro Latinoamericano de Innovación y Emprendimiento

CFS: Centre for Food Safety (Hong Kong)

CIMAR: Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología

CITES: Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas

CLV: Código de Localización Veterinario

CNP: Consejo Nacional de Producción

CNP+L: Centro Nacional de Producción más Limpia

CONICIT: Consejo Nacional para Investigaciones Científicas y Tecnológicas

CSE: Certificado Sanitario de Exportación

COMEX: Ministerio de Comercio Exterior de Costa Rica

DCA: Dirección de Cuarentena Animal

DG SANTE: Dirección General de Salud y Seguridad Alimentaria (UE)

DGA: Dirección General de Aduanas

DINADECO: Dirección Nacional de Desarrollo de la Comunidad

DIPOA: Dirección de Inocuidad de Productos de Origen Animal

EFSA: Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria

FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations

FDA: Food and Drug Administration (EE.UU.)

FSVP: Foreign Supplier Verification Program

FUNDER: Fundación para el Desarrollo Rural

FWS: Fish and Wildlife Service

GACC: General Administration of Customs of China

HACCP: Hazard Analysis and Critical Control Points

HDPE: High Density Polyethylene

HPLC: High Performance Liquid Chromatography

I+D: Investigación y Desarrollo

I+D+i: Investigación, Desarrollo e Innovación

IA: Inteligencia Artificial

ICT: Instituto Costarricense de Turismo

IICA: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura

IMAS: Instituto Mixto de Ayuda Social

IMTA: Integrated Multi-Trophic Aquaculture

INA: Instituto Nacional de Aprendizaje

INAMU: Instituto Nacional de las Mujeres

INCOPESCA: Instituto Costarricense de Pesca y Acuicultura

INDNR: Pesca Ilegal, No Declarada y No Reglamentada

INFOCOOP: Instituto Nacional de Fomento Cooperativo

MAFF: Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries (Japón)

MAG: Ministerio de Agricultura y Ganadería

MEIC: Ministerio de Economía, Industria y Comercio

MIDEPLAN: Ministerio de Planificación Nacional y Políticas Económicas

MEIC: Ministerio de Economía, Industria y Comercio

MFDS: Ministry of Food and Drug Safety (Corea del Sur)

MHLW: Ministry of Health, Labour and Welfare (Japón)

MICITT: Ministerio de Ciencia, Innovación, Tecnología y Telecomunicaciones

MINAE: Ministerio de Ambiente y Energía

MTSS: Ministerio de Trabajo y Seguridad Social

NMFS: National Marine Fisheries Service

NPP: Net Primary Productivity

OIEA: Organismo Internacional de Energía Atómica

OMC: Organización Mundial del Comercio

ONU: Organización de las Naciones Unidas

PAR: Photosynthetically Active Radiation

PEN: Programa Estado de la Nación

PIMA: Programa Integral de Mercadeo Agropecuario

PMP: Parque Marino del Pacífico

PNUD: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo

POM: Particulate Organic Matter

PROCOMER: Promotora del Comercio Exterior de Costa Rica

PRONAE: Programa Nacional de Empleo

PRONAMYPE: Programa Nacional de Apoyo a la Micro y Pequeña Empresa

PSU: Practical Salinity Units

PYMES: Pequeñas y Medianas Empresas

QGIS: Quantum Geographic Information System

RAS: Recirculating Aquaculture Systems

REDD+: Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de los bosques

SBD: Sistema de Banca para el Desarrollo

SBMs: Specific Beneficial Microorganisms

SENASA: Servicio Nacional de Salud Animal

SFE: Servicio Fitosanitario del Estado

SINAC: Sistema Nacional de Áreas de Conservación

SNP: Single Nucleotide Polymorphism

SROI: Social Return on Investment

TBP: Tasa Básica Pasiva

TICA: Tecnología de Información para el Control Aduanero

TIR: Tasa Interna de Retorno

TSS: Total Suspended Solids

UCR: Universidad de Costa Rica

UNA: Universidad Nacional

UNED: Universidad Estatal a Distancia

UV: Ultravioleta

VUCE: Ventanilla Única de Comercio Exterior

WACC: Weighted Average Cost of Capital

1. Introducción

El presente proyecto tiene como propósito realizar una consultoría especializada para la elaboración de portafolios de productos de maricultura, específicamente enfocados en pepinos de mar y macroalgas, así como evaluar la capacidad instalada en Costa Rica para el desarrollo de esta actividad productiva. Se busca identificar, caracterizar y fortalecer el potencial técnico, comercial y financiero del país para atraer inversión nacional e internacional, fomentar el desarrollo económico en zonas costeras vulnerables, generar empleo, y fortalecer la cadena de valor asociada a la maricultura.

Específicamente, el desarrollo de la maricultura sostenible de pepinos de mar representa una estrategia clave para fortalecer la seguridad alimentaria, la economía azul y la resiliencia socio ecológica en las comunidades costeras de Costa Rica. Esta visión se alinea con los compromisos del país en materia de biodiversidad, cambio climático y generación de empleo digno en zonas costeras vulnerables. A nivel global, la acuicultura de pepinos de mar ha emergido como respuesta al colapso de las pesquerías extractivas, impulsada por una creciente demanda internacional, especialmente en mercados asiáticos, debido a sus propiedades nutricionales, farmacológicas y su valor cultural (Han *et al.*, 2016; Conand, 2018).

En China, el cultivo de *Apostichopus japonicus* ha evidenciado que el éxito de esta actividad depende de avances técnicos en producción larval, manejo de juveniles y adecuación de hábitats para ranchos marinos. Sin embargo, experiencias en otros contextos, como Papúa Nueva Guinea, revelan que los modelos de maricultura comunitaria enfrentan desafíos significativos cuando no se consideran adecuadamente factores socioculturales, la gobernanza local y presiones comerciales externas como el furtivismo o la sobreexplotación (Hair *et al.*, 2020; Barclay *et al.*, 2019). Estos aprendizajes resaltan la importancia de adoptar enfoques participativos, adaptativos y territorializados para asegurar la estabilidad a largo plazo.

En América Latina y el Caribe, el interés creciente por especies comerciales como *Isostichopus badionotus* ha generado preocupación por la sobreexplotación y los vacíos regulatorios. Purcell *et al.* (2018) reportaron que esta especie alcanza precios promedio de hasta 313 USD/kg en mercados internacionales, especialmente en Asia, subrayando la necesidad de diseñar estrategias de manejo pesquero que optimicen el rendimiento económico sin comprometer la sostenibilidad a nivel de ambiente. Paralelamente, se reconoce ampliamente el rol ecológico de los pepinos de mar como recicladores de nutrientes y mejoradores del sedimento, motivando su inclusión en sistemas multitróficos, que ofrecen oportunidades adicionales para la diversificación productiva y reducción de la

presión sobre los ecosistemas marinos naturales (Barclay *et al.*, 2019; Conand, 2017; Sonnenholzner-Varas, 2021).

Por su parte, la acuicultura de macroalgas emerge como una actividad estratégica debido a su notable potencial comercial y ecológico. En Asia oriental, especies cultivadas como *Pyropia yezoensis* y *Undaria pinnatifida* generan ingresos anuales significativos, alcanzando miles de millones de dólares, debido a su alto valor nutricional y versatilidad en aplicaciones comerciales para las industrias alimentaria, cosmética, nutricional y farmacéutica (Hossain *et al.*, 2021).

En América Latina, el cultivo de macroalgas representa una importante oportunidad debido a su amplio potencial aún subexplotado. Aunque la producción actual en esta región proviene mayoritariamente de la extracción en bancos naturales, países como Chile y Brasil han comenzado a implementar técnicas de cultivo avanzadas, mostrando resultados prometedores en especies como *Agarophyton chilensis* y *Gracilaria birdiae* (Alemañ *et al.*, 2019).

Además, las macroalgas también desempeñan un rol clave en la mejora ambiental gracias a su capacidad para captar nutrientes excedentes en medios acuáticos, haciéndolas ideales para integrarse en IMTA. Investigaciones recientes en sistemas IMTA en el Mediterráneo y Latinoamérica han demostrado que la incorporación de macroalgas mejora significativamente la calidad del agua al capturar nutrientes derivados del cultivo de otras especies, incrementando así la eficiencia productiva y ambiental (Giangrande *et al.*, 2020; Alemañ *et al.*, 2019).

Este trabajo tiene como objetivo principal recolectar información científica, en documentos institucionales y a través de encuestas con actores clave que demuestre que la acuicultura de pepinos de mar y macroalgas es una alternativa viable para diversificar la producción costera, regenerar hábitats marinos y crear modelos socioeconómicos inclusivos y sostenibles.

2. Marco de Referencia

La presente iniciativa de maricultura en Costa Rica, impulsada por PROCOMER, surge en el contexto de una búsqueda estratégica del país por diversificar y fortalecer su sector productivo acuícola mediante la promoción de productos con alto potencial comercial, específicamente pepinos de mar y macroalgas. Además, esta iniciativa responde a la amplia demanda internacional para estos productos marinos, particularmente en Asia, Europa y Norteamérica, y a la identificación de oportunidades para atraer Inversión Extranjera Directa hacia esta actividad económica.

De acuerdo con lo anterior, la maricultura se ha convertido en una actividad económica estratégica, especialmente relevante para satisfacer la creciente demanda global por productos marinos, debido al aumento en el consumo per cápita de pescados y mariscos en general, particularmente en mercados como Estados Unidos, China, Macao y Hong Kong. Esta actividad no solo presenta ventajas económicas significativas en términos de exportación y generación de divisas, sino que también ofrece beneficios ambientales como la reducción de la presión sobre las poblaciones silvestres y la conservación de los ecosistemas marinos, además de importantes beneficios sociales como la generación de empleo y la mejora en la calidad de vida en comunidades costeras.

Históricamente, Costa Rica ha enfrentado desafíos significativos en la consolidación de la maricultura, relacionados principalmente con regulaciones ambientales, procedimientos administrativos complejos y prolongados, y la falta de un marco regulatorio claro y específico para esta actividad. Sin embargo, el país cuenta con abundantes recursos hídricos, una amplia zona económica exclusiva marina, y condiciones ambientales propicias para el desarrollo de una maricultura sostenible.

La elección estratégica de pepinos de mar y macroalgas para este estudio derivó de un análisis exhaustivo realizado por PROCOMER, identificando ambos grupos de organismos como oportunidades excepcionales debido a su demanda creciente y al potencial para generar productos de alto valor agregado. Los pepinos de mar, en particular especies como *Isostichopus fuscus* y *Holothuria atra*, poseen un mercado internacional establecido, especialmente en países asiáticos como China y Japón, donde son altamente valorados por sus propiedades gastronómicas y medicinales tradicionales. Su comercialización presenta oportunidades significativas de generación de ingresos, ya sea en formato fresco, congelado o procesado, lo que les convierte en productos ideales para su exportación.

Por otro lado, las macroalgas destacan por su creciente relevancia global en industrias altamente especializadas como la alimentaria, cosmética y farmacéutica. Las especies identificadas con mayor potencial comercial incluyen *Codium fragile*, *Ulva lactuca*, *Gracilaria* spp. y *Sargassum* spp. Estas algas son valoradas

internacionalmente por sus propiedades nutritivas, bioactivas y cosméticas, así como por su facilidad de cultivo en sistemas multitróficos integrados, lo cual permite una producción eficiente y sostenible desde el punto de vista ambiental y económico. La alta demanda internacional por macroalgas en mercados como Estados Unidos, Europa y Asia respalda claramente la elección estratégica de promover su cultivo y exportación desde Costa Rica.

En cuanto a infraestructura y capacidades técnicas necesarias, se han identificado claras áreas de mejora en la articulación institucional, la simplificación de trámites y la construcción de capacidades técnicas específicas para manejar proyectos de maricultura de alta complejidad tecnológica y logística. Con el presente trabajo, Costa Rica reconoce la necesidad de avanzar hacia un enfoque integral y multisectorial, donde exista presencia tanto del sector privado como público en la generación de emprendimientos, involucrando activamente a las comunidades locales en la generación de empleo y el desarrollo económico sobre todo en las áreas costeras.

3. Portafolio 1 y 2: Cultivo de Pepinos de Mar y Macroalgas

A continuación, se explicará, a través de una serie de subtemas, la importancia estratégica del cultivo de pepinos de mar y macroalgas desde una perspectiva económica, social y ambiental. Se destacarán sus principales usos comerciales, beneficios ecológicos y el potencial que tienen para atraer inversión y generar desarrollo sostenible. Adicionalmente, se identificarán aspectos clave que justifican la promoción de estas actividades como alternativas productivas viables para las comunidades costeras de Costa Rica.

3.1. Infraestructura requerida

3.1.1. Pepinos de mar

Para llevar a cabo de manera eficiente el cultivo de pepinos de mar (*Isostichopus badionotus*), es esencial considerar características técnicas específicas de la infraestructura, las cuales varían según el sistema de producción elegido: estanques terrestres, ranchos marinos o sistemas IMTA (Ver Anexo 1 y 2).

Sistemas terrestres cerrados

En este tipo de sistemas, los estanques deben ubicarse preferiblemente en la zona intermareal baja, con facilidad para el intercambio de agua y libres de contaminación. La profundidad mínima recomendada es de 1.5 metros, aunque lo ideal es que supere los 2 metros. Las áreas recomendadas oscilan entre 2 y 6 hectáreas, lo que facilita una limpieza eficiente ante eventos adversos como floraciones algales (Xue, 2007; Han *et al.*, 2016).

Asimismo, se recomienda añadir sustratos específicos, como piedras, ladrillos o tejas, al menos un mes antes de la introducción de los juveniles, con el fin de fomentar el crecimiento de biofilms naturales que favorezcan la supervivencia (Jia & Chen, 2001).

Ranchos marinos

En sistemas abiertos tipo rancho marino, la profundidad recomendada del sitio varía entre 2 y 15 metros. Es preferible ubicarlos en zonas protegidas de corrientes fuertes, alejadas de fuentes de agua dulce o desembocaduras de ríos. Los sedimentos deben ser arenoso-fangosos, idealmente con presencia de praderas marinas que proporcionen alimento y refugio natural (Xie, 2004; Yu *et al.*, 2010). Para proteger estas instalaciones, se utilizan barreras físicas robustas y anclajes resistentes que minimicen el impacto de tormentas o eventos climáticos extremos (Han *et al.*, 2016).

Sistemas IMTA e instalaciones en tierra

En instalaciones en tierra bajo condiciones controladas, especialmente aquellas que forman parte de sistemas IMTA, se recomienda utilizar tanques contruidos en fibra de vidrio o concreto. Para juveniles menores de 10 gramos, se sugieren tanques circulares de 1 metro de diámetro por 1 metro de alto. Para reproductores, los tanques rectangulares ideales son de 3 metros de largo, 2 metros de ancho y 1.5 metros de alto, proporcionando un área de aproximadamente 9 m². En estos tanques, se recomienda una densidad de siembra cercana a los 5 individuos por metro cuadrado y se busca que los juveniles alcancen los 80 gramos antes de ser trasladados a sistemas abiertos.

Los sistemas deben contar con recirculación eficiente y aireación constante, manteniendo un recambio diario de agua que no exceda el 20%, lo cual es fundamental para garantizar parámetros estables de oxígeno disuelto, temperatura y salinidad.

Aclimatación de reproductores

Los reproductores extraídos del medio natural deben ser aclimatados en tanques de entre 500 y 2000 litros, con fondos lisos y contruidos en materiales como fibra de vidrio o HDPE. Estos tanques deben estar equipados con sistema de aireación constante, agua marina filtrada (entre 5 y 20 Qm), desinfectada con luz UV o cloro neutralizado, y sistemas de recambio de agua de entre 0.5 y 2 renovaciones por hora (Feng et al., 2022). Además, se requiere infraestructura para manipulación sanitaria, separación de sexos y jaulas flotantes para almacenamiento temporal *in situ* (Dolganov et al., 2024).

Laboratorio de microalgas marinas

Para lograr una producción consistente de semilla de pepino de mar, es indispensable, además de la estanquería, la existencia de un laboratorio de microalgas marinas. Este laboratorio permite el cultivo de cepas marinas bajo condiciones controladas: salinidad de 31 PSU, temperatura de 27 - 31°C y medio nutritivo tipo f/2. El cultivo se realiza de forma escalonada: desde cepas madres, pasando por cultivos intermedios, hasta el cultivo en gran volumen en fotobiorreactores tubulares helicoidales. La aireación constante se realiza mediante bombas conectadas a filtros de 0.2 Qm para evitar contaminaciones.

Además, las microalgas pueden flocularse para facilitar su almacenamiento temporal y desflocularse con CO₂ cuando se requiera su uso. Esta infraestructura resulta vital para garantizar alimento de alta calidad durante las fases larvarias (Herrera-Ulloa, 2019).

Infraestructura para el cultivo larval

Durante el cultivo larval, se utilizan tanques cónicos de 500 a 3000 litros con fondo inclinado, acompañados de módulos de cultivo de microalgas, sistemas de aireación suave, drenajes con malla fina y ambientes separados para prevenir la contaminación cruzada (Magdy *et al.*, 2021; Laguerre *et al.*, 2020).

Fase de asentamiento y metamorfosis

Para esta etapa, se recomienda el uso de tanques bajos con amplio fondo superficial y bandejas plásticas que contengan sustratos biofilmados (PVC, cerámica o ladrillos). La iluminación debe ser suave y difusa, con aireación leve y sistemas de limpieza que no alteren el biofilm (Yu *et al.*, 2022; Cheng *et al.*, 2021).

Fase de engorde

En sistemas terrestres, se emplean raceways de concreto o geomembrana, estanques revestidos con arcilla compactada o plástico, tanques con flujo lateral, sistemas de alimentación y mallas contra depredadores (Dolganov *et al.*, 2024; Rodrigues *et al.*, 2023). En sistemas marinos, se utilizan corrales de malla anclados al fondo, estructuras flotantes y sustrato natural (Purcell *et al.*, 2012; Cutajar *et al.*, 2022). Ambos sistemas deben contar con estaciones meteorológicas, sensores de campo y espacios para cosecha, limpieza y medición de biomasa.

Monitoreo y control ambiental

El monitoreo ambiental debe realizarse con tecnología adecuada, incluyendo equipos como el multiparámetro para medir temperatura, salinidad, pH y oxígeno disuelto, medidores portátiles, sensores de nivel y flujo, sistemas automáticos de alimentación, cámaras submarinas para observación y plataformas digitales para registro y análisis de datos (Huo *et al.*, 2019; Ju *et al.*, 2024; Meirinawati *et al.*, 2020; Morroni *et al.*, 2023).

3.1.2. Macroalgas

El diseño y establecimiento de infraestructura para el cultivo y procesamiento de macroalgas en zonas costeras debe considerar condiciones ecológicas, sostenibilidad ambiental, escalabilidad económica y logística operativa. Las instalaciones adecuadas permiten no solo una producción eficiente, sino también el aseguramiento de la calidad y la trazabilidad de los productos algales, clave para acceder a mercados internacionales de alto valor.

Infraestructura para el cultivo

Los sistemas de cultivo varían según la especie y el entorno marino disponible (Ver Anexo 1 y 3). Las estructuras más utilizadas a nivel internacional y en experiencias piloto en América Latina incluyen:

- a. **Líneas largas flotantes (longlines):** sistema suspendido entre boyas y anclajes, empleado para especies como *Kappaphycus alvarezii*, *Gracilaria spp.*, *Saccharina latissima* y *Ulva spp.*, dada su eficiencia técnica y bajos costos de instalación (Tullberg *et al.*, 2022).
- b. **Sistemas intermareales en fondo:** utilizados en zonas protegidas para especies como *Gracilaria chilensis*, permiten una intervención mínima y favorecen modelos de acuicultura artesanal sostenible (Méndez *et al.*, 2024).
- c. **Tanques en tierra o sistemas de recirculación (RAS):** empleados para especies más delicadas o de alto valor comercial, como *Ulva lactuca* o *Hydropuntia spp.* Estos sistemas requieren control de temperatura, salinidad y nutrientes, y son preferidos para cultivo intensivo o investigación aplicada (Heery *et al.*, 2020).
- d. **Infraestructuras urbanas costeras (ecoingeniería):** se ha demostrado la viabilidad de cultivar macroalgas en estructuras artificiales como rompeolas, espigones o malecones, integrando producción, restauración ecológica y usos recreativos (Heery *et al.*, 2020).

Infraestructura para procesamiento

Las operaciones postcosecha requieren instalaciones adaptadas a la escala de producción y a los usos finales de la biomasa algal:

- a. **Áreas de lavado y secado:** necesarias para preservar la calidad del alga cosechada. En regiones tropicales, el secado solar asistido es una práctica común; sin embargo, en climas húmedos se recomienda el uso de sistemas de secado térmico controlado (Cerca *et al.*, 2024).
- b. **Plantas de transformación:** pueden incluir maquinaria para corte, prensado, extracción de polisacáridos (como agar, carragenano o alginato), fermentación para ensilado, o producción de harinas algales. Un diseño modular permite adaptarse a distintas escalas productivas (Cerca *et al.*, 2024).
- c. **Sistemas de conservación alternativos:** el ensilado de macroalgas mediante fermentación ácido-láctica ha sido propuesto como una opción de bajo costo, útil para almacenamiento prolongado, reducción de desperdicio y mejora de la logística (Cerca *et al.*, 2024).
- d. **Laboratorios de control:** son clave para análisis microbiológicos, contenido de humedad, trazabilidad y control de calidad, especialmente cuando se

busca ingresar a mercados regulados o desarrollar productos de valor agregado (Tullberg *et al.*, 2022).

Infraestructura de soporte

La infraestructura de soporte es esencial para la operación eficiente del sistema productivo:

- a. **Muelles, rampas y embarcaderos:** permiten el desembarque y transporte de la biomasa desde las zonas de cultivo a los centros de procesamiento. Su cercanía y funcionalidad reducen el tiempo de traslado y la degradación del producto (Cerca *et al.*, 2024).
- b. **Caminos de acceso y transporte terrestre:** se requiere infraestructura vial en buen estado para asegurar la conectividad entre zonas de producción, almacenamiento y comercialización. La ausencia de infraestructura vial adecuada se ha identificado como una de las principales limitantes en el escalamiento de la maricultura en América Latina (Cerca *et al.*, 2024).
- c. **Almacenamiento temporal:** espacios ventilados o refrigerados son necesarios para conservar la biomasa fresca o seca antes del procesamiento. La existencia de bodegas en las comunidades costeras reduce significativamente las pérdidas postcosecha (Méndez *et al.*, 2024).
- d. **Centros logísticos compartidos:** la cooperación entre productores mediante plantas de procesamiento regionales o módulos móviles puede optimizar recursos y disminuir los costos operativos, sobre todo en sistemas de pequeña escala (Cerca *et al.*, 2024).

El desarrollo de infraestructura debe incorporar principios de eficiencia energética, reducción de emisiones y bioseguridad, así como contemplar tecnologías de monitoreo ambiental que permitan evaluar variables como temperatura, salinidad, nutrientes, pH y oxígeno disuelto, fundamentales para la salud del cultivo (Tullberg *et al.*, 2022).

3.2. Investigación y desarrollo

En Costa Rica, diversas instituciones académicas y centros de investigación están desarrollando proyectos específicos relacionados con el estudio y cultivo sostenible de pepinos de mar y macroalgas (aunque de manera muy incipiente). A continuación, se detallan algunos investigadores destacados, sus líneas específicas de trabajo e instituciones asociadas.

3.2.1. Pepinos de mar

Desde la UCR, a través del CIMAR, el Dr. Juan José Alvarado investiga la biodiversidad, ecología marina, taxonomía y conservación de equinodermos, especialmente de pepinos de mar en diferentes regiones costeras de Costa Rica,

incluyendo estudios sobre su distribución y estructura poblacional en áreas como el Área de Conservación Guanacaste, Isla del Coco y el Caribe costarricense (Alvarado *et al.*, 2021; Alvarado *et al.*, 2022).

Por otro lado, la UNA, a través de la Estación de Biología Marina Juan Bertoglia Richards, desarrolla investigaciones encabezadas por la Dra. María del Milagro Carvajal Oses, cuya línea de investigación principal se enfoca en condiciones óptimas para la cría en cautiverio de pepinos de mar, identificando aspectos clave relacionados con su reproducción, crecimiento, nutrición y potencial para la acuicultura sostenible (Carvajal, 2025). Estos esfuerzos están orientados a sentar las bases para el cultivo comercial de pepinos de mar en Costa Rica, particularmente en las comunidades costeras del Pacífico costarricense.

3.2.2. Macroalgas

La UNED, con el liderazgo del MSc. Rodrigo Alberto Méndez Solano, se encuentra en etapas iniciales con un proyecto innovador relacionado con la "Jardinería Oceánica 3D", una modalidad de acuicultura multitrófica integrada que busca cultivar macroalgas en combinación con moluscos y peces, aprovechando integralmente la columna de agua y promoviendo la restauración ecológica marina (Méndez-Solano, 2025). Esta iniciativa busca no solo el aprovechamiento comercial sostenible, sino también mejorar la salud ecológica de las zonas marinas afectadas por la contaminación y sobreexplotación.

Desde la UCR, la Dra. Cindy Fernández García lidera un proyecto científico centrado en la investigación sobre cultivo y manejo sostenible de macroalgas en el sector costero de El Jobo, Guanacaste. Históricamente, sus investigaciones están dirigidas a identificar especies locales y su importancia a nivel ecológico.

Continuando con la Dra. Fernández, ha documentado nuevos registros de macroalgas bentónicas, contribuyendo con la actualización taxonómica de la flora marina nacional. Su investigación en arrecifes coralinos del sur del Caribe ha permitido identificar géneros de macroalgas no reportados previamente en la región y resaltar el predominio de macroalgas pardas en sitios como Punta Cocles y Playa Chiquita (Vega-Álvarez *et al.*, 2018).

En el Pacífico norte de Costa Rica, ha caracterizado hábitats submareales dominados por bosques de *Sargassum* y otras macroalgas, evidenciando su importancia ecológica en ecosistemas poco estudiados, como fondos sedimentarios profundos y arrecifes rocosos (Fernández-García *et al.*, 2021). Además, ha colaborado en estudios internacionales que revelaron una notable diversidad oculta de algas rojas en la costa pacífica de Panamá, utilizando técnicas de identificación molecular. Estos hallazgos han permitido describir nuevas especies, ampliando la comprensión biogeográfica de las macroalgas en el Pacífico tropical oriental (Freshwater *et al.*, 2017).

Por último, es esencial mencionar el legado del Dr. Ricardo Radulovich (+), investigador pionero de la UCR, quien sentó las bases científicas y técnicas para el cultivo de macroalgas en Costa Rica. Sus investigaciones se centraron en técnicas de cultivo eficientes y sostenibles, selección de especies adecuadas para condiciones tropicales y en cómo el cultivo de macroalgas contribuye a mejorar la biodiversidad y salud de los ecosistemas marinos (Radulovich *et al.*, 2014).

3.3. Tecnologías disponibles

3.3.1 Pepinos de mar

El cultivo de pepinos de mar ha avanzado hacia modelos de producción más eficientes, resilientes y sostenibles mediante la incorporación de innovaciones tecnológicas tanto en sistemas de cultivo como en el procesamiento postcosecha. Estas tecnologías buscan no solo optimizar la productividad, sino también reducir el impacto ambiental y mejorar la trazabilidad, calidad y rentabilidad del producto. A continuación, se mencionan algunas de estas tecnologías:

Tecnología de Biofloc (BFT)

Este enfoque emergente permite mantener la calidad del agua mediante la manipulación del balance carbono-nitrógeno, reduciendo la necesidad de recambios frecuentes y mejorando el rendimiento fisiológico de especies como *Apostichopus japonicus*. El uso de organismos como *Bacillus* spp. como aditivos microbianos en biofloc aumenta la inmunocompetencia y crecimiento de los pepinos (Xiao *et al.*, 2024).

Acuavoltaicos (PV, paneles voltaicos, integrados en acuicultura)

La integración de paneles solares en estanques de cultivo ha demostrado reducir la temperatura del agua y acortar los periodos de estivación en pepinos subadultos, mejorando su rendimiento sin afectar la digestión ni la fisiología (Guo *et al.*, 2025).

Cultivo en corrales bentónicos y ranchos marinos

Estas modalidades permiten una producción semi-extensiva con baja densidad y mínimo consumo de energía. Han sido particularmente eficaces en zonas costeras tropicales con *Holothuria scabra*, demostrando alta viabilidad ecológica y económica (Li & Zhu, 2025).

Acuicultura Multitrófica Integrada (IMTA)

La integración de pepinos de mar como especie bentónica en sistemas con peces o camarones ha mostrado una significativa reducción en nitrógeno y fósforo del

sedimento y el agua, funcionando como eficientes biorremediadores (Besoña *et al.*, 2024).

En cuanto a innovaciones en procesamiento y conservación, se pueden mencionar:

Conservación en fresco y secado asistido

La incorporación de tecnologías solares para deshidratación controlada, combinada con empaques con atmósfera modificada, mejora la estabilidad microbiológica y sensorial del producto final (Guo *et al.*, 2025).

Fermentación controlada y bioconservación

El uso de bacterias ácido-lácticas en procesos de pretratamiento reduce la carga microbiana y facilita la conservación sin químicos, permitiendo agregar valor con bajo impacto ambiental (Li *et al.*, 2024; Xiao *et al.*, 2024).

A nivel biotecnológico y de inteligencia artificial (IA, tecnologías emergentes), se pueden enumerar las siguientes:

Selección genética asistida por marcadores moleculares (MAS)

Se han desarrollado marcadores como microsatélites y SNPs (polimorfismos de nucleótido único) para seleccionar rasgos como resistencia a enfermedades, tolerancia al estrés y crecimiento acelerado, especialmente en *A. japonicus* (Liu *et al.*, 2024), sin embargo, estas técnicas son incipientes en América.

Manipulación del microbioma digestivo

La introducción de probióticos específicos en las dietas ha demostrado modular positivamente la microbiota intestinal, mejorando la digestibilidad y salud inmunológica (Xiao *et al.*, 2024).

Reconocimiento automático de pepinos en ambientes bentónicos complejos

Se ha desarrollado el modelo SO-YOLOv5, basado en redes neuronales profundas, para detección automática de pepinos de mar con precisión superior al 95% en imágenes submarinas, facilitando la automatización del monitoreo y cosecha (Xuan *et al.*, 2023).

Estimación de peso mediante cámaras submarinas y segmentación semántica

Mediante imágenes time-lapse se logró una estimación del peso corporal en sistemas de IMTA con un coeficiente de determinación de $R^2=0.87$, reduciendo la manipulación directa de los organismos (Yoshida *et al.*, 2024).

Sistemas de monitoreo inteligente (AIoT)

El uso de sensores conectados y modelos predictivos de IA permiten controlar en tiempo real variables como oxígeno disuelto, temperatura y turbidez, mejorando la eficiencia del manejo (Huang & Khabusi, 2025).

3.3.2 Macroalgas

El cultivo y procesamiento de macroalgas ha evolucionado hacia prácticas más eficientes y sostenibles mediante la adopción de tecnologías innovadoras. Este avance responde a la necesidad de garantizar un suministro confiable de biomasa marina, maximizar el valor agregado y reducir el impacto ambiental de la maricultura.

Para el caso de tecnologías relacionadas a los sistemas de cultivo, se pueden mencionar:

Cultivo offshore

En aguas de alta energía: se está desarrollando en regiones como Australia, donde se han identificado especies viables como *Durvillaea spp.* (esta especie no se reconoce como tropical) y *Asparagopsis spp.* Las condiciones offshore permiten un crecimiento acelerado por mayor flujo de nutrientes y mejor calidad de agua, aunque requieren estructuras más resistentes y costosas (Visch *et al.*, 2023).

Uso de biogears biodegradables

Para minimizar los residuos plásticos marinos, se han desarrollado cuerdas y estructuras a base de biopolímeros, que mantienen funcionalidad similar a los plásticos convencionales, pero con que podrían generar menos daño ambiental (Arantzamendi *et al.*, 2023).

Sistemas de cultivo circular e IMTA

La integración de macroalgas con bivalvos u otros organismos permite reciclar nutrientes y mejorar la productividad general. Estas configuraciones se promueven como parte de un enfoque de economía azul regenerativa (Arantzamendi *et al.*, 2023; Khan *et al.*, 2023).

Ahora, con respecto a tecnologías para procesamiento y conservación se mencionan las siguientes:

Plantas móviles de procesamiento

Están siendo evaluadas para comunidades costeras con bajo acceso a infraestructura industrial, permitiendo secado, extracción de carragenanos o transformación en biofertilizantes (Kotowicz *et al.*, 2024).

Sensores inteligentes e IoT

Utilizados para el control automatizado de variables críticas como salinidad, temperatura y densidad algal, lo cual optimiza el tiempo de cosecha y reduce pérdidas postcosecha (Chen *et al.*, 2025).

Bioconservación y fermentación controlada

Técnicas emergentes como el ensilado con ácido láctico y la fermentación microbológica permiten estabilizar la biomasa para uso posterior en piensos, cosméticos o productos nutracéuticos (Kotowicz *et al.*, 2024).

Para el punto de uso de tecnologías emergentes (biotecnología e IA) se nombran las siguientes:

Se han identificado microorganismos beneficiosos (SBMs)

Que promueven el crecimiento de macroalgas, aumentan su resistencia a enfermedades y mejoran la calidad de la biomasa. Esto abre la posibilidad de aplicar inoculación microbológica como parte del manejo técnico de los cultivos (Li *et al.*, 2023).

Ingeniería genética

Se encuentra en etapa experimental para macroalgas, especialmente mediante técnicas de edición génica (CRISPR) para seleccionar rasgos como crecimiento acelerado, mayor contenido de polisacáridos o resistencia a estrés ambiental (Khan *et al.*, 2023).

La IA ha sido aplicada con éxito para

- a) Predicción de ventanas óptimas de cosecha mediante algoritmos de aprendizaje automático (Aung *et al.*, 2024).
- b) Monitoreo satelital de extensión, biomasa y especies cultivadas usando clasificación de imágenes vía *random forest* y análisis espectral multitemporal (Chen *et al.*, 2025).
- c) Diagnóstico precoz de epífitas y estrés ambiental mediante visión por computadora y sensores remotos (Aung *et al.*, 2024; Chen *et al.*, 2025).

3.4. Condiciones y zonas de factibilidad para producir

Para el análisis de la definición de sitios de cultivo, se utilizó el análisis multicriterio, el cual permite establecer sitios adecuados considerando distintas variables descritas en la literatura. El método requiere datos de las variables definidas en rangos para establecer afinidad. Para cada imagen se realizó una reclasificación de valores de acuerdo con el grupo de interés. La reclasificación, así como el promedio de valores y la generación de los mapas, se realizó con el programa de código abierto Quantum Geographic Information System (QGIS 3.40.4).

Descarga de datos

Los datos que se logró obtener de los sensores remotos fueron: temperatura, salinidad y oxígeno. Los datos se obtuvieron de la plataforma de Giovanni de la NASA (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>) que son datos gratuitos. Se definió un cuadrante para la descarga de los datos (-86.9798, 7.3529, -82.5853, 11.22), que abarcara principalmente la zona costera del país y un período de tiempo 01/01/2020 hasta el 31/12/2024. De acuerdo con esto, se estableció el sensor que tuviera datos para el período de tiempo establecido y se solicitó una imagen con el promedio de esos datos.

Reclasificación de datos

Cada grupo de interés tiene diferentes requerimientos por lo que se estableció para cada uno, una tabla de rangos. Se definió un rango para microalgas, otro para macroalgas y otro para pepinos según la literatura disponible (Cuadros 1 y 2).

Cuadro 1. Rangos establecidos para cultivo de macroalgas.

Criterio	2	1	0
	óptimo	aceptable	limitante
Temperatura	22-28	19-21 y 29-31	Menos de 19 y más de 31
Salinidad	29-33	27-28 y 34-35	Menos de 27 y más de 35
Oxígeno	Más de 5	4,5 - 5	Menos de 4,5

Cuadro 2. Rangos establecidos para cultivo de pepinos de mar.

Criterio	2	1	0
	óptimo	aceptable	limitante
Temperatura	27-29	25-26 y 30-31	Menos de 25 y más de 31
Salinidad	29-33	27-28 y 34-35	Menos de 27 y más de 35
Oxígeno	5 ó más	4	Menos de 4

Promedio de los valores

Los valores obtenidos al final de cada reclasificación, utilizando la calculadora ráster del QGIS, se promediaron para determinar el grado de posibilidad para la realización de cultivos, esto se definió a modo de semáforo de acuerdo con los resultados del promedio. Los lugares que dieran valores de 0, quedan excluidos para la realización del cultivo, mientras que las que tuvieran un valor de 2 o cercanos, serían sitios idóneos para el cultivo, pasando por la gama de amarillos y naranjas que podrían ser sitios limitantes para los cultivos.

Valor	Color	Etiqueta
0		excluida
1		limitada
2		idónea

Figura 1. Escala de colores utilizada para la realización de los mapas.

Una vez que se obtuvo el mapa promedio para cada grupo, se le agregó valores como muelles que deben tener un buffer de 60 metros y que son áreas que quedan excluidas y las áreas silvestres protegidas que podrían tener ciertas limitaciones con respecto a las actividades productivas.

3.4.1. Pepinos de mar

La identificación de zonas costeras aptas para el cultivo de pepinos de mar y macroalgas requiere una comprensión detallada de los factores ambientales que condicionan su viabilidad ecológica y productiva. Estos organismos, por su sensibilidad y especificidad de hábitat, demandan condiciones naturales bien delimitadas que favorezcan su crecimiento, supervivencia y contribución a sistemas de acuicultura sostenibles, como los de tipo IMTA. A continuación, se mencionan aspectos necesarios para tomarse en cuenta en una posible área para cultivar:

Hábitat y sustrato

Los pepinos de mar, como *Holothuria scabra*, *H. atra* e *I. badionotus*, muestran preferencias por fondos arenosos o fangosos, especialmente en zonas donde se desarrollan pastos marinos y manglares (Deauna *et al.*, 2021). Estas condiciones proveen alimento, refugio y sustrato adecuado para el asentamiento larval y el

crecimiento juvenil. El sedimento, además de ser fuente de nutrientes, debe presentar una granulometría adecuada (arenosos) y niveles moderados de materia orgánica (74,11%) (Hartati *et al.*, 2021).

Temperatura

La temperatura del agua tiene una influencia directa sobre el metabolismo y la supervivencia. En ambientes naturales tropicales, se considera que los rangos entre 26 y 30 °C son adecuados para *H. scabra* (Hartati *et al.*, 2021), ya que temperaturas superiores a 30 °C pueden reducir el crecimiento y la supervivencia (Seeruttun *et al.*, 2008), aunque es importante tomar en cuenta que existen factores que influyen como densidad y oxigenación.

Se han explorado diferentes métodos para generar protocolos más exactos de producción, tal es el caso del modelo de idoneidad de hábitat en Sintok Island (Indonesia) en el cual se confirmó aspectos tales como que valores fuera de este rango de temperatura disminuyen significativamente la aptitud ecológica del sitio (Hartati *et al.*, 2021).

Salinidad

Los pepinos de mar son estenohalinos; requieren estabilidad salina. *H. scabra* muestra tolerancia entre 28 y 34 PPT, siendo afectado negativamente por valores inferiores a 24 PPT (Hartati *et al.*, 2021).

Oxígeno disuelto y pH

El oxígeno disuelto debe mantenerse por encima de 5 mg/L; valores menores causan hipoxia y reducción de la actividad metabólica (Yu *et al.*, 2010). El pH debe ubicarse entre 7.5 y 8.5, pues desviaciones afectan procesos enzimáticos y fisiológicos esenciales (Zhang & Liu, 1998).

Nutrientes disueltos y materia orgánica: factores como el contenido de nitrato, amonio y fosfato influyen en la calidad del agua

En ambientes costeros, concentraciones elevadas de nutrientes pueden indicar sobrecarga orgánica y provocar eutrofización. Hartati *et al.* (2021) incluyen índices de clorofila-a en sedimentos como indicador clave de idoneidad (se reportó hasta 1.85 mg/g), asociada con productividad primaria y alimento disponible para holoturias.

Corrientes, profundidad y transparencia

Las corrientes deben ser moderadas, ya que flujos muy intensos afectan la estabilidad del sustrato y la fijación de larvas. Profundidades menores a 5 m, con

buena penetración de luz, suelen ser las más favorables para el establecimiento de juveniles (Hartati *et al.*, 2021; Félix *et al.*, 2024).

Substrato y estructura del fondo

La preferencia por sustratos con alta proporción de arena media a fina, con cierta cobertura vegetal (pastos o algas), ha sido corroborada tanto en *H. forskali* (Félix *et al.*, 2024) como en *H. scabra* (Hartati *et al.*, 2021). La estructura del fondo incide en la disponibilidad de refugios y alimento.

Conectividad y dispersión larval

El transporte larval depende de las corrientes estacionales y la conectividad entre sitios. En Filipinas, Deauna *et al.* (2021) identificaron áreas prioritarias para el manejo de *H. scabra* y *Stichopus horrens* mediante modelado de dispersión pasiva y el uso de algoritmos como Infomap, integrando requerimientos de hábitat con patrones oceanográficos.

Mapa de posibles sitios para el cultivo de pepinos de mar

El cultivo de pepino de mar podría realizarse principalmente en las zonas del Pacífico central y sur del país y con limitaciones en el Pacífico norte y zona Caribe (Ver Figura 2).

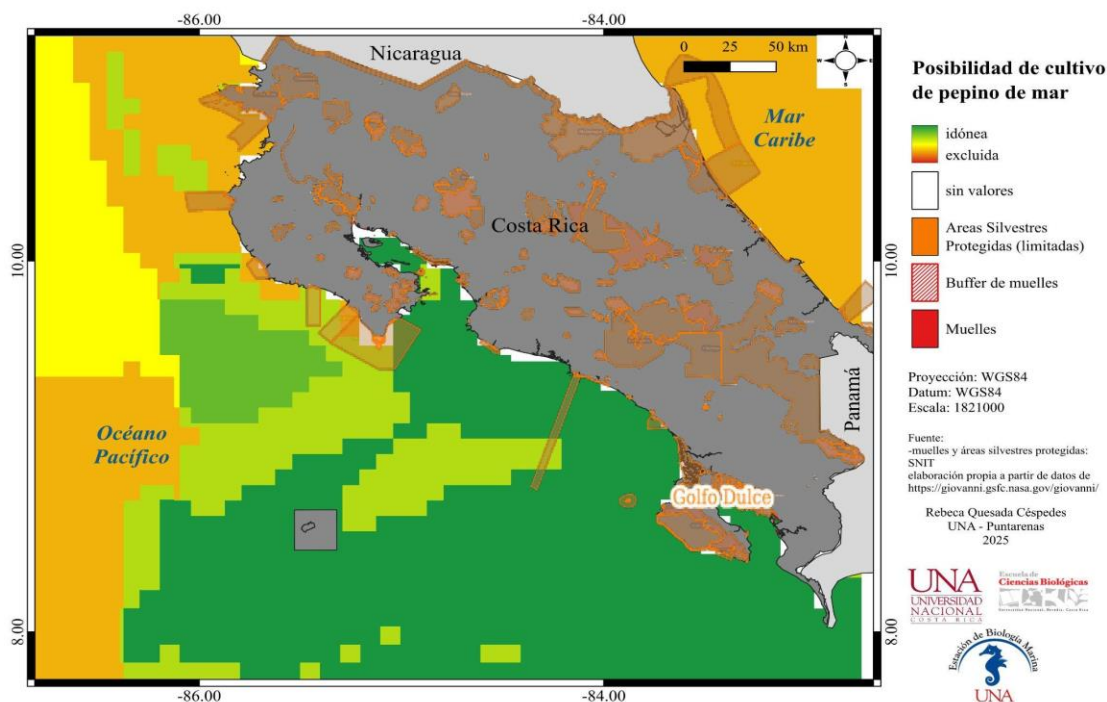


Figura 2. Mapa de posibles zonas para el establecimiento de cultivo de pepinos de mar.

3.4.2. Macroalgas

La selección de sitios adecuados para el cultivo de macroalgas requiere la evaluación de múltiples factores ambientales, biológicos y técnicos. El éxito productivo y ambientalmente responsable de los cultivos marinos depende de que las condiciones del sitio coincidan con los requerimientos ecológicos de las especies seleccionadas, asegurando además la compatibilidad con otros usos del espacio marino. Entre las condiciones que deben evaluarse incluyen:

Temperatura del agua

La mayoría de las especies tropicales de macroalgas se desarrollan en rangos de 20 a 30 °C. Por ejemplo, especies como *Gracilaria spp.* y *Ulva spp.* presentan tasas óptimas de crecimiento en torno a los 25-28 °C (Avila *et al.*, 2019; Buschmann *et al.*, 2017).

Salinidad

Idealmente entre 30 y 35 PPT para especies marinas. *Gracilaria* puede tolerar salinidades algo más bajas en estuarios, pero requiere estabilidad para evitar estrés fisiológico (Cerca *et al.*, 2024).

pH y oxígeno disuelto

Los cultivos deben ubicarse en zonas con buena renovación de agua, pH entre 7.8 y 8.4, y oxígeno disuelto mayor a 5 mg/L (Tullberg *et al.*, 2022).

Corrientes marinas

Deben ser moderadas; corrientes demasiado intensas pueden romper los talos, mientras que flujos insuficientes limitan la dispersión de nutrientes. Se considera adecuado un rango de velocidad entre 10 y 30 cm/s para mantener buena calidad del agua sin daño físico a la biomasa (Méndez *et al.*, 2024).

Luz

Las macroalgas requieren luz solar directa para su fotosíntesis. Las zonas con buena penetración de luz, aguas claras y baja turbidez son preferibles. Para especies como *Ulva* o *Sargassum*, el fotoperiodo (12:12) y la radiación (100 y 300 Qmol photons m⁻² s⁻¹) influyen directamente su rendimiento (Heery *et al.*, 2020).

Profundidad

El rango ideal depende de la especie, pero en general se sugiere entre 1 y 10 metros para cultivos someros, o entre 10 y 30 metros para sistemas suspendidos tipo longline en mar abierto (Tullberg *et al.*, 2022; Cerca *et al.*, 2024).

Mapa de posibles sitios para el cultivo de macroalgas

En el país, el Pacífico central y sur presenta condiciones aptas para realizar cultivo de macroalgas y con mayores limitaciones Pacífico norte y Caribe del país (Ver Figura 3).

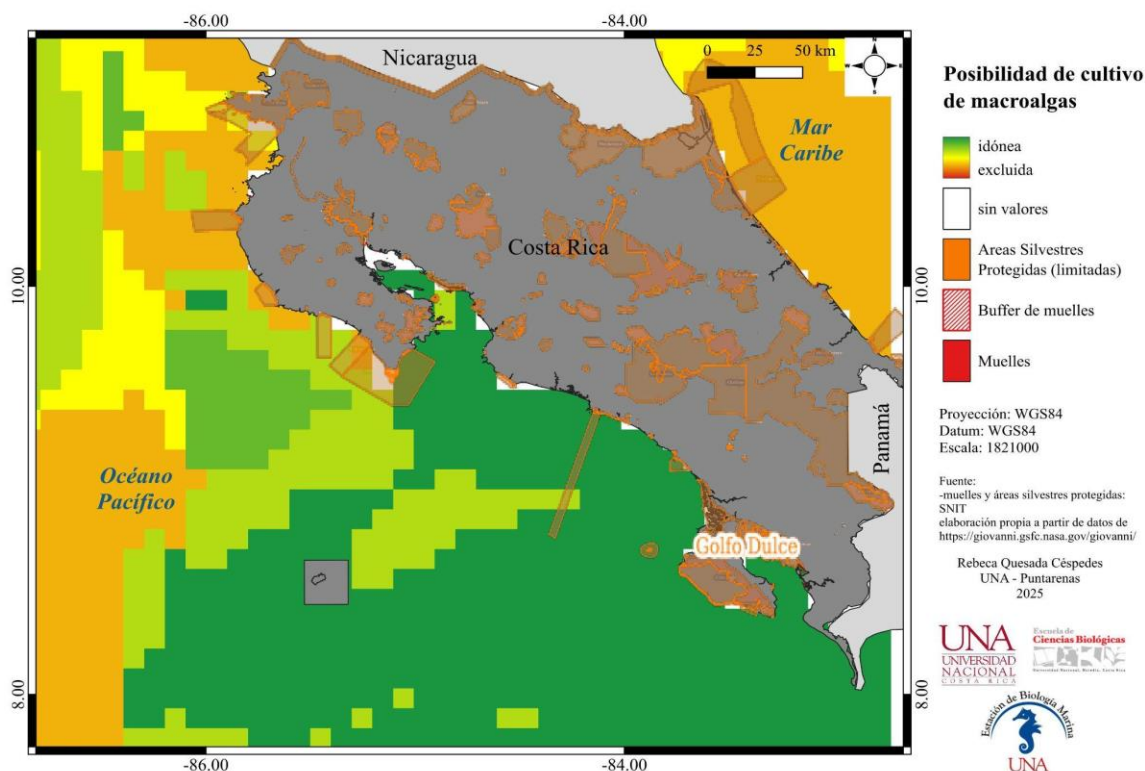


Figura 3. Mapa de posibles zonas para el establecimiento de cultivo de macroalgas.

Las principales limitaciones se deben a los valores de salinidad, especialmente en la zona Caribe.

3.5. Desarrollo del cultivo y especies a cultivar

3.5.1. Pepinos

El desarrollo del cultivo de pepinos de mar debe considerar tanto las condiciones ecológicas locales como las demandas del mercado internacional. En este sentido, se prioriza el cultivo de especies nativas tropicales del continente americano, dado su valor comercial, su compatibilidad con el ecosistema marino costero y su adaptabilidad a sistemas de cultivo sostenibles. En la Universidad Nacional, se manifiesta un desacuerdo con la importación de organismos exóticos sin un análisis científico exhaustivo que evalúe los posibles impactos ecológicos, sanitarios y socioeconómicos. La introducción de especies no nativas podría comprometer la biodiversidad local, alterar los ecosistemas marinos y poner en riesgo los esfuerzos de conservación y producción sostenibles ya establecidos.

Entre las especies viables para el cultivo en América Latina

Se han identificado al menos ocho especies con potencial comercial y cultivo consolidado o en desarrollo:

1. *I. fuscus*
2. *I. badionotus*
3. *Holothuria mexicana*
4. *Holothuria floridana*
5. *Holothuria grisea*
6. *Holothuria theeli*
7. *Apostichopus parvimensis*
8. *Athyonidium chilensis*

Estas especies presentan tolerancia a una amplia gama de condiciones físico-químicas, y son detritívoras, lo que les permite cumplir un papel ecológico importante como recicladoras de materia orgánica. El cultivo de estas especies se ha desarrollado exitosamente en países como México, Ecuador, Perú, Panamá, Belice, Brasil y Chile, utilizando sistemas como estanques reconvertidos de camaroneras, corrales marinos, jaulas flotantes y sistemas cerrados en tierra.

De estas, *Isostichopus fuscus* destaca por tener el ciclo de cultivo más desarrollado, incluyendo protocolos para reproducción inducida, cría larval, engorde, control sanitario y repoblamiento, gracias al trabajo realizado en Ecuador y México (Sonnenholzner-Varas, 2021; Hamel *et al.*, 2003).

Además, en el caso específico de Costa Rica, estas mismas especies han sido objeto de extracción ilegal, especialmente *I. fuscus* y *Holothuria inornata*, lo que ha contribuido al agotamiento de sus poblaciones naturales en algunas zonas del Pacífico costarricense (comunicación personal con Juan José Alvarado).

Ahora, por otro lado, la falta de registros oficiales, monitoreo pesquero y datos sobre tallas de madurez sexual ha impedido una gestión pesquera adecuada. En este contexto, estudiar estas especies desde un enfoque de cultivo representa una oportunidad estratégica para nuestro país en lograr reducir la presión pesquera, fomentar el conocimiento científico y establecer prácticas de manejo sustentable (Gamboa-Álvarez *et al.*, 2023; Purcell *et al.*, 2018). En la siguiente figura se muestran algunas especies muy cultivadas en América Latina (Sonnenholzner-Varas, 2021).



Figura 4. Especies de pepinos de mar de interés comercial en América Latina.

Impacto ambiental y sostenibilidad

El cultivo de pepinos de mar en sistemas IMTA es una estrategia eficaz para mejorar la sostenibilidad del cultivo. Al aprovechar los residuos orgánicos del cultivo de peces o camarones, los pepinos de mar contribuyen a reducir la carga de materia orgánica, estabilizando el sedimento y mejorando la calidad del agua. Esto promueve un impacto ambiental positivo, especialmente en zonas vulnerables del litoral pacífico de Costa Rica.

Además, el uso exclusivo de especies nativas evita los riesgos ecológicos asociados con la introducción de especies exóticas, como competencia, transmisión de enfermedades o hibridación con especies locales. Por tanto, no se contempla la importación de especies en esta propuesta. Cualquier necesidad futura de

introducir nuevas especies deberá ser evaluada con base en estudios técnicos y cumplir con las normativas del país.

Es importante aclarar que, en el contexto legal costarricense, las especies marinas no pueden ser objeto de cultivo ni importación directa sin contar previamente con un permiso oficial de investigación o uso aprobado por el SINAC, especialmente cuando estas especies no forman parte de la lista oficial de especies de interés acuícola publicada por INCOPESCA. Esto aplica a organismos nativos que están protegidos por la Ley de Conservación de Vida Silvestre (Ley N.º 7317), y también a especies exóticas o introducidas.

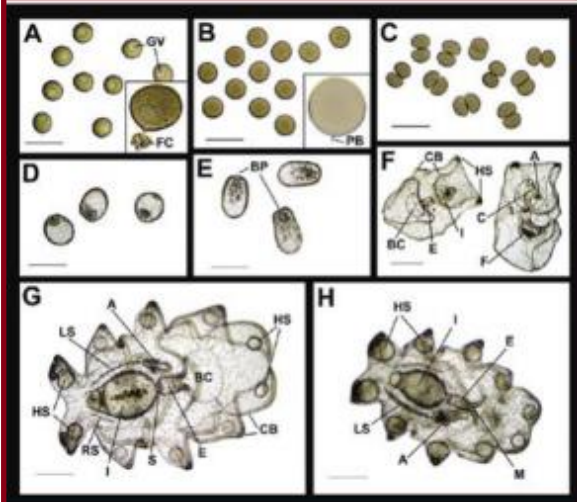
En el caso de especies no evaluadas o que aún no se han cultivado formalmente en el país, el primer paso requerido es una solicitud de investigación ante el SINAC, bajo el marco de la Ley de Biodiversidad y su reglamento. Solo después de contar con esa autorización inicial se puede gestionar, ante INCOPESCA, el permiso para producción acuícola o maricultura. Además, si se trata de organismos importados, se deben seguir los procedimientos específicos establecidos por SENASA (Servicio Nacional de Salud Animal), conforme a la Ley General del Servicio Nacional de Salud Animal (Ley N.º 8495), que regula el ingreso de material vivo al país en función del riesgo sanitario y ambiental.

Reproducción y cosecha

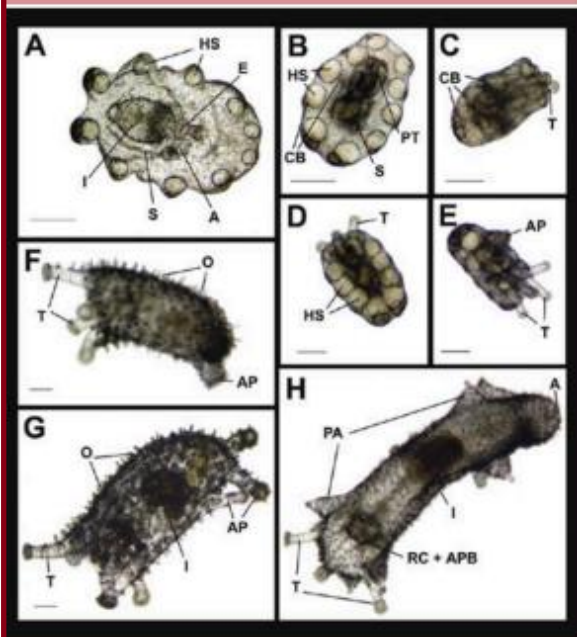
Las especies tropicales cultivables suelen presentar reproducción sexual externa mediante desove sincrónico. La proximidad entre individuos y condiciones fisicoquímicas como temperatura y salinidad pueden inducir el desove. En laboratorio, se han estandarizado técnicas de inducción mediante cambios térmicos y exposición a soluciones químicas. Las larvas planctónicas (auricularias) evolucionan hasta alcanzar el estadio juvenil (pentácula), momento en el que se asientan y se trasladan a sistemas de engorde.

La cosecha debe programarse con base en el tamaño comercial deseado (entre 200 y 400 g, aunque depende del mercado destino), aplicando buenas prácticas que minimicen el estrés y el deterioro de los ejemplares. En sistemas como corrales o jaulas, se recomienda cosechas escalonadas y monitoreo de parámetros ambientales para garantizar la supervivencia. En la siguiente imagen se muestra el desarrollo larval de *I. fuscus* de acuerdo con la información de Mercier *et al.* (2005).

CICLO REPRODUCTIVO DEL PEPINO DE MAR ISOSTICHOPUS FUSCUS



THE BARS REPRESENT 200 MM. A. OOCYTES COLLECTED SURGICALLY FROM A MATURE GONAD. THE GERMINAL VESICLE (GV) IS CLEARLY VISIBLE. THE INSERT SHOWS A CLOSE-UP OF AN OVULATING OOCYTE WITH THE FOLLICULAR CELLS (FC) STILL ATTACHED TO IT. B. FULLY MATURE, NEWLY FERTILIZED EGGS WITH CLEAR GERMINAL VESICLE BREAKDOWN. THE INSERT SHOWS THE EXPULSION OF THE TWO POLAR BODIES (PB). C. 2-CELL STAGE. D. NEWLY HATCHED GASTRULA. E. ELONGATED GASTRULA WITH VISIBLE BLASTOPORES (BP). F. EARLY AURICULARIA ON WHICH THE CILIARY BANDS (CB), HYALINE SPHERES (HS), BUCCAL CAVITY (BC), OESOPHAGUS (E), INTESTINE (I), CLOACA (C) AND ANUS (A) ARE IDENTIFIABLE. FOOD ITEMS (F) ARE PRESENT IN THE BUCCAL CAVITY. G. VENTRAL VIEW OF A FULLY DEVELOPED AURICULARIA SHOWING THE LEFT SOMATOCOEL (LS), AXOHYDROCOEL (A), HYALINE SPHERES (HS), CILIARY BANDS (CB), BUCCAL CAVITY (BC), OESOPHAGUS (E), SPHINCTER (S), INTESTINE (I) AND THE RIGHT SOMATOCOEL (RS). H. DORSAL VIEW OF A METAMORPHOSING AURICULARIA. WITH A NOTICEABLE DECREASE IN SIZE, THE BUCCAL CAVITY DISAPPEARS AND THE HYALINE SPHERES (HS) ARE PULLED CLOSER TOGETHER. THE MOUTH (M), INTESTINE (I), OESOPHAGUS (E), LEFT SOMATOCOEL (LS) AND AXOHYDROCOEL (A) ARE CLEARLY VISIBLE.



LATE DEVELOPMENT OF THE SEA CUCUMBER *ISOSTICHOPUS FUSCUS*. THE BARS REPRESENT 200 MM. A. LATE METAMORPHOSING AURICULARIA, SHOWING THE HYALINE SPHERES (HS), OESOPHAGUS (E), INTESTINE (I), SOMATOCOEL (S) AND AXOHYDROCOEL (A). B. FULLY DEVELOPED DOLIOLARIA WITH HYALINE SPHERES (HS), PRIMARY TENTACLES (PT), CILIARY BANDS (CB) AND SOMATOCOEL (S). C. EARLY PENTACTULA WITH 5 TENTACLES (T) AND THE STILL VISIBLE CILIARY BANDS (CB). D. DORSAL VIEW OF NEWLY SETTLED PENTACTULA WITH TENTACLES (T) AND HYALINE SPHERES (HS). E. VENTRAL VIEW OF NEWLY SETTLED PENTACTULA SHOWING THE FIRST AMBULACRAL PODIA (AP) AND THE 5 BUCCAL TENTACLES (T). F. EARLY JUVENILE, MEASURING 1.5 MM IN LENGTH, WITH TENTACLES (T), AMBULACRAL PODIA (AP) AND OSSICLES (O). THE HYALINE SPHERES HAVE DISAPPEARED. G. A 2 MM LONG JUVENILE WITH 5 TENTACLES (T) AND 3 PAIRS OF AMBULACRAL PODIA (AP). THE INTESTINE (I) AND OSSICLES (O) ARE VISIBLE. H. A 3 MM LONG JUVENILE SHOWING THE TENTACLES (T), PAPILLAE (PA), INTESTINE (I), ANUS (A) AND THE RING CANAL AND AQUAPHARYNGEAL BULB (RC + APB).

MERCIER ET AL. (2005)

Figura 5. Ciclo reproductivo del pepino *Isostichopus fuscus* utilizado en acuicultura.

Especies más cultivadas a nivel mundial

A nivel global, se han consolidado varias especies en cultivo por su alto valor económico, eficiencia reproductiva y adaptabilidad:

- a. *Apostichopus japonicus*: la especie más cultivada del mundo, originaria del noroeste del Pacífico. Su cultivo es altamente tecnificado en China, Japón y Corea.
- b. *H. scabra*: conocida como “sandfish”, es la especie tropical más cultivada en Asia, con gran aceptación en sistemas de engorde y repoblamiento en el Indo-Pacífico.
- c. *I. fuscus*: la principal especie cultivada en América Latina, con altos precios en el mercado y un ciclo biotecnológico de cultivo ampliamente documentado.

Otras especies como *Stichopus horrens*, *H. atra* y *Thelenota ananas* también son cultivadas en menor escala en países del sudeste asiático y Oceanía.

Estas especies forman parte de un mercado internacional en expansión, con altos precios por kilo (hasta 1200 USD/kg para *I. fuscus*) y creciente demanda, especialmente en China y otros países asiáticos. En la siguiente figura se resume la información anteriormente descrita.

CULTIVO DE PEPINOS DE MAR: Oportunidad Sostenible para Costa Rica



Isostichopus fuscus

ESPECIES LATINAS CON ALTO POTENCIAL

- *Isostichopus fuscus*
- *Isostichopus badionotus*
- *Holothuria mexicana*
- *Isostichopus badionotus*
- *Holothuria mexicana*
- *Holothuria floridana*
- *Holothuria grisea*
- *Holothuria theeli*
- *Apostichopus parvimensis*
- *Holothuria theeli*
- *Apostichopus parvimensis*
- *Athyonidium chilensis*

Desarrollado exitosamente en México, Ecuador, Perú, Panamá, Belice, Brasil y Chile.

POSIBLES ESPECIES EN COSTA RICA 🇸🇨

- *Isostichopus fuscus*
- *Holothuria inornata*

OPORTUNIDAD ESTRATÉGICA

- ✓ Reduce la presión pesquera.
- ✓ Fomenta el conocimiento científico.
- ✓ Establece prácticas de manejo sustentable.

MERCADO INTERNACIONAL 🌐



- 💰 Alto valor económico.
- 💰 Eficiencia reproductiva.
- 💰 Capacidad de adaptación.

Alta demanda en Asia: precios hasta **1200 USD/kg.**

Elaborado por: Natalia Guillén Benavides.

Figura 6. Especies de pepinos de mar para acuicultura a nivel de Latinoamérica.

3.5.2. Macroalgas

Generalidades

A nivel global, cinco géneros concentran aproximadamente el 98 % de la producción de macroalgas cultivadas, seleccionadas por su productividad, facilidad de manejo y valor comercial (Buschmann *et al.*, 2017; Rao & Ravishankar, 2022):

- a. *Kapaphycus* spp. y *Euclima* spp. (algas rojas tropicales): ampliamente cultivadas en el sudeste asiático para la producción de carragenanos utilizados como estabilizantes en las industrias alimentaria, farmacéutica y cosmética (Cotas *et al.*, 2020).
- b. *Gracilaria* spp. (roja): empleada en la obtención de agar, alimento humano, biofertilizantes y como biofiltro en acuicultura (Langford *et al.*, 2023).
- c. *Saccharina japonica* y *Undaria pinnatifida* (algas pardas templadas): consumidas como kombu y wakame; se cultivan también para la extracción de alginatos (Bhatt *et al.*, 2022).
- d. *Porphyra* spp. (nori): fundamental en la gastronomía japonesa y ampliamente comercializada como producto gourmet (Jönsson, 2024).

En América Latina, se ha logrado el cultivo experimental y a pequeña escala de especies como *Gracilaria* spp. y *Ulva* spp. en países como Chile, México y Brasil, destacando por su valor comercial y su capacidad de absorción de nutrientes, lo que las hace aptas para sistemas integrados de cultivo (Radulovich *et al.*, 2014; Cotas *et al.*, 2020). Especies como *Sargassum* spp., *Codium* spp., *Chaetomorpha* spp. y *Dictyota* spp. también se han identificado como prometedoras por su distribución natural, aplicaciones industriales y servicios ecosistémicos (Snethlage *et al.*, 2023).

En el caso específico de Costa Rica, estas especies podrían ser cultivadas en zonas costeras protegidas del Pacífico (comunicación con Cindy Fernández García, Anexo 4), integrando su valor ecológico con una cadena productiva emergente. Su desarrollo podría fortalecer modelos de economía circular en comunidades costeras, con potencial de generación de valor agregado a través de suplementos nutricionales, fertilizantes orgánicos, alimentos funcionales y cosmética natural (Langford *et al.*, 2023; Snethlage *et al.*, 2023).

En el caso de la sostenibilidad e impacto ambiental

El cultivo de macroalgas marinas se considera una de las formas más sostenibles de acuicultura. Su alta productividad primaria neta (NPP) permite una producción eficiente de biomasa sin requerir fertilizantes, agua dulce ni pesticidas,

posicionándose como una opción viable en un contexto de cambio climático y escasez de recursos (Pessarrodona *et al.*, 2022; Cotas *et al.*, 2020).

Cuando se integran en sistemas de acuicultura multitrófica integrada, las macroalgas actúan como biofiltros naturales al absorber compuestos nitrogenados, fósforo y dióxido de carbono disueltos, reduciendo la eutrofización, mejorando la calidad del agua y contribuyendo a la resiliencia de los ecosistemas marinos (Buschmann *et al.*, 2017; Khan *et al.*, 2024). Además, algunas especies aportan estabilidad a los ambientes costeros al amortiguar la energía del oleaje y reducir la erosión costera (FAO, 2021).

Reproducción

Las macroalgas pueden reproducirse tanto sexual como asexualmente. En los sistemas de cultivo, predominan las técnicas de propagación vegetativa mediante fragmentación de talos, fijados a líneas largas, cuerdas o estructuras flotantes, lo que permite ciclos productivos cortos y continuos (Charrier *et al.*, 2017). De acuerdo con la especie:

- a. *Gracilaria* spp.: se propaga por fragmentos del talo adheridos a líneas de cultivo, con cosechas cada 45-60 días (Buschmann *et al.*, 2017).
- b. *Kappaphycus* spp. y *Eucheuma* spp.: emplean esquejes fijados a cuerdas o redes flotantes, con rendimientos de hasta 30 toneladas húmedas por hectárea en ciclos de tres meses (Ask & Azanza, 2002).
- c. *Ulva* spp.: debido a su alta tasa de crecimiento y capacidad bioabsorbente, se integra con éxito en sistemas IMTA como cosecha rotativa para biofertilizantes, biomasa funcional o revalorización ambiental (FAO, 2021; Khan *et al.*, 2024).

A continuación, se presentan tres tipos de reproducción en macroalgas, con sus pasos respectivos, aplicados en acuicultura:

Cultivo gametofítico de *Ulva prolifera* de acuerdo con Zhao *et al.* (2023)

1. **Inducción de gametos:** Se estimula la liberación de gametos a partir de talos adultos de *Ulva prolifera*.
2. **Inoculación en medio enriquecido:** Los gametos móviles se inoculan en un medio líquido (f/2 o Provasoli) con agua de mar filtrada y suplementos como nitratos, fosfatos, vitaminas y micronutrientes.
3. **Desarrollo de gametofitos:** Por fecundación o partenogénesis, se forman gametofitos adheridos a las superficies del cultivo (placas o frascos).
4. **Fase de crecimiento controlado:** Entre los días 7 y 30, los gametofitos muestran alto crecimiento y ramificación.
5. **Traslado a sistemas mayores:** Al alcanzar el tamaño adecuado, se trasladan a tanques o al mar, fijados a cuerdas o estructuras flotantes.

6. **Producción final:** El cultivo escalonado garantiza biomasa sana, libre de contaminantes, útil para cosecha o investigación (Ver la siguiente figura).

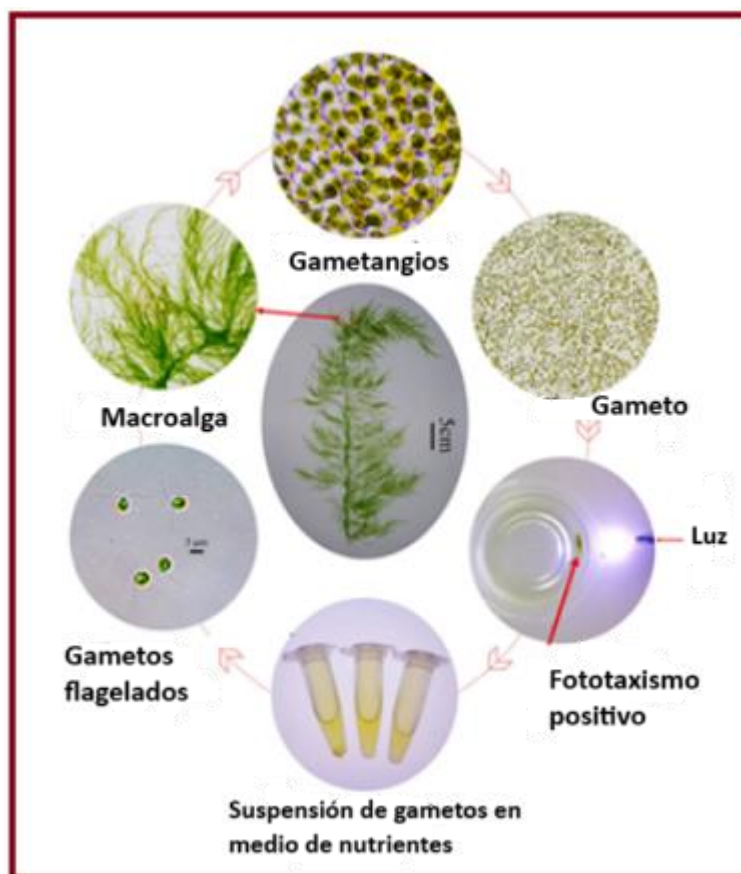


Figura 7. Ciclo reproductivo de *Ulva prolifera* utilizado en acuicultura.

Cultivo clonal escalado de *Gracilaria dura* de acuerdo con Balar et al. (2025)

- Recolección y aclimatación:** Se recolectan muestras silvestres de *G. dura* y se aclimatan durante una semana en tanques (32 psu, 26–28 °C, luz 12/12).
- Producción de propágulos:** Se cortan ramas en fragmentos de 0.5-1 cm y se tratan con bioestimulantes (ejemplo kinetina).
- Cultivo en tanques:** Los propágulos se cultivan por 112 días en tanques de 5 000 L, con fertilización diaria. Se alcanza 100% de regeneración al día 28 y 87.99% de sobrevivencia al día 112.
- Trasplante al mar:** Se trasladan 21 999 propágulos a bolsas de red a 5 m de profundidad. Se observa aumento de peso y formación de brotes laterales.
- Ciclo comercial proyectado:** Se planifican cinco ciclos anuales, combinando métodos de línea monofilamento y red tubular. La producción va de 58 kg a más de 8,000 kg/año.

- f. **Impacto económico:** El modelo genera hasta USD 2 180.25 anuales por familia, promoviendo sostenibilidad y reducción de la dependencia de bancos naturales (Ver la siguiente figura).



Figura 8. Esquema de técnica de cultivo para *Gracilaria* sp.

Modelo de cultivo clonal cíclico (multiespecífico) según Lüning & Pang (2003)

- Recolección inicial:** Se obtienen fragmentos sanos de algas marinas silvestres.
- Formación de plántulas:** Los fragmentos se siembran como propagulos vegetativos en laboratorio o tanques controlados.
- Fase de crecimiento:** Se cultivan en condiciones controladas de luz, nutrientes y temperatura para promover la ramificación.
- Cosecha de biomasa:** Cuando el alga madura, se recolecta la biomasa cultivada.
- Corte y regeneración:** Parte de la biomasa se fragmenta para producir nuevos propagulos regenerativos.
- Reinicio del ciclo:** Los nuevos propagulos se reintegran al sistema de cultivo, manteniendo un ciclo continuo sin retornar al medio silvestre (Ver Figura 9).

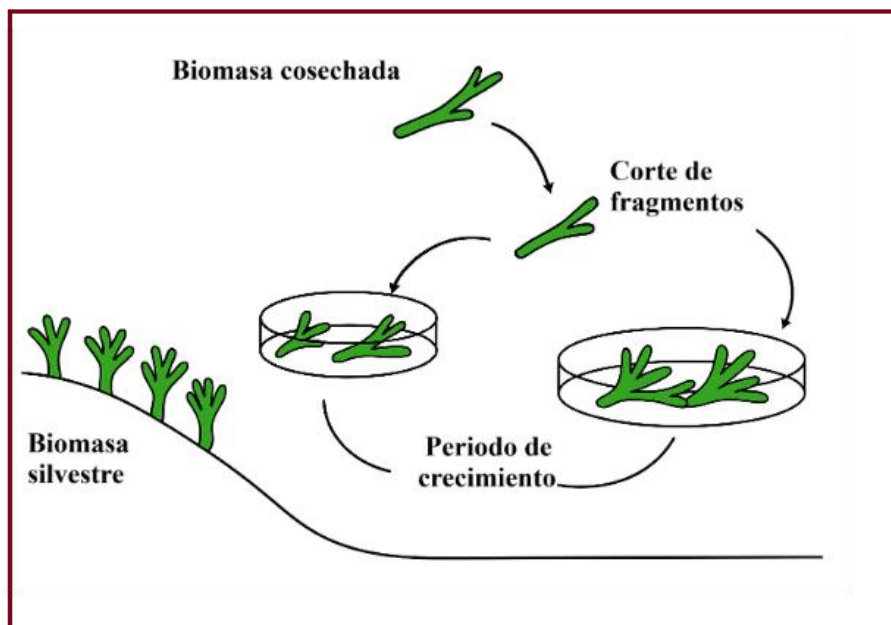


Figura 9. Esquema de cultivo clonal cíclico en macroalgas.

3.6. Desarrollo y establecimiento del cultivo

A continuación, se señalan aspectos relacionados a la temática para pepinos de mar y macroalgas

3.6.1. Pepinos de mar

Los pepinos de mar, al igual que otros organismos marinos que se cultiven en cautiverio requiere una calidad de agua óptima que permita el progreso del cultivo, factores que se deben tomar en cuenta se mencionan a continuación:

Temperatura

La temperatura del agua es uno de los parámetros ambientales más influyentes en la maricultura de pepinos de mar. Como organismos ectotermos, sus tasas metabólicas, crecimiento, reproducción y desarrollo larval están estrechamente reguladas por la temperatura externa. Esta variable debe mantenerse dentro de un rango óptimo para evitar efectos adversos como estrés, evisceración, reducción en la inmunidad o incluso mortalidad.

En condiciones controladas, se ha demostrado que incluso especies tropicales como *H. atra* tienen un umbral térmico definido. En un estudio realizado en Mauricio, esta especie alcanzó su mayor tasa de crecimiento (1.43 g) y un 100 % de supervivencia a 28 °C. Sin embargo, cuando se aumentó la temperatura a 32 °C, la

tasa de crecimiento cayó a 0.78 g y la supervivencia se redujo al 67 % (Seeruttun *et al.*, 2008).

Siguiendo con esta especie (*H. atra*), en sistemas IMTA se ha reportado crecimiento sostenido bajo temperaturas entre 27 y 28 °C, condiciones que se consideran ideales para esta especie en ambientes tropicales (Pattinasarany *et al.*, 2024).

De forma similar, *Isostichopus sp.*, una especie de interés en el Caribe colombiano mostró un mejor rendimiento larval a 26 °C frente a 23 °C, con mayor crecimiento y tasas de supervivencia durante el cultivo larval (Acosta *et al.*, 2021).

En *I. badionotus*, cultivado en condiciones controladas en Yucatán, México, a 25-31 °C, se logró una reproducción exitosa sin necesidad de inducción artificial, completando su desarrollo larval hasta la fase de pentácula en ese mismo rango térmico (Zacarías-Soto *et al.*, 2013). Más recientemente, Sánchez-Tapia *et al.* (2018) observaron que *I. badionotus* mantenido a 24-31 °C alcanzó altos niveles de supervivencia, con longitudes de hasta 38.49 mm tras 176 días.

Salinidad

Las especies de Holothuroidea suelen ser estenohalinas. En *I. badionotus*, en un estudio realizado por Zacarías-Soto *et al.* (2013) demostró que manteniendo salinidades entre 34±1 ppt durante todas las fases del cultivo en condiciones controladas fue clave para el desarrollo y la supervivencia. Por otro lado, en Belice, se reportaron muertes rápidas cuando la salinidad bajó de 20 ppt durante lluvias intensas (Rogers, 2019) con esta misma especie.

En *H. scabra*, el rango ideal se puede situar entre 28 y 32 ppt. Salinidades fuera de este rango podrían afectar negativamente la etapa larval y juvenil (Sithisak *et al.*, 2013; Li y Li, 2010; Xing & Wang, 2000).

Si nos referimos a *H. atra*, esta mostró tolerancia en ambientes con salinidades reducidas de hasta 15 ppt durante ocho semanas en sistemas de acuicultura integrada, gracias a su capacidad de regular osmóticamente el fluido celómico (Pattinasarany *et al.*, 2024).

Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto debe mantenerse por encima de 5 mg/L. En *I. badionotus*, niveles entre 5 y 7±0.1 mg/L permitieron un desarrollo larval saludable (Zacarías-Soto *et al.*, 2013). Rogers (2019) reportó estrés y mortalidad en estanques cuando el oxígeno disuelto cayó por debajo de 4 mg/L. En *H. scabra*, niveles bajos también han sido asociados con pérdida de tonicidad y mortalidad (Yu *et al.*, 2010).

pH

Estudios han demostrado por ejemplo que para *I. badionotus*, el pH fue mantenido cercano a 8.0 para obtener resultados exitosos. Este valor, puede situarse dentro de un rango ideal de 7.5 a 8.5, y se ha visto que ha permitido una metamorfosis exitosa de las fases larvarias (Zacarías-Soto *et al.*, 2013). En condiciones no controladas, lluvias intensas pueden alterar este equilibrio (Rogers, 2019). Un pH fuera del rango puede causar acidosis o alcalosis interna (Zhang y Liu, 1998; Yu *et al.*, 2010).

En cultivos con *H. atra*, se ha documentado que el pH puede mantenerse estable entre 7.4 y 7.7 sin afectar su fisiología ni su tasa de crecimiento (Pattinasarany *et al.*, 2024).

Nutrientes disueltos (nitrato, nitrito, amonio y fosfato)

Los compuestos nitrogenados deben mantenerse bajo control y cercanas a 0. Niveles de amonio superiores a 0.5 ppm pueden resultar tóxicos para las larvas, mientras que concentraciones entre 0.07 y 0.43 ppm permiten un desarrollo normal (James, 2004).

El nitrito debe mantenerse por debajo de 0.2 ppm y el nitrato entre 0.02 y 0.08 ppm (Sithisak *et al.*, 2013; Tuwo *et al.*, 2012). El fosfato, especialmente en su forma de ortofosfato, puede desencadenar eutrofización si no se regula adecuadamente.

En estudios de campo, se ha observado que los valores de amonio en sistemas de cultivo pueden oscilar entre 0.4 y 1.2 mg/L, el nitrato entre 1 y 4 mg/L, el nitrito entre 0.1 y 0.8 mg/L y el fósforo total entre 0.4 y 1.4 mg/L. Aunque estos valores son más altos que los ideales, no se observaron efectos letales inmediatos en *Holothuria poli*, lo cual sugiere cierta tolerancia si se mantiene una buena calidad del sustrato y circulación del agua (Cutajar *et al.*, 2022).

En un sistema IMTA con *H. atra*, se reportaron niveles estables de amonio entre 0.00 y 0.04 mg/L, y nitrato a 0.01 mg/L, indicando una eficiente absorción de nutrientes por parte del sistema conjunto con *Gracilaria spp.* (Pattinasarany *et al.*, 2024).

Partículas orgánicas y transparencia

Los pepinos de mar desempeñan un rol ecológico valioso como bioturbadores. Su alimentación basada en materia orgánica particulada (POM) ayuda a mejorar la calidad del sustrato y la transparencia del agua. Esta acción de bioremediación contribuye a la estabilidad ecológica del sistema y puede aprovecharse en esquemas de acuicultura multitrófica integrada (Sadeghi-Nassaj *et al.*, 2018; Watanabe *et al.*, 2012).

En sistemas de cultivo, la turbidez asociada a sólidos suspendidos totales (TSS) también debe ser monitoreada. *Holothuria poli* ha mostrado tolerancia a niveles de TSS entre 10 y 40 mg/L sin comprometer su supervivencia, lo que resalta su potencial en ambientes moderadamente eutrofizados si existen mecanismos de remediación naturales (Cutajar *et al.*, 2022).

Asimismo, en el estudio de Pattinasarany *et al.* (2024), *H. atra* prosperó incluso cuando la materia orgánica total (TOM) alcanzó los 67.94 mg/L, evidenciando su capacidad de aprovechar estos compuestos como fuente alimenticia en sistemas IMTA.

Relación con la reproducción

Los reproductores son usualmente extraídos del medio natural. Para su aclimatación, se utilizan tanques con fondo liso y agua marina filtrada y desinfectada, además de sistemas de aireación, control lumínico y recambio de agua constante (Feng *et al.*, 2022). Se requieren zonas de manipulación sanitaria, separación de sexos y jaulas flotantes para almacenamiento *in situ* (Dolganov *et al.*, 2024). Algunos aspectos necesarios para tomar en cuenta:

- a) **Para la respectiva Inducción de desove:** se realiza en tanques circulares de 200 a 1000 litros, con drenaje central o lateral. Estos deben contar con control de temperatura, recambio rápido, recipientes adicionales para fertilización, y sistemas de control de luz (Morgan, 2000; Battaglione *et al.*, 2002) (Ver Figura 10).

CULTIVO DE HOLOTHURIA INORNATA

1. SELECCIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DE REPRODUCTORES

1. Colectar adultos sanos (>23 cm y 290-460 g) en hábitats naturales.
2. Aclimatarlos en tanques con agua marina filtrada (1 μ m), pH 7.9, salinidad 35 PSU, oxígeno >5 mg/L.
3. Mantenerlos durante 4 días sin alimento, con temperatura estable (27.4-29.7 °C) y limpieza diaria.





2. INDUCCIÓN AL DESOVE

1. Exponer a desecación por 1 hora en oscuridad
2. Inmediatamente aplicar choque térmico (+5 °C, hasta 34 °C)
3. Transferir a tanque con 70 L de agua marina desinfectada
4. Esperar entre 3.5 y 4 h para liberación de esperma y ovocitos
5. Obtener gametos y fertilizar externamente (tasa de fertilización ~98%)

Figura 10. Ejemplo de inducción al desove en *H. inornata*.

- b) **Cultivo larval:** se utilizan tanques cónicos con fondo inclinado, difusores de aireación suave, drenajes con malla fina y módulos de cultivo de microalgas. Esta fase debe realizarse en una sala especializada para evitar contaminación cruzada y permite distinguir edades larvales (Magdy *et al.*, 2021; Laguerre *et al.*, 2020).
- c) **Asentamiento y metamorfosis:** requiere tanques bajos con bandejas plásticas con sustrato biofilmado, iluminación suave, aireación leve y manejo delicado del biofilm (Yu *et al.*, 2022; Cheng *et al.*, 2021).
- d) **Engorde:** el engorde se puede llevar a cabo en sistemas en tierra o marinos. Los sistemas terrestres permiten mayor control, pero requieren más inversión, mientras que los marinos se adaptan mejor a zonas rurales con menor infraestructura (Gangadaran & Cheema, 2017). Cada sistema incluye requerimientos básicos para alimentación, manejo de depredadores y control de condiciones (Ver Figura 11).

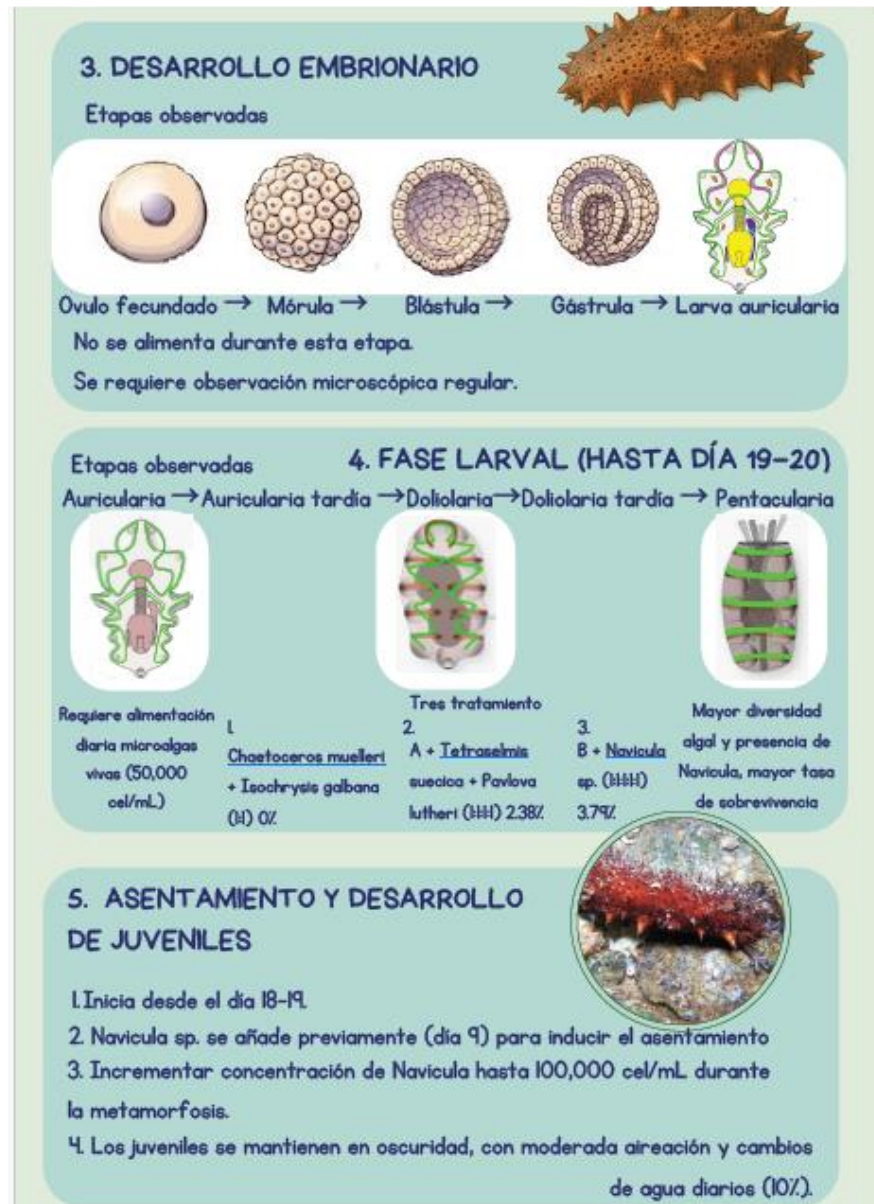


Figura 11. Ejemplo de la fase larval y asentamiento de juveniles en *H. inornata*.

Métodos utilizados por cada etapa de desarrollo del pepino:

a) Larval:

- Intensivo: alta densidad, ambiente controlado, microalgas puras (Robinson *et al.*, 2019).
- Semi-intensivo: microalgas + fitoplancton natural (Dolganov *et al.* 2024).
- Extensivo: ambientes naturales sin renovación frecuente (Cutajar *et al.*, 2022).

b) Asentamiento:

- Sustrato biofilmado (Li *et al.*, 2010).
- Sustrato inerte con aditivos (Tu *et al.*, 2023).

c) Engorde:

- Raceways en tierra (Du *et al.*, 2021).
- Estanques costeros (Xuered *et al.*, 2018).
- Tanques cerrados con recirculación (Du *et al.*, 2021).
- Corrales marinos (Heinen & Quist, 2001).

Cada una de estas fases exige controles ambientales rigurosos, particularmente en etapas tempranas debido a la alta sensibilidad de los holotúridos (Huo *et al.*, 2019; Ju *et al.*, 2024; Meirinawati *et al.*, 2020; Morroni *et al.*, 2023).

Aspectos nutricionales y de cosecha

El cultivo exitoso del pepino de mar requiere comprender y satisfacer sus específicos requerimientos alimenticios, así como implementar métodos adecuados de cosecha. Estos organismos bentónicos obtienen la mayoría de sus nutrientes a partir de partículas orgánicas en los sedimentos marinos, incluyendo microorganismos, detritos orgánicos, fragmentos de sílice y residuos fecales de otros organismos marinos (David *et al.*, 2020).

Una alimentación adecuada en condiciones de cultivo implica la preparación de dietas que simulan condiciones naturales, compuestas principalmente por sedimentos marinos enriquecidos con materiales vegetales en polvo, incluyendo microalgas y macroalgas, además de mezclas suplementarias de minerales y vitaminas esenciales (Agudelo-Martínez *et al.*, 2016). En particular, estudios específicos sobre pepinos como *A. japonicus* señalan que dietas ricas en lípidos, ácidos grasos esenciales y carotenoides son cruciales para su crecimiento y reproducción (Giraspy & Ivy, 2008; Sunde & Christophersen, 2023). La utilización de algas marinas, como *Sargassum* spp., es particularmente común debido a su alta calidad nutricional y capacidad para fomentar el desarrollo gonadal (Sunde & Christophersen, 2023).

En la fase larvaria, se requiere una alimentación especializada basada en microalgas como *Isochrysis galbana*, *Pavlova*, *Tetraselmis* sp., *Chaetoceros calcitrans*, *Thalassiosira weissflogii* y *Thalassiosira pseudonana*. Estas microalgas aseguran una óptima supervivencia y crecimiento larval, iniciando con una densidad de aproximadamente 20,000 células/ml, incrementándose hasta 50,000 células/ml en fases avanzadas (Agudelo-Martínez *et al.*, 2016).

En términos de cosecha, la fase de engorde de juveniles implica asegurar condiciones ambientales adecuadas y disponibilidad constante de alimento natural o dietas suplementarias. Investigaciones recientes han mostrado que la cosecha

nocturna es más eficiente para ciertas especies, como *Stichopus cf. horrens*, debido a su comportamiento alimenticio predominantemente nocturno (Rioja *et al.*, 2020). La cosecha generalmente ocurre tras un período de engorde que puede durar entre 12 y 14 meses, momento en el cual los pepinos alcanzan tallas comercializables (Agudelo-Martínez *et al.*, 2016).

El transporte hacia los sitios de procesamiento debe minimizar el estrés y prevenir lesiones en los animales, utilizando agua de mar o manteniéndolos húmedos sobre toallas dentro de recipientes plásticos, con temperaturas controladas entre 28°C y 31°C (Agudelo-Martínez *et al.*, 2016).

En la etapa poscosecha, los pepinos son sometidos a procesos específicos como evisceración, cocción, salado y deshidratación. Estos procesos deben realizarse con cuidado extremo para preservar la calidad del producto final debido a las enzimas autolíticas de estos organismos que pueden causar rápida descomposición (David *et al.*, 2020). La deshidratación se destaca como método preferido, facilitando la conservación y transporte del producto al mercado internacional, especialmente al asiático, donde los pepinos secos o beche-de-mer son altamente demandados (Xue, 2023).

3.6.2. Macroalgas

El desarrollo exitoso de cultivos de macroalgas requiere una comprensión integral de factores biológicos, ambientales y técnicos que influyen directamente en el rendimiento, calidad de la biomasa y sostenibilidad del sistema. A continuación, se detallan los elementos clave para el establecimiento, mantenimiento y cosecha eficiente del cultivo.

Factores biológicos y nutricionales

Las macroalgas son organismos autótrofos que obtienen su energía por fotosíntesis y absorben nutrientes directamente del medio acuático, por lo que no requieren alimentación suplementaria. Su rendimiento, sin embargo, depende de la disponibilidad de nutrientes inorgánicos como nitrógeno y fósforo (Cai *et al.*, 2021; FAO, 2021).

Diversas especies tropicales como *Gracilaria* spp., *Ulva* spp. y *Sargassum* spp. han mostrado buena adaptación a condiciones costeras de América Latina y son candidatas viables para cultivos sostenibles o esquemas multitroóficos integrados (Radulovich *et al.*, 2014; Buschmann *et al.*, 2017). En particular, se ha documentado que *Gracilaria* puede alcanzar altas tasas de crecimiento con mínimas intervenciones técnicas cuando se cultiva en ambientes estuarinos adecuados (Banik *et al.*, 2023).

Calidad del agua y condiciones fisicoquímicas

Las macroalgas requieren ambientes bien iluminados, con temperaturas óptimas entre 20–30 °C, salinidad entre 30–35 ppt, buena disponibilidad de nutrientes disueltos y concentraciones de oxígeno disuelto mayores a 5 mg/L (Buschmann *et al.*, 2017; Pessarrodona *et al.*, 2022). La salinidad estable es crítica para mantener la homeostasis osmótica y evitar necrosis celular en especies sensibles (Khan *et al.*, 2024).

Además, la penetración de luz (PAR) y la estabilidad del pH (alrededor de 8.0) son cruciales para mantener una alta tasa fotosintética y crecimiento constante. Zonas costeras protegidas con circulación moderada permiten un intercambio adecuado de nutrientes y evitan la acumulación de sedimentos o epífitas (Cai *et al.*, 2021). El monitoreo continuo de estos parámetros contribuye a predecir brotes de epibiosis o pérdidas de biomasa (Masyahoro & Mappiratu, 2012).

Técnicas de cultivo y etapas del ciclo productivo

El cultivo de macroalgas en zonas tropicales se basa principalmente en la propagación vegetativa, utilizando fragmentos de talos que se fijan a estructuras como líneas largas, redes o balsas flotantes. Este método ha sido ampliamente validado para especies como *Gracilaria* spp., *Kappaphycus alvarezii* y *Eucheuma denticulatum* debido a su eficiencia, bajo costo y facilidad de manejo (Buschmann *et al.*, 2017; Charrier *et al.*, 2017).

El ciclo productivo se puede describir en las siguientes etapas:

- a. **Selección del sitio:** se priorizan áreas costeras protegidas con baja turbidez, buena circulación de agua, acceso a nutrientes disueltos y exposición solar adecuada. También deben presentar salinidad estable (~30–35 ppt) y temperatura entre 20–30 °C (Banik *et al.*, 2023; Khan *et al.*, 2024).
- b. **Preparación de propágulos vegetativos:** se seleccionan talos sanos y vigorosos de plantas madre, que se fragmentan en secciones de 10–15 cm, y se aclimatan en agua marina por 1–2 días antes de la siembra (Khan *et al.*, 2024).
- c. **Fijación en líneas, redes o balsas:** los fragmentos se amarran a líneas de cultivo (longlines), redes horizontales o estructuras flotantes, como el método "tie-tie" utilizado para *Kappaphycus* en Indonesia (Ask & Azanza, 2002; Banik *et al.*, 2023).

Mantenimiento: incluye limpieza manual de epífitas, inspección de líneas, eliminación de fragmentos enfermos y monitoreo de variables ambientales. Se recomienda registrar semanalmente la temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y pH (Buschmann *et al.*, 2017; Charrier *et al.*, 2017).

Cosecha y renovación: se realiza de forma parcial o total. En *Gracilaria*, la cosecha ocurre cuando los talos alcanzan 30–40 cm, en ciclos de 30 a 60 días (Banik *et al.*, 2023) (Ver Tabla 1). La cosecha se realiza manual o mecánicamente, retirando los talos sin afectar el punto de regeneración. La biomasa puede ser lavada, secada y acondicionada para alimentación, biofertilizantes, cosmética o bioplásticos (Buschmann *et al.*, 2017; Visch *et al.*, 2023).

Cuadro 3. Resumen de parámetros recomendados para el cultivo de macroalgas.

Parámetro	Rango óptimo	Fuente
Temperatura	20–30 °C	Banik <i>et al.</i> , 2023
Salinidad	28–34 PSU	Banik <i>et al.</i> , 2023; Khan <i>et al.</i> , 2024
pH	7.6–8.5	Banik <i>et al.</i> , 2023
Oxígeno disuelto	>5 mg/L	Khan <i>et al.</i> , 2024
Luz PAR	>200 Qmol m ⁻² s ⁻¹	Khan <i>et al.</i> , 2024
Nitrato (NO ₃ ⁻)	>0.2 mg/L	Masyahoro & Mappiratu, 2012
Fosfato (PO ₄ ³⁻)	>0.05 mg/L	Masyahoro & Mappiratu, 2012

Frecuencia de monitoreo y mantenimiento: el monitoreo debe realizarse semanalmente e incluir medición de temperatura, salinidad, pH, oxígeno disuelto y nutrientes. También debe evaluarse el crecimiento, limpieza de estructuras y revisión de integridad estructural (Cai *et al.*, 2021; FAO, 2021).

Prácticas para el establecimiento exitoso: incluyen la elección de especies nativas o aclimatadas, ubicación estratégica de las estructuras, implementación de materiales biodegradables, integración en sistemas IMTA y capacitación comunitaria (Arantzamendi *et al.*, 2023; Radulovich *et al.*, 2014).

Problemáticas y Patógenos en el Cultivo de Macroalgas Marinas en América Latina

El cultivo de macroalgas marinas en América Latina enfrenta diversos desafíos que comprometen su viabilidad económica y ecológica. Entre las principales problemáticas se encuentran factores bióticos como enfermedades, epífitos y herbivoría, así como condiciones abióticas como la temperatura, salinidad y luz. Estas condiciones no solo afectan el rendimiento del cultivo, sino que también favorecen la proliferación de patógenos específicos, como virus, bacterias, hongos y algas parásitas, que pueden provocar pérdidas significativas en la producción. En el siguiente cuadro se muestran algunos factores bióticos y abióticos, detallados

de manera general, que podrían afectar a los cultivos de macroalgas de acuerdo con Morúa *et al.* (2024) y Khan *et al.* (2024).

Cuadro 4. Factores bióticos y abióticos que pueden afectar los cultivos de macroalgas.

Factor	Tipo	Soluciones
Herbívoros (Grazers)	Biótico	• Trap cropping. • Cultivo en temporadas con menor actividad de herbívoros. • Policultivo con algas menos palatables. • Uso de estructuras protectoras.
Epífitos	Biótico	• Selección de sitios adecuados. • Control manual y genético. • Uso de extractos naturales. • Peces controladores y tratamientos químicos específicos.
Mareas rojas/café	Biótico	• Monitoreo satelital. • Cambio en técnicas y época de cultivo. • Uso de especies alelopáticas como <i>Gracilaria</i>.
Temperatura	Abiótico	• Selección de cepas resistentes. • Manejo de sombra/luz artificial. • Adaptación estacional.
Bioincrustación	Abiótico	• Ubicación en zonas con buena circulación. • Uso de compuestos antifouling naturales.
Hidrodinamismo	Abiótico	• Diseño estructural resistente al oleaje. • Zonificación con monitoreo oceanográfico.
Salinidad	Abiótico	• Cultivo de cepas tolerantes. • Manejo del ingreso de agua dulce o hipersalina.
Luz	Abiótico	• Uso de LEDs adecuados. • Control de intensidad lumínica según especie.

En la siguiente tabla se describen algunos patógenos que se han reportado en macroalgas según Murúa *et al.* 2024.

Cuadro 5. Principales patógenos de macroalgas en América Latina.

Macroalga	País	Tipo de patógeno	Clasificación
<i>Macrocystis pyrifera</i>	Chile, Perú, Argentina, Islas Malvinas	Virus	Virus
<i>Mazzaella laminarioides</i>	Chile	<i>Pleurocapsa</i> sp.	Cianobacteria
<i>Neorubra decipiens</i> / <i>Prionitis</i> spp.	México, Perú	<i>Lobocolax deformans</i> (posiblemente Roseobacter)	Bacteria
<i>Halymenia floresii</i>	México	<i>Vibrio owensii</i>	Bacteria
<i>Stephanocystis dioica</i>	México	<i>Haloguignardia irritans</i>	Hongo

<i>Ectocarpus</i> spp.	Chile	<i>Anisolpidium ectocarpii</i>	Pseudohongo (Oomycota)
<i>Durvillaea</i> spp.	Chile, Islas Malvinas	<i>Maullinia braseltonii</i>	Fitomíxeo (Plasmodiophorida)
<i>Gracilaria chilensis</i>	Chile	Ameba tipo rizópodo no identificada	Ameboide
<i>Gelidium floridanum</i>	Venezuela	<i>Gelidiocolax desikacharyi</i>	Alga parásita
<i>Grateloupia filicina</i>	Colombia	<i>Grateloupiocolax colombianus</i>	Alga parásita
<i>Champia</i> spp.	Colombia	<i>Champiocolax sarae</i>	Alga parásita

3.7. Análisis de productos y demanda

3.7.1 Pepino de mar

El pepino de mar se ha posicionado en la última década como un recurso marino de alto valor comercial, cultural y funcional. Su comercio, impulsado principalmente por la demanda asiática, ha generado un mercado multimillonario caracterizado por la diversificación, el surgimiento de nuevas aplicaciones industriales y una creciente presión sobre las poblaciones silvestres (Li *et al.*, 2024). Este panorama ha promovido el interés por la maricultura como alternativa sostenible, abriendo oportunidades para países con potencial de producción como Costa Rica. Este apartado examina el comportamiento de los mercados, las preferencias del consumidor, las tendencias en formatos y productos, y las posibilidades estratégicas para la inserción del pepino de mar costarricense.

Perfil global del consumo: tradición, prestigio y funcionalidad

En los mercados tradicionales de Asia Oriental, el pepino de mar representa mucho más que un alimento: es un símbolo de estatus, un remedio tradicional y un componente esencial en celebraciones y rituales. En China, por ejemplo, se le atribuyen propiedades inmunoestimulantes, afrodisíacas y regenerativas, especialmente en el contexto de la medicina tradicional china. Consumidores de ciudades como Beijing, Dalian y Shanghái integran el pepino de mar en su dieta diaria como suplemento funcional, especialmente durante el invierno (Bordbar *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2024).

El producto más reconocido internacionalmente es el *bêche-de-mer*, pepino de mar seco cocido y eviscerado, cuyo valor comercial depende de variables como:

- Especie y procedencia.
- Tamaño y peso seco.
- Integridad estructural.
- Textura tras rehidratación.
- Color uniforme (preferido: oscuro o negro).

El valor por kilo puede oscilar desde 150 USD hasta más de 3.000 USD en mercados premium como Hong Kong o Macao, dependiendo del nivel de calidad (Purcell *et al.*, 2014; FAO, 2023).

Evolución hacia productos funcionales y formatos diversificados

A partir de los años 2000, el pepino de mar ha atravesado un proceso de industrialización progresiva. La investigadora Akamine (2024) describió cómo, en el noreste asiático, su consumo ha pasado de ser un ritual reservado a élites a convertirse en un producto estandarizado y masivo. Este fenómeno, que la autora denomina la “McDonalización del pepino de mar”, ha dado lugar a una proliferación de productos como:

- a. *Jishi haishen*: cocido, empacado al vacío y listo para consumir.
- b. *Donggan*: congelado, para descongelar y usar.
- c. *Banggan*: semi-seco con hidratación más rápida.
- d. Extractos líquidos en presentaciones bebibles.
- e. Cápsulas de colágeno.
- f. Ingredientes deshidratados para sopas instantáneas o comidas listas.

Estos productos responden a la necesidad de conveniencia y funcionalidad. Se comercializan tanto en tiendas físicas como en plataformas de e-commerce como JD.com, Taobao y Alibaba, ampliando su alcance incluso hacia consumidores no tradicionales (Akamine, 2024; Wei & Chang, 2023).

Dinámicas de mercado por región

A continuación, se hará referencia al comportamiento de estos productos en varias regiones del mundo:

- a. **Asia Oriental:** China es el principal mercado consumidor y transformador del pepino de mar. En 2022, las importaciones legales e ilegales superaron las 3.500 toneladas, con un crecimiento sostenido del 6% anual desde 2010 (FAO, 2023). Corea del Sur y Japón, aunque más estables, mantienen una demanda constante, con especies locales como *Stichopus japonicus* o *Holothuria leucospilota*.
- b. **América del Norte y Europa:** en Estados Unidos y Canadá, el pepino de mar ha comenzado a comercializarse como suplemento natural, en tiendas naturistas y cadenas gourmet. En Europa, su inclusión en platos de alta cocina y su uso en productos de belleza (cremas, geles, sueros) ha incrementado su valor percibido, especialmente en países como Francia, Italia y Alemania (Ciriminna *et al.*, 2024).
- c. **América Latina:** países como México, Colombia, Perú y Ecuador han desarrollado pesquerías y modelos de maricultura, aunque con desafíos de regulación, sostenibilidad y mercado interno. En estos contextos, la

exportación a Asia sigue siendo el destino principal, aunque iniciativas locales han comenzado a explorar la producción de extractos, colágeno marino y productos de turismo gastronómico (Agudelo-Martínez *et al.*, 2016; Conand, 2017).

Perfil del consumidor

El consumidor tradicional asiático es mayor de 40 años, urbano, con ingresos medios-altos, y suele adquirir el producto como regalo de salud o como parte de la dieta invernal. En cambio, los nuevos consumidores en mercados occidentales son más jóvenes, preocupados por el bienestar físico, la sostenibilidad ambiental y los alimentos funcionales. Los principales atributos que valoran son:

- a. Origen ecológico o trazabilidad.
- b. Ausencia de aditivos o residuos químicos.
- c. Formato listo para usar.
- d. Certificaciones (orgánico, comercio justo, sostenibilidad).

La integración del pepino de mar en la cosmética, la medicina funcional y la cocina fusión genera nuevos escenarios para su comercialización (Ren *et al.*, 2023).

Oportunidades estratégicas para Costa Rica

Costa Rica cuenta con dos especies de alto interés comercial, bien distribuidas en su litoral Pacífico. Su resistencia a condiciones ambientales variables, su valor nutricional y la posibilidad de integrarlas en sistemas IMTA las convierten en candidatas idóneas para proyectos de maricultura sostenible.

Las oportunidades para el país incluyen:

- a. Posicionamiento en nichos de mercado éticos y funcionales.
- b. Exportación a mercados gourmet o nutraceuticos.
- c. Desarrollo de productos para turismo gastronómico costero.
- d. Producción de derivados funcionales (colágeno, extractos).

Para lograrlo, será clave el establecimiento de protocolos de cultivo, procesamiento y certificación, así como la construcción de alianzas con compradores especializados y plataformas de exportación diferenciada, así como lo indican autores tales como Hair *et al.* (2020) y Hou *et al.* (2019).

Retos y consideraciones

Entre algunos aspectos que se consideran importantes a tomar en cuenta, se encuentran:

- a. Ausencia de regulación específica para la maricultura de pepinos en Costa Rica.
- b. Necesidad de capacitar comunidades en técnicas de cultivo, poscosecha y comercialización.
- c. Requerimientos sanitarios para exportación.
- d. Riesgo de pesca ilegal si no se establecen mecanismos de control y trazabilidad.

Aun así, los estudios revisados indican que el pepino de mar ofrece un alto retorno económico por unidad cultivada, bajo impacto ambiental y alto potencial de escalamiento si se articula con un modelo de maricultura familiar y comunitaria (Hou *et al.*, 2019; FAO, 2023).

3.7.2. Macroalgas

La reproducción, procesamiento y comercialización de las macroalgas han experimentado una expansión significativa en las últimas décadas, con una proyección favorable hacia mercados funcionales, sostenibles y de alto valor agregado. A medida que aumenta la conciencia sobre la salud, la nutrición sostenible y el cambio climático, la demanda por productos derivados de algas marinas se ha transformado tanto en volumen como en diversidad (Blikra *et al.*, 2021; Nova *et al.*, 2020).

Panorama global del consumo

Históricamente, el consumo de macroalgas se ha concentrado en países asiáticos como China, Japón y Corea del Sur, donde especies como *Porphyra* (nori), *Saccharina* (kombu) y *Undaria* (wakame) forman parte integral de la dieta. En China, por ejemplo, la producción de macroalgas cultivadas superó los 20 millones de toneladas anuales, generando ingresos superiores a los USD \$9.000 millones (Rao & Ravishankar, 2022).

Sin embargo, la demanda de algas ha trascendido el ámbito tradicional. En Europa, Norteamérica y América Latina, la incorporación de algas como ingredientes funcionales, suplementos nutricionales, cosméticos y productos sostenibles está en aumento, con tasas de crecimiento anual superiores al 8% en varios segmentos del mercado (García-Poza *et al.*, 2022). El interés de los consumidores europeos y norteamericanos está particularmente influenciado por el deseo de alimentos locales, trazables, bajos en carbono y con etiquetado limpio (Stevant *et al.*, 2017; Moss & McSweeney, 2021).

Este crecimiento responde a una serie de factores como:

- a. Interés del consumidor por alimentos saludables y bajos en carbono.
- b. Percepción positiva de las algas como “superfoods”.

- c. Búsqueda de fuentes sostenibles de proteínas, fibras y minerales.
- d. Innovación en la gastronomía basada en plantas y alimentos funcionales (Bhatt *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2022).

Diversificación de productos y formatos comerciales

El mercado actual ofrece una amplia gama de productos derivados de macroalgas, con niveles de sofisticación que van desde el alga seca deshidratada hasta productos ultraprocesados de alto valor. Algunas de las principales líneas de comercialización incluyen:

- a. **Alimentos frescos y secos:** *Ulva*, *Gracilaria*, *Porphyra* y *Sargassum* en presentaciones laminadas, en polvo o rehidratadas.
- b. **Snacks y alimentos preparados:** barras energéticas, chips de algas, fideos con algas, panes funcionales y sustitutos cárnicos (Quitral *et al.*, 2022; Yesuraj *et al.*, 2022).
- c. **Suplementos nutricionales:** cápsulas de calcio, hierro y yodo marino, extractos bioactivos.
- d. **Cosméticos naturales:** mascarillas faciales, geles, cremas antiinflamatorias con fucoidanos.
- e. **Bioplásticos y envases biodegradables:** a partir de polisacáridos extraídos de *Gracilaria* y *Kappaphycus* (Snethlage *et al.*, 2023).
- f. **Textiles y empaques inteligentes:** productos basados en carragenatos y alginatos de alta pureza (Zhang *et al.*, 2022).

Además, nuevos formatos de conservación como la fermentación (ensilado) están siendo evaluados como alternativas económicas y sostenibles al secado térmico tradicional, especialmente para zonas con limitaciones de infraestructura (Cerca *et al.*, 2024).

Segmentos de mercado y perfil del consumidor

El consumidor actual de productos con macroalgas presenta una gran diversidad, que varía según la región y el segmento. Se pueden identificar al menos tres grandes perfiles:

- a. **Consumidores funcionales:** interesados en salud digestiva, prevención de enfermedades, control del peso y metabolismo.
- b. **Consumidores éticos y sostenibles:** que buscan reducir su huella de carbono y consumir productos marinos sin impacto negativo.
- c. **Consumidores gourmet y flexitarianos:** que incorporan algas por su sabor umami, textura y versatilidad culinaria (Losada-López *et al.*, 2021; Blikra *et al.*, 2021).

Estudios realizados en Francia y España indican que el etiquetado claro, la trazabilidad, y los sellos de producción ética son claves para aumentar la disposición a pagar por productos con algas (Lucas *et al.*, 2019; Moss & McSweeney, 2021).

Mercados emergentes y oportunidades estratégicas: el crecimiento de la bioeconomía azul ha creado nuevas oportunidades para integrar las macroalgas a sectores no tradicionales, como:

- a. **Agroindustria:** como fertilizantes, mejoradores de suelos y aditivos para alimentación animal.
- b. **Farmacéutica y nutracéutica:** como base para excipientes, sistemas de liberación y compuestos terapéuticos.
- c. **Industria química verde:** obtención de biocatalizadores y enzimas a partir de macroalgas (Chakraborty *et al.*, 2015).

En América Latina, países como Chile, Perú y Brasil han comenzado a explorar modelos productivos integrados que permiten agregar valor desde el cultivo hasta la transformación. Costa Rica, con su biodiversidad marina y capacidad técnica, podría liderar iniciativas de producción de algas tropicales como *Gracilaria* y *Ulva*, destinadas a nichos como el mercado vegano, la cosmética ecológica o la alimentación regenerativa (Snethlage *et al.*, 2023).

Retos y recomendaciones para la consolidación de mercados

A pesar de su potencial, el sector de macroalgas enfrenta desafíos importantes:

- a. **Percepción limitada del consumidor:** en muchos países las algas aún son vistas como “exóticas”.
- b. **Ausencia de normativas armonizadas:** especialmente para especies tropicales y productos derivados.
- c. **Falta de infraestructura local de transformación:** lo cual limita el desarrollo de cadenas de valor.
- d. **Desconocimiento sobre inocuidad y composición nutricional:** lo que genera barreras de aceptación.

Para superar estos retos se recomienda

- a. Impulsar campañas de educación alimentaria sobre beneficios y usos de las algas.
- b. Desarrollar marcos regulatorios y sellos que certifican productos a base de algas.
- c. Fortalecer la investigación aplicada en compuestos bioactivos y propiedades funcionales.

- d. Estimular la innovación mediante alianzas entre el sector académico, comercial y comunitario.
- e. Apoyar iniciativas de producción asociativa y circular con trazabilidad y equidad.

3.8. Capital humano

La evaluación de la disponibilidad de mano de obra calificada en acuicultura en Costa Rica muestra un panorama alentador gracias a los diversos programas académicos especializados que ofrecen reconocidas instituciones educativas del país, los cuales proveen una formación integral en técnicas avanzadas de cultivo y manejo sostenible, fundamentales para el desarrollo responsable y eficiente de esta industria.

La UTN ofrece una Licenciatura en Ingeniería en Acuicultura (UTN, 2023), que incluye en su currículo cursos esenciales como emprendimiento e innovación tecnológica, maricultura, bioestadística, bioseguridad e inocuidad, sistemas de información geográfica, economía acuícola, sostenibilidad ambiental, legislación específica, oceanografía y manejo integrado de zonas costeras (Universidad Técnica Nacional, 2023).

Por su parte, la UNA ofrece el Bachillerato y Licenciatura en Biología Marina (UNA, 2024), con una formación profunda en botánica marina, zoología marina, oceanografía, ecología marina, calidad de aguas y biotecnología de cultivos marinos. Esta universidad destaca especialmente por contar con la Estación de Biología Marina ubicada en Puntarenas, equipada con infraestructura específica para investigación y prácticas en acuicultura, incluyendo tanques especializados para cultivo y experimentación práctica en condiciones controladas (Universidad Nacional, 2024). Adicionalmente, la UNA alberga el Programa del Parque Marino del Pacífico, que mantiene fuertes vínculos internacionales, especialmente con universidades destacadas en acuicultura como la Universidad Católica del Norte, en Coquimbo, Chile, facilitando así oportunidades de especialización avanzada para los estudiantes costarricenses.

La UCR cuenta con un programa en Biología que incluye optativos en acuicultura, tales como acuicultura general, ecología acuática, limnología y oceanografía general. Esto permite a los estudiantes obtener una sólida base teórica y práctica en acuicultura sostenible y manejo de especies cultivadas (UCR, 2020).

En cuanto al sector empresarial acuícola en Costa Rica, que podrían ser posibles fuentes de empleo, la diversidad de especies cultivadas es considerable. Se destacan especialmente empresas dedicadas al cultivo de tilapia y trucha, que históricamente han sido importantes en el país. Además, existen iniciativas comerciales y experimentales relacionadas con camarones, ostras, pargo manchado, y especies emergentes como la langosta australiana (*Cherax*

quadricarinatus), el catfish (*Ictalurus punctatus*), el pangasio (*Pangasianodon hypophthalmus*), y la cachama negra o tambaquí (*Colossoma macropomum*) (INCOPESCA, 2019).

Además, empresas consolidadas a gran escala, como la empresa Acuacorporación Internacional S.A., dedicada a la exportación masiva de tilapia hacia mercados internacionales, principalmente hacia Estados Unidos, así como pequeños emprendimientos y cooperativas que gestionan cultivos de menor escala, especialmente ostras y otros moluscos en el Golfo de Nicoya (INCOPESCA, 2019) (Anexo 5 y 6).

3.9. Cadena de valor

Generalidades

La cadena de valor describe el conjunto completo de actividades necesarias para llevar un producto o servicio desde su concepción, pasando por las diferentes fases de producción, hasta la entrega a los consumidores finales y su disposición después del uso (Gómez-Lemos *et al.*, 2018). En el contexto de la maricultura y pesquerías asociadas, como las del pepino de mar y macroalgas, la cadena de valor abarca desde la extracción o cultivo hasta el consumidor final, a menudo en mercados internacionales.

El desarrollo de las cadenas de valor para el pepino de mar y las macroalgas en Costa Rica representa una oportunidad estratégica significativa para diversificar la economía azul del país y fomentar el desarrollo sostenible en las comunidades costeras. Aunque ambas cadenas se encuentran en una etapa incipiente, su potencial se fundamenta en la favorable ubicación geográfica de Costa Rica, la creciente demanda internacional de productos marinos sostenibles y diferenciados, y el sólido marco nacional de políticas de sostenibilidad ambiental por ejemplo la Estrategia Nacional Carbono Azul (MINAE, 2023).

El pepino de mar, particularmente la especie nativa *I. fuscus*, posee un alto valor intrínseco en mercados asiáticos cuando se procesa como *bêche-de-mer* (deshidratado). Por su parte, las macroalgas ofrecen una notable versatilidad, con aplicaciones que van desde la alimentación humana y animal hasta ingredientes para la industria cosmética, farmacéutica, biofertilizantes y potencialmente bioenergía, alineándose con modelos de economía circular. Este análisis desglosa las cadenas de valor para ambos recursos, identificando actores, fortalezas, debilidades y oportunidades clave para su consolidación.

Este estudio mapea los posibles actores que participan en la producción, comercialización y exportación de estos recursos en Costa Rica, estableciendo paralelismos con estudios de caso internacionales. Además, analiza las oportunidades de mejora en cada eslabón de la cadena productiva, así como las

posibles fortalezas y debilidades. También se explora la integración de la producción de pepino de mar y macroalgas a través de la IMTA como una vía para mejorar la sostenibilidad y los beneficios económicos. Las recomendaciones clave enfatizan la necesidad de evaluaciones de stock, inversión en investigación e infraestructura, desarrollo de marcos regulatorios sólidos y capacitación dentro de las comunidades locales para garantizar la viabilidad a largo plazo y la integridad ambiental de estos sectores emergentes (Alvarado *et al.*, 2021).

Ambos productos comparten **cinco eslabones principales** en su cadena de valor, los cuales están interconectados y dependen de un ecosistema de apoyo transversal. Si bien existen muchas similitudes en los subprocesos —especialmente en sistemas de Acuicultura Multitrófica Integrada (IMTA)—, es importante destacar que cada eslabón presenta particularidades específicas para cada producto.

A continuación, se detallarán los eslabones compartidos. En cada uno, se resaltan las diferencias clave entre las cadenas del pepino de mar y las macroalgas, solo cuando sea relevante.

La cadena del **pepino de mar** se enfoca principalmente en la extracción o cultivo y un procesamiento específico dirigido a un nicho de mercado de alto valor. En contraste, las cadenas de las **macroalgas** se distinguen por la diversidad de sus técnicas de cultivo, una amplia gama de posibilidades de procesamiento y una multiplicidad de mercados finales con distintos niveles de valor agregado.

Cadena de valor potencial del pepino de mar y macroalgas en Costa Rica

A continuación, se detallan los eslabones de la cadena de valor para el pepino de mar y las macroalgas en Costa Rica. Ambos productos comparten una estructura fundamental en sus cadenas de valor, por lo que se presentarán de forma conjunta, destacando las particularidades y diferencias pertinentes a cada uno en los eslabones donde sea necesario.

Eslabón 1: Suministro de Insumos y Servicios Clave

- a. **Actividades:** provisión de material biológico inicial (larvas/juveniles de pepino de mar; plántulas/cepas de macroalgas), alimento especializado (para pepino de mar en cultivo), equipamiento (sistemas de cultivo, embarcaciones, equipos de laboratorio y procesamiento), y servicios de asesoría técnica y ambiental.
- b. **Actores Clave:** centros de investigación (UCR, UNA, CIMAR), potenciales criaderos (hatcheries) y laboratorios de micropropagación (públicos o privados), proveedores de equipos de maricultura y pesca, potenciales formuladores de dietas, consultores especializados (biólogos, ingenieros acuícolas, expertos ambientales), INCOPESCA (regulación de origen de semilla).

- c. **La etapa inicial de la cadena de valor** del pepino de mar en Costa Rica probablemente involucraría a recolectores y pescadores. Al igual que en otros países en desarrollo con pesquerías de pepino de mar, estos probablemente serían pescadores artesanales que operan desde comunidades costeras (Alvarado *et al.*, 2021; Barclay *et al.*, 2019). Sus actividades podrían centrarse inicialmente en la recolección silvestre, pero a medida que la industria se desarrolle, existe potencial para la incorporación de prácticas de acuicultura y maricultura (Chang *et al.*, 2004). Dada la prevalencia de la pesca artesanal en las regiones costeras de Costa Rica, involucrar a estas comunidades desde el principio será crucial para el desarrollo de la industria, lo que requerirá capacitación en métodos de recolección sostenibles y gestión de recursos.

Ahora las fortalezas, debilidades y oportunidades para este eslabón se consideran:

i. **Fortalezas:**

- **Biodiversidad:** Presencia de diversas especies de equinodermos con potencial comercial (Alvarado *et al.*, 2021).
- **Interés Nacional:** Creciente enfoque en prácticas de acuicultura sostenible.
- **Potencial IMTA:** Posibilidad de integrar el cultivo con otras especies acuícolas para mayor eficiencia y sostenibilidad.

ii. **Debilidades:**

- **Infraestructura limitada y dependencia de recursos silvestres:**
 - Ausencia de pesquerías reguladas y centros especializados en acuicultura de pepino de mar.
 - Falta de suministro comercial estable de semillas (larvas/juveniles), lo que obliga a depender de poblaciones silvestres (riesgo de sobreexplotación) o importaciones (Conand, 2018; Han *et al.*, 2016).
- **Brechas técnicas y de conocimiento:**
 - Escasa experiencia local en técnicas de cultivo sostenible y manejo poscosecha.
 - Desconexión entre la investigación científica y la disponibilidad de insumos comerciales (dietas formuladas) y asesoría técnica aplicada.
- **Riesgo sistémico de sobreexplotación:**
 - Vulnerabilidad de las poblaciones naturales ante la falta de protocolos de extracción y monitoreo, agravada por la carencia de certificaciones que aseguren trazabilidad (Conand, 2018; Han *et al.*, 2016).

iii. Oportunidades de Mejora:

- **Infraestructura acuícola estratégica:**
 - Desarrollar criaderos (*hatcheries*) y laboratorios de micropropagación para pepino de mar y macroalgas, utilizando recursos genéticos locales y adaptando técnicas de otros países (Chang *et al.*, 2004; Han *et al.*, 2016).
 - Priorizar especies nativas de alto valor (*Isostichopus badionotus*) para reducir presión sobre poblaciones silvestres.
- **Vinculación investigación-mercado:**
 - Fortalecer alianzas público-privadas para transferir tecnología de la academia al sector productivo, enfocándose en:
 - Producción de insumos biológicos (dietas formuladas, equipos especializados).
 - Implementación de sistemas IMTA que combinen especies (Sithisak *et al.*, 2013).
- **Gestión basada en ciencia:**
 - Establecer evaluaciones de stock periódicas y cuotas de extracción.
 - Promover técnicas de recolección responsable y certificación de trazabilidad.
- **Capacitación comunitaria:**
 - Formar a personas pescadoras en acuicultura, manejo poscosecha y estándares de sostenibilidad (Hair *et al.*, 2020).

Eslabón 2: Producción Primaria (Cultivo)

- a. **Actividades:** cultivo (potencialmente en sistemas extensivos, semi-intensivos o integrados). Manejo sanitario, monitoreo ambiental, cosecha.
- b. **Actores Clave:** empresas maricultoras (de diversa escala), cooperativas de personas pescadoras/productoras, comunidades costeras organizadas, personal técnico de campo.

En cuanto a este eslabón, las fortalezas, debilidades y oportunidades son:

i. Fortalezas:

- Extensas costas (Pacífico y Caribe) con zonas que presentan condiciones ambientales adecuadas (calidad de agua, temperatura y otros parámetros que se han mencionado anteriormente).
- Alto potencial para implementar Sistemas de tipo IMTA, combinando pepinos (detritívoros) y algas (extractores de nutrientes) para optimizar el uso de recursos, mejorar la calidad del agua y diversificar productos.
- Cultivo de macroalgas reconocido por sus beneficios ambientales (captura de carbono, generación de hábitat).

- El cultivo de pepino de mar podría requerir menor inversión en alimentación comparado con peces carnívoros.

ii. Debilidades Críticas:

- Procesos regulatorios (permisos, concesiones - INCOPECA, SETENA/MINAE) percibidos como complejos, lentos y costosos.
- Falta de experiencia práctica consolidada a escala comercial en Costa Rica.
- Riesgos inherentes a la maricultura (climáticos, sanitarios, floraciones algales nocivas).
- Potenciales conflictos por el uso del espacio marino con pesca, turismo y conservación

iii. Oportunidades de Mejora:

- Agilización y simplificación de trámites regulatorios para la maricultura ("ventanilla única", procedimientos claros y específicos).
- Desarrollo de herramientas de planificación espacial marina (zonificación) para identificar áreas óptimas y reducir conflictos.
- Implementación de programas de capacitación y asistencia técnica robustos (INA, universidades, extensión).
- Fomento de la asociatividad (cooperativas, clústeres) para mejorar economías de escala y poder de negociación.

Según Agudelo-Martínez *et al.* (2016), el cultivo de pepino de mar en sistemas semi-intensivos ha demostrado ser efectivo en términos de crecimiento y supervivencia, lo que respalda la viabilidad de implementar tales sistemas en Costa Rica como una alternativa técnica promisorio para optimizar la producción primaria en el contexto local.

Eslabón 3: Procesamiento (Primario y Secundario)

a. Actividades:

- **Pepino de Mar:** limpieza, eviscerado, cocción, secado (tradicional/solar/mecánico) para obtener *bêche-de-mer*. Potencial extracción de compuestos bioactivos.
- **Macroalgas:** lavado, secado (solar/mecánico), molienda. Potencial extracción de hidrocoloides (carrageninas, agar), pigmentos, proteínas, compuestos bioactivos. Congelación o elaboración de productos para consumo directo.

- b. **Actores Clave:** centros de acopio, plantas de procesamiento (potencialmente operadas por productores, cooperativas o empresas especializadas), laboratorios de extracción.

La siguiente etapa podría involucrar a ensambladores y procesadores locales. Estos podrían ser individuos o pequeñas empresas dentro de las áreas costeras que compren pepinos de mar frescos a los recolectores. Ellos llevarían a cabo los pasos primarios de procesamiento, que típicamente incluyen eviscerado, hervido y secado de los pepinos de mar, como se observa en Filipinas. Este procesamiento es esencial para preservar el producto para su posterior comercio y exportación, agregando valor a nivel local. La capacitación adecuada en estas técnicas de procesamiento será vital para garantizar que el producto final cumpla con los estándares de calidad de los mercados internacionales.

Una vez analizados los aspectos anteriores, las fortalezas, debilidades y oportunidades corresponden a:

i. Fortalezas:

- Alto potencial de agregación de valor, transformando la materia prima en productos de mayor durabilidad y precio.
- Experiencia nacional en procesamiento de otros productos pesqueros y alimentarios bajo estándares de exportación.

ii. Debilidades Críticas:

- Infraestructura de procesamiento específica (ej. secadores controlados para pepino, sistemas de extracción para algas), prácticamente inexistente o inadecuada a escala comercial.
- Altos costos de inversión inicial para plantas que cumplan normativas internacionales (calidad, inocuidad).
- Escasez de personal técnico capacitado en estas tecnologías específicas.

iii. Oportunidades de Mejora:

- Crear incentivos (fiscales, financieros) para atraer inversión en infraestructura de procesamiento moderna y eficiente.
- Desarrollar programas de formación técnica especializada en procesamiento de pepino de mar y macroalgas.
- Fomentar la I+D aplicada en técnicas de procesamiento para optimizar rendimientos, calidad y desarrollar nuevos productos con mayor valor agregado (ingredientes funcionales, nutricionales, cosméticos).

El manual de Agudelo-Martínez *et al.* (2016) proporciona una guía detallada sobre las técnicas de secado del pepino de mar, destacando la importancia de controlar la temperatura y la humedad para obtener un producto de alta calidad, lo que podría orientar el diseño de procesos estandarizados en Costa Rica para cumplir con las demandas del mercado internacional.

Eslabón 4: Comercialización, Distribución y Exportación

- a. **Actividades:** acopio, clasificación, empaque, almacenamiento (seco o refrigerado/congelado), logística de transporte nacional e internacional, marketing, ventas y gestión de exportación.
- b. **Actores Clave:** empresas comercializadoras/exportadoras, intermediarios, proveedores de logística (transporte, almacenamiento en frío), PROCOMER, distribuidores y minoristas en mercados finales.

Con respecto a los actores clave, los intermediarios o comerciantes podrían entonces desempeñar un papel actuando como intermediarios entre los procesadores locales y los comerciantes o exportadores más grandes. Comprarían los pepinos de mar procesados y agregarían mayores volúmenes para la venta, un patrón observado en países como Sri Lanka (Nishanthan *et al.*, 2019). Si bien estos actores pueden facilitar el flujo de mercancías, su presencia también puede reducir potencialmente los márgenes de ganancia para los productores y procesadores iniciales. Comprender su papel e impacto será importante para estructurar una cadena de valor justa y eficiente.

Los exportadores serían las entidades responsables de vender los pepinos de mar secos a los mercados internacionales, principalmente en Asia. Estas empresas podrían estar ubicadas en los principales centros urbanos con vínculos comerciales establecidos. El acceso a estos mercados internacionales y el cumplimiento de sus requisitos de calidad específicos son fundamentales para el éxito financiero de la industria del pepino de mar en Costa Rica (Sonnenholzner-Varas, 2021).

Las etapas finales del proceso de comercialización ocurren en los países importadores, involucrando a importadores, distribuidores y minoristas. Estas empresas, ubicadas en países como China, Hong Kong y el sudeste asiático, compran los pepinos de mar secos, pueden realizar un procesamiento adicional y luego distribuyen y venden los productos finales a los consumidores. Comprender las demandas y preferencias de estos mercados finales será crucial para guiar las prácticas de producción y procesamiento en Costa Rica. A continuación, se mencionan aspectos positivos y negativos de la comercialización:

i. Fortalezas:

- PROCOMER como aliado estratégico para inteligencia de mercados, promoción y facilitación de exportaciones.
- Marca país "Esencial Costa Rica" como plataforma para posicionar productos asociados a sostenibilidad y calidad.
- Demanda internacional robusta y creciente para ambos productos: Pepino de mar en Asia (precios premium: USD 150-400/kg seco); derivados de macroalgas en industrias alimentaria, cosmética,

farmacéutica (mercado global proyectado > USD 22 mil millones para 2030).

- Acceso preferencial a mercados clave (China, EE. UU., UE) mediante Tratados de Libre Comercio (TLCs).
- Infraestructura logística nacional en desarrollo (ej. Hub de Ultracongelado en Moín).

ii. Debilidades Críticas:

- Falta de canales de comercialización específicos y establecidos desde Costa Rica para estos productos.
- Logística compleja y costosa, especialmente para mantener cadena de frío o condiciones específicas de humedad/secado.
- Desconocimiento de requisitos específicos (calidad, certificaciones, empaque) de nichos de mercado de alto valor.
- Bajo poder de negociación para personas productoras pequeñas o desarticuladas.

iii. Oportunidades de Mejora:

- Realizar estudios de mercado detallados (con PROCOMER) para identificar nichos, compradores y requisitos específicos (ej. certificaciones ASC/MSC, Orgánico UE, Halal).
- Desarrollar alianzas estratégicas con operadores logísticos especializados en productos perecederos/de alto valor, optimizando rutas y costos.
- Facilitar la conexión productor-mercado (plataformas B2B, ferias, misiones comerciales).
- Promover la obtención de certificaciones de sostenibilidad y calidad como factor diferenciador clave.
- Integrar tecnologías de trazabilidad (ej. blockchain) para garantizar transparencia y confianza.

Eslabón Transversal: Ecosistema de Apoyo y Entorno Habilitador

- Actividades:** regulación, fiscalización, investigación y desarrollo (I+D), transferencia tecnológica, financiamiento, promoción, capacitación, certificación, conservación ambiental.
- Actores Clave:** gobierno (INCOPESCA, MINAE/SINAC/SETENA, MAG, SENASA, MICITT, PROCOMER, INA), Academia (UCR, UNA, UNED, CATIE), Sector Financiero (Banca pública - SBD, banca privada, fondos de inversión), Cooperativismo (INFOCOOP), ONGs conservacionistas y de desarrollo, Organismos de Certificación.

El desarrollo de esta cadena de valor también requerirá el apoyo de varios actores de apoyo. Estos incluyen agencias gubernamentales responsables de la regulación

y la emisión de licencias, instituciones de investigación que brindan experiencia técnica y promueven prácticas sostenibles (como la Universidad Nacional y la Universidad Estatal a Distancia en Costa Rica), instituciones financieras que ofrecen acceso a capital, proveedores de insumos para la acuicultura si ese sector se desarrolla, y proveedores de transporte para el apoyo logístico. Seguidamente se explicarán las fortalezas, debilidades y oportunidades del proceso:

i. Fortalezas:

- Marco institucional existente (aunque perfectible).
- Disponibilidad de mecanismos de financiamiento (ej. SBD).
- Compromiso país con la sostenibilidad como ventaja competitiva.

ii. Debilidades Críticas:

- Fragmentación institucional y falta de coordinación efectiva entre entidades.
- Regulación ambiental/sanitaria que, aunque necesaria, puede ser un cuello de botella si no es ágil, clara y específica para maricultura.
- Acceso a financiamiento aún limitado, especialmente para etapas tempranas o proyectos innovadores percibidos como riesgosos.
- Persistente brecha entre la generación de conocimiento científico y su aplicación escalable en el sector productivo.

iii. Oportunidades de Mejora:

- Establecer una instancia de gobernanza interinstitucional ágil y efectiva (ej. Comisión Nacional de Maricultura) para coordinar políticas y acciones.
- Diseñar instrumentos financieros adaptados a las necesidades específicas del ciclo productivo de la maricultura (capital semilla, crédito, garantías).
- Crear y fortalecer programas formales y efectivos de transferencia tecnológica y extensión.
- Revisar y actualizar el marco normativo para que sea habilitador, basado en ciencia, y equilibre protección ambiental con fomento productivo sostenible.

Con respecto a este último aspecto, la investigación documentada en Agudelo-Martínez *et al.* (2016) ofrece una base sólida para el desarrollo de programas de capacitación y asistencia técnica en el cultivo y procesamiento del pepino de mar, lo que podría fortalecer las capacidades locales y cerrar la brecha entre el conocimiento científico y su aplicación práctica en Costa Rica.

A continuación, se analiza de manera general las fortalezas, debilidades y oportunidades en la comercialización del pepino de mar y macroalgas:

a. Análisis de Fortalezas

Costa Rica posee varias fortalezas potenciales que podrían apoyar el desarrollo de una cadena de valor del pepino de mar. La biodiversidad marina existente, incluidas varias especies de equinodermos (Alvarado *et al.*, 2021), sugiere la presencia de especies adecuadas para la comercialización. El creciente interés nacional en las prácticas de acuicultura sostenible se alinea bien con la necesidad de un desarrollo responsable de este recurso. Además, el potencial de utilizar sistemas IMTA ofrece un enfoque ambientalmente sólido y potencialmente más productivo para el cultivo de pepino de mar.

Una fortaleza crítica en el desarrollo de las cadenas de valor del pepino de mar y las macroalgas en Costa Rica radica en la capacidad de investigación instalada en universidades clave, como la UCR, la UNA y el TEC. Estas instituciones cuentan con grupos especializados en biología marina, acuicultura y biotecnología respectivamente, capaces de generar innovaciones técnicas y científicas para optimizar etapas como el cultivo, procesamiento y certificación de productos.

Por ejemplo, estudios liderados por la UCR han avanzado en estudios ecológicos de *I. fuscus*, mientras que el Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología (CIMAR) explora aplicaciones de macroalgas en cultivos controlados. Esta sinergia académica no solo resuelve desafíos operativos, como la estandarización de prácticas sostenibles, sino que también facilita la transferencia de conocimiento a comunidades locales y exportadores, fortaleciendo la competitividad en mercados que priorizan trazabilidad y sustentabilidad (Alvarado *et al.*, 2021). Además, la vinculación con políticas públicas, como la Estrategia Nacional de Bioeconomía, asegura que la investigación se alinee con prioridades nacionales, transformando la ciencia en un motor tangible para la economía azul.

b. Análisis de Debilidades

Costa Rica actualmente carece de pesquerías de pepino de mar establecidas y de la infraestructura acuícola necesaria. Si el desarrollo se centra únicamente en la recolección silvestre sin una gestión adecuada, existe un riesgo significativo de sobreexplotación, como se ha observado en muchas pesquerías de pepino de mar tropicales a nivel mundial (Conand, 2018; Han *et al.*, 2016).

También es probable que haya una experiencia local limitada en acuicultura y técnicas de procesamiento de pepino de mar, que deberá desarrollarse mediante capacitación y transferencia de tecnología. Finalmente, la industria sería inherentemente dependiente de los mercados internacionales, lo que la haría vulnerable a las fluctuaciones de precios y los cambios en la demanda (Sonnenholzner-Varas, 2021). Abordar estas debilidades mediante inversiones estratégicas, adquisición de conocimientos y gestión proactiva será crucial para construir una cadena de valor del pepino de mar resiliente y sostenible en Costa Rica.

c. Análisis de Oportunidades de Mejora

Existen oportunidades significativas para mejorar la potencial cadena de valor del pepino de mar en Costa Rica mediante la adopción de prácticas exitosas de otros países. La implementación de técnicas de recolección sostenibles y la exploración de la acuicultura son primordiales. Las técnicas de cultivo en áreas cercadas, como se aplican en China para *A. japonicus*, podrían adaptarse a especies nativas adecuadas en Costa Rica (Chang *et al.*, 2004; Han *et al.*, 2016; Jia & Chen, 2001; Mu, 1999; Xie, 2004).

Como mencionan estos mismos autores, estas técnicas implican la liberación de juveniles criados en criaderos en áreas gestionadas para mejorar las poblaciones silvestres. El desarrollo de la producción en criaderos para especies comercialmente valiosas como *I. badionotus*, que se ha estudiado en la vecina Nicaragua, podría proporcionar un suministro constante y reducir la presión sobre las poblaciones silvestres.

La exploración de sistemas IMTA que combinan el cultivo de pepino de mar con otras especies de acuicultura, como se investigó en Nicaragua y se practica con el pepino de arena y la tilapia en otras regiones (Sithisak *et al.*, 2013), también podría mejorar la sostenibilidad y la productividad. La transición hacia métodos de acuicultura y cultivo en áreas cercadas ofrece una vía hacia volúmenes de producción más sostenibles en comparación con la dependencia exclusiva de las capturas silvestres.

La mejora de los métodos de procesamiento es otra área clave. La adopción de las mejores prácticas para el procesamiento, posiblemente basándose en recursos como el manual para la producción en criaderos de *H. scabra* en la India, puede conducir a productos de mayor calidad y a la reducción de las pérdidas poscosecha. La implementación de medidas rigurosas de control de calidad en cada etapa del procesamiento, desde el manejo inicial hasta el secado y envasado final, como se enfatiza en los estudios sobre el procesamiento del pepino de mar (Yu *et al.*, 2010), será esencial para cumplir con los estándares de los compradores internacionales. El procesamiento de alta calidad está directamente relacionado con la obtención de mejores precios en el competitivo mercado global.

La mejora del acceso al mercado y la adición de valor al producto también pueden beneficiar significativamente a la industria del pepino de mar en Costa Rica. El establecimiento de vínculos directos con los compradores internacionales puede reducir la dependencia de múltiples intermediarios, lo que podría aumentar los beneficios para las comunidades locales (Barclay *et al.*, 2019). La exploración de oportunidades para una mayor adición de valor a través de técnicas de procesamiento más avanzadas o el desarrollo de productos de nicho de pepino de mar, como se observa en países con industrias establecidas (Yu *et al.*, 2010), también podría mejorar la rentabilidad.

Como aspecto final a este apartado, la creación de capacidad y la capacitación son cruciales para el éxito a largo plazo de la industria. La capacitación de los pescadores en métodos de recolección sostenibles y cualquier práctica de acuicultura adoptada, y la educación de los procesadores locales en técnicas mejoradas de procesamiento y control de calidad, como se destacó como un factor clave en el desarrollo exitoso de la acuicultura (Hair *et al.*, 2020), garantizará que la industria opere de manera eficiente y sostenible. La transferencia de conocimientos y el desarrollo de habilidades en todos los niveles son fundamentales para construir una cadena de valor del pepino de mar robusta y competitiva en Costa Rica.

3.10. Industrialización

3.10.1 Pepino de mar

El desarrollo de procesos industriales orientados a la agregación de valor al pepino de mar constituye una de las estrategias clave para mejorar la competitividad de este recurso en los mercados internacionales. En el contexto costarricense, la implementación de tecnologías de procesamiento, conservación y transformación puede permitir el posicionamiento del producto más allá de la materia prima, generando oportunidades para la diversificación comercial, la mejora en los ingresos de comunidades costeras y la apertura hacia nichos de mercado especializados.

Procesamiento primario: etapas y estándares

El procesamiento técnico del pepino de mar se inicia inmediatamente después de la cosecha para preservar su calidad y evitar degradación microbiológica. El protocolo básico recomendado por Agudelo-Martínez *et al.* (2016) y validado por FAO (2023) incluye:

- a. Lavado inicial para remover arena, limo y detritos.
- b. Evisceración manual cuidando la integridad de la pared corporal.
- c. Cocción en agua caliente (90-100 °C) durante 20-40 minutos.
- d. Segundo lavado para eliminar restos internos.
- e. Secado solar o térmico (en horno de aire forzado a 40-60 °C) hasta alcanzar humedad <15%.
- f. Clasificación según tamaño, textura, forma y color.
- g. Empaque al vacío o en atmósfera modificada.

Este procedimiento determina en gran medida el valor de mercado del producto seco (*bêche-de-mer*), ya que defectos como sobrecocción, quemaduras o decoloración pueden reducir el precio de exportación hasta en un 70% (Purcell *et al.*, 2014; Harini *et al.*, 2024).

Conservación y prolongación de la vida útil

Las técnicas de conservación no solo buscan garantizar la inocuidad y calidad organoléptica del producto, sino también adaptarse a las exigencias de los mercados internacionales. Entre las tecnologías aplicables se destacan:

- a. Secado solar con estructuras elevadas y malla anti moscas: bajo costo y eficiencia en zonas costeras.
- b. Hornos eléctricos o de gas con ventilación cruzada: permiten control de temperatura y humedad.
- c. Congelado individual rápido (IQF): ideal para bandas musculares o pepinos fileteados.
- d. Empaque en atmósfera modificada (MAP): reduce la oxidación y el crecimiento microbiano.
- e. Uso de antioxidantes naturales: como ácido ascórbico o extractos de plantas marinas.

Estas prácticas extienden la vida útil del producto de semanas a varios meses y reducen las pérdidas postcosecha, permitiendo el acceso a mercados lejanos (FAO, 2023; Hou *et al.*, 2019).

Transformación e innovación de productos

La agregación de valor también se puede lograr mediante la transformación del pepino de mar en productos derivados con mayor margen de ganancia. Según Li *et al.* (2024), los procesos industriales más relevantes incluyen:

- a. Obtención de extractos bioactivos: ricos en sulfatos, colágeno, mucopolisacáridos y péptidos antioxidantes.
- b. Producción de colágeno hidrolizado: para suplementos funcionales, cápsulas, polvos o bebidas.
- c. Elaboración de cosméticos: geles regenerativos, cremas antienviejecimiento y lociones cicatrizantes.
- d. Desarrollo de alimentos funcionales: como sopas deshidratadas, barras energéticas o snacks marinos.
- e. Fermentados o marinados gourmet: para cocina de fusión o alta gastronomía.

Estas líneas de transformación permiten atender públicos diferenciados (salud, belleza, cocina premium) y posicionar el pepino de mar como producto integral con múltiples aplicaciones (Akamine, 2024; Wei & Chang, 2023).

Enfoque estratégico para la competitividad costarricense

El aprovechamiento industrial del pepino de mar en Costa Rica requiere una visión de cadena de valor que considere:

- a. Infraestructura modular y descentralizada: centros de acopio comunitarios, hornos compartidos, plantas piloto.
- b. Transferencia tecnológica adaptada: entrenamiento técnico, protocolos estandarizados, manuales operativos.
- c. Certificaciones sanitarias y de sostenibilidad: BPM, HACCP, orgánico, comercio justo.
- d. Encadenamientos productivos: alianzas con sector turismo, restaurantes, spas, tiendas naturistas.
- e. Narrativa país: biodiversidad, economía azul, maricultura regenerativa.

3.10.2. Macroalgas

Más allá de su recolección o cultivo primario, la industrialización permite transformar las macroalgas en una amplia gama de productos alimentarios, cosméticos, farmacéuticos, agrícolas y biotecnológicos, generando oportunidades de empleo, exportación y diversificación productiva en regiones costeras. Esta sección presenta los principales avances en técnicas de procesamiento, conservación y transformación, así como su relevancia para la competitividad del sector.

Procesamiento primario y manejo poscosecha

El procesamiento de macroalgas inicia con una fase crítica de manejo poscosecha que incluye limpieza, clasificación, deshidratación y almacenamiento adecuado. Estas etapas son esenciales para preservar la calidad, evitar pérdidas y garantizar la inocuidad del producto final. Según Rao & Ravishankar (2022), las técnicas más comunes incluyen:

- a. Lavado con agua salobre o potable para remover sedimentos, epífitas y fauna asociada.
- b. Clasificación manual por especie, color, tamaño y estado de frescura.
- c. Secado solar en estructuras elevadas o túneles solares; o en secadores térmicos a 40–60 °C con ventilación forzada.
- d. Empaque en sacos respirables o bolsas al vacío para transporte o almacenamiento temporal.

Es importante recalcar que, estas operaciones influyen directamente en el rendimiento industrial posterior y en la calidad sensorial de los productos derivados (Langford *et al.*, 2023).

Técnicas de conservación y extensión de vida útil

Las macroalgas frescas presentan alta actividad enzimática y sensibilidad microbiana, por lo que requieren técnicas de conservación adaptadas al tipo de producto y mercado destino. Entre las más relevantes se encuentran:

- a. **Secado térmico controlado:** se realiza mediante hornos eléctricos, de gas o energía solar con flujo de aire forzado. Esta técnica reduce la humedad a menos de un 15%, permitiendo su almacenamiento durante meses sin riesgo microbiológico. Es una opción rentable y de baja tecnología apropiada para zonas costeras con buena insolación (Nova *et al.*, 2020).
- b. **Liofilización (freeze-drying):** consiste en congelar las algas a temperaturas muy bajas (-30 a -50 °C) y luego sublimar el hielo en condiciones de vacío. Este proceso preserva la estructura celular, los pigmentos, las vitaminas y los compuestos bioactivos, siendo ideal para productos farmacéuticos, cosméticos y alimentos funcionales de alta calidad. Aunque el costo energético es elevado, su valor se compensa en mercados premium.
- c. **Congelado rápido individual (IQF):** las algas se enfrían a -35 °C por contacto con aire o nitrógeno líquido. Este proceso mantiene la integridad física del producto y es adecuado para macroalgas destinadas a consumo directo, como *Ulva* y *Gracilaria*, en sopas, ensaladas o preparados gourmet.
- d. **Envasado en atmósfera modificada (MAP):** implica sustituir el oxígeno del empaque por gases inertes como nitrógeno o dióxido de carbono, reduciendo la oxidación y el deterioro microbiano. Esta tecnología es aplicable a productos mínimamente procesados o de cuarta gama.

Transformación y valor agregado

La transformación industrial de macroalgas permite desarrollar productos de alto valor y adaptados a demandas emergentes. A continuación, se describen algunas de las líneas de innovación más destacadas:

- a. **Alimentos funcionales y formulados (Yesuraj *et al.*, 2022)**
 - Galletas, snacks, fideos, hamburguesas, panadería funcional.
 - Cápsulas y bebidas con extractos de calcio, hierro, yodo o compuestos antioxidantes.
 - Condimentos y salsas enriquecidas con polvo de *Ulva* o *Gracilaria*.

La transformación puede incluir procesos de extrusión, aglomeración, mezcla con otras harinas y moldeado, facilitando su incorporación a líneas industriales.

b. Cosmética y dermofarmacia

La industria cosmética aprovecha los polisacáridos (alginatos, fucoidanos), antioxidantes y vitaminas de las algas para:

- Cremas antienvjecimiento y antiinflamatorias.
- Geles hidratantes y lociones reparadoras.
- Máscaras faciales naturales (Bhatt et al., 2022; Jönsson, 2024).

Estos productos requieren etapas de extracción, filtrado, concentración y estabilización que pueden integrarse en procesos semi artesanales o industriales.

c. Agroindustria y bioestimulantes

El uso de macroalgas en agricultura incluye:

- Biofertilizantes líquidos ricos en minerales y fitohormonas.
- Aditivos para piensos animales con propiedades inmunoestimulantes.
- Biocontroladores contra plagas y enfermedades (Nakhate & van der Meer, 2021).

Estas aplicaciones requieren procesos de maceración, fermentación o extracción acuosa controlada.

d. Biotecnología y materiales sostenibles

Los polisacáridos marinos son base para:

- Películas comestibles y envases biodegradables.
- Hidrogeles para liberación controlada de fármacos.
- Textiles ecológicos en mezcla con fibras vegetales (Cotas *et al.*, 2020).

El procesamiento puede implicar etapas de purificación, gelificación y secado con técnicas como la electrohilatura o el secado en lecho fluidizado.

Factores para la competitividad

Para que los procesos de industrialización se traduzcan en competitividad real, se requiere:

- Infraestructura modular y tecnologías apropiadas al contexto local.
- Capacitación técnica para operadores, especialmente en zonas costeras.
- Cumplimiento de normas internacionales: HACCP, orgánico, ISO 22000.
- Desarrollo de cadenas de suministro trazables, éticas y sostenibles.

Como destaca Snethlage *et al.* (2023), el éxito no solo depende del producto final, sino también de las condiciones institucionales, sociales y de gobernanza que aseguren inclusión y sostenibilidad.

3.11. Estructura de costos

Introducción al análisis financiero para inversionistas

La viabilidad de cualquier proyecto de acuicultura, particularmente aquellos que integran especies o sistemas novedosos como el cultivo multitrófico de pepinos de mar y macroalgas, depende críticamente de una evaluación financiera exhaustiva. Para los inversionistas potenciales, comprender la estructura detallada de costos, tanto de capital inicial (CAPEX) como operativos recurrentes (OPEX), así como los factores que impulsan la rentabilidad y los riesgos financieros inherentes, es fundamental. Este capítulo proporciona un análisis financiero diseñado para informar las decisiones de inversión, evaluando la factibilidad económica del cultivo y procesamiento de pepinos de mar y macroalgas en el contexto específico de Costa Rica.

El alcance de este análisis abarca la identificación y estimación de los requisitos de inversión inicial, el desglose de los gastos operativos continuos, la evaluación de los factores clave que influyen en los ingresos y la rentabilidad general, y la identificación de los principales riesgos financieros asociados al proyecto. La metodología empleada consiste en la síntesis de información proveniente de una variedad de fuentes, incluyendo manuales técnicos de cultivo y procesamiento (Agudelo-Martínez *et al.*, 2016; James, 2004; Saavedra *et al.*, 2019), revisiones de la industria acuícola (Han *et al.*, 2016; Alemañ *et al.*, 2019), estudios de mercado (Purcell *et al.*, 2018), y datos económicos y regulatorios específicos de Costa Rica, como normativas de acuicultura y tarifas energéticas (Instituto Costarricense de Electricidad, 2025). Se reconoce la limitación derivada de la inaccesibilidad de ciertos estudios de caso específicos (Hair *et al.*, 2020).

Costos de Capital (CAPEX): Inversión inicial requerida

Los costos de capital (CAPEX) representan la inversión inicial no recurrente necesaria para establecer la operación de acuicultura y procesamiento antes de que se pueda generar cualquier ingreso. Estos costos suelen ser sustanciales y requieren una planificación financiera y presupuestaria meticulosa. A continuación, se detallan los componentes principales del CAPEX para un proyecto de cultivo de pepinos de mar y macroalgas.

- a. **Adquisición/arrendamiento de sitio y adecuación:** este rubro incluye los costos asociados con asegurar los sitios marinos o terrestres adecuados para las instalaciones de cultivo y procesamiento. Implica gastos potenciales para estudios de sitio (evaluaciones ambientales, batimetría), la compra de

terrenos o la negociación de contratos de arrendamiento a largo plazo, y la preparación inicial del sitio (limpieza, nivelación, construcción de caminos de acceso). La selección del sitio tiene implicaciones financieras profundas que van más allá del costo inicial de adquisición o arrendamiento. La proximidad a infraestructura clave como carreteras, puertos y redes eléctricas, junto con la calidad del agua y la exposición a riesgos naturales, influyen directamente tanto en los costos de preparación del sitio (CAPEX) como en los costos operativos a largo plazo (OPEX), tales como transporte y energía. Optar por un sitio más económico en términos de adquisición, pero logísticamente subóptimo (remoto, con mala calidad de agua o expuesto a eventos climáticos) puede resultar en gastos recurrentes significativamente mayores, afectando la rentabilidad sostenida del proyecto. Por lo tanto, la selección del sitio exige un análisis cuidadoso de las compensaciones entre la inversión inicial y los costos operativos futuros.

- b. **Infraestructura de cultivo:** se refiere a las estructuras físicas necesarias para albergar y cultivar los organismos.
- **Pepino de Mar:** requiere instalaciones de criadero (hatchery) con tanques de diversos tamaños, sistemas de tratamiento de agua (filtración, esterilización UV), laboratorios para el manejo de larvas y producción de microalgas (Agudelo-Martínez *et al.*, 2016; James, 2004). Los sistemas de engorde pueden variar desde estanques en tierra, corrales marinos (sea pens), hasta sistemas de ranching que podrían implicar la creación de hábitats artificiales (Chang *et al.*, 2004; Xie, 2004).
 - **Macroalgas:** puede necesitar infraestructura de criadero/nursery similarmente controlada (tanques, sistemas de luz y temperatura, sustratos como cuerdas o redes) para las etapas iniciales. Los sistemas de cultivo en mar abierto suelen emplear líneas largas (long-lines) suspendidas con flotadores y ancladas al fondo, balsas, o sistemas fijos intermareales con redes y estacas (Saavedra *et al.*, 2019).
 - **Consideraciones IMTA:** la Acuicultura Multitrófica Integrada (IMTA) puede requerir diseños específicos para facilitar la co-cultura, como sistemas de agua compartidos o una disposición espacial particular de las estructuras para optimizar los flujos de nutrientes (Watanabe *et al.*, 2012; Giangrande *et al.*, 2020). La elección del sistema de cultivo impacta directamente en el CAPEX inicial. El diseño de la infraestructura con un enfoque modular y escalable representa una estrategia financiera prudente.

Ahora, iniciar con una operación piloto de menor escala permite limitar la inversión inicial y el riesgo asociado, ofreciendo la flexibilidad de expandir la operación de manera incremental a medida que se consolida la experiencia técnica y se confirma la demanda del mercado. Este enfoque por fases es a menudo preferido por los inversionistas, ya que permite validar el concepto de negocio antes de comprometer capitales mayores, mitigando la exposición financiera en las etapas

tempranas del proyecto, que suelen ser las de mayor incertidumbre biológica y de mercado.

c. **Equipamiento esencial:** comprende la compra de maquinaria y equipos necesarios para la operación.

- **Cultivo:** bombas para el manejo de agua, sistemas de aireación (sopladores, difusores), equipos de monitoreo de calidad de agua (sondas multiparamétricas), embarcaciones para acceso y mantenimiento del sitio, equipo de buceo (si es necesario), y equipo de alimentación (si aplica).
- **Procesamiento:** el equipo varía significativamente según el producto. Para pepinos de mar, incluye pailas de cocción, estaciones de eviscerado, tanques o contenedores de salazón, hornos de secado o áreas de secado solar, y maquinaria de empaque (Agudelo-Martínez *et al.*, 2016; Yu *et al.*, 2010). Para macroalgas, se requieren tanques de lavado, equipos de secado (mecánicos o áreas designadas), molinos o trituradoras, potencialmente equipos de extracción para compuestos específicos (ficocoloides), y maquinaria de empaque (Saavedra *et al.*, 2019; Radulovich *et al.*, 2014).
- **General:** vehículos para transporte terrestre, equipamiento de laboratorio (microscopios, etc.), y equipos de seguridad.

d. **Marco regulatorio y permisos en Costa Rica:** Este componente abarca los costos asociados a la obtención de las licencias y permisos necesarios para operar legalmente.

- Se deben identificar y tramitar permisos clave, incluyendo las licencias de acuicultura emitidas por el Instituto Costarricense de Pesca y Acuicultura (INCOPESCA), concesiones de uso de agua otorgadas por el Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), especialmente si se utilizan bienes de dominio público, estudios de impacto ambiental (EIA) según lo requiera la Secretaría Técnica Nacional Ambiental (SETENA), y posibles permisos municipales. El Decreto Ejecutivo No 44111-MAG-MINAE-MOPT, aunque no se enfoca en estos dos productos, establece un marco regulatorio relevante que puede influir o ser análogo a las políticas generales de acuicultura.
- Los costos incluyen honorarios legales y de consultoría para la preparación y seguimiento de las solicitudes de permisos, la realización de los EIA, y la implementación de posibles medidas de mitigación ambiental exigidas por las autoridades. La falta de información pública y detallada sobre las tarifas específicas y los plazos de tramitación para los permisos de acuicultura de INCOPESCA y MINAE introduce una incertidumbre significativa en la planificación del proyecto. Esta ambigüedad regulatoria representa un costo oculto potencial y un riesgo considerable. Los retrasos en la obtención de permisos pueden paralizar el inicio de las operaciones,

generando costos de mantenimiento de activos improductivos y poniendo en peligro la estructura de financiación del proyecto. La necesidad de aprobaciones de múltiples agencias añade complejidad al proceso. Por consiguiente, es indispensable asignar un presupuesto de contingencia sustancial y un cronograma realista para la fase de obtención de permisos.

- **Adquisición de stock inicial:** Incluye los costos de compra de reproductores (para operaciones con criadero propio) o la adquisición de juveniles (pepinos de mar) o plántulas (macroalgas) de proveedores externos. Es crucial considerar aspectos de bioseguridad y calidad genética del stock inicial, factores que influyen en el costo y en el éxito productivo futuro (James, 2004) (Ver Cuadro 6).

Cuadro 6. Resumen Estimado de Costos de Capital (CAPEX) Típicos (Rangos Cualitativos).

Categoría CAPEX	Enfoque Pepino de Mar	Enfoque Macroalgas	Sistema Integrado (IMTA)	Notas
Adquisición/Arrendamiento de Sitio	Medio a Alto	Medio	Medio a Alto	Depende de ubicación (terrestre/marino) y condiciones del mercado inmobiliario/concesiones.
Preparación y Adecuación del Sitio	Medio	Bajo a Medio	Medio	Incluye estudios, limpieza, accesos. Mayor para sistemas terrestres (estanques).
Infraestructura de Criadero (Hatchery)	Alto	Medio a Alto	Alto	Requiere instalaciones controladas y equipamiento especializado.
Infraestructura de Engorde (Grow-out)	Medio a Alto	Medio	Medio a Alto	Varía mucho según el sistema (estanques, corrales, long-lines). Potencial de compartir estructuras en IMTA.
Equipamiento de Cultivo	Medio	Medio	Medio	Bombas, aireadores, botes, monitoreo.
Equipamiento de Procesamiento (Pepino de Mar)	Alto	N/A	Alto	Equipos de cocción, salado, secado, empaque.
Equipamiento de Procesamiento (Macroalgas)	N/A	Medio	Medio	Equipos de secado, molienda, empaque. Extracción requiere inversión adicional.
Permisos, Licencias y	Medio a Alto	Medio a Alto	Medio a Alto	Costos de estudios (EIA), tasas (inciertas), honorarios. Riesgo de

Consultoría Legal/Ambient al				retrasos.
Adquisición de Stock Inicial	Medio	Bajo a Medio	Medio	Costo de reproductores o juveniles/plántulas. La Bioseguridad es clave.
Contingencia (% del Total)	Alto (e.g., 15-25%)	Alto (e.g., 15-25%)	Alto (e.g., 15-25%)	Fundamental para cubrir imprevistos, especialmente regulatorios y de construcción.
Inversión Inicial Total Estimada	Alto	Medio	Alto	Nota: Rangos cualitativos. Las preguntas buscan contar con datos específicos para detallar cifras monetarias. La integración puede optimizar ciertos costos.

Fuente: Elaboración propia basada en Agudelo-Martínez *et al.* (2016), (Saavedra et al., 2019), Yu et al. (2010), y análisis del marco regulatorio costarricense.

- e. **Costos operativos (OPEX): Gastos recurrentes del proyecto:** los costos operativos (OPEX) son los gastos continuos y recurrentes necesarios para mantener en funcionamiento la granja de acuicultura y la planta de procesamiento. La gestión eficiente del OPEX es un factor determinante para la rentabilidad a largo plazo del proyecto. Los principales componentes del OPEX se describen a continuación.
- **Mano de obra:** representa uno de los rubros más significativos del OPEX. Incluye salarios, beneficios y costos asociados del personal necesario en toda la cadena de valor.
 - **Cultivo:** Técnicos especializados para el criadero, operarios para la siembra, monitoreo de los cultivos, mantenimiento de estructuras (limpieza de líneas, redes o corrales) (Saavedra et al., 2019), alimentación (si aplica), cosecha, y potencialmente buzos para operaciones submarinas.
 - **Procesamiento:** personal para la recepción, clasificación, limpieza, eviscerado (pepino de mar), cocción, salado, secado (pepino de mar), (Agudelo-Martínez *et al.*, 2016) secado, molienda (macroalgas), (Saavedra *et al.*, 2019), empaque y control de calidad.
 - **Administración y soporte:** gerencia, personal administrativo, contabilidad, ventas y marketing, seguridad. La estacionalidad de ciertas actividades puede influir en las necesidades de mano de obra temporal. Los sistemas IMTA podrían permitir cierta optimización al compartir personal para tareas comunes de monitoreo y mantenimiento. Es relevante considerar la disponibilidad y costo de mano de obra calificada en la región del proyecto.
 - **Alimentación y nutrición:** los costos de alimentación son un componente principal del OPEX en muchas formas de acuicultura.

- **Pepino de mar:** muchas especies de pepino de mar son detritívoras y pueden alimentarse de los sedimentos naturales o del material orgánico presente en el sistema de cultivo, lo que potencialmente reduce o elimina los costos de alimentación externa en sistemas extensivos o de ranching. Sin embargo, en sistemas más intensivos o durante las fases de criadero y juveniles tempranos, puede ser necesaria la suplementación con dietas formuladas o el cultivo de microalgas (Acosta *et al.*, 2021; Agudelo-Martínez *et al.*, 2016; James, 2004).
- **Macroalgas:** generalmente, las macroalgas obtienen los nutrientes necesarios para su crecimiento directamente del agua de mar circundante, por lo que los costos directos de alimentación son mínimos o nulos en la fase de engorde. No obstante, las etapas de cultivo en criadero pueden requerir el enriquecimiento del agua con medios de cultivo específicos para asegurar un desarrollo óptimo de las plántulas (Saavedra *et al.*, 2019).
- **Beneficio IMTA:** los sistemas IMTA ofrecen una ventaja significativa en este aspecto. Las macroalgas pueden absorber el exceso de nutrientes disueltos (nitrógeno, fósforo) liberados por otras especies cultivadas (si las hubiera) o presentes en el ambiente, mientras que los pepinos de mar pueden consumir los desechos sólidos y detritos. Esto crea un ciclo de nutrientes que reduce la necesidad de insumos externos (alimentos, fertilizantes) y convierte potenciales contaminantes en biomasa valiosa (Agudelo-Martínez *et al.*, 2016).
- **Consumo energético:** el costo de la energía es un factor crítico del OPEX, especialmente en operaciones con bombeo, aireación o procesamiento térmico.
 - Los principales usos de energía incluyen: bombeo de agua para tanques en tierra o sistemas de recirculación, operación de sistemas de aireación, control de temperatura y luz en criaderos, funcionamiento de maquinaria de procesamiento (hornos de secado, molinos, equipos de cocción), sistemas de refrigeración o congelación para almacenamiento, iluminación del sitio y combustible para embarcaciones y vehículos. (Agudelo-Martínez *et al.*, 2016; Saavedra *et al.*, 2019)
 - En Costa Rica, la matriz eléctrica se caracteriza por una alta penetración de fuentes renovables, principalmente hidroeléctrica (aproximadamente 74% en 2023), complementada por geotermia, eólica, solar y biomasa. El Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) es la principal empresa estatal de energía. Si bien esta matriz es favorable desde una perspectiva de sostenibilidad, la fuerte dependencia de la hidroelectricidad introduce una vulnerabilidad significativa a las condiciones climáticas, particularmente durante las estaciones secas o en años de sequía. En estos períodos, el país debe recurrir a la generación térmica con combustibles fósiles, que es considerablemente más costosa. Esta dependencia ha generado

recientemente preocupaciones sobre aumentos tarifarios significativos, y las tarifas industriales en Costa Rica ya se consideran elevadas en comparación con otros países de la región. La volatilidad potencial en los costos de la electricidad, impulsada por factores climáticos y decisiones regulatorias sobre cómo trasladar los Costos Variables de Generación (CVG) a los consumidores, representa un riesgo operativo importante que debe ser cuidadosamente modelado y gestionado, por ejemplo, mediante inversiones en eficiencia energética o la evaluación de generación distribuida.

- **Mantenimiento y reparaciones:** incluye los costos regulares asociados con el mantenimiento preventivo y correctivo de la infraestructura (corrales, líneas, tanques, edificios) y los equipos (bombas, motores de embarcaciones, maquinaria de procesamiento). También abarca medidas para controlar la bioincrustación (fouling) en las estructuras sumergidas, como la limpieza periódica de redes y líneas. (Saavedra *et al.*, 2019)
- **Insumos:** se refiere al costo de los materiales consumibles utilizados en la operación.
 - **Criadero:** cultivos de microalgas y nutrientes, sustratos para el asentamiento de larvas o esporas, y productos químicos para tratamiento de agua o control de enfermedades (cuyo uso debe ser responsable y minimizado) (Agudelo-Martínez *et al.*, 2016; Saavedra *et al.*, 2019).
 - **Procesamiento:** sal (un insumo clave y de volumen considerable para el procesamiento de pepino de mar), materiales de empaque (bolsas, cajas, etiquetas), y suministros de limpieza e higiene. (Agudelo-Martínez *et al.*, 2016)
 - **Generales:** Combustible y lubricantes para embarcaciones y vehículos, suministros de oficina.
- **Monitoreo ambiental y sanitario:** costos asociados a la realización de análisis periódicos de la calidad del agua (parámetros fisicoquímicos y microbiológicos) (Tuwo *et al.*, 2012), la vigilancia de la salud de los organismos cultivados para detectar signos de enfermedad de manera temprana, y potencialmente, el monitoreo ambiental adicional exigido por los permisos de operación para asegurar el cumplimiento de las normativas.
- **Logística y comercialización:** abarca todos los costos incurridos desde la poscosecha hasta la venta final del producto.
 - Incluye el manejo poscosecha, el almacenamiento (que puede requerir refrigeración o condiciones controladas de humedad), el empaque final para el consumidor o mayorista, el transporte terrestre o marítimo hacia los centros de distribución o puertos de exportación, los gastos de marketing

y ventas, y los costos asociados a la documentación y trámites de exportación, más aún, considerando el acceso potencial a mercados como China (Ver Cuadro 7).

Cuadro 7. Desglose Estimado de Costos Operativos (OPEX) Anuales (Rangos Cualitativos por Unidad de Producción o Anual)

Categoría OPEX	Enfoque Pepino de Mar	Enfoque Macroalgas	Sistema Integrado o (IMTA)	Notas
Mano de Obra - Cultivo	Medio a Alto	Medio	Medio a Alto	Depende de la intensidad del sistema y la tecnología.
Mano de Obra - Procesamiento	Alto	Medio	Alto	El procesamiento del pepino de mar es intensivo en mano de obra.
Mano de Obra - Administración y Soporte	Medio	Medio	Medio	Escalable con el tamaño de la operación.
Alimentación y Nutrición	Bajo a Medio	Muy Bajo / Nulo	Bajo	Costo significativo si se requiere alimentación suplementaria para pepinos. Mínimo para macroalgas. Potencial de ahorro en IMTA.
Energía - Electricidad	Medio a Alto	Bajo a Medio	Medio a Alto	Alto consumo en bombeo, aireación y procesamiento térmico (secado pepino). Sujeto a volatilidad de tarifas en Costa Rica.
Energía - Combustible (Botes, Vehículos)	Medio	Medio	Medio	Depende de la distancia al sitio y logística.
Mantenimiento y Reparaciones	Medio	Medio	Medio	Mantenimiento de estructuras marinas, equipos (bombas, motores, maquinaria).
Insumos - Criadero	Medio	Medio	Medio	Microalgas, nutrientes, sustratos.
Insumos - Procesamiento	Alto	Bajo	Alto	La sal es un costo importante para los pepinos. Empaques para ambos.

Monitoreo Ambiental y Sanitario	Bajo a Medio	Bajo a Medio	Bajo a Medio	Análisis de agua, salud animal (Tuwo <i>et al.</i> , 2012). Puede aumentar por requisitos de permisos.
Logística y Comercialización	Medio	Medio	Medio	Almacenamiento, transporte, marketing, costos de exportación.
Renovación de Permisos/Licencias, Tasas	Bajo	Bajo	Bajo	Costos anuales recurrentes.
Seguros	Medio	Medio	Medio	Cobertura de activos, responsabilidad civil, potencialmente stock.
Contingencia (% del Total OPEX)	Medio (e.g., 5-10%)	Medio (e.g., 5-10%)	Medio (e.g., 5-10%)	Para cubrir fluctuaciones inesperadas en costos (energía, reparaciones).
Costo Operativo Total Anual Estimado	Alto	Medio	Medio a Alto	Nota: Rangos cualitativos. La eficiencia operativa y las economías de escala son clave para controlar el OPEX. La integración puede reducir ciertos costos (alimentos).

Fuente: Elaboración propia basada en (Agudelo-Martínez *et al.* (2016), (Saavedra *et al.*, 2019), Acosta *et al.* (2021), análisis de costos energéticos en Costa Rica, y consideraciones operativas generales.

Análisis diferencial de costos: pepino de mar vs. macroalgas

Al comparar directamente las estructuras de costos para el cultivo y procesamiento de pepinos de mar y macroalgas, emergen diferencias significativas tanto en la inversión inicial como en los gastos operativos recurrentes.

En términos de CAPEX, las operaciones enfocadas en pepino de mar generalmente demandan una inversión inicial mayor. Esto se debe principalmente a la necesidad de instalaciones de criadero más complejas y controladas (Agudelo-Martínez *et al.* (2016) y, crucialmente, a los requerimientos de equipamiento para el procesamiento poscosecha, que incluye cocción, salado y secado, procesos que requieren equipos específicos y a menudo costosos (Agudelo-Martínez *et al.*, 2016; Yu *et al.*, 2010). En contraste, el cultivo de macroalgas, si bien requiere una inversión en sistemas de cultivo como líneas largas o balsas y potencialmente un criadero (Saavedra *et al.*, 2019), suele implicar un procesamiento más simple (principalmente secado y molienda), lo que puede traducirse en un CAPEX de

procesamiento inferior.

Las distinciones en OPEX también son notables. El procesamiento del pepino de mar es particularmente intensivo en mano de obra debido a las múltiples etapas manuales como el eviscerado, la manipulación durante la cocción, el salado y el secado (Agudelo-Martínez *et al.*, 2016). Si bien el cultivo de macroalgas también requiere mano de obra para la siembra, mantenimiento (limpieza de líneas) y cosecha, el procesamiento básico podría ser menos demandante en este aspecto, aunque la operación de un criadero de macroalgas también requiere personal técnico especializado (Agudelo-Martínez *et al.*, 2016).

En cuanto a la alimentación, existe un costo potencial variable para los pepinos de mar dependiendo del sistema de cultivo (Acosta *et al.*, 2021), mientras que para las macroalgas este costo es prácticamente nulo en la fase de engorde. Energéticamente, la cocción y el secado mecánico de pepinos de mar pueden consumir más energía que el secado de macroalgas, aunque el secado mecánico de algas también tiene requerimientos energéticos. Finalmente, la sal representa un insumo consumible significativo y recurrente en el procesamiento de pepinos de mar, un costo inexistente para las macroalgas. (Agudelo-Martínez *et al.*, 2016; Saavedra *et al.*, 2019)

Un sistema IMTA que integre ambas especies podría ofrecer sinergias de costos. La posibilidad de compartir infraestructura (embarcaciones, instalaciones en tierra), personal para monitoreo y mantenimiento, y la reducción potencial en la necesidad de insumos (nutrientes para algas absorbidos de desechos, detritos consumidos por pepinos), son ventajas atractivas (Agudelo-Martínez *et al.*, 2016). Sin embargo, la gestión integrada también introduce complejidades operativas al tener que manejar los ciclos de producción y requerimientos específicos de múltiples especies simultáneamente.

Proyección de rentabilidad: factores determinantes y sensibilidad

La rentabilidad de una operación de acuicultura de pepinos de mar y macroalgas no depende únicamente de la gestión de costos, sino también, y de manera crucial, de los ingresos generados, los cuales están sujetos a una serie de factores biológicos, de mercado y operativos. Las proyecciones de rentabilidad son inherentemente inciertas y deben considerar la sensibilidad a estas variables clave.

- a. **Parámetros biológicos:** el rendimiento final de la cosecha, que determina directamente el volumen de producto disponible para la venta, está gobernado por las tasas de crecimiento y supervivencia de las especies cultivadas, así como por la densidad de siembra manejada. Estos parámetros biológicos son altamente sensibles a las condiciones ambientales del sitio de cultivo, incluyendo la temperatura del agua, salinidad, pH y disponibilidad de nutrientes (Seeruttun *et al.*, 2008; Li & Li, 2010; Zhang & Liu, 1998; Tuwo *et*

et al., 2012). Asimismo, las prácticas de manejo, como la calidad de la dieta (si aplica), el control de la densidad para evitar estrés y competencia (Acosta *et al.*, 2021; Sánchez-Tapia *et al.*, 2018), la calidad genética del stock inicial y la implementación de medidas de bioseguridad para prevenir enfermedades (Xue, 2007), son fundamentales. La variabilidad en el desempeño biológico representa uno de los mayores riesgos para la rentabilidad. Eventos inesperados como brotes de enfermedades, floraciones algales nocivas o condiciones ambientales subóptimas pueden reducir drásticamente las tasas de supervivencia o ralentizar el crecimiento, resultando en rendimientos muy inferiores a los proyectados. Esto impacta directamente los ingresos y, por ende, la rentabilidad y el retorno de la inversión. Por ello, las proyecciones financieras deben incluir análisis de sensibilidad que modelen el impacto de variaciones en estos parámetros biológicos clave, y las estrategias de mitigación deben enfocarse en una selección rigurosa del sitio y protocolos de manejo robustos.

- b. **Precios y mercado:** el valor de mercado de los productos finales es el otro componente fundamental de la ecuación de ingresos. Existe una diferencia notable entre los dos grupos: los pepinos de mar procesados (*beche-de-mer*) pueden alcanzar precios elevados, especialmente en los mercados asiáticos donde son considerados un manjar y producto medicinal (Purcell *et al.*, 2018; Conand, 2018; Han *et al.*, 2016). Sin embargo, estos precios pueden ser volátiles, influenciados por la oferta global (incluyendo la pesca extractiva), la demanda fluctuante y cambios regulatorios en los países consumidores o productores (Purcell *et al.*, 2018; Conand, 2018; Barclay *et al.*, 2019). El valor de las macroalgas es más variable y depende de la especie, la calidad poscosecha y el mercado objetivo final, que puede ir desde alimento humano directo, hasta la extracción de ficocoloides (carragenanos, agares, alginatos) para la industria alimentaria y farmacéutica, o su uso como biofertilizantes o aditivos para piensos (Radulovich *et al.*, 2014; Alemañ *et al.*, 2019; Hossain *et al.*, 2021). El mercado global de acuicultura está en crecimiento, pero es esencial analizar las tendencias específicas para los productos y mercados objetivo. Para Costa Rica, el acceso a mercados de exportación, como el potencial acceso al mercado chino, podría representar una oportunidad significativa, pero también requiere cumplir con estándares de calidad y certificaciones internacionales.
- c. **Calidad y rendimiento del producto final:** no solo el volumen, sino también la calidad del producto cosechado y procesado es crucial para maximizar los ingresos. Para los pepinos de mar, factores como el tamaño, la apariencia (integridad, color), la textura después del procesamiento y el contenido de humedad final determinan la clasificación y el precio (Agudelo-Martínez *et al.*, 2016; Yu *et al.*, 2010). Para las macroalgas, la calidad puede referirse a la limpieza, el color, la textura (para consumo directo) o la concentración y

pureza de compuestos específicos como los ficocoloides (si es materia prima para otras industrias). El rendimiento del procesamiento (la relación entre el peso de la materia prima cosechada y el peso del producto final vendible) también impacta directamente la rentabilidad, ya que pérdidas excesivas durante el procesamiento reducen la cantidad de producto comercializable. Las técnicas de procesamiento empleadas son determinantes para ambos aspectos (Agudelo-Martínez *et al.*, 2016; Yu *et al.*, 2010).

- d. **Eficiencias de costos vía IMTA:** como se mencionó anteriormente, la implementación de sistemas IMTA puede mejorar la rentabilidad al reducir costos operativos, principalmente relacionados con la alimentación y el manejo de nutrientes (Giangrande *et al.*, 2020; Watanabe *et al.*, 2012; Cutajar *et al.*, 2022; Pattinasarany *et al.*, 2024). Además, algunos estudios sugieren que la co-cultura puede tener efectos beneficiosos en la salud y crecimiento de las especies involucradas, lo que podría mejorar los parámetros biológicos y, por ende, el rendimiento. La cuantificación precisa de estos beneficios requiere estudios específicos para la combinación de especies y condiciones locales (Ver Cuadro 8).

Cuadro 8. Comparativa de Factores Clave de Rentabilidad y Sensibilidad

Factor Clave	Impacto en Rentabilidad (Pepino de Mar)	Variabilidad/Riesgo (Pepino de Mar)	Impacto en Rentabilidad (Macroalgas)	Variabilidad/Riesgo (Macroalgas)	Notas / Estrategias de Mitigación
Tasa de Supervivencia	Alto	Alto	Alto	Medio a Alto	Optimización de condiciones ambientales (sitio, manejo), bioseguridad (Acosta <i>et al.</i> , 2021; Seeruttun <i>et al.</i> , 2008; Xue, 2007).
Tasa de Crecimiento	Alto	Medio a Alto	Alto	Medio a Alto	Calidad del stock inicial, manejo de densidad, nutrición (si aplica), condiciones ambientales (Acosta <i>et al.</i> , 2021; Sánchez-Tapia <i>et al.</i> , 2018).
Precio de Mercado (Product	Muy Alto	Alto	Medio a Alto	Medio	Calidad del producto, diversificación de mercados, contratos (si es posible), inteligencia

o Procesa do)					de mercado (Purcell <i>et al.</i> , 2018; Conand, 2018). El valor de algas depende mucho del uso final.
Rendimi ento del Procesa miento	Alto	Medio	Medio	Bajo a Medio	Optimización de técnicas de procesamiento, control de calidad, capacitación del personal (Agudelo-Martínez <i>et al.</i> , 2016; Yu <i>et al.</i> , 2010).
Costo de Energía	Medio a Alto	Alto (en Costa Rica)	Bajo a Medio	Alto (en Costa Rica)	Eficiencia energética, evaluación de renovables in situ, monitoreo de tarifas. Impacto mayor en procesos térmicos (secado pepino).
Costo de Mano de Obra	Alto	Medio	Medio	Medio	Optimización de procesos, capacitación, automatización (donde sea viable), gestión eficiente.
Costo de Alimenta ción (si aplica)	Bajo a Medio	Bajo	N/A	N/A	Optimización de estrategias de alimentación, uso de alimento natural, IMTA (Acosta <i>et al.</i> , 2021).
Calidad del Product o Final	Muy Alto	Medio	Alto	Medio	Control riguroso en cosecha y procesamiento, manejo adecuado poscosecha, estándares de calidad.
Potencia l de Rentabili dad General	Alto (pero con Mayor Riesgo)		Medio a Alto (Riesgo Variable)		Nota: Evaluación cualitativa. La rentabilidad final depende de la gestión integral de todos estos factores y requiere modelización financiera detallada.

Fuente: Elaboración propia basada en análisis de la literatura (Purcell *et al.*, 2018; Conand, 2018; Acosta *et al.*, 2021; Agudelo-Martínez *et al.*, 2016) y evaluación de riesgos contextuales.

Evaluación de Riesgos Financieros y Estrategias de Mitigación

Una inversión en acuicultura de pepinos de mar y macroalgas, como cualquier empresa agrícola o industrial, está sujeta a diversos riesgos que pueden impactar su desempeño financiero. La identificación temprana y la planificación de estrategias de mitigación son esenciales para la toma de decisiones de inversión informada.

- a. **Volatilidad de precios de mercado:** este es un riesgo particularmente relevante para el pepino de mar, un producto de alto valor cuyo precio en los mercados internacionales puede fluctuar significativamente debido a cambios en la oferta (incluyendo capturas silvestres), la demanda, las tasas de cambio y las políticas comerciales (Purcell *et al.*, 2018; Conand, 2018; Barclay *et al.*, 2019). Las macroalgas también pueden experimentar fluctuaciones, aunque quizás menos pronunciadas dependiendo del producto final.
 - **Mitigación:** buscar acuerdos de compra a largo plazo con compradores (aunque pueden ser difíciles de obtener), diversificar los mercados geográficos y los segmentos de producto (diferentes calidades o productos derivados), enfocarse en nichos de mercado de alto valor a través de la calidad superior y certificaciones, y desarrollar productos con valor agregado.
- b. **Variabilidad de la producción (riesgo Biológico):** como se discutió en la sección anterior, las fluctuaciones en el crecimiento y la supervivencia debido a factores ambientales (calidad del agua, temperatura, eventos climáticos extremos), enfermedades o problemas genéticos representan un riesgo financiero directo al afectar el volumen de producción.
 - **Mitigación:** selección rigurosa del sitio basada en estudios ambientales detallados para asegurar condiciones óptimas y estables (Félix *et al.*, 2024; Hartati *et al.*, 2021; Deauna *et al.*, 2021), implementación de protocolos estrictos de bioseguridad y manejo sanitario (Xue, 2007), optimización de las prácticas de cultivo (densidad, alimentación) basadas en investigación y monitoreo continuo (Acosta *et al.*, 2021; Sánchez-Tapia *et al.*, 2018), diversificación genética del stock y, potencialmente, diversificación de especies dentro de la granja para no depender de un solo cultivo.
- c. **Incremento en costos de insumos:** el aumento inesperado en el precio de insumos clave puede erosionar los márgenes de ganancia. La energía eléctrica es una preocupación particular en Costa Rica debido a la volatilidad asociada a la dependencia hidroeléctrica y el uso de generación térmica. Otros costos como el combustible, los materiales de empaque, la sal (para pepinos de mar) y la mano de obra también pueden fluctuar (Agudelo-

Martínez et al., 2016).

- **Mitigación:** invertir en tecnologías y prácticas de eficiencia energética, explorar la viabilidad de generar energía renovable en el sitio (e.g., paneles solares), optimizar las estrategias de alimentación para reducir la dependencia de piensos costosos (favoreciendo IMTA), mejorar la productividad laboral a través de la capacitación y la optimización de procesos.
- d. **Riesgos regulatorios y políticos:** los retrasos en la obtención de permisos y licencias, cambios inesperados en la normativa ambiental o de acuicultura, o la imposición de nuevas tasas o requisitos pueden generar costos imprevistos y afectar la viabilidad del proyecto. La falta de claridad en los procesos y costos regulatorios actuales en Costa Rica agudiza este riesgo.
- **Mitigación:** realizar una debida diligencia exhaustiva del marco regulatorio desde las etapas iniciales del proyecto, mantener una comunicación proactiva y transparente con las agencias reguladoras pertinentes (INCOPECA, MINAE, SETENA), asegurar el cumplimiento e incluso superar los estándares ambientales exigidos, construir buenas relaciones con las comunidades locales y autoridades, y desarrollar planes de contingencia para posibles retrasos o cambios normativos.
- e. **Riesgos operacionales y técnicos:** fallas en equipos críticos (bombas, sistemas de aireación, maquinaria de procesamiento), dificultades para encontrar o retener personal calificado, problemas en el escalamiento de la producción desde una fase piloto a una comercial, o fallos en la cadena de frío o logística pueden interrumpir las operaciones y generar pérdidas.
- **Mitigación:** implementar programas rigurosos de mantenimiento preventivo para equipos e infraestructura, invertir en la capacitación continua del personal, planificar un escalamiento gradual y modular de la producción, desarrollar y documentar protocolos operativos estandarizados (SOPs) para todas las fases críticas, y establecer sistemas robustos de control de calidad y logística.

Síntesis financiera y consideraciones clave para la inversión

Este análisis ha delineado la estructura de costos esperada para un proyecto de acuicultura integrada de pepinos de mar y macroalgas en Costa Rica. La inversión inicial (CAPEX) es considerable, particularmente si se incluye un criadero y una planta de procesamiento para pepino de mar, abarcando desde la adquisición y adecuación del sitio hasta la compra de infraestructura, equipos especializados y la obtención de permisos. Los costos operativos (OPEX) recurrentes están dominados por la mano de obra, la energía (con una notable sensibilidad al

contexto costarricense de tarifas elevadas), el mantenimiento y los insumos específicos de procesamiento como la sal para pepinos de mar.

La rentabilidad del proyecto depende de una compleja interacción de factores. Los parámetros biológicos (tasas de crecimiento y supervivencia) y los precios de mercado (especialmente para el pepino de mar) son los motores más potentes, pero también las fuentes de mayor incertidumbre y riesgo (Purcell *et al.*, 2018; Acosta *et al.*, 2021). La calidad del producto final y la eficiencia en el procesamiento son cruciales para capturar el máximo valor (Agudelo-Martínez *et al.*, 2016). La eficiencia operativa, incluyendo la gestión energética y de mano de obra, es fundamental para controlar el OPEX.

Los riesgos financieros clave identificados incluyen la volatilidad de los precios de mercado (Purcell *et al.*, 2018), la variabilidad inherente a la producción biológica, el potencial aumento de los costos energéticos en Costa Rica, y las incertidumbres y posibles retrasos asociados al marco regulatorio y de permisos. La implementación proactiva de las estrategias de mitigación discutidas es vital para mejorar la resiliencia financiera del proyecto.

Es imperativo subrayar que este capítulo ofrece un marco general basado en la literatura disponible y datos contextuales. Una decisión de inversión definitiva requiere necesariamente la realización de un estudio de factibilidad detallado y específico para el sitio propuesto. Dicho estudio debe incorporar cotizaciones actualizadas de proveedores locales para infraestructura y equipos, análisis de costos laborales locales, tarifas energéticas vigentes y proyectadas, evaluaciones ambientales exhaustivas del sitio, y consultas directas con las entidades regulatorias costarricenses (INCOPECA, MINAE, SETENA, ARESEP) para clarificar requisitos, costos y plazos de permisos. Además, se debe desarrollar un modelo financiero robusto que incluya análisis de sensibilidad y planificación de escenarios para evaluar la viabilidad bajo diferentes supuestos operativos y de mercado.

Finalmente, el enfoque de Acuicultura Multitrófica Integrada (IMTA) presenta un potencial interesante para optimizar el uso de recursos, reducir el impacto ambiental y potencialmente mejorar la economía general del proyecto mediante sinergias entre especies (Giangrande *et al.*, 2020; Watanabe *et al.*, 2012). Esto se alinea bien con el compromiso de Costa Rica hacia la sostenibilidad y la economía azul, respaldado por su matriz energética predominantemente renovable. No obstante, los desafíos relacionados con la volatilidad de costos energéticos y la necesidad de navegar eficientemente los procesos regulatorios deben ser gestionados cuidadosamente para asegurar el éxito a largo plazo de la inversión.

3.12. Insumos

Se realizó una búsqueda exhaustiva de instituciones y empresas que cuentan con la capacidad para suplir integralmente los requerimientos de un laboratorio. Es importante recalcar que, en el caso particular de los equipos para sistemas de filtración de agua, estos deben ser adquiridos mediante importación, dado que la oferta nacional de insumos especializados para acuicultura es limitada.

En este sentido, se recomienda de manera especial a la empresa SOLACUA, la cual dispone de los contactos y mecanismos necesarios para importar prácticamente cualquier insumo requerido en proyectos de acuicultura.

Con base en la experiencia nacional, estas son algunas de las empresas que han sido utilizadas con éxito para la dotación de laboratorios en instituciones como el PMP, la Universidad Nacional y el Instituto Costarricense de Pesca y Acuicultura (INCOPESCA).

Además, todas estas empresas cuentan con los debidos avales para participar en procesos de contratación administrativa a través de la plataforma SICOP, lo que garantiza su idoneidad y cumplimiento con los requisitos legales y técnicos establecidos por la normativa nacional (Ver Cuadro 9).

Cuadro 9. Empresas dedicadas a la venta e importación de productos utilizados en la acuicultura y sus respectivos contactos.

Empresa / Nombre / Equipo de laboratorio	Teléfono
Advance Laboratorios	4030 0183
Prelab	2297 2900
Isasa Latam	2432 5712
Vida en la Tierra	2282 0100
Scanco Tecnología	2215 3555
Tecno Diagnóstica	4032 6060
Biocientífica Internacional	2272 3700
Capris	800-022-7747
Equipar CR CA	2280 4658
Diprolab de Centro America Corp	2234 8242
Goltech de Costa Rica	4070 5500
Servicios Analíticos Sasa	2283 7070
Import Lab	85941653
Romanas Lacost	2248 0200
SOLME RC	4070 4711
Instrumentación Industrial	2444 5040

Desarrollos Internacionales de Salud	2102 0935
Sistemas de filtrado para agua	
Corporación Font	2296 9010
Zebol	2437 7980
Alrotek	2452 1046
Satec	2233 8111
SOLACUA	8312 3297
Paul li	8421 3748
Piscinas Aqua Star	2265 5555
Piscina Crystal	6212 2432
Químicos	
Audrain y Jiménez	2227 2064
Tecno Diagnóstica	4032 6060
Fibra (Jaulas Y tanques)	
Serviflex	2433 7010
Redes para jaulas	
El Cabécar Puntarenas	2661 1093
Ferretería APUI	2661 3606
Ferretería EPA	2224 4110
Alimentos para animales	
Solacua	8312 3297
Satec	2233 8111
Paul Li	8421 3748
Belina	2430 0527
Biomar	2668 3300

3.13. Financiamiento local

El presente cuadro reúne una compilación de instituciones nacionales e internacionales, tanto públicas como privadas, que ofrecen apoyo financiero, técnico y organizativo para proyectos de maricultura en Costa Rica a nivel general y de las especies comunes en Costa Rica ya que como se ha explicado en los puntos anteriores la maricultura de pepinos de mar y macroalgas es incipiente en nuestro país. (Ver Cuadro 10).

Cuadro 10. Posibles instituciones dedicadas a la financiación de proyectos.

Institución / Programa	Tipo de apoyo	Aplicabilidad en Maricultura
AMANGARA	Apoyo financiero y capacitación a emprendedores de zonas rurales e indígenas	Sí, especialmente para proyectos comunitarios sostenibles
Asociación Costa Rica por Siempre	Fondos para conservación marina y economía azul	Sí, en proyectos de conservación marina
AUGE-UCR	Incubadora de empresas, mentoría y vinculación con financiamiento	Sí, si el proyecto tiene base innovadora o tecnológica
BAC San José	Créditos empresariales para PYMES con enfoque de sostenibilidad	Sí, si el proyecto cumple con criterios de viabilidad financiera
BCIE	Créditos para MIPYMES a través de intermediarios financieros	Sí, para fortalecer el sistema financiero que atiende a MIPYMES
BID	Financiamiento para proyectos de desarrollo sostenible	Sí, especialmente en iniciativas de cambio climático y biodiversidad
BNCR	Líneas de crédito para PYMES en maricultura	Sí, para financiamiento de empresas en el sector
BIOFIN (PNUD)	Mecanismos financieros sostenibles para biodiversidad	Sí, en proyectos que promuevan la biodiversidad marina
CELIEM	Capacitación y apoyo técnico a emprendedoras y proyectos sociales	Sí, especialmente si hay liderazgo femenino o enfoque social
Conservación Internacional	Apoyo a proyectos de restauración y conservación marina	Sí, en iniciativas de conservación y restauración de ecosistemas marinos
Cooperativas	Diversos tipos de crédito y apoyo organizacional colectivo	Sí, para iniciativas productivas colectivas y sostenibles
DINADECO	Fondos no reembolsables para asociaciones de desarrollo comunal	Sí, si el proyecto se canaliza a través de asociaciones comunales
FAO	Asistencia técnica y fondos para acuicultura sostenible	Sí, en proyectos de acuicultura y maricultura
Fondo Conjunto de los ODS (ONU y gobierno)	Financiamiento a programas de desarrollo local	Sí, si el proyecto contribuye a los Objetivos de Desarrollo Sostenible

Fondo de Preinversión (MIDEPLAN)	Financiamiento para estudios de preinversión en proyectos públicos	Sí, si el proyecto requiere estudios previos para su implementación
Fundecooperación	Créditos verdes y asesoría técnica para proyectos sostenibles	Sí, en proyectos que promuevan la sostenibilidad ambiental
FUNDES	Fortalecimiento de MIPYMES a través de programas de desarrollo competitivo	Sí, para mejorar la competitividad de empresas en maricultura
GIZ - Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit	Asistencia técnica y financiera a través de cooperación alemana	Sí, especialmente en proyectos relacionados con energía renovable y ambiente
IMAS	Fondos para proyectos productivos en comunidades vulnerables	Sí, en proyectos que mejoren las condiciones de vida en comunidades costeras
INAMU	Fondos y formación para mujeres emprendedoras	Sí, en proyectos liderados por mujeres
INDER	Apoyo financiero y técnico a proyectos rurales	Sí, en iniciativas que promuevan el desarrollo rural
INFOCOOP	Créditos y asistencia técnica para cooperativas	Sí, si el proyecto se organiza bajo una estructura cooperativa
INA	Capacitación y asesoría para formular planes de negocio	Sí, como apoyo inicial para preparar y formular proyectos de maricultura
MEIC - Sistema de Apoyo a Emprendedores	Orientación empresarial y acceso a financiamiento	Sí, para orientación general y conexión con entidades financieras
Programa Descubre (PROCOMER)	Promoción de oportunidades y conexión con financiamiento	Sí, en proyectos con potencial exportador
PROCOMER	Apoyo técnico y financiero en programas de exportación e inversión	Sí, para proyectos con potencial exportador
PRONAE (MTSS)	Subsidios y capacitación para personas desempleadas o en vulnerabilidad	Sí, si el proyecto busca generar empleo en comunidades vulnerables
SBD	Crédito, avales, capital semilla a través de intermediarios	Sí, si el emprendimiento está formalizado y se ubica en zona rural costera
UNED Impulsa (Banca para el Desarrollo)	Capital semilla, acompañamiento y asesoría	Sí, para emprendimientos en etapas iniciales

Además de la amplia red de instituciones identificadas, el *Plan Nacional de Desarrollo Pesquero y Acuícola 2020-2025* destaca una serie de mecanismos de financiamiento que pueden potenciar el desarrollo de proyectos de maricultura en

el país. Uno de los pilares fundamentales es el fortalecimiento del SBD, promovido como una fuente clave para canalizar productos financieros adecuados a las necesidades del sector pesquero y acuícola. Asimismo, se contempla la articulación de convenios institucionales y alianzas estratégicas con entidades como el INA, IMAS, INDER, INAMU y otros actores clave, con el fin de facilitar tanto recursos financieros como capacitación técnica especializada.

El plan también subraya la importancia de acceder a fondos no reembolsables dirigidos a poblaciones vulnerables, los cuales son canalizados a través de programas como FIDEIMAS, FOMUJERES y PRONAE. Estos fondos representan una herramienta estratégica para empoderar a mujeres, jóvenes y comunidades costeras en condición de pobreza que desean incursionar en la maricultura. En la misma línea, se enfatiza la necesidad de promover líneas de crédito flexibles en colaboración con entidades bancarias y cooperativas, adaptadas a las realidades de los pescadores artesanales y pequeños acuicultores.

Adicionalmente, se contemplan incentivos específicos para proyectos de maricultura sostenible, en los cuales destacan los mecanismos financieros ofrecidos por programas verdes como los de Fundecooperación. Finalmente, se reconoce el valor del aprovechamiento de recursos provenientes de la cooperación internacional, haciendo énfasis en la gestión articulada con organismos como la FAO, BID, BCIE y fondos multilaterales como BIOFIN y GIZ, todos los cuales pueden tener un impacto significativo en la consolidación de proyectos con enfoque ambiental, territorial y socialmente justo.

3.14. Tramitología y legislación

En el contexto costarricense, tanto los pepinos de mar (Holothuroidea) como las macroalgas marinas son especies sujetas a regulaciones específicas debido a su clasificación legal como parte de la biodiversidad silvestre del país. Su aprovechamiento productivo, especialmente con fines acuícolas, implica un riguroso proceso de gestión institucional, comenzando por la autorización para realizar investigaciones científicas.

A pesar de que estas especies han sido tradicionalmente contempladas en propuestas de maricultura como alternativas sostenibles para la diversificación productiva y conservación marina, su inclusión formal en la “Lista de especies de interés acuícola” de INCOPECA ha sido objeto de revisión reciente. En el acuerdo AJDIP/057-2023, la Junta Directiva de INCOPECA (2023) aprobó una lista ampliada que incluía diversas especies de pepinos de mar como *Holothuria inornata*, *Holothuria atra*, *Isostichopus fuscus* y *Holothuria theeli*. Por su parte, entre las macroalgas se contemplaron especies como *Anadyomene stellata*, *Caulerpa chemnitzia*, *Codium taylorii*, *Codium isthmocladum*, *Codium spp.*, *Halimeda opuntia*, *Halimeda discoidea*, *Cladophora sp.*, *Chaetomorpha sp.*, *Ulva lactuca*, *Ulva*

spp., *Padina spp.*, *Dictyota spp.*, *Spatoglossum schroederi*, *Sargassum liebmanni*, *Sargassum acinarium*, *Sargassum polyceratum*, *Sargassum fluitans*, *Sargassum natans*, *Turbinaria turbinata*, *Asparagopsis taxiformis*, *Spyridia filamentosa*, *Gelidiella acerosa*, *Hypnea musciformis*, *Gracilaria domingensis*, *Gracilaria sp.*, *Gracilariopsis sp.* y *Halymenia*

No obstante, este acuerdo fue dejado sin efecto mediante el AJDIP/094-2023, en atención a una solicitud del Ministerio de Ambiente y Energía, con el objetivo de someter la lista a una revisión integral por parte de la Comisión de Coordinación Científico Técnica (CCCT) del INCOPESCA. Actualmente, esta comisión se encuentra en proceso de análisis y deliberación, y no existe certeza sobre si dichas especies serán incluidas oficialmente en una futura lista aprobada por la Junta Directiva.

Mientras tanto, cualquier iniciativa orientada a la recolección, observación o cultivo experimental de estas especies debe enmarcarse en los procedimientos establecidos por el SINAC, dado que siguen siendo reguladas por la Ley de Conservación de la Vida Silvestre (Ley N.º 7317). Por tanto, el punto de partida obligatorio es la presentación de una solicitud formal de investigación, mediante el formulario PI-01 (SINAC, sf) y cumpliendo con los requisitos del “Reglamento para la investigación sobre biodiversidad silvestre” del MINAE (SINAC, sf).

Este trámite debe gestionarse ante la Oficina Regional del Área de Conservación correspondiente al sitio geográfico donde se pretenda realizar la colecta o muestreo (p. ej., Área de Conservación Pacífico Central, Tempisque, etc.). La solicitud debe incluir, entre otros documentos: un proyecto de investigación, carta de respaldo institucional, plan de comunicación de resultados, copia de identificación y fotografías recientes del solicitante. En caso de recolección, también debe detallarse el tipo y cantidad de material biológico a recolectar, el destino de los especímenes y la justificación científica de su uso.

Cabe destacar que el permiso otorgado por SINAC no habilita por sí solo el desarrollo comercial del cultivo, sino que representa únicamente una autorización para investigación con fines no comerciales. Todo desarrollo posterior con fines productivos requerirá una resolución de INCOPESCA, en caso de que las especies se incorporen oficialmente como de interés acuícola, conforme a la Ley N.º 8436 y sus disposiciones ejecutivas complementarias.

Por tanto, se recomienda a las instituciones, universidades y cooperativas interesadas en promover cultivos de pepinos de mar o macroalgas, iniciar desde ya con investigaciones piloto autorizadas conforme a la normativa vigente, de modo que se genere evidencia técnica robusta que respalde futuras solicitudes de inclusión de estas especies en las listas oficiales de INCOPESCA (Ver siguiente figura).



Figura 12. Resumen de Legislación acuícola de Costa Rica.

Ahora es importante recalcar que a nivel Latinoamericano las legislaciones referentes a organismos marinos como macroalgas son limitadas, por ejemplo, en el siguiente cuadro (Méndez *et al.*, 2024) se muestra el número de legislaciones de algunos países latinos referente a la producción de organismos marinos y cuántas específicamente en organismos como macroalgas (Ver Cuadro 11).

Cuadro 11. Legislaciones existentes en Latinoamérica destinadas a la acuicultura.

País	Número de legislaciones relacionadas en acuicultura	Especificidad en macroalgas	Tipo de riesgos abordados	Comentarios generales
Argentina	11	Escasa, parte de legislación general de acuicultura	Principalmente riesgos ecológicos, poca mención de macroalgas	Escasa mención a la bioseguridad de macroalgas; legislación basada en acuicultura general y maricultura.
Brasil	6	General, legislación vinculada a otras especies (p.ej., camarones)	Prevención (ecológicos), sin foco en riesgos económicos o ambientales	Legislación incipiente, falta de desarrollo de cultivo de macroalgas.
Chile	21	Alta especificidad, vinculada a crisis de <i>Gracilaria chilensis</i> y plagas como <i>Rhizoclonium</i>	Énfasis en prevención ecológica (plagas y especies invasoras), poca atención a riesgos económicos	Es el país con legislación más específica y desarrollada para macroalgas; surge de problemas reales con plagas.
Colombia	2	Muy escasa, parte de acuicultura general	Prevención ecológica, pero limitada a maricultura general	Desarrollo de cultivo de macroalgas casi inexistente; poca legislación específica.
México	7	General, con énfasis en acuicultura de especies como	Foco en prevención y cuarentena para evitar introducciones accidentales	Carencia de planificación espacial marina limita el crecimiento de macroalgas.

		camarón y moluscos		
Perú	29	Ligera especificidad, pero más enfocada a biodiversidad y contaminación	Aborda biodiversidad, toxicidad, perturbaciones físicas y servicios ecosistémicos	Legislación técnica con base en IMARPE; la producción de macroalgas en Perú es incipiente y principalmente depende de recolección natural.

3.15. Incentivos del sector

En el *Plan Nacional de Desarrollo de la Pesca y la Acuicultura 2025-2030*, el Instituto Costarricense de Pesca y Acuicultura (INCOPESCA) establece como una de sus metas estratégicas la promoción de un sistema de incentivos que fortalezca la inversión en el sector acuícola y marino-costero, con una visión integral de sostenibilidad, equidad y gobernanza territorial. En el documento se destaca la importancia de identificar subsidios, diseñar políticas públicas efectivas y establecer mecanismos regulatorios y financieros que contribuyan a dinamizar este sector clave para el desarrollo de las comunidades costeras de Costa Rica.

El plan reconoce que la acuicultura es una actividad con altos riesgos productivos y financieros, dado su carácter biológico, ambiental y técnico. Sin embargo, resalta también su enorme potencial como fuente de empleo, alimento y sostenibilidad económica, siempre que cuente con un entorno de apoyo institucional sólido. En este sentido, se plantea la necesidad de fomentar alianzas con universidades públicas, centros de investigación, entidades técnicas y organizaciones de base comunitaria que puedan aportar su experiencia y acompañamiento a proyectos acuícolas, aumentando sus probabilidades de éxito.

Asimismo, el documento subraya la relevancia de contar con un marco jurídico claro y moderno que ofrezca seguridad a las inversiones y reduzca las barreras para la formalización de actividades productivas. En esta línea, destaca como un avance reciente la implementación del Decreto Ejecutivo N.º 42755-MINAE (MINAE, 2020), conocido como D5, que regula la maricultura en aguas del dominio público del Estado costarricense. Este decreto ha representado una mejora significativa en términos de simplificación de trámites, reducción de costos administrativos y claridad en los procesos de autorización para el establecimiento de granjas marinas, lo que ha generado nuevas oportunidades para emprendedores y organizaciones costeras.

El plan también propone establecer incentivos económicos, financieros y fiscales diferenciados, priorizando el acceso a fondos no reembolsables, capital semilla y productos financieros adaptados a las condiciones del sector. Se hace énfasis en

la necesidad de crear políticas interinstitucionales que articulen el accionar de entidades como el IMAS, INDER, INA, INAMU y el propio Sistema de Banca para el Desarrollo (SBD), permitiendo no solo la financiación de proyectos, sino también el fortalecimiento de capacidades, infraestructura y encadenamientos productivos.

En complemento, se reconoce la importancia de la zonificación técnica del espacio marino como herramienta de política pública que permitiría asignar áreas adecuadas para la maricultura bajo criterios socioambientales, facilitando la planificación territorial, el otorgamiento de concesiones y la mitigación de conflictos por uso del espacio. Finalmente, se destaca que el fortalecimiento de capacidades para la gestión de fondos de cooperación internacional, como los provenientes de FAO, BCIE, BID o programas como BIOFIN, representa una oportunidad clave para consolidar un ecosistema de incentivos con enfoque territorial, inclusivo y resiliente.

3.16. Valor agregado a través del conocimiento

La maricultura de pepinos de mar y macroalgas en Costa Rica requiere una estrategia de desarrollo sustentada en la innovación tecnológica y el conocimiento científico. Para alcanzar la competitividad, es necesario mejorar diversos aspectos técnicos que inciden directamente en la calidad del producto final, tales como:

Mejora genética y reproducción

En el caso del pepino de mar, en especies como *Isostichopus fuscus* y *Holothuria atra*, se identifican oportunidades para mejorar su rendimiento mediante la selección genética enfocada en mayor tasa de crecimiento, resistencia a enfermedades como el Síndrome de Úlcera Cutánea (SUD), y aumento en la concentración de compuestos bioactivos. La caracterización genética de poblaciones locales es crucial para garantizar una base sólida de reproducción y conservar la biodiversidad.

En términos reproductivos, desarrollar protocolos específicos para la inducción al desove, optimizar la fertilización y mejorar el cultivo larval con dietas basadas en microalgas específicas sería un importante avance para la industria emergente. Asimismo, el establecimiento de bancos de reproductores y la colaboración entre universidades como la UCR y la UNA, junto con INCOPESCA, fortalecen esta línea de acción.

Para macroalgas, *Codium fragile*, *Ulva lactuca*, *Gracilaria spp.* y *Sargassum spp.*, la selección de cepas debe orientarse a mejorar el crecimiento y la producción de compuestos bioactivos. La investigación local es clave para asegurar la adaptación a las condiciones ambientales del país. Además, se deben perfeccionar técnicas de propagación en laboratorio y el cultivo de juveniles o plántulas bajo condiciones controladas.

Sistemas de cultivo y manejo

La implementación de tecnología avanzada en sistemas de cultivo contribuye significativamente a la eficiencia y sostenibilidad del proceso productivo. En pepinos de mar, se deben considerar alternativas como cultivo en fondo, corrales, jaulas sumergibles y sistemas de maricultura multitrófica. Para las macroalgas, el enfoque debe estar en sistemas de línea larga para *Gracilaria* y *Sargassum*, así como balsas o tanques en tierra para *Ulva* o *Codium*.

Así mismo, tomar en cuenta el monitoreo ambiental en tiempo real mediante sensores (IoT), la aplicación de inteligencia artificial para predicción de eventos y automatización de tareas, son herramientas clave que incrementan la resiliencia del cultivo ante cambios ambientales.

Nutrición y sanidad

Es necesario desarrollar dietas formuladas específicas para pepinos de mar, ajustadas a sus requerimientos nutricionales. Esto incluye proteínas, lípidos, carbohidratos y vitaminas esenciales. La utilización de ingredientes locales y sostenibles, como subproductos agroindustriales, representa una ventaja adicional.

Bioseguridad y manejo sanitario

Se deben establecer protocolos de bioseguridad robustos, apoyados en el conocimiento de patógenos específicos y estrategias de cuarentena. El uso de probióticos y prebióticos también se considera una alternativa para mejorar la salud de los organismos sin recurrir a antibióticos.

Además, se promueve el uso de herramientas moleculares como la PCR para la detección temprana de enfermedades.

Cosecha y poscosecha

Las buenas prácticas en la cosecha y el manejo poscosecha son fundamentales para preservar la calidad del producto. En pepinos de mar, se recomienda la recolección manual y selectiva, minimizando el estrés. En el caso de las macroalgas, la cosecha debe realizarse en el momento óptimo para maximizar el contenido bioquímico, utilizando técnicas mecanizadas cuando sea posible.

En el manejo poscosecha, para pepinos se busca mejorar los procesos de evisceración, secado y conservación. Para macroalgas, los métodos de limpieza y secado deben orientarse a preservar compuestos sensibles, como pigmentos y antioxidantes.

Valor agregado y transformación

El desarrollo de productos derivados de alta calidad es una vía clave para incrementar el valor económico de la maricultura. Para pepinos de mar se promueve el desarrollo de extractos nutricionales, suplementos alimenticios, ingredientes gourmet y productos listos para cocinar. La validación científica de la bioactividad de sus compuestos (saponinas, colágeno, etc.) es esencial.

Y para el caso de las macroalgas se destaca la obtención de carragenanos, fucoidanos, alginatos, ulvanos, pigmentos y compuestos antioxidantes. Estos pueden ser aprovechados en industrias alimentarias, farmacéuticas y cosméticas.

Procesos sostenibles

La transformación industrial debe regirse por principios de sostenibilidad y eficiencia. Se recomienda emplear técnicas verdes de extracción como la extracción asistida por ultrasonido o por microondas, así como el uso de fluidos supercríticos o métodos enzimáticos. Se recomienda el uso del enfoque de biorrefinería, que permite la obtención secuencial de varios productos a partir de una misma biomasa, optimiza el uso de los recursos y minimiza los residuos.

Certificación, trazabilidad y marketing

Obtener certificaciones como orgánica, ASC, MSC o comercio justo fortalece el posicionamiento de los productos en mercados premium. Además, se plantea el uso de blockchain para asegurar la trazabilidad e incorporar códigos QR que permitan al consumidor conocer el origen y características del producto.

En el ámbito del marketing, debe liderar estrategias basadas en análisis de mercados, perfiles de consumidores, y tendencias globales en alimentación saludable y sostenible. La marca país "Esencial Costa Rica" puede jugar un rol importante.

Articulación y ecosistemas de innovación

El fortalecimiento de la cadena de valor exige cooperación entre instituciones, centros de investigación y el sector privado. Se propone la creación de clústeres de maricultura de alto valor, alianzas público-privadas y redes de transferencia tecnológica. Además, el intercambio digital de información técnica y los programas de capacitación liderados por entidades como el INA, UCR, UNA y CIMAR serán fundamentales para asegurar el crecimiento sostenible del sector.

3.17. Principales hallazgos

Durante el proceso de investigación desarrollado para la elaboración del portafolio técnico sobre maricultura en Costa Rica, centrado en pepinos de mar y macroalgas, se recopilaron, sistematizaron y analizaron múltiples fuentes técnicas, científicas, institucionales y de campo que permitieron construir una visión integral del potencial y limitaciones del sector. A continuación, se presentan de forma ampliada los principales hallazgos, organizados en torno a tres ejes fundamentales: oportunidades de mercado, desafíos de producción y potencial de sostenibilidad, todos ellos interrelacionados entre sí y decisivos para orientar futuras inversiones y políticas públicas.

Oportunidades de mercado

Uno de los descubrimientos más relevantes del estudio es la identificación de un entorno de mercado favorable para productos derivados tanto de pepinos de mar como de macroalgas. En el caso de los pepinos de mar, especies como *Isostichopus fuscus*, *Holothuria mexicana*, *Isostichopus badionotus* y *Apostichopus parvimensis* cuentan con una demanda consolidada en países asiáticos, donde son altamente valoradas por sus propiedades medicinales y nutricionales. Su comercio se caracteriza por precios altos, escasez de oferta legal y un consumidor dispuesto a pagar por trazabilidad y sostenibilidad.

En cuanto a las macroalgas, el estudio identifica especies nativas con alto valor potencial como *Gracilaria spp.*, *Ulva spp.*, *Chaetomorpha spp.*, *Sargassum spp.* y *Eucheuma isiforme*, las cuales pueden ser cultivadas y transformadas para diversos usos. Se detectó una expansión del mercado global en sectores como:

- Alimentación humana (snacks saludables, harina rica en proteínas, ingredientes funcionales, sustitutos de carne)
- Industria cosmética (cremas, tónicos, exfoliantes con extractos naturales)
- Agricultura (biofertilizantes, mejoradores de suelo)
- Biotecnología (empaques biodegradables, bioplásticos, producción de biomasa energética)

Se identifican oportunidades en la producción de productos de valor agregado como extractos, geles, aceites, polvos, cápsulas, hojas secas y presentaciones congeladas. Estas formas de transformación permiten diversificar los canales de venta y acceder a mercados gourmet, naturistas o industriales, tanto para pepinos de mar como para macroalgas.

Desafíos en la producción

No obstante, el alto potencial, existen retos significativos que deben ser atendidos para lograr una producción estable, escalable y competitiva de ambos recursos. En

el caso de los pepinos de mar, se requiere mayor estandarización de protocolos de reproducción y engorde, especialmente en condiciones controladas. Las tasas de supervivencia larval aún son variables y dependen de condiciones físico-químicas específicas, manejo experto y seguimiento técnico constante. La calidad del alimento, la densidad poblacional y la bioseguridad son factores determinantes del éxito productivo.

Para las macroalgas, los desafíos principales están en la selección adecuada de especies según zona y época del año, la definición de técnicas óptimas de cultivo (flotante, en estructuras sumergidas o en tierra), el manejo poscosecha y la reducción de pérdidas por deterioro. A nivel operativo, la infraestructura en campo es aún incipiente para ambos productos, y se requiere inversión en centros de acopio, plantas de secado, instalaciones para desalinización y sistemas de conservación en frío para ampliar la vida útil del producto.

También se identificaron cuellos de botella logísticos como la dificultad para transportar biomasa fresca desde sitios de producción remotos hasta centros urbanos o puntos de exportación. Estos aspectos limitan la eficiencia del modelo de negocio y requieren soluciones mediante cooperación interinstitucional, desarrollo de clústeres y tecnologías móviles de procesamiento.

Potencial de sostenibilidad

Los pepinos de mar y las macroalgas presentan un alto potencial para integrarse en esquemas de economía circular y maricultura sostenible. Los pepinos de mar cumplen una función ecológica de reciclaje de materia orgánica, ya que se alimentan de sedimentos ricos en detritos. Su presencia puede mejorar la calidad del fondo marino en zonas impactadas por sobrepesca o acuicultura tradicional. Las macroalgas, por su parte, capturan carbono, nitrógeno y fósforo, funcionando como sumideros naturales de gases de efecto invernadero y nutrientes en exceso. Esto las convierte en aliadas estratégicas para mitigar los impactos del cambio climático y la eutrofización costera.

La implementación de sistemas multitróficos integrados (IMTA), que combinan cultivos de pepinos de mar, macroalgas y otras especies como moluscos o peces herbívoros, es una de las recomendaciones clave surgidas del estudio. Este enfoque no solo mejora el rendimiento económico del área de cultivo, sino que reduce el uso de insumos externos y el impacto ecológico de las operaciones. También permite diversificar riesgos ante fluctuaciones de mercado o condiciones climáticas adversas.

El marco legal vigente, especialmente el Decreto Ejecutivo N.º 42755-MINAE (MINAE, 2020), ha representado un avance sustancial al simplificar los procesos de concesión de espacio marino costero y fomentar la formalización de iniciativas comunitarias. Esta normativa favorece el acceso legal a zonas aptas para

maricultura y reduce los tiempos de espera para permisos, incentivando la inversión nacional y extranjera. Dicho marco aplica tanto para iniciativas de cultivo de pepinos de mar como de macroalgas, permitiendo desarrollar ambas líneas productivas de manera paralela o integrada.

Apoyo institucional e infraestructura disponible

Otro hallazgo relevante es la existencia de infraestructura e instituciones públicas y privadas interesadas en apoyar el desarrollo de la maricultura en Costa Rica. Existen instalaciones previamente habilitadas que pueden adaptarse o ampliarse para proyectos de pepinos de mar y macroalgas, tales como laboratorios universitarios, centros de investigación marina, estaciones biológicas, viveros comunitarios y plataformas técnicas asociadas al PMP y universidades públicas.

Asimismo, varias entidades han mostrado disposición para colaborar técnica y financieramente con proyectos que aborden ambos productos marinos, incluyendo universidades públicas (UNA, UCR, UNED), Fundecooperación, el INA, organizaciones no gubernamentales nacionales e internacionales, incubadoras como AUGÉ-UCR, y organismos multilaterales como la FAO y el PNUD. Esta red de apoyo puede brindar asistencia en áreas como capacitación técnica, acceso a crédito, acompañamiento en trámites legales, diseño de modelos de negocio, comercialización e innovación tecnológica.

Consideraciones finales

En síntesis, los hallazgos del portafolio técnico demuestran que Costa Rica se encuentra en una posición estratégica para desarrollar una maricultura basada en principios de sostenibilidad, inclusión y valor agregado, tanto para pepinos de mar como para macroalgas. El país cuenta con biodiversidad marina valiosa, estabilidad política, capacidad científica y una legislación favorable. Sin embargo, para escalar esta actividad y garantizar su rentabilidad, se requiere una visión país articulada que conecte actores institucionales, financieros, productivos y comunitarios.

La promoción de incentivos financieros, acceso a crédito verde, plataformas de capacitación técnica, esquemas asociativos e inversión en infraestructura serán claves para materializar el potencial identificado. La maricultura costarricense puede evolucionar hacia un modelo de desarrollo que no solo genere empleo y divisas, sino que también contribuya a la resiliencia climática, la seguridad alimentaria y la conservación del entorno marino costero, con un enfoque integral que incluya tanto a los pepinos de mar como a las macroalgas.

4. Portafolio 3: Evaluación de Capacidad Instalada en Maricultura

4.1. Inventario de infraestructura

En el Anexo 2 se proporciona un panorama representativo de las principales instalaciones dedicadas a la acuicultura en Costa Rica, abarcando cultivos de agua dulce (acuicultura continental) y de ambiente marino. Se incluyen tanto centros experimentales como unidades productivas de carácter comercial e industrial, con detalles sobre su ubicación geográfica, tipo de especie cultivada, dimensión del área utilizada y modalidad de infraestructura empleada (estanques, jaulas flotantes, entre otros).

Esta recopilación busca facilitar la identificación de capacidades instaladas, tecnologías empleadas y potencial productivo, contribuyendo así al análisis de oportunidades de desarrollo, encadenamientos productivos y planificación territorial de esta actividad estratégica para la seguridad alimentaria y la economía azul del país

4.2. Condiciones y zonas de factibilidad para la producción

El desarrollo de la maricultura en la costa pacífica de Costa Rica presenta un alto potencial, siempre que se seleccionen zonas adecuadas desde las perspectivas biológica, estructural y operativa. Según Calleja *et al.* (2022), las áreas óptimas deben contar con condiciones oceanográficas y ambientales que favorezcan el crecimiento de las especies objetivo, permitan la instalación y mantenimiento de infraestructuras acuícolas, y faciliten las operaciones cotidianas (alimentación, cosecha, limpieza).

Para definir dichas áreas, se evaluaron tres dimensiones clave:

- a. **Adecuación biológica**, considerando temperatura superficial del mar (SST), salinidad y transparencia. Por ejemplo, *Lutjanus guttatus* y *Seriola rivoliana* requieren temperaturas entre 24 °C y 30 °C, salinidades de 25–35 PSU y claridad mínima del agua de 1m. Por su parte, especies eurihalinas como *Centropomus nigrescens* pueden tolerar salinidades tan bajas como 0–6.5 PSU, lo cual las hace aptas para zonas estuarinas como el Golfo de Nicoya.
- b. **Adecuación estructural**, que considera factores como altura de ola significativa (máx. 5 m para gran escala), velocidad de corrientes (mín. 0.025 m/s) y profundidad (<150 m). Estas variables garantizan la integridad de las jaulas y sistemas de anclaje.
- c. **Adecuación operativa**, en la cual se toma en cuenta la proximidad a puertos (máx. 20 km), velocidad de viento (máx. 7.5 m/s para pequeña

escala) y el tiempo disponible en condiciones seguras para realizar mantenimiento y cosecha (Ver Cuadro 12).

Cuadro 12. Zonas de mayor factibilidad para la maricultura.

Zona	Temperatura (°C)	Salinidad (PSU)	Claridad (m)	Oleaje (m)	Recomendación
Golfo de Nicoya	26-30 (variable)	6.5-31 (estuarina)	0.25-1	<1	Alta factibilidad para pequeña escala, especies eurihalinas
Golfo de Papagayo	27-30	30-35	>1	1-3	Factible para mediana escala y especies costeras
Santa Elena	15.5-27 (afloramiento)	30-35	>1	>3	Factible para gran escala con estructuras resistentes
Punta Leona / Pacífico Central	27-29	28-34	>0.5	<2	Ideal para proyectos con conexión turismo-producción

Fuente: Calleja *et al.* (2022)

4.3. Estructura de costos

Esta sección delinearé las categorías de costos fundamentales en emprendimientos acuícolas, tanto marinos como terrestres, dentro del contexto costarricense. Se basa en la categorización estándar de costos de capital y operativos, adaptada a las particularidades del sector en el país.

a. Costos de Inversión (CAPEX) Típicos

Los costos de inversión inicial (CAPEX) representan los desembolsos significativos requeridos antes de que un proyecto acuícola pueda comenzar sus operaciones y generar ingresos. Estos varían considerablemente según el tipo de sistema (extensivo, semi-intensivo, intensivo, Sistemas de Recirculación Acuícola - RAS), las especies cultivadas y la escala del proyecto.

- **Adquisición o Arrendamiento de Terrenos y/o Concesiones Marítimas:** incluye el costo de compra o los cánones de arrendamiento a largo plazo para terrenos (utilizados en acuicultura continental o para instalaciones costeras de apoyo a la maricultura) o el pago de derechos por concesiones en zonas marítimo-terrestres o áreas de agua para maricultura. Los costos de concesiones son establecidos por el Estado y pueden variar según la zona

y el tipo de uso. Sin embargo, el canon que se paga a MINAE puede oscilar entre los 10 mil y 100 mil colones mensuales. Y el costo de los trámites va desde los \$67.8 para una Escala Familiar hasta los \$1.695 para Gran Escala.

- **Desarrollo de Infraestructura:** este rubro abarca la construcción de las facilidades físicas para el cultivo. Para la acuicultura continental, esto incluye estanques (de tierra, concreto, o con revestimiento de geomembrana). Para la maricultura, puede incluir jaulas flotantes o sumergidas, y sistemas de líneas largas (*long-lines*) para el cultivo de bivalvos o macroalgas. Adicionalmente, se consideran laboratorios de análisis de calidad de agua o de producción de semilla (*hatcheries*), sistemas de recirculación de agua (RAS) que, si bien son intensivos en capital, optimizan el uso del agua y permiten un mayor control ambiental. También se incluyen edificios para procesamiento primario, bodegas para el almacenamiento de alimento e insumos, y oficinas administrativas.
- **Adquisición de Equipo:** compra de bombas para el movimiento de agua, sopladores (*blowers*) y difusores para la aireación (crítica para mantener niveles óptimos de oxígeno disuelto), sistemas de filtración (mecánica, biológica, desinfección UV), embarcaciones (esenciales para operaciones en mar o en grandes cuerpos de agua continentales), vehículos para transporte terrestre de insumos y productos, equipo de laboratorio (microscopios, medidores multiparamétricos de calidad de agua), herramientas y equipos de cosecha (redes, chinchorros, grúas pequeñas), sistemas de alimentación automática (que pueden reducir costos de mano de obra y mejorar la eficiencia alimenticia), y generadores eléctricos de respaldo para asegurar la continuidad operativa ante fallas en el suministro principal.
- **Costos de permisos, licencias y estudios de impacto ambiental (EsIA):** incluye los pagos por la tramitación de permisos de construcción, licencias de operación acuícola (emitidas por el Instituto Costarricense de Pesca y Acuicultura - INCOPESCA), concesiones de agua (ante la Dirección de Aguas del MINAE), permisos sanitarios de operación (emitidos por el Servicio Nacional de Salud Animal - SENASA), y el costo asociado a la elaboración y presentación de Estudios de Impacto Ambiental (EsIA), requeridos y evaluados por la Secretaría Técnica Nacional Ambiental (SETENA). El Cuadro 3 del Plan Estratégico para la Acuicultura en Costa Rica 2019-2023 lista las principales instituciones que intervienen en la tramitación de permisos para un proyecto de acuicultura.
- **Adquisición de pie de cría inicial (semillas, reproductores):** corresponde a la compra de las primeras cohortes de organismos para el cultivo, tales como alevines de peces, post-larvas de camarón, semillas de moluscos (como las ostras), o reproductores certificados para iniciar el ciclo productivo o para establecer y mantener un plantel de reproductores en *hatcheries* propios. La calidad genética y sanitaria, así como el costo del pie de cría, son determinantes para el éxito de los ciclos productivos subsecuentes. El PNDPA identifica la "calidad de la semilla" como un factor que exige una

atención integral y coordinada. La Universidad Nacional (UNA) ha realizado esfuerzos para mejorar la disponibilidad de semilla de calidad, como la construcción de un *hatchery* con capacidad para producir entre 1.5 y 2.0 millones de semillas al mes, lo que indica la importancia de la producción local para reducir la dependencia de importaciones y asegurar la calidad. En el caso de las ostras, se menciona que las semillas de aproximadamente 5 mm de altura son trasladadas a los sitios de engorde, mientras que, para tilapia, el precio de las crías puede variar, por ejemplo, entre \$0.50 y \$1.00 USD por pez en contextos generales.

- **Capital de trabajo inicial:** representa los fondos necesarios para cubrir los costos operativos (OPEX) durante los primeros ciclos productivos, antes de que el proyecto comience a generar ingresos suficientes para ser autosostenible. Esto incluye los costos de alimento, mano de obra, energía, insumos diversos, etc., durante los primeros meses o hasta la primera cosecha y venta.

Es un componente esencial para asegurar la liquidez y la supervivencia del proyecto en su fase inicial de desarrollo. La subestimación del capital de trabajo inicial es una causa común de fracaso en nuevos emprendimientos. A modo ilustrativo, un estudio de un proyecto camaronero en Ecuador estimó un capital de trabajo para tres meses de producción en \$319,711.32 USD, para una inversión total del proyecto de \$495,511.32 USD, lo que demuestra la magnitud que puede alcanzar este rubro. Sin embargo, la propuesta de Costa Rica debería plantearse en un primer hito que corresponda a una producción en IMTA y además de escala familiar, esto para validar información relevante como las tasas de crecimiento y de sobrevivencia.

b. Costos operativos (OPEX) típicos

Los costos operativos (OPEX) son los gastos recurrentes necesarios para el funcionamiento diario y continuo del proyecto acuícola. Su gestión eficiente es clave para la rentabilidad y sostenibilidad a largo plazo de la operación.

- **Mano de obra (salarios, cargas sociales):** comprende los salarios del personal técnico especializado (biólogos marinos, ingenieros acuícolas, veterinarios con especialidad en organismos acuáticos), operarios de campo (encargados de la alimentación, limpieza de estructuras, mantenimiento general, monitoreo de parámetros, y cosecha), así como personal administrativo y de gestión. Un componente crucial de este costo en Costa Rica son las cargas sociales patronales. Este es uno de los rubros más importantes del OPEX, especialmente en sistemas de cultivo que no están altamente automatizados. En Costa Rica, las cargas sociales son significativas; estimaciones generales para la acuicultura indican que los costos laborales pueden oscilar entre \$30,000 y \$50,000 USD anuales por

empleado a tiempo completo. Más específicamente para Costa Rica, los aportes patronales para la actividad agrícola (que incluiría la mayoría de las operaciones acuícolas primarias) se estiman en un 25.67% sobre el salario reportado, y para la actividad no agrícola en un 26.67%. Estas cargas incluyen contribuciones a la Caja Costarricense de Seguro Social (CCSS) para los regímenes de Enfermedad y Maternidad (SEM) e Invalidez, Vejez y Muerte (IVM), al Banco Popular y de Desarrollo Comunal (BPDC), al Fondo de Desarrollo Social y Asignaciones Familiares (FODESAF), al Instituto Mixto de Ayuda Social (IMAS) y al Instituto Nacional de Aprendizaje (INA).

- **Alimento:** corresponde a la compra de alimento balanceado, formulado específicamente para la especie cultivada y su etapa de desarrollo (e.g., iniciador, crecimiento, engorde). Para la mayoría de las especies de peces y camarones cultivadas comercialmente, el alimento es el costo operativo más alto, pudiendo representar entre el 40% y el 60% del OPEX total. La calidad del alimento impacta directamente la tasa de crecimiento, la conversión alimenticia, la salud de los organismos y la calidad del producto final. PROCOMER y la FAO han destacado la creciente importancia de los alimentos sostenibles y el potencial de desarrollar ingredientes alternativos de origen local para la acuicultura en Costa Rica, lo cual podría mitigar la dependencia de insumos importados. Como referencia de precios locales, un saco de 30 kg de alimento Acuaoro Tilapia 20-66 se comercializaba en ₡21,050 (IVA incluido), lo que equivale aproximadamente a \$1.38 USD/kg, considerando el tipo de cambio de este informe. La dependencia de alimentos importados puede exponer a los productores a la volatilidad del tipo de cambio y a los costos de transporte internacional y nacional. El fomento de la producción de alimentos con ingredientes locales es una estrategia clave no solo para reducir costos, sino también para mejorar la sostenibilidad y la resiliencia del sector
- **Energía (electricidad, combustible):** incluye el consumo eléctrico para el funcionamiento de bombas de agua (para llenado, recambio o recirculación), sistemas de aireación (sopladores, difusores), sistemas de filtración y tratamiento de agua en RAS, iluminación en instalaciones, y equipos de refrigeración o congelación para la conservación del producto. También se considera el combustible (diésel, gasolina) para embarcaciones, vehículos terrestres y generadores eléctricos de emergencia.
Este costo es particularmente significativo en sistemas de cultivo intensivos o aquellos que requieren un alto grado de bombeo y aireación para mantener altas densidades de siembra. Los costos de electricidad en Costa Rica varían según el proveedor (Instituto Costarricense de Electricidad - ICE, Compañía Nacional de Fuerza y Luz - CNFL, Junta Administrativa del Servicio Eléctrico de Cartago - JASEC, Empresa de Servicios Públicos de Heredia - ESPH) y la estructura tarifaria aplicable (e.g., residencial, industrial, agrícola, horaria). Por ejemplo, JASEC contempla una tarifa industrial (T-IN) para "Bombas

para agua de riego", que podría ser aplicable a ciertos tipos de operaciones acuícolas.

Las tarifas horarias (con diferenciación de precios en periodos punta, valle y nocturno) también pueden influir en la gestión de los costos energéticos, incentivando operaciones en horarios de menor costo. En el cultivo de tilapia, se estima que los servicios públicos, incluyendo la energía, pueden representar entre el 10% y el 15% del OPEX.

- **Mantenimiento y reparaciones de infraestructura y equipo:** gastos asociados al mantenimiento preventivo y correctivo de todas las instalaciones y equipos, tales como estanques, jaulas, sistemas de tuberías, bombas, motores, aireadores, edificios, embarcaciones, vehículos, etc. Esencial para asegurar la longevidad de los activos fijos, prevenir fallas inesperadas que puedan comprometer la producción, y garantizar la continuidad operativa. Se sugiere presupuestar entre el 5% y el 10% de los costos operativos totales para este rubro en operaciones de piscicultura.
- **Insumos diversos:** este rubro agrupa una variedad de materiales consumibles necesarios para la operación, como redes de repuesto, boyas, cuerdas, anclajes, productos para el tratamiento y acondicionamiento del agua (e.g., cal agrícola para ajuste de pH, probióticos para mejorar la calidad del agua y la salud de los organismos), medicamentos veterinarios (cuyo uso debe estar estrictamente regulado y supervisado por SENASA), material de empaque para el producto final (bolsas plásticas, cajas de poliestireno expandido, hielo), y equipo de protección personal para los trabajadores.
- **Monitoreo y análisis:** costos asociados a la adquisición de kits de análisis para el monitoreo regular *in situ* de parámetros de calidad del agua (e.g., oxígeno disuelto, pH, temperatura, amonio, nitritos). También incluye el costo de envío de muestras de agua, tejido de organismos o alimento a laboratorios externos especializados para análisis más complejos, como detección de patógenos, residuos de medicamentos, o contaminantes. El monitoreo es crucial para la toma de decisiones de manejo, la prevención de enfermedades, la optimización de las condiciones de cultivo y el cumplimiento de normativas de inocuidad. En un contexto general, los costos de gestión de la calidad del agua, que incluyen monitoreo, pueden representar entre el 5% y el 10% del presupuesto operativo.
- **Cosecha y post-cosecha:** mano de obra adicional o especializada requerida durante los periodos de cosecha, hielo para la conservación inmediata del producto cosechado, y el transporte inicial del producto desde la granja hasta los centros de acopio, plantas de procesamiento primario o mercados locales.
- **Costos administrativos y de gestión:**
Gastos relacionados con la administración general del negocio, tales como servicios de contabilidad y auditoría, primas de seguros (pólizas de responsabilidad civil, seguros contra daños a la infraestructura o pérdida de inventario), servicios de comunicaciones (internet, telefonía), asesoría legal,

y gastos generales de oficina. Para tener una referencia del sector agropecuario en Costa Rica, un estudio sobre costos de producción de caña de azúcar estimó los gastos de administración en un 3.5% de los costos totales.

- **Certificaciones y auditorías periódicas:**

Desembolsos necesarios para obtener y mantener certificaciones de calidad, sostenibilidad, inocuidad alimentaria o bienestar animal (GlobalG.A.P., Aquaculture Stewardship Council - ASC, Buenas Prácticas Acuícolas, HACCP). Estos costos suelen incluir pagos de derechos de certificación y los honorarios de las auditorías periódicas (generalmente anuales) realizadas por entidades certificadoras acreditadas. Estas certificaciones son crecientemente importantes, y a menudo indispensables, para acceder a mercados de mayor valor, especialmente para la exportación, y para satisfacer las demandas de consumidores y compradores preocupados por la sostenibilidad y la calidad. En un contexto general, los costos de auditorías de cumplimiento pueden oscilar entre \$1,500 y \$7,000 USD anuales (Ver Cuadro 13).

Cuadro 13. Resumen de Costos de Inversión (CAPEX) Típicos en Acuicultura Costarricense

Rubro Principal de CAPEX	Ejemplos y Consideraciones Específicas en Costa Rica
Adquisición/Arrendamiento de Terrenos/Concesiones	Compra de terrenos para acuicultura continental. Pago de cánones por concesiones marítimas (INCOPECA/Municipalidades) para maricultura. Los costos varían por ubicación y tipo de derecho.
Desarrollo de Infraestructura	Construcción de estanques (tierra, concreto, geomembrana), jaulas, sistemas <i>long-line</i> , <i>hatcheries</i> , RAS, plantas de proceso primario, bodegas. Necesidad de modernización de infraestructura existente identificada.
Adquisición de Equipo	Bombas, aireadores, filtros, embarcaciones y motores ⁷ , vehículos, equipo de laboratorio, herramientas de cosecha, generadores. La tecnología impacta eficiencia y costos energéticos.
Permisos, Licencias y EsIA	Trámites ante INCOPECA, SETENA, MINAE (Dirección de Aguas), SENASA, Municipalidades. El costo de elaboración de EsIA puede ser significativo. Múltiples instituciones involucradas.
Pie de Cría Inicial	Compra de alevines, post-larvas, semillas de moluscos, o reproductores. Calidad y origen son cruciales. Iniciativas para producción local de semilla de calidad existen.
Capital de Trabajo Inicial	Fondos para cubrir OPEX iniciales (alimento, mano de obra, energía) antes de generar ingresos. Su subestimación es un riesgo. Puede ser un porcentaje importante de la inversión total.

Fuente: Elaboración propia con base en análisis de la problemática.

En el siguiente cuadro se muestran los rubros principales y especificaciones para nuestro país.

Cuadro 14. Resumen de Costos Operativos (OPEX) Típicos en Acuicultura Costarricense

Rubro Principal de OPEX	Ejemplos y Consideraciones Específicas en Costa Rica
Mano de Obra	Salarios de personal técnico, operarios, administrativos. Incluye cargas sociales patronales significativas (aprox. 25.67% agrícola, 26.67% no agrícola).
Alimento	Principal costo para especies alimentadas (peces, camarón), 40-60% del OPEX. ¹⁶ Precios locales de referencia disponibles. Importancia de desarrollo de alimentos locales/sostenibles.
Energía	Electricidad (bombeo, aireación, RAS) y combustibles (embarcaciones, vehículos). Tarifas varían por proveedor y tipo (industrial, agrícola, horaria). Oportunidades de gestión y energías alternativas.
Mantenimiento y Reparaciones	Mantenimiento preventivo y correctivo de infraestructura y equipo. Estimado 5-10% del OPEX.
Insumos Diversos	Redes, boyas, cuerdas, productos para tratamiento de agua, medicamentos (regulado por SENASA), material de empaque, hielo. Disponibilidad local vs. importación.
Monitoreo y Análisis	Kits de calidad de agua, análisis de laboratorio (patógenos, contaminantes). Crucial para prevención y optimización.
Cosecha y Post-cosecha	Mano de obra adicional para cosecha, hielo, transporte inicial.
Administrativos y de Gestión	Contabilidad, seguros, comunicaciones, servicios legales. Referencia agropecuaria: 3.5% de costos totales.
Certificaciones y Auditorías	Costos para obtener/mantener certificaciones de calidad, sostenibilidad, inocuidad (GlobalG.A.P., ASC). Importantes para acceso a mercados de exportación.

Fuente: Elaboración propia.

Análisis de caso de estudio: cultivo de ostras marinas

Esta sección se enfoca en el análisis crítico de los datos proporcionados para un proyecto de cultivo de ostras, aplicando el tipo de cambio y los conocimientos sobre estructuras de costos previamente discutidos. Se enfatizan las limitaciones inherentes a los datos y los supuestos necesarios para proceder con una evaluación preliminar.

a. Contexto del caso de estudio, limitaciones de datos y suposiciones clave

- **Descripción del Sistema de Cultivo (Asumido):** se asume un sistema de cultivo de ostra japonesa (*Crassostrea gigas*) utilizando tecnología de suspensión tipo *long-line* o similar. Este tipo de sistema es común en Costa Rica para esta especie y es promovido por sus ventajas en términos de manejo y calidad del producto. Una característica fundamental del cultivo de ostras es que no requiere alimentación externa, ya que son organismos filtradores que se nutren del fitoplancton y la materia orgánica particulada presente de forma natural en la columna de agua.
- **Limitaciones de datos:** los datos proporcionados para el caso de estudio son notablemente escuetos, consistiendo únicamente en tres cifras agregadas: "Costo de Personal de Mantenimiento", "Precio de Venta", y "Costo Directo". Estos datos carecen de un desglose detallado sobre su composición, el período exacto que cubren, y, de manera crítica, no incluyen ninguna información sobre los costos de inversión inicial (CAPEX), los cuales son fundamentales para cualquier análisis de viabilidad.
- **Suposiciones clave necesarias para el análisis:** dada la limitada información, se deben establecer las siguientes suposiciones para realizar una estimación preliminar:
 - **Tipo de Cambio:** conforme a lo establecido al inicio de este apartado, se utilizará 1 USD = 509.90 CRC
 - **Ciclo de producción:** se asumirá un ciclo de producción de **9 meses** desde la siembra de semilla de una talla comercial inicial (superior a 5 mm) hasta alcanzar la talla de cosecha. Esta duración es un promedio estimado basado en literatura técnica que indica ciclos de engorde para *C. gigas* que pueden variar entre 7 y 12 meses para alcanzar tallas comerciales, dependiendo de las condiciones ambientales y de manejo.
 - **Tasa de supervivencia:** este dato no fue proporcionado y es una variable crítica. Se asumirá una tasa de supervivencia global conservadora del **70%** desde la siembra de la semilla hasta la cosecha final. Es importante notar que su supervivencia real puede variar significativamente (entre 50% y más del 90%) dependiendo de factores como la calidad de la semilla, las condiciones ambientales del sitio de cultivo (temperatura, salinidad, presencia de floraciones algales nocivas), la presión de depredadores, la incidencia de enfermedades y la efectividad de las prácticas de manejo. Como referencia, un estudio en México con *C. gigas* reportó una mortalidad final del 12% (equivalente a una supervivencia del 88%). La elección de un 70% busca un balance prudente ante la falta de datos específicos del caso.
 - **Unidades por hectárea cosechadas:** con una densidad de siembra de 108,000 unidades/hectárea y una tasa de supervivencia asumida del 70%, el número de ostras cosechadas por hectárea por ciclo sería: 108,000 unidades/ha * 0.70 = **75,600 unidades/ha/ciclo**.

b. Análisis detallado de datos proporcionados:

- Costo de Personal de Mantenimiento: 1,000,000 CRC mensuales.
- Conversión y Cálculo Anual:
 - Costo mensual en USD: $1,000,000 \text{ CRC} / 509.90 \text{ CRC/USD} = \$1,961.17 \text{ USD/mes}$.
 - Costo anual de personal (base, antes de cargas sociales): $\$1,961.17 \text{ USD/mes} * 12 \text{ meses} = \$23,534.04 \text{ USD/año}$.
- Análisis crítico y consideración de cargas sociales: es altamente probable que esta cifra corresponda al salario bruto o base del personal. En Costa Rica, es mandatorio adicionar las cargas sociales patronales. Asumiendo que la actividad de maricultura se clasifica dentro del sector agrícola para estos efectos, el porcentaje de cargas sociales patronales es de aproximadamente el 25.67%.
 - Cargas Sociales Anuales Estimadas: $\$23,534.04 \text{ USD} * 0.2567 = \$6,040.86 \text{ USD}$.
 - Costo Anual Total Estimado de Personal de Mantenimiento (incluyendo cargas sociales): $\$23,534.04 \text{ USD} + \$6,040.86 \text{ USD} = \$29,574.90 \text{ USD/año/ha}$.
- Se asume que este costo de personal está dedicado exclusivamente al mantenimiento de una (1) hectárea de cultivo de ostras. La información no especifica el número de personas cubiertas por este monto, lo que dificulta evaluar si es un costo eficiente o si la carga de trabajo por persona es razonable. Investigaciones previas indican que el mayor costo en el cultivo de ostras suele estar relacionado con las horas de trabajo requeridas para el manejo de las estructuras, la limpieza de las ostras y el control de organismos incrustantes (biofouling). Según fue detallado por los ostracultores consultados, ese costo corresponde a mantener a una persona en el lugar en jornada continua, lo que implica el dormir en el lugar. No se detalló si se realizan turnos entre varias personas, sin embargo, por el tipo de trabajo no se descarta que estos datos estén subvalorados.
- Densidad de cultivo: 1 hectárea puede albergar 9 líneas, y cada línea puede sembrar 12,000 unidades de ostras (total: 108,000 unidades/hectárea).
- Análisis: Esta cifra representa un parámetro técnico de diseño del sistema de cultivo. La viabilidad económica de esta densidad dependerá fundamentalmente de la tasa de supervivencia que se logre en la práctica y del precio de venta unitario que se pueda obtener por las ostras cosechadas.
- "Precio de Venta": \$200,000 USD.
- Análisis crítico: Esta cifra es considerablemente ambigua tal como está presentada. Para proceder con el análisis, se interpretará como el **ingreso bruto total potencial por hectárea por ciclo de producción de 9 meses**, asumiendo la venta del 100% de las ostras que se estima cosechar (75,600 unidades/ha/ciclo, según el supuesto de supervivencia del 70%).
- Ingreso Potencial por Ostra Individual (bajo los supuestos establecidos):

- $\$200,000 \text{ USD} / 75,600 \text{ ostras cosechadas/ha/ciclo} = \$2.64 \text{ USD/ostra}.$
- o **Discusión de variabilidad y sensibilidad:**
 - Un precio de venta de \$2.64 USD por ostra individual parece elevado si se considera como un precio promedio de venta directa desde la finca (farm-gate price), a menos que el proyecto esté dirigido a mercados nicho de muy alto valor, exportación directa a mercados premium, o que el producto incluya algún tipo de procesamiento, valor agregado o presentación especial que justifique dicho precio. Como referencia, los precios de productos como hongos ostra en supermercados locales no son directamente comparables, y los precios de platos con ostras en restaurantes (que pueden oscilar entre \$31 y \$50 USD por una porción que incluye varias ostras) incorporan múltiples costos adicionales (preparación, servicio, alquiler, otros ingredientes) y márgenes de intermediación significativos.
 - El "Plan Nacional de Desarrollo Pesquero y Acuícola" tiene entre sus objetivos mejorar la competitividad del sector y fomentar la generación de valor agregado, lo cual podría, en teoría, sustentar precios de venta más altos para productos diferenciados. Sin embargo, se requeriría una evidencia de mercado robusta y específica para validar la viabilidad de alcanzar consistentemente un precio unitario de \$2.64 USD.
 - Es crucial destacar que la rentabilidad del proyecto es extremadamente sensible tanto a este precio de venta unitario como a la tasa de supervivencia. Una disminución en cualquiera de estos dos parámetros (o en ambos) impactaría de manera drástica y negativa los ingresos totales y, por ende, el margen de ganancia. La vaguedad y la aparente magnitud de esta cifra de "Precio de Venta" constituyen un riesgo mayor en la evaluación. Sin una validación exhaustiva del precio de mercado realista por unidad para el tipo y calidad de ostra que se produciría, y sin datos de campo que respalden la tasa de supervivencia asumida, cualquier proyección de ingresos basada en esta cifra es altamente especulativa y debe ser tratada con extrema cautela. Esto subraya la necesidad imperativa de realizar estudios de mercado detallados y pruebas piloto para validar estos parámetros.
- **"Costo directo": \$20,000 USD.**
- o **Análisis crítico:**
 - **Rubros probables incluidos:** dado que el costo del personal de mantenimiento ya ha sido identificado y contabilizado por separado, este "Costo Directo" de \$20,000 USD probablemente incluye los siguientes componentes principales:
 - **Costo de la semilla de ostra:** para sembrar 108,000 unidades por hectárea. El costo de la semilla de ostra puede variar considerablemente dependiendo de su tamaño al momento de la compra, su origen (local o importada), y si está certificada. Precios de referencia pueden oscilar, por ejemplo, entre \$0.05 y \$0.20 USD por semilla. Si, hipotéticamente,

cada semilla costara \$0.10 USD, el costo total de la semilla para una hectárea sería de \$10,800 USD, lo que representaría más de la mitad de este "Costo Directo". Documentos técnicos mencionan que las semillas de ostra de 5 mm de tamaño son las que se trasladan a las líneas de engorde, y existen datos sobre producción de postlarvas, pero no se dispone de precios específicos de semilla de engorde para Costa Rica en el material de referencia.

- **Materiales directos para las líneas de cultivo y artes de engorde:** esto podría incluir el reemplazo o mantenimiento de componentes de las líneas (boyas secundarias, cuerdas de suspensión, anclajes menores) y, fundamentalmente, el costo de las artes de cultivo donde crecen las ostras (linternas, canastas, bandejas) si estas no se consideran parte de la inversión inicial o si tienen una vida útil que coincide con un ciclo de producción o requieren reemplazo frecuente. Un estudio en El Salvador detalla los materiales para la construcción de *long-lines* y balsas, y menciona costos unitarios para linternas (aproximadamente \$10 USD/unidad) y bolsas de cultivo (\$4.5 USD/unidad), lo que ilustra que estos componentes pueden ser significativos.
- **Mano de obra directa adicional:** podría incluir costos de mano de obra contratada específicamente para tareas puntuales como la siembra masiva de la semilla en las artes de cultivo o la cosecha intensiva, si estas actividades no están completamente cubiertas por el personal de mantenimiento regular.
- **Base del costo:** Se asume que esta cifra de \$20,000 USD corresponde a un costo **por hectárea y por ciclo de producción de 9 meses**.
- **Relación con el costo de personal de mantenimiento:** Se asume que este "Costo Directo" es **adicional** al costo de personal de mantenimiento de 1,000,000 CRC mensuales (\$29,574.90 USD anuales incluyendo cargas) ya calculado.
- Si los \$20,000 USD cubren efectivamente el costo de la semilla y los materiales consumibles o de corta vida útil para un ciclo de producción en una hectárea, la cifra podría ser plausible, aunque un desglose detallado es indispensable para confirmarlo. Si la semilla representa una porción mayoritaria de este costo, entonces la calidad genética y sanitaria de esa semilla, y la tasa de supervivencia que se logre con ella, son absolutamente cruciales para justificar esta inversión recurrente en cada ciclo.

- c. **Estimación de costos operativos e ingresos anuales (basado en datos y supuestos:** para realizar una comparación más estandarizada, los costos e ingresos se anualizarán. Dado que el ciclo de producción asumido es de 9 meses, se pueden completar teóricamente 12 meses / 9 meses/ciclo = **1.333** ciclos por año.

- **Costos operativos anualizados identificados (por hectárea):**
 - Personal de mantenimiento (incluyendo cargas sociales estimadas): este costo ya fue calculado sobre una base anual: **\$29,574.90 USD/año/ha.**
 - "Costos directos" (asumidos como semilla y materiales directos del ciclo): **\$20,000 USD/ciclo.**
 - Costo Anualizado de "Costos Directos": $\$20,000 \text{ USD/ciclo} * 1.333 \text{ ciclos/año} = \mathbf{\$26,660.00 \text{ USD/año/ha.}}$
 - Total, costos operativos anuales identificados (basado en datos proporcionados):
 - $\$29,574.90 \text{ USD/año (Personal)} + \$26,660.00 \text{ USD/año (Costos Directos)} = \mathbf{\$56,234.90 \text{ USD/ha/año.}}$
 - **Ingresos anuales estimados (por hectárea):**
 - "Precio de Venta" (interpretado como ingreso bruto por ciclo): **\$200,000 USD/ciclo.**
 - Ingreso Bruto Anualizado: $\$200,000 \text{ USD/ciclo} * 1.333 \text{ ciclos/año} = \mathbf{\$266,600.00 \text{ USD/ha/año.}}$
 - **Margen bruto potencial anual (por hectárea):**
 - Ingresos Anuales Estimados - Total Costos Operativos Anuales Identificados
 - $\$266,600.00 \text{ USD/ha/año} - \$56,234.90 \text{ USD/ha/año} = \mathbf{\$210,365.10 \text{ USD/ha/año.}}$
 - Este margen bruto, derivado directamente de las cifras proporcionadas y los supuestos realizados, parece excepcionalmente alto. Esta observación refuerza las serias dudas expresadas anteriormente sobre la validez o interpretación de la cifra de "Precio de Venta" de \$200,000 USD por ciclo y/o sobre la tasa de supervivencia asumida del 70%. Es fundamental reiterar que este margen bruto **no considera la inversión inicial (CAPEX) ni una multitud de otros costos operativos esenciales** que se detallan a continuación.
- d. **Identificación de costos omitidos cruciales para un análisis completo:** los datos proporcionados para el caso de estudio de cultivo de ostras omiten numerosos costos que son esenciales para una evaluación de viabilidad económica completa y realista. Sin la cuantificación de estos costos, el margen bruto calculado anteriormente carece de utilidad práctica para la toma de decisiones de inversión.
- **Costos de inversión (CAPEX) faltantes:**
 - **Infraestructura inicial del sistema de cultivo:** el costo de adquisición e instalación de las 9 líneas largas (*long-lines*) por hectárea. Esto incluye los cables madre, los sistemas de anclaje y fondeo (muertos de concreto, anclas de alta capacidad), y las boyas de flotación principales. A modo de referencia, un estudio en El Salvador estimó el costo de materiales para una *long-line* de 100 metros en aproximadamente \$1,297 USD. Aunque los costos exactos variarían en Costa Rica debido a precios de materiales, mano de

obra y condiciones logísticas, esto ilustra que la infraestructura de soporte es una inversión inicial significativa.

- o **Artes de cultivo específicas:** se refiere a las estructuras donde las ostras son directamente sembradas y crecen suspendidas de las líneas largas. Estas pueden ser linternas (cestas cilíndricas de múltiples pisos), canastas o bandejas de cultivo. El mismo estudio de El Salvador menciona costos unitarios de \$10 USD para linternas y \$4.5 USD para bolsas de cultivo. Considerando una siembra de 108,000 ostras por hectárea, y dependiendo de la densidad por arte de cultivo, se requeriría una cantidad considerable de estas unidades, representando una inversión inicial importante que, además, tendrá una vida útil limitada y requerirá reemplazo periódico.
- o **Embarcación y motor:** una embarcación adecuada (tipo panga o similar) con su respectivo motor fuera de borda es indispensable para las operaciones de siembra, mantenimiento rutinario (limpieza, revisión de líneas), monitoreo de las condiciones del cultivo y del ambiente, y para las labores de cosecha en un sistema de *long-lines* en el mar.
- o **Instalaciones en tierra:** se requerirá, como mínimo, una bodega segura para el almacenamiento de insumos, herramientas y equipos. Dependiendo de la escala y la estrategia de comercialización, podría ser necesaria también un área techada para el pre-procesamiento o empaque primario de las ostras cosechadas, y una pequeña oficina para la gestión administrativa.
- o **Costos de permisos iniciales y estudio de impacto ambiental (EsIA):** los desembolsos necesarios para obtener la concesión marítima para el área de cultivo, los permisos de operación de INCOPESCA y SENASA, y, fundamentalmente, el costo de elaboración y tramitación del Estudio de Impacto Ambiental (EsIA) ante SETENA. Estos pueden ser costos iniciales considerables y de tiempo variable.
- o **Capital de trabajo inicial:** como se mencionó en la sección 1.1, se necesitan fondos para cubrir los primeros meses de operación (personal, "costos directos" del primer ciclo, combustible, etc.) antes de que se realice la primera venta y comiencen a fluir ingresos.
- **Otros costos operativos (OPEX) faltantes:**
 - o **Depreciación de activos fijos:** la infraestructura de cultivo (líneas, anclajes), las artes de cultivo (linternas, canastas), la embarcación y motor, y las instalaciones en tierra tienen una vida útil finita. El costo de estos activos debe ser distribuido a lo largo de su vida útil mediante un cargo anual por depreciación, el cual es un costo económico real del proyecto.
 - o **Mantenimiento y reparación de líneas, embarcación y artes de cultivo:** más allá del costo del personal de mantenimiento, se requerirán materiales (cuerdas, boyas de repuesto, pintura anti-incrustante para la embarcación, reparaciones de motor, reemplazo de mallas o componentes de las artes de cultivo).

- **Combustible y lubricantes:** para la operación de la embarcación. El consumo dependerá de la frecuencia de visitas al sitio de cultivo y la distancia desde la base de operaciones.
 - **Transporte del producto al mercado:** costo de trasladar las ostras cosechadas desde la granja o el punto de desembarque hasta los puntos de venta (restaurantes, intermediarios, mercados) o plantas de procesamiento.
 - **Empaque:** costo de los materiales utilizados para empacar las ostras para su comercialización (e.g., sacos de malla, cajas isotérmicas, etiquetas).
 - **Comercialización y ventas:** Gastos asociados a la promoción del producto, desarrollo de relaciones con clientes, participación en ferias, etc., si el proyecto busca desarrollar sus propios canales de venta.
 - **Seguros:** primas anuales por pólizas de seguro para la embarcación, la infraestructura contra daños o pérdidas, y seguros de responsabilidad civil.
 - **Costos administrativos adicionales:** si no están cubiertos por la categoría de "personal de mantenimiento", esto podría incluir servicios de contabilidad profesional, asesoría legal, costos de comunicaciones (telefonía, internet), y otros gastos generales de oficina.
 - **Monitoreo de calidad de agua y sanidad ambiental:** costo de kits de análisis, posibles análisis de laboratorio para toxinas (biotoxinas marinas por floraciones algales nocivas), o parámetros microbiológicos, según lo requieran las normativas o los compradores.
 - **Intereses por financiamiento (costo financiero):** si el proyecto se financia parcial o totalmente con deuda (préstamos bancarios), los pagos de intereses representarán un costo operativo financiero.
 - **Cánones anuales de concesión:** pagos periódicos (generalmente anuales) al Estado por el derecho de uso del espacio marítimo o la zona marítimo-terrestre otorgada en concesión.
 - **Certificaciones:** costos anuales de mantenimiento y renovación de certificaciones de calidad, inocuidad o sostenibilidad, si el proyecto opta por ellas para acceder a mercados específicos. La omisión de estos costos, especialmente la inversión inicial (CAPEX) y su correspondiente depreciación anual, así como los numerosos OPEX recurrentes no listados en los datos originales, significa que el "margen bruto potencial" calculado en la sección 2.3 es una sobreestimación de la rentabilidad neta real del proyecto. Un análisis financiero completo, utilizando herramientas como el flujo de caja descontado que incorpore todos los CAPEX y OPEX relevantes a lo largo de la vida útil del proyecto, es indispensable para una evaluación de viabilidad rigurosa.
- e. **Discusión preliminar de viabilidad, brechas de información y riesgos asociados**
- **Viabilidad preliminar:** basada *única y exclusivamente* en los datos limitados proporcionados y los supuestos necesarios realizados para interpretarlos, el

margen bruto potencial anual de \$210,365.10 USD/ha/año parece atractivo. Sin embargo, es crucial enfatizar que esta es una visión **extremadamente incompleta y, por lo tanto, potencialmente engañosa de la rentabilidad real del proyecto**. La viabilidad económica genuina no puede determinarse de ninguna manera sin una cuantificación detallada y validada de todas las inversiones iniciales (CAPEX) y de la totalidad de los costos operativos (OPEX) que fueron omitidos en la información base.

- **Brechas de información críticas:** para realizar una evaluación de factibilidad confiable, es imprescindible subsanar las siguientes brechas de información:
 - **Desglose y validación del "precio de venta":** se necesita conocer el precio unitario realista por ostra (o por docena/kilogramo), el mercado objetivo (local, exportación, restaurantes, mayoristas), y la evidencia que sustenta la capacidad de alcanzar y mantener dicho precio.
 - **Desglose y validación del "costo directo":** es necesario detallar qué rubros específicos componen esta cifra (e.g., costo exacto de la semilla por unidad, tipo y costo de materiales de cultivo por ciclo, mano de obra específica para siembra/cosecha si aplica).
 - **Tasa de supervivencia real:** se requieren datos de campo o de proyectos similares en condiciones costarricenses para establecer una tasa de supervivencia promedio realista y comprender sus posibles variaciones estacionales o por ciclo productivo.
 - **Costos de inversión inicial (CAPEX) detallados:** se necesita una cotización o estimación rigurosa de todos los componentes de la inversión inicial, específicos para las condiciones y proveedores de Costa Rica.
 - **Listado y cuantificación de todos los costos operativos (OPEX) omitidos:** todos los rubros mencionados en la sección 2.4 deben ser estimados.
 - **Vida útil de los activos fijos:** Para calcular correctamente la depreciación anual.
- **Riesgos asociados a las suposiciones y a la operación del cultivo de ostras:**
 - **Riesgo de mercado:** la alta dependencia de un precio de venta unitario asumido de \$2.64 USD/ostra es un riesgo mayor. Este precio podría no ser sostenible en el tiempo o no ser alcanzable en todos los canales de venta o para toda la producción. La competencia de otros productores o de productos sustitutos también es un factor.
 - **Riesgo biológico y ambiental:** las operaciones de maricultura están expuestas a riesgos significativos como mortalidades masivas causadas por enfermedades (virales, bacterianas), la aparición de floraciones algales nocivas (FAN) que pueden generar toxinas y provocar vedas sanitarias, la depredación por especies como caracoles o rayas, y los impactos de eventos climáticos extremos (tormentas, huracanes, cambios en temperatura o salinidad del agua). La tasa de supervivencia es un factor de altísima sensibilidad en la rentabilidad. Los impactos del cambio climático en los ecosistemas marinos, como el aumento de la temperatura del agua, la

acidificación oceánica y cambios en las corrientes, podrían exacerbar estos riesgos biológicos y ambientales a mediano y largo plazo.

- o **Riesgo operativo:** fallas inesperadas en la infraestructura de cultivo (rotura de líneas por tormentas), problemas con la calidad o disponibilidad de la semilla, ineficiencias en la gestión de la mano de obra, robos, o dificultades logísticas.
- o **Riesgo regulatorio y administrativo:** cambios inesperados en las normativas aplicables, aumentos en los costos de permisos o cánones de concesión, o demoras en la renovación de licencias. La alta sensibilidad del modelo preliminar a supuestos clave como el precio de venta y la tasa de supervivencia implica que una variación incluso pequeña pero adversa en estos parámetros podría transformar un proyecto que parece rentable sobre el papel en uno que genere pérdidas significativas. Esto refuerza la necesidad imperativa de realizar análisis de sensibilidad robustos como parte de cualquier estudio de factibilidad completo, evaluando el impacto de diferentes escenarios (pesimista, realista, optimista) para estas variables críticas (Ver Cuadro 15).

Cuadro 15. Análisis Preliminar de Costos e Ingresos Anuales para Cultivo de Ostras (Caso de Estudio – USD/ha/año)
(Tipo de Cambio Utilizado: 1 USD = 509.90 CRC)

Componente	Valor Anualizado (USD/ha/año)	Supuestos y Notas Clave
Ingresos Brutos Estimados		
"Precio de Venta" (interpretado)	\$266,600.00	Basado en \$200,000 USD/ciclo; ciclo de 9 meses (1.333 ciclos/año). Asume venta de 75,600 ostras/ciclo (108,000 sembradas * 70% supervivencia) a un precio implícito de \$2.64 USD/ostra. Esta cifra de ingresos es altamente especulativa y requiere validación.
Costos Operativos Identificados (Anualizados)		
Personal de Mantenimiento	\$29,574.90	1,000,000 CRC/mes convertido a USD y anualizado, más 25.67% de cargas sociales patronales estimadas.
"Costos Directos" (interpretado)	\$26,660.00	Basado en \$20,000 USD/ciclo; ciclo de 9 meses (1.333 ciclos/año). Asumido como costo de semilla y materiales directos del ciclo.

Total Costos Operativos Identificados	\$56,234.90	
Margen Bruto Potencial Estimado	\$210,365.10	ADVERTENCIA: Este margen bruto es una estimación muy preliminar. NO INCLUYE: Costos de inversión inicial (CAPEX) y su depreciación, ni numerosos otros costos operativos esenciales (mantenimiento de equipos, combustible, transporte, empaque, comercialización, seguros, etc.).

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del caso de estudio y supuestos detallados en el texto.

Comparación y contextualización de estructuras de Costos

Esta sección contrastará la estructura de costos del cultivo de ostras, un bivalvo filtrador, con otros tipos de acuicultura relevantes en Costa Rica, como la piscicultura de tilapia y la camaronicultura. Además, se vincularán estos conocimientos con la planificación de los proyectos de pepinos de mar y macroalgas, que son el enfoque estratégico de los Portafolios 1 y 2 de este estudio de factibilidad global.

- a. Comparación del cultivo de ostras con otras especies acuícolas en Costa Rica
 - **Cultivo de ostras (Bivalvos Filtradores):**
 - **Ventaja principal en la estructura de costos:** el costo de alimentación es prácticamente nulo o muy bajo. Las ostras, al ser organismos filtradores, obtienen su alimento directamente del fitoplancton y la materia orgánica particulada presente de forma natural en el ambiente marino. Esto las diferencia marcadamente de la mayoría de las especies de peces y crustáceos cultivados.
 - **Costos operativos significativos:** la mano de obra tiende a ser uno de los componentes más importantes del OPEX. Se requiere personal para el manejo de las estructuras de cultivo, la limpieza periódica de las ostras y de las artes de cultivo para remover organismos incrustantes (biofouling) que compiten por espacio y alimento o dificultan el flujo de agua, y para las labores de siembra y cosecha.
 - **Costos de inversión significativos:** la inversión inicial (CAPEX) se concentra en los sistemas de suspensión (líneas largas o balsas), los sistemas de anclaje y fondeo, y las artes de cultivo específicas (linternas, canastas, bandejas) donde se colocan las ostras para su engorde. También se requiere una embarcación adecuada para las operaciones en el mar.
 - **Piscicultura (tilapia en estanques o jaulas):**
 - **Costo operativo dominante:** el alimento balanceado es, con diferencia, el principal costo operativo, representando comúnmente entre el 40% y el 60%,

o incluso más, de los costos totales de producción. Un ejemplo de precio local para alimento de tilapia es de ₡21,050 por un saco de 30 kg (aproximadamente \$1.38 USD/kg al tipo de cambio de este informe).

- o **Otros costos operativos significativos:** la energía eléctrica para bombeo de agua (en sistemas de estanques con recambio) y para aireación (especialmente en sistemas semi-intensivos o intensivos para mantener altas densidades) es un rubro importante. Se estima que los servicios públicos (agua y energía) pueden representar entre el 15% y el 20% del OPEX para tilapia. El costo de los alevines de calidad y la mano de obra (estimada entre 20-30% del OPEX) también son relevantes.
- o **Costos de inversión significativos:** construcción de estanques (que pueden ser de tierra, concreto o revestidos con geomembrana), instalación de sistemas de jaulas, equipos de bombeo y aireación (bombas, sopladores, difusores), y sistemas de alimentación.
- o **Producción en Costa Rica:** La tilapia es la principal especie acuícola producida en el país, representando el 78% del volumen total en 2020 y el 80% en 2018.
- **Camaronicultura (e.g., Camarón Patiblanco *Litopenaeus vannamei* en estanques):**
 - o **Costos operativos significativos:** Al igual que en la piscicultura, el alimento balanceado es uno de los costos más importantes. El costo de adquisición de post-larvas de camarón de buena calidad y libres de enfermedades es también un factor crítico. La energía para bombeo (para llenado de estanques y recambio de agua) y para aireación (especialmente en fases de engorde con altas densidades) representa un gasto considerable. La mano de obra para alimentación, manejo de estanques, y cosecha también es relevante. Un estudio de costos para camaronicultura en Ecuador muestra que la materia prima e insumos (principalmente alimento y larvas) y la nómina (mano de obra) son los componentes más fuertes del capital de trabajo y, por ende, del OPEX.
 - o **Costos de inversión significativos:** Construcción de estanques de gran extensión, estaciones de bombeo, sistemas de aireación (aireadores de paleta, difusores), y equipos de cosecha.
 - o **Producción en Costa Rica:** El camarón cultivado es la segunda especie acuícola en importancia en Costa Rica, representando el 13.5% de la producción en 2020 y el 13% en 2018. Existe una cadena de valor establecida para el camarón en el país.

La principal diferencia estructural en los costos operativos entre el cultivo de ostras y los de tilapia o camarón radica en la incidencia del costo de alimentación. Esta ausencia de gasto en alimento para las ostras puede parecer una ventaja competitiva importante. Sin embargo, la rentabilidad de los cultivos de bivalvos como las ostras dependerá entonces de manera más crítica de otros factores: la calidad intrínseca del agua del sitio de cultivo (que provee el alimento natural), los

costos y la eficiencia de la mano de obra, la magnitud de la inversión inicial en infraestructura por unidad de producción, las tasas de supervivencia y los precios de venta que se puedan obtener en el mercado. Para peces y camarones, la eficiencia en la conversión alimenticia y el precio del alimento son, sin duda, los factores más críticos que determinan la rentabilidad. Especies como las ostras, que no dependen de alimento balanceado, podrían ser particularmente atractivas desde una perspectiva de sostenibilidad y reducción de dependencia de insumos importados, siempre y cuando se logre un manejo eficiente de los otros componentes de costos y se acceda a mercados que valoren sus atributos.

- b. **Relevancia para la planificación de proyectos de pepinos de mar y macroalgas:** la comprensión de las estructuras de costos de las actividades acuícolas ya existentes en Costa Rica (analizadas en la Parte 1 y comparadas en la sección 3.1) proporciona una base conceptual valiosa para anticipar los tipos de costos (tanto CAPEX como OPEX) que probablemente enfrentarán los nuevos proyectos de cultivo de pepinos de mar y macroalgas. Al analizar las similitudes y diferencias con los sistemas actuales, se pueden formular el siguiente detalle de las estructuras de costos (Ver Cuadro 16).

Cuadro 16. Principales Diferencias en la Estructura de Costos: Ostras vs. Tilapia vs. Camarón en Costa Rica (Impacto Relativo Estimado en OPEX)

Rubro de Costo Principal	Cultivo de Ostras (Maricultura)	Cultivo de Tilapia (Continental/Jaulas)	Cultivo de Camarón (Continental)
Alimentación	Nulo / Muy Bajo (filtrador natural)	Muy Alto (40-60% del OPEX)	Muy Alto (similar a tilapia, componente principal del OPEX)
Mano de Obra	Alto (manejo, limpieza, cosecha)	Medio - Alto (alimentación, manejo, cosecha)	Medio - Alto (alimentación, manejo estanques, cosecha)
Energía	Bajo - Medio (principalmente para embarcación)	Medio - Alto (bombeo, aireación intensiva)	Medio - Alto (bombeo intensivo, aireación)
Semilla / Alevín / Post-larva	Medio (costo de semilla de ostra)	Medio (costo de alevines de tilapia)	Medio - Alto (costo de post-larvas de camarón)

Inversión en Infraestructura Específica (CAPEX)	Alta (sistemas <i>long-line</i> /balsas, artes de cultivo, embarcación)	Alta (estanques/jaulas, sistemas de bombeo/aireación)	Muy Alta (grandes extensiones de estanques, estaciones de bombeo)
Mantenimiento de Infraestructura/Equipos	Medio - Alto (estructuras marinas, embarcación)	Medio (estanques, equipos de bombeo/aireación)	Medio - Alto (estanques, compuertas, equipos de bombeo/aireación)

Fuente: Elaboración propia con base en análisis de la problemática. El impacto es cualitativo y relativo entre las especies.

Consideraciones adicionales

Esta sección final recapitula los puntos clave derivados del análisis de la estructura de costos en la acuicultura costarricense y ofrece recomendaciones generales que son pertinentes para la evaluación de la factibilidad de cualquier proyecto acuícola, incluyendo los de pepinos de mar y macroalgas.

- **Reconocimiento de la Alta Variabilidad de los Costos:**
 - Es fundamental destacar que los costos en la acuicultura pueden variar de manera drástica, incluso para la misma especie, debido a una confluencia de factores. Entre los más importantes se encuentran:
 - **Escala del Proyecto:** los proyectos de mayor escala pueden, en algunos casos, beneficiarse de economías de escala que reduzcan los costos unitarios de producción (compra de insumos al por mayor, dilución de costos fijos).
 - **Tecnología Utilizada:** Los sistemas de cultivo intensivos o los Sistemas de Recirculación Acuícola (RAS) generalmente conllevan costos de inversión inicial (CAPEX) más elevados, pero pueden ofrecer una mayor productividad por unidad de área o volumen, un mayor control sobre las condiciones de cultivo y, potencialmente, una menor huella ambiental. En contraste, los sistemas extensivos suelen tener un CAPEX menor, pero también pueden presentar menores rendimientos y una mayor exposición a los riesgos ambientales. Tecnologías como los RAS o la alimentación automatizada, aunque requieren una inversión inicial considerable, pueden contribuir a reducir costos operativos a largo plazo, como los de mano de obra o el consumo de agua.
 - **Ubicación Geográfica Específica:** la localización del proyecto afecta múltiples variables de costo, incluyendo el precio de los terrenos o concesiones, los costos de transporte de insumos y productos, la disponibilidad y el costo de la mano de obra local, y las condiciones

ambientales particulares del sitio, que pueden influir en la necesidad de ciertos equipos o prácticas de manejo.

- **Prácticas de Manejo Implementadas:** la eficiencia en el uso de los alimentos (para especies alimentadas), la efectividad de los programas de prevención y control de enfermedades, la optimización de las densidades de siembra, y la gestión general de la operación tienen un impacto directo y significativo en los costos de producción y, por ende, en la rentabilidad.
- **Necesidad Crítica de Recopilación Sistemática de Datos Primarios de Costos:** dada la relativa escasez de datos de costos de producción detallados, actualizados y públicamente disponibles para la maricultura específica en Costa Rica (una brecha que también se infiere del PNDPA al señalar la necesidad de fortalecer la información del sector), se recomienda enfáticamente impulsar y apoyar la recopilación sistemática de datos de costos provenientes de proyectos piloto e iniciativas de investigación. La inversión en la generación de información económica local y validada para el sector marícola emergente es tan importante como la investigación biológica o tecnológica. Sin datos de costos fiables y representativos de las condiciones costarricenses, la planificación estratégica del sector, la formulación de políticas de fomento efectivas y la atracción de inversiones privadas se ven considerablemente obstaculizadas.

4.4. Soporte de investigación y desarrollo

Costa Rica ha consolidado una red interinstitucional robusta en investigación y desarrollo para la maricultura, liderada por entidades académicas, estatales y, en menor medida, por el sector privado. Esta estructura se alinea con las prioridades nacionales establecidas en el Plan Nacional de Desarrollo Pesquero y Acuícola 2025-2030 (INCOPECA, 2024), que enfatiza el fortalecimiento de capacidades técnicas, la diversificación de especies y la sostenibilidad.

La UNA, a través de su Escuela de Ciencias Biológicas y el Parque Marino del Pacífico (PMP), ha liderado el cultivo de especies como *Lutjanus guttatus* (pargo manchado) y *Crassostrea gigas* (ostra japonesa), con avances significativos en investigación larval, protocolos de engorde y sistemas de cultivo flotante. Además, el PMP ha iniciado estudios preliminares para incorporar *Isostichopus fuscus* (pepino de mar) en programas de maricultura diversificada con enfoque comunitario. Asimismo, ha desarrollado investigaciones técnicas en cultivo de camarón blanco del Pacífico (*Litopenaeus vannamei*), particularmente en condiciones de baja salinidad, como alternativa de diversificación para el sector camaronero tradicional (Calvo, 2024; Herrera-Ulloa et al., 2009; PMP, 2023).

El INCOPECA no solo actúa como ente regulador, sino que también participa en proyectos técnicos y de capacitación. Destaca su rol en la definición de especies prioritarias para el desarrollo acuícola y en la promoción de estrategias de

investigación aplicada para el Golfo de Nicoya, como lo establece el Plan Nacional de Desarrollo Pesquero y Acuícola 2025-2030 (INCOPESCA, 2024).

El TEC ha contribuido en el diseño de estructuras flotantes y sistemas automatizados de alimentación y monitoreo, aplicados a proyectos piloto en ostras y peces. Asimismo, ha participado en evaluaciones de indicadores de sostenibilidad para la maricultura a pequeña escala (Robles-Herrera et al., 2025).

La UCR ha tenido un rol pionero en la investigación marina en el país, especialmente a través del CIMAR. Históricamente, esta universidad ha desarrollado investigaciones sobre la biología y ecología de moluscos bivalvos, equinodermos y peces de importancia acuícola, incluyendo diagnósticos de potencial de maricultura desde la década de 1980. Más recientemente, ha enfocado esfuerzos en aspectos de biodiversidad, calidad del agua, capacidad de carga y bioseguridad, aspectos clave para la planificación espacial marina y la sostenibilidad de proyectos de acuicultura, particularmente en el Pacífico Central y Sur del país (Méndez-Vargas et al., 2022).

La UNED y la Universidad Latina de Costa Rica han desarrollado investigaciones vinculadas a la sostenibilidad, gobernanza y gestión integrada en maricultura, particularmente en el Golfo de Nicoya. Entre las especies estudiadas figuran *Litopenaeus vannamei* (camarón blanco), *Crassostrea gigas*, *Lutjanus guttatus* y mejillones nativos (Robles-Herrera et al., 2024; 2025).

La UTN, mediante su sede en Puntarenas, ha promovido la transferencia de tecnología y formación de recursos humanos para granjas de camarón blanco, trabajando estrechamente con comunidades costeras y pequeños productores (INCOPESCA, 2019). Por su parte, el Instituto INA ha tenido un papel complementario en la capacitación técnica de acuicultores y operarios, apoyando la implementación de buenas prácticas acuícolas, particularmente en sistemas de engorde de camarón y tilapia (PMP, 2023).

En cuanto al sector privado, su participación ha sido incipiente, pero creciente, especialmente en iniciativas de cultivo de ostras en el Golfo de Nicoya y en alianzas para turismo acuícola. Se vislumbra como un actor clave en la escalabilidad de los proyectos investigativos a fases comerciales. La convergencia de estos centros de investigación y formación ha permitido no solo avances técnicos significativos, sino también la articulación de una visión nacional de maricultura inclusiva, resiliente y con potencial de exportación.

4.5. Capital humano

Este apartado se construye a partir del análisis de los portafolios de pepinos de mar y macroalgas, donde ya se han identificado importantes capacidades humanas en desarrollo. Sin embargo, es clave reconocer que la mayoría del capital humano

existente en maricultura en Costa Rica ha sido formada a través de más de 30 años de trabajo en maricultura general, principalmente en el cultivo de peces marinos.

La trayectoria en esta área ha generado una red interinstitucional sólida, conformada por:

- a. UNA: a través de su Escuela de Ciencias Biológicas y el PMP, ha liderado procesos de investigación y formación en reproducción de peces marinos, producción de alimento vivo, manejo sanitario y sistemas de engorde en jaulas flotantes. La UNA no solo genera tecnologías sino también genera profesionales en el área con una alta especialización a través de su carrera en Biología Marina.
- b. INCOPESCA: contribuye activamente mediante proyectos de engorde experimental de especies marinas y en la formación de las personas de las comunidades interesadas en las temáticas de maricultura.
- c. INA: desarrolla programas técnicos en acuicultura con enfoque práctico en zonas costeras.
- d. Universidades públicas como la Universidad de Costa Rica (UCR), el Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), la Universidad Estatal a Distancia (UNED) que han aportado en temas como biotecnología, sostenibilidad y monitoreo ambiental marino. En el caso de la Universidad Técnica Nacional (UTN) cuentan con la carrera en Ingeniería en Acuicultura, la cual genera también profesionales con alta especialización en el campo.
- e. Asociaciones de pescadores y organizaciones comunitarias, quienes han recibido capacitación directa en maricultura productiva y que actualmente cuentan con restaurantes flotantes con jaulas con peces, camarones e incluso ostras. Sin embargo, estas asociaciones obtienen estos organismos de instituciones como la UNA, PMP, UTN e incluso comprados de la empresa privada.
- f. Aunque al momento de escribir este trabajo, Martec/Aquafoods ya no opera a nivel nacional, sí dejó muchas personas capacitadas sobre todo en Quepos (Puntarenas) y en Pilas de Bejuco (Guanacaste).

Adicionalmente, la cooperación internacional con entidades como el International Cooperation and Development Fund of Taiwan y la Universidad Católica del Norte de Chile ha sido fundamental para la capacitación de técnicos costarricenses en áreas especializadas como auditoría de procesos productivos, evaluación de ciclos biotecnológicos y nutrición larval.

Este capital humano ha sido formado tanto en ambientes académicos como mediante experiencias prácticas, con proyectos de cultivo real en el Golfo de Nicoya y Bocas del Toro (Panamá), y ha generado documentación especializada como el libro *Producción de Peces Marinos Juveniles en Costa Rica* (Herrera-Ulloa, 2019), que sistematiza más de 15 años de conocimiento técnico y académico. Estas

capacidades son adaptables a otros cultivos marinos, como equinodermos, bivalvos o macroalgas, consolidando una base técnica nacional robusta y con alta capacidad de transferencia.

4.6. Insumos

Este subapartado se fundamenta en la caracterización realizada en los portafolios de pepinos de mar y macroalgas, complementado con la información técnica sistematizada a partir de experiencias en maricultura de peces marinos en Costa Rica. En particular, se emplea como referencia la sistematización de más de quince años de trabajo técnico-operativo en cultivos de peces nativos, experiencia que resulta ampliamente aplicable a otros cultivos marinos.

- a. **Infraestructura:** En cuanto a infraestructura, a continuación, se mencionan algunos aspectos básicos requeridos para realizar una maricultura de un alcance importante.
- **Laboratorios especializados:** Para cultivo larval, reproducción, producción de microalgas y alimento vivo. Están diseñados con:
 - Tanques de fibra de vidrio de diferentes capacidades (de 500 L a 20 000 L).
 - Áreas separadas para reproductores, larvas, juveniles y producción de alimento vivo.
 - Sistemas cerrados y abiertos de recirculación de agua marina.
- **Sistemas de soporte de vida:**
 - Captación de agua marina desde cuerpos costeros con baja contaminación.
 - Filtración mecánica (arena, cartucho) y biológica (biofiltros).
 - Esterilización con radiación ultravioleta (UV) y cloración controlada.
 - Red de aireación con compresores, difusores y mangueras microperforadas.
 - Redes eléctricas de respaldo con plantas generadoras para evitar interrupciones críticas.
- **Sistemas de engorde:**
 - Jaulas marinas flotantes de diferentes diseños (circulares, rectangulares) con mallas de nylon de alta resistencia. Plataformas flotantes de trabajo con pasarelas para manejo, alimentación y cosecha.

b. **Insumos biológicos:** la experiencia en peces marinos ha generado el desarrollo de múltiples insumos que también son útiles para otras especies.

- **Microalgas cultivadas:**

- *Nannochloropsis sp.*: rica en EPA (ácido eicosapentaenoico), ideal para enriquecer alimento vivo.
- *Isochrysis galbana*: fuente de DHA (ácido docosahexaenoico), usada en fases tempranas de alimentación larval.
- *Tetraselmis sp.* y *Chaetoceros sp.*: empleadas como primer alimento directo para bivalvos o en fases larvales de peces y crustáceos.

- **Zooplankton vivo:**

- **Rotíferos (*Brachionus plicatilis*):**

- Cultivos en masa con sistemas semicontinuos.
- Enriquecimiento con emulsiones ricas en HUFA's.

- **Artemia spp:**

- Eclosión de quistes en tanques cónicos.
- Enriquecimiento con ácidos grasos esenciales y probióticos.

- **Copépodos** (ej. *Tisbe monozota*): utilizados experimentalmente para mejorar tasas de supervivencia larval. Aunque este organismo tiene su tecnología menos desarrollada al menos en Costa Rica.

- **Reproductores:**

- Selección por talla, edad y condición reproductiva. Capturados primeramente del ambiente natural y a partir de ellos se generan las F1, F2, etc.
- Acondicionamiento con fotoperiodo, temperatura y alimentación.
- Inducción hormonal mediante GnRH, HCG o implantes biodegradables. Aunque lo recomendado es tratar de que el organismo realice la reproducción de manera natural.

c. **Alimentos balanceados y estrategias nutricionales**

- **Formulación y uso de alimentos secos comerciales:**

- Balanceados por etapa de desarrollo (larvas, juveniles, adultos).
- Aporte de proteína de origen marino (harina de pescado) o vegetal.
- Aplicación de estrategias de alimentación progresiva según talla y densidad.

- **Alimentos alternativos y complementarios:**

- Pescado molido, subproductos pesqueros y desechos de camarón como alimento fresco para reproductores o en fases de engorde.
- Dietas experimentales con base en harinas vegetales, probióticos y aditivos inmunoestimulantes.

d. Sistemas de control sanitario y calidad de agua

- **Monitoreo de parámetros críticos:**
 - Temperatura, oxígeno disuelto, pH, amonio, nitritos y salinidad.
 - Sistemas de medición portátiles y fijos con sensores multivariantes (si es posible, pero al menos se requiere un aparato para medir el oxígeno disuelto).
- **Manejo sanitario preventivo:**
 - Limpieza y desinfección rutinaria de instalaciones con hipoclorito y yodóforos.
 - Aplicación de protocolos de cuarentena para reproductores nuevos.
 - Observación diaria del comportamiento, apetito y mortalidades.
- **Profilaxis y respuesta ante enfermedades:**
 - Uso de baños terapéuticos (formol, peróxido, agua dulce).
 - Aislamiento de lotes enfermos y protocolos de descarte seguro.
 - Registros de enfermedades prevalentes y tratamientos aplicados.

e. Equipamiento técnico y operatividad

- **Herramientas de laboratorio:**
 - Microscopios para monitoreo de alimento vivo y desarrollo larval.
 - Balanzas de precisión, termómetros digitales, oxímetros.
 - Equipos para análisis microbiológico y microscópico de muestras.
- **Equipos logísticos y de cosecha:**
 - Redes de arrastre manual, cosechadoras tipo bomba para juveniles.
 - Botes auxiliares y boyas para mantenimiento de jaulas (generalmente estos son aportados por instituciones como INCOPECA, UNA, Guardacostas).
 - Camiones para traslados, que generalmente han sido proveídos por el INCOPECA cuando es de su posibilidad.

f. Soporte institucional y técnico-operativo

- **Asistencia técnica y capacitación:**
 - Servicios disponibles desde el INA, INCOPECA, universidades y organizaciones locales para capacitación en cultivo, cosecha, procesamiento y comercialización.
 - Manuales técnicos y guías operativas desarrolladas a partir de experiencias documentadas.
- **Disponibilidad de proveedores locales:**
 - Distribuidores de aireadores, redes, alimentos balanceados, tanques y productos químicos certificados.
 - Importadores de Artemia, suplementos nutricionales y equipos de medición.

g. Elementos estratégicos para escalamiento

- Conocimiento validado en condiciones tropicales.
- Protocolos adaptables a nuevas especies con requerimientos similares.
- Presencia de redes institucionales para acompañamiento técnico.
- Capacidad de replicabilidad en zonas costeras con adecuada zonificación y acceso a agua marina limpia.

En el siguiente cuadro se resumen insumos importantes para la actividad de maricultura y empresas que los importan al país y que además están incorporados al SICOP lo cual es una ventaja frente a otras empresas (Ver cuadro 17).

Cuadro 17. Equipos requeridos en laboratorio de maricultura y algunos oferentes con sus respectivos precios (USD).

Filtración de agua									
Oferente	Bomba de agua, potencia 3,72 kw (0,5 hp)	Bomba de agua periférica, presión de trabajo de 3,86 bar (56 psi).	Filtro de agua, tipo esfera	Fraccionador de proteínas	Medidor multiparámetros	UV ultravioleta	Arena para filtro 1	Figuras para armar un sistema	Tanque de fibra de 4 ton.
CC Instrumentación industrial Sociedad Anónima	1 142.40								
Zebol Sociedad Anónima	1 892.10	795.60	633.42						
Zebol Sociedad Anónima	731.34								
Alrotek de Centroamérica Sociedad Anónima			321.30						
Sensar LS Sociedad Anónima				1 140.96					

Compañía Técnica SATEC Sociedad Anónima				1 683					
VIMAT Sociedad Anónima				2 241.92					
HANNA					1 119.72				
Servicios Analíticos SASA Sociedad Anónima					1 050				
Servicios Técnicos Sociedad Anónima					921.27				
Supplymeca Sociedad de Responsabili dad Limitada					2 394.12				
ENHMED Sociedad Anónima					3 466				
Vida en la Tierra						654			

Sociedad Anónima									
Solacua Sociedad Anónima							279.88		
Ferreteros 1								156.55	
Ferreteros 2								270	
Serviflex									4000

En el siguiente cuadro se muestran equipos para laboratorio, con oferentes y costo en dólares.

Cuadro 18. Oferentes, precio (USD) de algunos equipos de laboratorio utilizados en maricultura.

Laboratorio												
Oferente	Multiparámetros	Luxómetro	Balanza laboratorio 5kg	Centrífuga	Autoclave	Phmetro	Destilador	Computadora 14"	Balanza granataria 3000 g	Estereoscopio	Químicos para microalgas	Materiales de fotobiorreactor
HANNA	1120											

Servicios analíticos SASA Sociedad Anónima	1050											
Servicios Técnicos Sociedad Anónima	921.27											
Supplymeca Sociedad de Responsabilidad Limitada	2395											
ENHMED Sociedad Anónima	3466											
Compañía Técnica SATEC Sociedad Anónima		904										
Goltech de Costa Rica Sociedad Anónima		525.3										
G Y H steinvorth Limitada		816										
OCONY			380.4									
GyH steinvorth Limitada				4156.5								

Centro para el Desarrollo Biociencia Sociedad Anónima					1308. 66	651	1525. 92					
PRELAB S. A								486				
Romanas Lacost Sociedad Anónima									295			
DIPROLAB de Centro América CORP Sociedad Anónima						286. 62				375.78		
DIPROLAB de Centro América CORP Sociedad Anónima										955.74		
DIPROLAB de Centro América CORP Sociedad Anónima					3106. 614					1914.19		
Audraín y Jiménez											2 000	
Ferreteros												700

Este último cuadro muestra otros insumos que se requieren en la maricultura.

Cuadro 19. Oferentes, precio (\$) de otros insumos utilizados en maricultura.

Otros materiales						
Oferentes	Materiales de limpieza	Cristalería (vario)	Microalgas en pasta y Artemia (ambos precios aproximados)	Saco de alimento para pargo rojo	Redes para jaulas flotantes (para 4 jaulas)	Jaula Flotante de tamaño D5
Solacua			100			
Biomar				60		
El Cabécar					2800	
Serviflex						2500
Audraín y Jiménez		1000				
Almacén	500					

4.7. Financiamiento Local

Cabe señalar que el apartado de financiamiento local presentado en este documento es el mismo que se incluye en los portafolios de pepinos de mar y macroalgas, ya que todos comparten las mismas fuentes, limitaciones y mecanismos de apoyo económico. Esta convergencia responde a que, en Costa Rica, el desarrollo de la maricultura ha estado históricamente enfocado en especies como peces, ostras y camarones, mientras que las iniciativas orientadas a nuevos cultivos, como pepinos de mar y macroalgas, aún se encuentran en una fase emergente, sin esquemas financieros diferenciados. A continuación, se realiza un resumen de esta información, pero para mayor detalle revisar el portafolio de pepinos y macroalgas.

a. Fuentes actuales de financiamiento

En el país existen diversas fuentes de financiamiento local que, aunque no están diseñadas exclusivamente para maricultura, han sido utilizadas por proyectos productivos del sector:

- **Sistema de Banca para el Desarrollo (SBD):** créditos y fondos no reembolsables a emprendimientos productivos, incluyendo proyectos del sector pesquero y acuícola. Sin embargo, la canalización efectiva hacia la maricultura ha sido limitada debido a barreras técnicas y requisitos de formalidad.
- **Fideicomisos y fondos rotativos regionales:** administrados por municipalidades o instituciones como el IMAS, estos fondos han apoyado iniciativas de economía social solidaria, incluyendo algunas relacionadas con acuicultura artesanal y pesca responsable.
- **Organizaciones no gubernamentales y cooperación internacional:** a través de proyectos piloto y fondos concursables, han contribuido al financiamiento de infraestructura básica, capacitaciones y transferencia tecnológica, especialmente en zonas costeras.
- **Apoyo institucional en especie:** entidades como INCOPESCA, INA, UNA y el PMP han brindado apoyo mediante acompañamiento técnico, uso de laboratorios, acceso a semilla, estudios ambientales, y capacitación, lo cual representa una forma indirecta pero fundamental de financiamiento.

b. Mecanismos de acceso y limitaciones actuales

Aunque estas fuentes existen, su acceso enfrenta barreras relevantes:

- **Falta de instrumentos financieros específicos para la maricultura,** que consideren las características particulares del sector: tiempos largos de producción, riesgos ambientales, necesidad de permisos, entre otros.

- Limitado conocimiento del sector financiero sobre cultivos marinos, lo que dificulta la evaluación de proyectos y el otorgamiento de créditos.
- Escasa formalización de grupos productivos costeros, lo cual restringe su acceso a financiamiento bancarizado.
- Baja capacidad de formulación de proyectos con enfoque empresarial, especialmente en comunidades que apenas se están vinculando a la maricultura.

c. Oportunidades de fortalecimiento

- Desarrollo de líneas de crédito específicas para la maricultura, con períodos de gracia amplios y tasas diferenciadas, considerando el modelo de producción escalonado.
- Incorporación de maricultura en los planes de financiamiento del SBD y en políticas nacionales de economía azul.
- Articulación con iniciativas de carbono azul y soluciones basadas en naturaleza (SbN), que podrían generar ingresos complementarios por servicios ecosistémicos en proyectos de cultivo de macroalgas o bivalvos.
- Fortalecimiento de capacidades en formulación de proyectos y modelos de negocio acuícola en organizaciones locales.

4.8. Tramitología y legislación

En el contexto actual de la maricultura en Costa Rica, se observa que la producción de camarón marino en estanques enfrenta limitaciones para su expansión, principalmente por la falta de disponibilidad de nuevas áreas aptas para este tipo de cultivo. No obstante, existen oportunidades para optimizar su rendimiento mediante la incorporación de tecnologías innovadoras y la implementación de medidas de bioseguridad que reduzcan el riesgo de enfermedades. Por otro lado, las mejores proyecciones de crecimiento se centran en el cultivo marino de peces y moluscos, como pargos, corvinas, ostras y mejillones.

Asimismo, el cultivo de camarón en jaulas marinas y de otros invertebrados como los pepinos de mar ha despertado un creciente interés. En términos de comercialización, el mercado para estas especies no representa un obstáculo significativo, especialmente en lo que respecta a la exportación. A medida que se fortalezca la producción de semilla y se superen ciertos desafíos técnicos entre ellos, la obtención oportuna de permisos técnicos y ambientales, se vislumbran buenas perspectivas para el desarrollo técnico del sector y la generación de empleo en las zonas costeras, que actualmente registran un 14% de desempleo, una de las tasas más altas a nivel nacional.

El INCOPESCA es la entidad responsable de regular y promover la acuicultura en el país, conforme a lo establecido en la Ley N.º 7384 del 29 de marzo de 1994.

Esta ley proporciona el marco jurídico adecuado para el impulso y organización del sector, y designa a INCOPESCA como el ente encargado de coordinar las actividades pesqueras y acuícolas, promover su desarrollo ordenado y fomentar, con base en criterios técnicos y científicos, el aprovechamiento sostenible de los recursos biológicos marinos y acuícolas (Artículo 2). Además, la Ley N.º 8436 de Pesca y Acuicultura refuerza esta función al nombrar a INCOPESCA como la unidad ejecutora de dicha normativa (Artículo 12), y establece en sus artículos 82 al 85 los requisitos y lineamientos para gestionar una autorización para desarrollar proyectos acuícolas.

El desarrollo de la maricultura en Costa Rica constituye una alternativa productiva clave para la generación de empleo y el fortalecimiento de la seguridad alimentaria en las zonas costeras. No obstante, la implementación de estas actividades debe realizarse bajo un marco normativo riguroso que garantice la sostenibilidad ambiental y el uso racional de los ecosistemas marinos. En este contexto, el Decreto Ejecutivo N.º 42755-MINAE (2020), publicado en diciembre de 2020, establece la Guía General para la Valoración de los Impactos Ambientales Generados por la Actividad de Maricultura, con el objetivo de estandarizar y agilizar los procesos requeridos para obtener la viabilidad ambiental ante la Secretaría Técnica Nacional Ambiental (SETENA).

La guía está dirigida a todos aquellos cultivos realizados directamente en el mar, no incluye acuicultura costera continental como el caso de las fincas de camarón en lagunas o laboratorios de producción de semilla, ya que sus características difieren significativamente de las grajas marinas.

Esta normativa surge en respuesta a la necesidad de ordenar y facilitar el trámite ambiental de las actividades de maricultura, promoviendo la armonización entre el desarrollo productivo y la conservación de los ecosistemas marino-costeros. El decreto define los criterios técnicos y los instrumentos de evaluación de impacto ambiental aplicables según la escala del proyecto (social-familiar, pequeña, mediana o gran escala), a través de formularios diferenciados (D5-SF, D5-PE, D5-ME y D5-GE). Además, introduce un enfoque adaptado a la naturaleza particular de la maricultura, considerando aspectos como el tipo de especie cultivada, el volumen de producción anual y la localización respecto a áreas silvestres protegidas.

Entre los aportes más relevantes del decreto se encuentra la formalización de un procedimiento claro para clasificar los proyectos según su impacto ambiental potencial, así como los requisitos y plazos para la obtención de la viabilidad ambiental. Por ejemplo, los proyectos de maricultura social-familiar deben presentar un formulario D5-SF con un tiempo de respuesta no mayor a 10 días hábiles, mientras que los de gran escala deben someterse a un Estudio de Impacto Ambiental con una evaluación más rigurosa y plazos de hasta 60 días hábiles (Ver Cuadro 20).

Cuadro 20. Tiempos máximos de resolución para obtener una viabilidad ambiental, al cumplir con todos los requisitos.

Escala	Instrumento requerido	Tiempo máximo de resolución por SETENA
Social-familiar	Formulario D5-SF (Registro)	10 días hábiles
Pequeña escala	Declaración Jurada de Compromisos Ambientales (DJCA)	30 días hábiles
Mediana escala	Pronóstico - Plan de Gestión Ambiental (P-PGA)	40 días hábiles
Gran escala	Estudio de Impacto Ambiental (EsIA)	60 días hábiles

En definitiva, el Decreto Ejecutivo N.º 42755-MINAE (2020) representa un avance significativo en la gobernanza ambiental del país al ofrecer un instrumento técnico que permite al Estado costarricense evaluar y fiscalizar las actividades de maricultura desde una perspectiva integral, alineada con las políticas nacionales de desarrollo sostenible, los compromisos internacionales como la Convención Ramsar, y el ordenamiento ambiental del territorio. Su aplicación efectiva constituye un paso fundamental para impulsar una maricultura responsable, inclusiva y resiliente frente a los desafíos del cambio climático y la sobreexplotación de los recursos marinos.

Las escalas propuestas para el trámite de la viabilidad ambiental son: (tomado de DE N.º 42755-MINAE) (MINAE, 2020).

Acuicultura social-familiar

Se trata de cultivos de organismos marinos realizados por núcleos familiares o grupos organizados (como asociaciones o cooperativas), con fines de subsistencia, autoconsumo o generación de empleo en zonas costeras. Estos proyectos deben contar con el apoyo de al menos dos instituciones estatales durante los dos primeros años, y se caracterizan por su bajo impacto ambiental, incluso si se desarrollan en áreas marinas protegidas permitidas por el SINAC. Son considerados proyectos de registro (D5-SF) y los límites de producción varían según la especie cultivada.

Pequeña escala

Son cultivos marinos de baja producción anual y bajo impacto ambiental, que no pueden ubicarse en áreas marinas protegidas salvo que esté permitido en el Plan de Manejo y según su categoría SINAC. Deben mantener al menos 100 metros de distancia de áreas protegidas y no pueden afectar arrecifes, pastos marinos y manglares. Se presentan mediante una Declaración Jurada de Compromisos Ambientales (OS PE).

Mediana escala

Corresponden a cultivos marinos de mediana producción y con impacto ambiental potencial moderado. No pueden ubicarse dentro de áreas marinas protegidas ni afectar arrecifes, pastos marinos o manglares, sin importar su ubicación. Deben mantener al menos 500 metros de distancia desde su área de impacto hasta el límite de zonas protegidas. Requieren evaluación conforme a los requisitos (O5-ME).

Gran escala

Son cultivos marinos de alta producción anual, con impacto ambiental potencial de moderado a alto. No pueden desarrollarse en áreas marinas protegidas ni afectar arrecifes, pastos marinos o manglares, sin importar su ubicación. Deben mantener una distancia mínima de 1000 metros respecto a zonas protegidas y ser evaluados según los requisitos (OS-GE) (Ver Cuadro 21).

Cuadro 21. Escalas de cultivo de la maricultura según tipo de organismos marinos (Instructivo para la valoración de impactos ambientales).

Cultivo de camarón en jaulas flotantes			
Escala	Área (hectáreas)	Producción (kg/año)	Categorías
Social Familiar	≤ 1.5	$\leq 10\ 000$	D5-SF (Registro)
Pequeña	> 1.5 y ≤ 5	$> 10\ 000$ y $\leq 30\ 000$	D5-PE (DJCA)
Mediana	> 5.1 y ≤ 15	$> 30\ 000$ y $\leq 100\ 000$	D5-ME (P-PGA)
Grande	>15	$>100\ 000$	D5-GE (EsIA)
Cultivo de peces marinos en jaulas flotantes			
Social Familiar	≤ 1.5	$\leq 15\ 000$	D5-SF (Registro)
Pequeña	> 1.5 y ≤ 5	$> 15\ 000$ y $\leq 50\ 000$	D5-PE (DJCA)
Mediana	> 5.1 y ≤ 15	$> 50\ 000$ y $\leq 250\ 000$	D5-ME (P-PGA)
Grande	>15	$>250\ 000$	D5-GE (EsIA)
Cultivo de ostras, mejillones y otros moluscos bivalvos en jaulas flotantes			
Social Familiar	≤ 2	$\leq 10\ 000$	D5-SF (Registro)
Pequeña	> 2 y ≤ 6	$> 10\ 000$ y $\leq 30\ 000$	D5-PE (DJCA)
Mediana	> 6 y ≤ 20	$> 30\ 000$ y $\leq 100\ 000$	D5-ME (P-PGA)
Grande	>20	$>100\ 000$	D5-GE (EsIA)

*http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=93705&nValor3=124511&strTipM=TC

En caso de nuevas especies de invertebrados aún no cultivadas como moluscos no bivalvos, equinodermos, macroalgas, entre otras especies, se utilizará la misma categoría de Moluscos bivalvos.

Seguidamente, al obtener la viabilidad ambiental se debe tramitar ante Dirección de Agua el permiso de Concesión de aguas superficiales. La Dirección de Agua, adscrita al MINAE, es la entidad encargada de la administración y gestión del recurso hídrico a nivel nacional. Su función principal es garantizar el uso sostenible del agua, protegiendo este recurso vital en el marco de la legislación ambiental vigente. El Departamento de Agua de Costa Rica fue establecido mediante la Ley de Aguas N.º 276, promulgada el 27 de agosto de 1942. Esta legislación asignó la rectoría de las aguas de dominio público al entonces Servicio Nacional de Electricidad (SNE) y dispuso la creación del Departamento de Aguas para ejercer dicha función. Finalmente, en enero de 2010, mediante el Decreto Ejecutivo N.º 35669-MINAE, el Departamento de Aguas fue reorganizado y elevado al rango de Dirección de Agua, ampliando sus funciones y consolidando su papel en la gestión del recurso hídrico a nivel nacional.

Es importante destacar que las aguas superficiales, como nacimientos, quebradas, ríos, lagunas, lagos y mares, son de propiedad nacional. Por lo tanto, cualquier persona física o jurídica que desee utilizarlas debe obtener una concesión de aprovechamiento.

Para obtener una concesión de aprovechamiento de aguas superficiales en Costa Rica, es necesario seguir un proceso regulado por la Dirección de Agua (DA) del Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE). Este proceso consta de tres fases principales: admisibilidad, técnica y legal.

Fase de Admisibilidad

- Presentación de la solicitud: El interesado debe completar y presentar el formulario correspondiente a través del Sistema de Permisos y Concesiones (SIPECO).
- Revisión de la solicitud: La DA revisa la documentación presentada. Si se requieren correcciones o información adicional, se notificará al solicitante.
- Asignación de expediente y publicación de edicto: Una vez que la solicitud está completa, se asigna un número de expediente y se emite la Boleta 5 (Solicitud Admitida con Edicto). El solicitante debe publicar un edicto en el Diario Oficial La Gaceta, lo cual puede hacerse en línea o presencialmente en la Imprenta Nacional.
- Audiencia a instituciones y recepción de oposiciones: Se da audiencia a diversas instituciones relacionadas con la petición. Además, se otorgan 30 días, a partir de la publicación del edicto, para recibir oposiciones, las cuales se atenderán según el debido proceso y se resolverán en la resolución final.

Fase técnica

- Inspección de campo: Según sea el caso, un funcionario técnico realiza una inspección de campo, generalmente durante la época seca.
- Elaboración de informe técnico: Se elabora un informe técnico con las recomendaciones pertinentes.

Fase legal

- Redacción de la resolución final: La Asesoría Legal de la DA redacta la resolución final basada en el informe técnico y las consideraciones legales.
- Revisión y firma: El jerarca de la DA revisa y firma la resolución.
- Notificación al interesado: Se notifica la resolución al solicitante.

Una vez otorgada la concesión, el concesionario debe pagar un canon anual por el aprovechamiento del agua, calculado en función del volumen autorizado y el uso específico del recurso.

Finalmente, el solicitante debe presentar ante INCOPECA un expediente con varios documentos. Aunque pueden variar según el tipo de proyecto (pequeña escala, investigación, gran escala), típicamente se incluyen Solicitud de Autorización para el Cultivo de Organismo Acuáticos en Aguas Continentales y Marinas, debidamente firmadas por el interesado. Conjuntamente con:

1. Presentación de cédula de identidad vigente.
2. En caso de personas jurídicas presentar original y fotocopia de la cédula de personería jurídica vigente y certificación notarial de la personería jurídica con no más de 3 meses de haber sido emitida.
3. Viabilidad ambiental debidamente aprobada por la Secretaría Técnica Nacional Ambiental (SETENA).
4. Concesión de aguas debidamente aprobada por la Dirección del Aguas del MINAE.
5. Documento técnico donde se explique con detalle el proyecto acuícola, conteniendo al menos los siguientes puntos:
6. Biología de la especie o especies en cultivo.
7. Infraestructura: Número de unidades de producción (estanques, jaulas, bateas, apartos, etc.)
8. Área por unidad de producción
9. Espejo de agua total
10. Croquis de la infraestructura
11. Presiembra:
 - a. Preparación de sistema de cultivo
 - b. Procedencia de la semilla
 - c. Aclimatación
 - d. Siembra

12. Manejo de unidades de producción:
 - a. Recambios
 - b. Alimentación
 - c. Muestreos
 - d. Cosecha
 - e. Medidas sanitarias
 - f. Post cosecha.
13. Medidas de bioseguridad de la finca.
14. Estructura de costos del proyecto.
15. Tabla con las principales características de producción.

Una vez aprobado, el permiso se otorga por un plazo determinado (usualmente 5 años), y puede ser renovado si el proyecto cumple con los requisitos técnicos, sanitarios y legales. Además, debe cancelar un pago anual por concepto de canon.

4.9. Cadena de valor

Una cadena de valor acuícola típica, aplicable al contexto de la maricultura general en Costa Rica, comprende las siguientes etapas principales:

Investigación y Desarrollo (I+D) e Innovación: esta etapa inicial es crucial y abarca la investigación científica aplicada para la selección y adaptación de especies nativas o exóticas con potencial comercial (como pepinos de mar y macroalgas), el desarrollo de técnicas de reproducción en cautiverio (criaderos o *hatcheries*), la mejora genética para optimizar rendimientos y resistencia a enfermedades, la formulación de dietas específicas, y la innovación en tecnologías de cultivo y sistemas de producción (ej. estanques en tierra, jaulas marinas, sistemas de líneas o *longlines* para macroalgas, sistemas multitróficos integrados). También incluye el desarrollo de nuevos productos y procesos con valor agregado.

Suministro de insumos: comprende la provisión de todos los elementos necesarios para la producción. Esto incluye el suministro de "semillas" (larvas, juveniles, plántulas de algas), alimento balanceado de alta calidad y costo-efectivo, equipos especializados para el cultivo (bombas, aireadores, redes, boyas, sistemas de monitoreo), medicamentos veterinarios y productos para el tratamiento de aguas, así como servicios técnicos especializados (consultorías, análisis de laboratorio).

Producción primaria / cultivo: es el núcleo de la maricultura, donde se lleva a cabo el engorde de las especies seleccionadas hasta alcanzar la talla comercial. Involucra la operación de criaderos para la producción de juveniles (si no se adquieren externamente) y las granjas de engorde. Estas pueden operar bajo

diversos sistemas, desde estanques en tierra (comunes en camaronicultura, pero adaptables a otras especies en ciertas fases) hasta sistemas suspendidos o en el fondo marino (jaulas, líneas para algas, corrales para pepinos de mar).

Procesamiento: una vez cosechados, los productos acuícolas suelen requerir algún tipo de procesamiento. Este puede ser primario, como la evisceración, limpieza, clasificación, congelación, secado (como en el caso de pepinos de mar y algunas macroalgas) o refrigeración. El procesamiento secundario implica una transformación mayor para generar productos con valor agregado, tales como extractos bioactivos de macroalgas para la industria cosmética o farmacéutica, conservas, ahumados, o platos preparados.

Distribución y logística: esta etapa se encarga del movimiento eficiente de los productos desde la granja o planta de procesamiento hasta los consumidores. Incluye el almacenamiento adecuado (especialmente la cadena de frío para productos frescos y congelados), el transporte nacional (hacia mercados locales o centros de consolidación para exportación) y el transporte internacional (aéreo o marítimo), involucrando a operadores logísticos especializados.

Comercialización y mercadeo: implica la venta de los productos a través de diversos canales. Estos pueden ser mayoristas que distribuyen a supermercados, restaurantes y otros minoristas, o la venta directa en mercados locales. La exportación a mercados internacionales es una vía crucial para productos de alto valor como los pepinos de mar y derivados de macroalgas. Esta etapa también incluye estrategias de *branding*, promoción, participación en ferias comerciales y desarrollo de relaciones con compradores.

Servicios de apoyo y regulación: engloba a todas las entidades y servicios que facilitan y regulan el funcionamiento de la cadena. Esto incluye instituciones financieras que proveen crédito e inversión, entidades gubernamentales responsables de la regulación, permisos, fiscalización y fomento (como INCOPECA, SENASA, MINAE, PROCOMER), certificadoras de calidad e inocuidad (ej. HACCP, ASC), asociaciones de productores que defienden intereses comunes y facilitan la cooperación, y consultores especializados en diversas áreas.

Identificación de actores clave en la cadena de valor de la maricultura costarricense

Para cada etapa de la cadena de valor de la maricultura general en Costa Rica, se identifican los siguientes tipos de actores clave:

- **Investigación y Desarrollo (I+D) e Innovación:**
 - Universidades públicas y privadas (ej. UCR) con estudios sobre *Sargassum spp.* Universidad Nacional (UNA)).

- Centros de investigación marina y acuícola.
 - Empresas privadas con departamentos de I+D (potencialmente grandes productoras o proveedoras de insumos).
 - ONGs con enfoque en investigación aplicada y desarrollo comunitario.
- **Suministro de insumos:**
 - Proveedores de larvas/semillas/plántulas (actualmente limitado para especies como pepinos de mar, pudiendo requerir desarrollo local o importación controlada).
 - Fabricantes y distribuidores de alimento balanceado (nacionales e internacionales).
 - Empresas proveedoras de equipos de cultivo, redes, bombas, sistemas de aireación, etc.
 - Proveedores de productos veterinarios y para la salud acuícola.
 - Laboratorios de diagnóstico y análisis de agua.
- **Producción primaria / cultivo:**
 - Pequeños, medianos y grandes acuicultores/maricultores.
 - Cooperativas de pescadores o productores acuícolas.
 - Empresas nacionales y extranjeras con inversiones en granjas de maricultura.
 - Comunidades costeras involucradas en proyectos de pequeña escala.
- **Procesamiento:**
 - Plantas de procesamiento primario (muchas veces integradas con las granjas de cultivo).
 - Empresas especializadas en procesamiento secundario y desarrollo de productos con valor agregado (actualmente incipiente para muchos productos de maricultura más allá del congelado o secado básico).
 - Maquiladoras (potencialmente).
- **Distribución y logística:**
 - Empresas de transporte terrestre refrigerado.
 - Operadores logísticos con experiencia en productos perecederos y exportación.
 - Aerolíneas y navieras.
 - Centros de acopio y almacenamiento en frío.
- **Comercialización y Mercadeo:**
 - Exportadores (actualmente pocas empresas consolidadas para productos como pepinos de mar, según se infiere de la posible confidencialidad de datos por PROCOMER).
 - Importadores y distribuidores en mercados internacionales (ej. Hong Kong y Singapur para pepinos de mar; China, EE. UU. y la UE para macroalgas y sus derivados como cosméticos, agar, suplementos e investigación farmacéutica).

- Mayoristas y minoristas en el mercado local (supermercados, restaurantes, pescaderías, ferias del agricultor).
- Plataformas de comercio electrónico.
- Agentes aduaneros, responsables de la gestión de la clasificación arancelaria, partida 0308.19 para pepinos de mar y 1212.21 para macroalgas de uso alimentario.
- **Servicios de apoyo y regulación:**
 - **PROCOMER:** Promoción de exportaciones, facilitación de contactos comerciales, inteligencia de mercados y apoyo en la internacionalización.
 - **INCOPECA:** Principal ente rector, encargado de otorgar permisos, concesiones, y regular la actividad acuícola.
 - **MINAE/ SETENA:** Regulación ambiental, evaluación de impacto ambiental.
 - **Autoridades CITES:** Control del comercio de especies amenazadas o en apéndices, como *Isostichopus fuscus*.
 - **SENASA:** Inocuidad alimentaria, sanidad acuícola, certificación para exportación.
 - **FAO:** Seguimiento de estadísticas, apoyo técnico y normativo a nivel internacional.
 - **Banca pública y privada:** Proveedores de financiamiento.
 - **Aseguradoras:** Cobertura de riesgos.
 - **Asociaciones de productores:** Representación gremial, intercambio de conocimientos.
 - Consultores y proveedores de asistencia técnica.
 - Entidades certificadoras de sostenibilidad y buenas prácticas (ASC, MSC, Orgánico, etc.).

Análisis de cuellos de botella en la producción y etapas conexas de la cadena

El desarrollo robusto de la maricultura en Costa Rica enfrenta diversos cuellos de botella que impactan la producción y las etapas interconectadas de la cadena de valor. Estos pueden agruparse en las siguientes categorías:

- **Técnicos y productivos:**
 - **Disponibilidad y calidad de semillas/larvas:** para especies no tradicionales como los pepinos de mar o ciertas macroalgas, la falta de *hatcheries* comerciales locales y la dependencia de la importación (con sus respectivos controles sanitarios y de bioseguridad) o de la recolección silvestre (para algunas algas) representa una barrera significativa para escalar la producción de manera sostenible.
 - **Acceso a alimento balanceado específico y a costos competitivos:** el alimento puede representar uno de los costos operativos más

altos. La disponibilidad local de formulaciones adecuadas para nuevas especies puede ser limitada.

- **Manejo de enfermedades:** A medida que la industria crece, el riesgo de brotes de enfermedades aumenta, requiriendo capacidades de diagnóstico, prevención y tratamiento.
 - **Desarrollo y adaptación de tecnologías de cultivo:** la transferencia y adaptación de tecnologías de cultivo probadas en otras regiones a las condiciones específicas de Costa Rica requiere inversión y conocimiento técnico.
 - **Infraestructura adecuada:** La carencia de infraestructura especializada tanto en tierra (laboratorios, plantas de proceso) como en el mar (sistemas de anclaje robustos, embarcaciones adecuadas) puede limitar la expansión.
 - **Personal técnico capacitado:** se requiere personal con conocimientos específicos en biología marina, patología acuícola, ingeniería de cultivos y gestión de granjas.
 - **Bajo volumen de producción y oferta exportable:** el volumen de exportación de pepinos de mar "inferior a 1 tonelada anual" sugiere cuellos de botella importantes en la producción sostenible (sea cultivo o extracción manejada), el procesamiento adecuado para mercados exigentes, o la capacidad de consolidar una oferta exportable que sea competitiva y atractiva para compradores internacionales.
 - **Limitada diversificación de especies:** la concentración de las exportaciones de macroalgas en *Gracilaria spp.* (90% del volumen) podría indicar un cuello de botella en la investigación, desarrollo y escalamiento comercial de otras especies de macroalgas con potencial.
- **Económicos y financieros:**
 - **Acceso a financiamiento:** la maricultura suele requerir inversiones iniciales significativas y un período de retorno prolongado, lo que dificulta el acceso a crédito para pequeños y medianos productores.
 - **Altos costos de inversión y operación:** Los costos de infraestructura, insumos de calidad y tecnología pueden ser elevados, afectando la rentabilidad, especialmente en las etapas iniciales.
 - **Rentabilidad y riesgos asociados:** la incertidumbre en los precios de mercado, los riesgos biológicos y ambientales pueden disuadir la inversión si no se percibe una rentabilidad atractiva y gestionable.
 - **Falta de economías de escala:** el sector, especialmente para nuevas especies, puede estar fragmentado y carecer de la escala necesaria para reducir costos y negociar mejores condiciones con proveedores y compradores.

- **Regulatorios e institucionales:**
 - **Complejidad y duración de trámites:** la obtención de permisos, concesiones y licencias ambientales puede ser un proceso largo y complejo, desincentivando la inversión y retrasando el inicio de operaciones.
 - **Falta de marcos regulatorios específicos:** para nuevas especies o sistemas de cultivo innovadores, pueden existir vacíos o ambigüedades en la normativa, generando incertidumbre jurídica.
 - **Debilidad en la fiscalización y control:** una fiscalización insuficiente puede llevar a prácticas insostenibles o al incumplimiento de normativas, afectando la reputación del sector.
 - **Coordinación interinstitucional:** la necesidad de interactuar con múltiples entidades gubernamentales (INCOPECA, MINAE/SETENA, SENASA, Aduanas, etc.) requiere una coordinación fluida que no siempre se logra, pudiendo generar retrasos y duplicidad de esfuerzos.
 - **Barreras administrativas por regulaciones de conservación:** la inclusión de especies como *Isostichopus fuscus* en el Apéndice III de CITES por Costa Rica, si bien es una medida crucial para asegurar la sostenibilidad y el comercio legal, podría representar un cuello de botella administrativo si los procesos para obtener los permisos de exportación son excesivamente engorrosos, lentos o poco claros para los productores y exportadores que cumplen con las normativas.

- **Comerciales y de mercado:**
 - **Acceso a mercados de exportación:** penetrar y consolidarse en mercados internacionales exigentes requiere conocimiento del mercado, cumplimiento de estándares, volúmenes consistentes y estrategias de comercialización efectivas.
 - **Cumplimiento de estándares de calidad e inocuidad:** los mercados de exportación, particularmente para consumo humano directo (como pepinos de mar) o para industrias especializadas (cosmética, farmacéutica con macroalgas), demandan altos estándares de calidad, inocuidad y, crecientemente, trazabilidad y sostenibilidad.
 - **Desarrollo de una oferta exportable consistente y con volumen:** la incapacidad de garantizar un suministro regular y en cantidades suficientes puede dificultar el establecimiento de relaciones comerciales a largo plazo.
 - **Logística de exportación:** la cadena de frío, los costos de transporte (especialmente aéreo para productos frescos) y la eficiencia en los procesos aduaneros son críticos y pueden ser un cuello de botella si no están optimizados.

- o **Inteligencia de mercados limitada:** la falta de información actualizada sobre tendencias de consumo, precios, competidores y requisitos específicos de nichos de mercado puede limitar la capacidad de los productores para tomar decisiones informadas.

4.10. Potencial de relacionamiento y encadenamientos

La maricultura en Costa Rica, particularmente en lo que respecta al cultivo de pepinos de mar y macroalgas, presenta un potencial significativo para el desarrollo de encadenamientos productivos robustos, sostenibles y de alto valor agregado. El análisis realizado hasta ahora indica que esta actividad no puede concebirse como una iniciativa aislada, sino como un componente dentro de un ecosistema económico más amplio que articule diversos actores, capacidades e infraestructuras.

Este potencial de relacionamiento se estructura sobre la premisa de un modelo de especialización por eslabones, donde la producción, logística, industrialización y comercialización no son asumidas por un solo actor, sino integradas a través de alianzas estratégicas, modelos asociativos y esquemas de outsourcing. Así, por ejemplo, se propone que el productor se enfoque exclusivamente en la etapa de cultivo, mientras que la logística y el procesamiento se delegan a socios especializados, bajo acuerdos que definen un “precio de venta en playa”. Esta separación estratégica facilita la gestión financiera, reduce la incertidumbre y fomenta la participación de actores comunitarios, empresariales y académicos.

A nivel de relacionamiento institucional, se vislumbra una plataforma de colaboración intersectorial que involucre entidades públicas (como PROCOMER, INCOPECA, INA, universidades públicas), capital privado (fincas marinas, comercializadores, hoteles), y organizaciones sociales (cooperativas, asociaciones de mujeres, agrupaciones de pescadores). La creación de un “Régimen Especial para el Ecosistema del Mar”, inspirado en las Zonas Francas, servirá como catalizador para este modelo, brindando incentivos fiscales, facilidades regulatorias y esquemas innovadores de formación técnica (como el modelo 4x3 de trabajo y capacitación).

Este enfoque integrador abre la puerta a una visión de maricultura que no solo produce, sino que también transforma, innova, capacita y exporta. En próximos apartados se profundizará en las oportunidades específicas de encadenamiento vertical (con la industria cosmética, alimentaria, farmacéutica y turística) y horizontal (con otras especies cultivables y actividades complementarias como el turismo científico), así como en las condiciones habilitantes para consolidar este ecosistema marino como un verdadero motor de desarrollo territorial sostenible.

4.11. Organizaciones de coordinación y apoyo

El desarrollo exitoso de la maricultura en Costa Rica dependerá en gran medida de la articulación efectiva entre diversas organizaciones de coordinación y apoyo que operan a nivel nacional e internacional. Este sector emergente, que integra componentes productivos, tecnológicos, ambientales y sociales, exige una gobernanza interinstitucional capaz de facilitar procesos, alinear políticas y fomentar la colaboración público-privada.

Entre los actores clave se encuentran entidades como PROCOMER, que lidera la promoción comercial, la inteligencia de mercados y la internacionalización del sector. Su rol es vital para posicionar productos como el pepino de mar y las macroalgas en ferias internacionales, conectar a productores con compradores y certificar los atributos diferenciadores como sostenibilidad e innovación. Por su parte, INCOPESCA y el SINAC son piezas esenciales para regular el uso de los recursos marinos, emitir concesiones y velar por el cumplimiento de normativas ambientales y sanitarias, aunque se evidencia la necesidad urgente de simplificar y digitalizar sus procesos mediante una ventanilla única especializada en maricultura.

En el ámbito de formación y transferencia tecnológica, el INA, la UNA, la UCR, la UNED y otros centros de investigación cumplen un papel estratégico, no solo en la capacitación de técnicos y operarios, sino también en la producción de semillas, el desarrollo de biotecnologías aplicadas, y la certificación de competencias. A nivel comunitario, se requiere impulsar el protagonismo de cooperativas pesqueras, asociaciones comunales y organizaciones de mujeres, que podrían asumir funciones clave dentro del ecosistema, como la transformación primaria, la logística local o el turismo experiencial.

Este entramado de actores debe evolucionar hacia un modelo de gobernanza colaborativa, donde cada institución asuma una función específica dentro del ecosistema productivo marino. En los próximos apartados se profundizará en la arquitectura institucional requerida, incluyendo propuestas de coordinación territorial, mecanismos de financiamiento compartido, y la creación de un Consejo Interinstitucional de Maricultura Sostenible, que opere como ente rector de esta nueva frontera productiva nacional.

4.12. Servicios de apoyo y financiamiento

Uno de los pilares fundamentales para escalar el modelo de maricultura en Costa Rica es la disponibilidad de servicios de apoyo técnico, logístico, empresarial y financiero que actúen como catalizadores del ecosistema productivo. El diagnóstico realizado evidencia que, si bien existen esfuerzos dispersos, aún es necesario consolidar una oferta articulada de servicios especializados que

respondan a las necesidades particulares del cultivo de pepinos de mar y macroalgas.

En cuanto a servicios de apoyo, destacan los relacionados con formación técnica, asistencia empresarial, aseguramiento de la calidad, logística refrigerada y certificaciones sanitarias y de sostenibilidad. Estos servicios deben prestarse de forma coordinada por entes como el INA, los centros de formación universitaria y técnica, así como por proveedores privados con experiencia en cadenas agroindustriales. Además, es clave incorporar servicios digitales como monitoreo remoto, sistemas de trazabilidad y plataformas de e-commerce, que permitirán mejorar la eficiencia operativa y el acceso a mercados especializados.

Desde la perspectiva financiera, se plantea la necesidad de activar mecanismos híbridos de financiamiento que combinen capital público (subsidios, fondos no reembolsables, líneas de crédito blandas) con inversión privada de impacto. Se recomienda la creación de instrumentos como fondos semilla, dirigidos a la compra de larvas, instalación de infraestructuras básicas y formalización de cooperativas. A su vez, deben generarse condiciones para atraer fondos de inversión especializados en bioeconomía, turismo sostenible y economías azules, mediante esquemas de riesgo compartido y garantías estatales.

De cara al mediano plazo, se proyecta la necesidad de establecer un Sistema Nacional de Servicios Integrados para la Maricultura, con presencia territorial, que actúe como ventanilla única y brinde acompañamiento a lo largo del ciclo productivo. Este sistema debería incluir asesoría técnica, diseño de modelos de negocio, acompañamiento para acceso a financiamiento y vinculación con mercados, en alianza con entidades financieras, ONGs y organismos internacionales de cooperación. En la próxima sección se profundizará en las herramientas disponibles y propuestas para movilizar capital estratégico hacia el desarrollo de este ecosistema costero.

4.13. Incentivos del sector

El desarrollo de la maricultura sostenible en Costa Rica requiere un marco de incentivos que promueva la inversión, acelere la formalización de actores productivos y facilite el escalamiento de iniciativas con impacto ambiental y social positivo. Actualmente, los incentivos existentes son limitados, dispersos y en su mayoría no adaptados a las particularidades del cultivo de pepinos de mar y macroalgas, lo cual genera una barrera estructural para el despegue del sector.

Se propone la creación de un Régimen Especial para el Ecosistema del Mar, inspirado en el modelo exitoso de Zonas Francas, pero con un enfoque territorial más flexible y vinculado a la sostenibilidad y a la pertenencia al clúster marino-productivo. Este régimen podría incluir exoneraciones fiscales en la importación de tecnología, insumos y equipamiento; beneficios en cargas sociales ligados a

esquemas innovadores de formación técnica; y acceso preferencial a fondos de innovación, comercialización y promoción internacional.

Adicionalmente, se identifican incentivos indirectos que deben ser fortalecidos, como el acceso prioritario a certificaciones de sostenibilidad, acompañamiento técnico gratuito para las fases de incubación y financiamiento compartido para procesos de valor agregado, turismo científico o diseño de marca país. Estos incentivos no deben verse como subsidios aislados, sino como parte de una estrategia estructural para posicionar la maricultura costarricense como un sector de futuro, generador de empleo decente, seguridad alimentaria y nuevas exportaciones con valor agregado.

4.14. Características generales del sector

El sector de la maricultura en Costa Rica se encuentra en una fase emergente, con potencial técnico y comercial significativo, pero aún con una institucionalidad incipiente, cadenas de valor fragmentadas y bajos niveles de inversión. Su desarrollo se ha visto limitado históricamente por un marco normativo poco específico, procesos regulatorios complejos y la ausencia de una visión multisectorial articulada. Sin embargo, en el contexto actual de transición hacia una economía azul, la maricultura de especies como el pepino de mar (*Isostichopus badionotus*, *Holothuria scabra*) y diversas macroalgas (*Gracilaria* spp., *Ulva* spp., *Codium fragile*) representa una oportunidad estratégica para la diversificación productiva, la regeneración ambiental y la inclusión social en zonas costeras vulnerables.

Desde el punto de vista productivo, el sector aún carece de escalas industriales estables, aunque existen experiencias piloto y capacidades técnicas desarrolladas en universidades públicas como la UNA, UCR y UNED. La infraestructura de producción, cuando existe, responde más a formatos artesanales o de experimentación técnica que a modelos comerciales consolidados y ya exitosos. La cadena de valor está mayormente desarticulada, con cuellos de botella en logística, procesamiento y comercialización, y una alta dependencia de iniciativas académicas o esfuerzos aislados más de investigación que comerciales. A pesar de esto, la creciente demanda internacional por productos marinos sostenibles y de alto valor (colágeno, carragenanos, alimentos funcionales, cosméticos marinos) ofrece un contexto favorable y con un potente potencial de expansión.

En el plano institucional, el sector está regulado principalmente por INCOPESCA, el SINAC y el MINAE, sin una normativa específica para maricultura, lo que genera ambigüedad jurídica y ralentiza la tramitación de concesiones o permisos. No obstante, se reconoce una ventana de oportunidad para estructurar una gobernanza más moderna y funcional mediante la creación de un “Régimen Especial para el Ecosistema del Mar”, con incentivos fiscales,

laborales y regulatorios, inspirado en el modelo de Zonas Francas. Este régimen permitiría integrar actores diversos (productores, logística, procesamiento, comercialización, turismo, ciencia y formación) bajo un esquema colaborativo, territorializado y con impacto sistémico. Este modelo es parte fundamental de la propuesta del presente documento.

En cuanto a su dimensión socioeconómica, el sector posee un alto potencial inclusivo. Su expansión permitiría integrar a comunidades costeras con fuerte tradición pesquera artesanal, mujeres organizadas en asociaciones, jóvenes en formación técnica, y actores del turismo sostenible. La lógica de eslabonamiento productivo por especialización, planteada en el modelo de clúster, permite que distintos actores contribuyan desde sus fortalezas sin necesidad de verticalizar toda la cadena. Además, la posibilidad de combinar la producción con servicios turísticos (experiencias en granjas marinas, restaurantes costeros, venta de productos locales) amplía la base económica del sector y reduce su vulnerabilidad. Esto fomenta la generación de empleo en zonas del país que históricamente han presentado rezagos de desarrollo.

En términos tecnológicos y de innovación, Costa Rica cuenta con fortalezas significativas. Existen capacidades instaladas para el cultivo de larvas, el diseño de sistemas multitróficos (AMTI), el monitoreo con sensores remotos y el uso de inteligencia artificial aplicada a la trazabilidad y optimización de cultivos. Sin embargo, estos esfuerzos aún están desconectados del aparato productivo real. Para superar esta brecha, se propone un esquema de financiamiento dual, donde el Estado financia la I+D básica (genética, tecnologías de cultivo, bioproductos) y el sector privado asume el riesgo de escalamiento comercial.

En síntesis, el sector de la maricultura en Costa Rica combina una base científica prometedora, un potencial económico latente y una vocación social transformadora, pero requiere de un entorno habilitante coherente, políticas públicas diferenciadas y esquemas de financiamiento innovadores para consolidarse como una de las nuevas fronteras productivas del país. Su desarrollo exitoso podría posicionar a Costa Rica como referente regional en maricultura sostenible, integrando biodiversidad, economía circular, equidad social y competitividad internacional.

4.15. Indicadores macroeconómicos

Costa Rica ha mostrado una creciente estabilidad macroeconómica en los últimos años, con un crecimiento sostenido del PIB cercano al 4 % anual. En 2024 la economía creció 4.3 %, impulsada por la demanda interna, las exportaciones y la inversión pública y privada, y se proyecta un crecimiento de entre 3.8 % y 4.0 % para 2025-2026. (CEPAL, 2024)

En el primer trimestre de 2025, la economía costarricense sigue en zona de

expansión, pese a factores externos como la fortaleza del colón y aranceles en EE.UU. Mientras tanto, la inflación se mantiene contenida y dentro del rango objetivo del Banco Central. Para marzo de 2025, la inflación anual se ubicó en aproximadamente en un 1%.

Estas cifras, unidas a tasas de desempleo en descenso (alrededor del 7 %), reflejan un entorno económico favorable para la inversión productiva, inclusive en sectores emergentes como la maricultura.

En cuanto al financiamiento y estabilidad externa, Costa Rica ha recibido una señal positiva del FMI: se aprobó un Flexible Credit Line de 1.500 millones de USD, lo que otorga un colchón financiero ante posibles shocks globales. Además, la inflación se mantendría cercana al 3 % en 2025, apoyada en la política macroprudencial del Banco Central de Costa Rica. Esta solidez macro brinda un entorno favorable para la implementación de nuevos emprendimientos productivos, incluido el desarrollo del clúster marino.

Con este cuadro de estabilidad económica, baja inflación, empleo sólido y respaldo institucional, el país está en una posición propicia para promover la maricultura como sector de alto crecimiento y generación de divisas. El siguiente apartado sobre el panorama exportador permite dimensionar cómo este nuevo ecosistema productivo podría encajar de manera estratégica en las cadenas de comercio internacional ya consolidadas.

Los hallazgos subsiguientes ofrecen una "fotografía" detallada del panorama exportador actual, abarcando los volúmenes comercializados, los principales mercados de destino, las clasificaciones arancelarias correspondientes, las especies de mayor relevancia en estos flujos comerciales y el marco regulatorio vigente, incluyendo consideraciones CITES. Esta caracterización del escenario comercial existente es crucial, pues constituye un punto de partida fáctico indispensable para fundamentar con mayor precisión los análisis de viabilidad, las estrategias de penetración de mercados y la evaluación de la competitividad de la potencial industria maricultura de estas especies, orientando así la toma de decisiones informadas para su fomento en Costa Rica.

En el caso de los productos analizados se logró determinar que sus niveles de exportación son prácticamente nulos, algo que concuerda con los hallazgos realizados en cuanto a los procesos de producción que como ya fue expuesto, caracterizan por la ausencia de estructuras productivas. Esto puede ser desventajoso, pero también puede entenderse como una gran oportunidad de innovación en la propuesta de exportación nacional.

Exportaciones de pepinos de mar (*Isostichopus fuscus*, *Holothuria atra*)

a. Clasificación arancelaria

- Código del Sistema Armonizado (SA) a 6 dígitos: **0308.19**
- Descripción: "Otros invertebrados acuáticos, vivos, frescos o refrigerados"

b. Volumen de exportación

- De acuerdo con los datos oficiales suministrados por PROCOMER, Costa Rica no ha realizado ninguna exportación de este producto desde 2014.

c. Destinos de exportación

- De acuerdo con los datos oficiales de PROCOMER, no se realizan exportaciones, de este producto.

d. Regulaciones CITES

- La especie *Isostichopus fuscus* fue incluida en el Apéndice III de la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES) en 2023 por Costa Rica, lo que implica controles adicionales para su exportación.

Exportaciones de macroalgas (*Codium fragile*, *Ulva lactuca*, *Gracilaria* spp., *Sargassum* spp.)

a. Clasificación arancelaria

- Código del Sistema Armonizado (SA) a 6 dígitos: **1212.21**
- Descripción: "Algas y otras algas marinas, frescas o secas, incluso molidas"

b. Volumen de exportación

- Según los datos oficiales de PROCOMER, desde Costa Rica no se han realizado exportaciones de este producto.

c. Destinos de exportación

No se encontraron datos relacionados con exportaciones a ningún destino.

e. Especies exportadas

- No se encontraron datos relacionados con exportaciones a ningún destino.

f. Estudios Académicos

- No se encontraron documentos de esta naturaleza que reflejen información sobre exportaciones, evidentemente, porque como ya se mencionó previamente desde Costa Rica no se exportan estos productos.

4.16. Logística de exportación

Infraestructura y capacidades logísticas de salida en Costa Rica

La capacidad de Costa Rica para exportar productos de maricultura, especialmente aquellos sensibles a la temperatura y al tiempo, se basa en la infraestructura de sus principales puntos de salida marítimos y aéreos.

a. Puertos marítimos clave:

- **Puerto Moín (Caribe):** considerado el principal puerto de Costa Rica, especialmente con la Terminal de Contenedores de Moín (TCM) operada por APM Terminals. La TCM cuenta con 3,800 conexiones para contenedores refrigerados y opera 24/7/365, siendo crucial para la maricultura. Históricamente ha sido un punto de salida para perecederos como banano y piña. Existen planes de modernización adicionales para Moín.
- **Puerto Limón (Caribe):** complementa las operaciones de Moín y es administrado por JAPDEVA. Posee capacidad para manejar carga refrigerada. Empresas como Costamar operan desde esta terminal ofreciendo transporte especializado en contenedores refrigerados.
- **Puerto Caldera (Pacífico):** es el principal puerto de la costa Pacífica, estratégico por su cercanía a San José y zonas industriales. Movilizó más de 6.3 millones de toneladas de carga a finales de 2024, pero enfrenta una urgente necesidad de modernización para satisfacer la creciente demanda. Frionet opera un almacén fiscal con capacidad de almacenamiento refrigerado y congelado en Caldera.

La modernización y alta capacidad de contenedores refrigerados en Puerto Moín es un facilitador esencial para la exportación a gran escala de productos de maricultura. No obstante, la urgencia de modernización de Puerto Caldera podría representar un desafío para las exportaciones hacia Asia y la costa oeste de EE. UU. Es fundamental validar que la infraestructura de frío existente, tradicionalmente orientada a frutas, cumpla con los requisitos específicos de los pepinos de mar y macroalgas, que pueden necesitar temperaturas de congelación específicas o manejo diferenciado.

b. Aeropuertos Internacionales clave:

- **Aeropuerto Internacional Juan Santamaría (SJO, Alajuela):** según el portal flightconnections, Costa Rica tiene conexión con 57 destinos sin escala en

20 países. En 2023, manejó 55.486 toneladas de carga aérea, principalmente de los sectores médico y farmacéutico. Está en un proceso de expansión con una inversión de \$390 millones. Operadores como Swissport ofrecen manejo especializado de carga perecedera y farmacéutica con infraestructura de cadena de frío.

- **Aeropuerto Internacional Daniel Oduber Quirós (LIR, Liberia):** importante para la región noroccidental, cuenta desde 2018 con un moderno Centro de Logística Internacional de Carga (CLIC) operado por la empresa privada Rex Cargo, con más de 1,000 m², incluyendo una cámara fría de 153 m². Es importante destacar que esta infraestructura es de operación privada con tarifas comerciales propias de Rex Cargo, no es una facilidad pública del aeropuerto. Esta infraestructura privada en LIR representa una opción estratégica para proyectos de maricultura en Guanacaste y la costa Pacífica, aunque con costos determinados por el operador privado.

La capacidad para exportar productos de maricultura por vía aérea dependerá de la pericia técnica de los manejadores de carga y la disponibilidad de contenedores aéreos refrigerados. En SJO, es crucial evaluar la capacidad de carga aérea específica para productos perecederos muy sensibles, que competirán por espacio con otros sectores de alto valor.

Puntos de entrada y conectividad logística en mercados destino

La selección de puntos de entrada en mercados destino impacta tiempos, costos e integridad del producto.

a. Principales Puertos y Aeropuertos de Entrada:

- **Asia:**
 - **China:** puertos como Shanghái, Ningbo-Zhoushan y Shenzhen son clave para agroalimentos. Aeropuertos como Beijing (PEK), Shanghái (PVG) y Hong Kong (HKG) concentran carga aérea internacional y tienen infraestructura para perecederos.
 - **Japón:** puertos principales son Kobe, Yokohama, Osaka, Tokio (con terminales de alimentos) y Nagoya. Los aeropuertos clave son Tokio (NRT, HND), Osaka (KIX) y Nagoya (NGO).
 - **Hong Kong:** su puerto es un vital centro de transbordo y su aeropuerto (HKG) es un hub de carga global.
 - **Macao:** cuenta con infraestructura portuaria; HKG podría servir como hub aéreo.
 - **Europa:** puertos como Rotterdam y Amberes son fundamentales para las exportaciones costarricenses, sirviendo como centros de distribución. Hubs aéreos importantes incluyen Ámsterdam (AMS), Londres (LHR), París (CDG), Frankfurt (FRA) y Madrid (MAD).
 - **Norteamérica (EE. UU.):** puertos en la Costa Este (Miami, NY/NJ), Golfo (Houston) y Oeste (Los Ángeles, Long Beach) son relevantes.

Aeropuertos como Miami (MIA), Los Ángeles (LAX) y Nueva York (JFK) son hubs principales para perecederos.

Se dependerá frecuentemente de hubs logísticos consolidados para la redistribución. Optar por puntos de entrada con experiencia en productos similares puede agilizar despachos y reducir riesgos.

b. Conectividad marítima y aérea:

● **Marítima:**

- Hacia Asia: existen servicios con frecuencias aproximadas de 14 días y capacidad reefer (ej. ACSA5). Los tiempos de tránsito entre China y Costa Rica son de 25-35 días.
- Hacia Europa: desde Moín, Maersk opera el servicio 'Costa Rica Express' (CRX) orientado a refrigerados, con tiempos de tránsito variables (ej. Moín a Turquía 26-45 días).
- Hacia Norteamérica: oferta robusta desde Limón/Moín y Caldera. Los tiempos de tránsito varían (ej. NY a Limón 12-16 días; LA a Caldera 18-22 días).

● **Aérea:**

- Hacia Asia: no se identifican rutas de carga aérea directa; probablemente requerirían transbordos vía EE. UU. o Europa. Esto representa un obstáculo para productos frescos.
- Hacia Europa: SJO tiene conexiones directas a hubs europeos; la carga perecedera es significativa.
- Hacia Norteamérica: amplia y frecuente conectividad desde SJO y LIR.

La buena conectividad con Europa y Norteamérica es favorable. La experiencia con otros perecederos costarricenses (banano, piña) provee una base logística adaptable. Sin embargo, la volatilidad de fletes es un factor por considerar.

c. Capacidades de inspección y cuarentena en destino: todos los mercados poseen rigurosos sistemas de inspección.

- **China (GACC):** realiza inspecciones exhaustivas; productos refrigerados como pepinos de mar deben ingresar por puertos designados.
- **Japón (MAFF, MHLW):** requiere "Notificación de Importación de Alimentos"; inspecciones en almacenes refrigerados designados. Certificados de captura para algunas especies.
- **Unión Europea (DG SANTE):** productos deben ingresar por Puestos de Control Fronterizo (PCF) autorizados, provenir de establecimientos aprobados y acompañados de certificado sanitario oficial.
- **Estados Unidos (FDA, CBP, APHIS):** FDA regula mariscos (FSVP, HACCP, etiquetado, Prior Notice). El pepino de mar está regulado por FDA, NMFS y FWS.

- **Corea del Sur (MFDS):** exige registro previo de instalaciones alimentarias extranjeras; inspecciones en despacho.
- **Hong Kong (CFS):** se recomiendan certificados sanitarios para productos marinos.

La preparación documental exhaustiva es imperativa para evitar retrasos o rechazos. La comunicación fluida con el importador es vital. La disponibilidad de instalaciones de inspección refrigerada en destino es crucial.

d. Acuerdos comerciales y aranceles aplicables

El marco regulatorio, incluyendo acuerdos comerciales y aranceles, influye en la competitividad.

- **Acuerdos comerciales vigentes de Costa Rica:** Costa Rica tiene una red de acuerdos que facilitan acceso preferencial:
 - **CAFTA-DR (EE. UU.):** elimina la mayoría de los aranceles; para productos beneficiados por la Iniciativa de la Cuenca del Caribe (CBI), el arancel se fijó en cero inmediatamente.
 - **AdA UE-CA (Unión Europea):** establece zona de libre comercio; se estima que 99% de productos industriales y de pesca de Centroamérica ingresan libres de aranceles.
 - **TLC Costa Rica-China:** busca eliminar obstáculos al comercio; desgravación en plazos de 0, 5, 10 y 15 años, aunque algunos productos de pesca podrían tener plazos más largos o estar excluidos.
 - **TLC Costa Rica-Singapur:** fomenta el comercio bilateral; reglas de origen pueden requerir contenido regional o cambio de clasificación. Notas específicas para productos pesqueros pueden facilitar la calificación de origen para acuicultura.
 - **TLC Costa Rica-Corea del Sur:** acceso inmediato libre de aranceles para 80% de productos costarricenses; 16% adicional con desgravación gradual.
 - **Otros:** Costa Rica es miembro de la OMC. No se identificaron TLC directos con Japón ni Macao; se aplicarían aranceles NMF o SGP si aplica.
- **Reglas de Origen (RoO):** el criterio de "totalmente obtenido" (cultivados y cosechados en Costa Rica) será común para productos frescos/refrigerados/congelados sin procesamiento extensivo. Para productos procesados, se aplican reglas de "transformación sustancial" (cambio de clasificación arancelaria o umbral de valor de contenido regional), lo que añade complejidad. La acumulación de origen, presente en algunos TLCs como el de China, podría ser beneficiosa.

- **Aranceles aplicables:** la correcta clasificación arancelaria (HS Codes) es el primer paso.
 - **Partidas arancelarias sugeridas:**

Pepinos de Mar:

 - Vivos, frescos o refrigerados: 0308.11 / 0308.19
 - Congelados: 0308.12.00.90 (China GACC) / 0308.19.00
 - Secos, salados o en salmuera: 0308.19.00.90 (China GACC) / 0308.19.00
 - Preparados o conservados: 1605.61.00.90 (China GACC) / 1605.61.01
 - Extractos: 1302.19 (vegetales gral.) / Cap. 30 (farmacéutico) / Cap. 33 (cosmético)

Macroalgas:

 - Frescas, refrigeradas, congeladas o secas (consumo humano): 1212.21
 - Otros usos (fertilizantes, extractos): 1212.29
 - Agar-agar: 1302.31
 - Otros mucílago y espesativos (carragenina, alginatos): 1302.39
- **Aranceles NMF y preferenciales:**
 - **EE. UU. (CAFTA-DR):** mayoría de productos agropecuarios y pesqueros de CR ingresan con arancel 0%.
 - **UE (AdA UE-CA):** se espera arancel 0% para pepinos de mar y macroalgas originarios.
 - **China (TLC):** tratamiento variable; "ciertos productos de pesca" con desgravación de 10 años, otros excluidos. Verificar lista específica.
 - **Japón:** aranceles NMF (4.6% para pesqueros) o SGP si aplica. Algunas algas con cuotas.
 - **Corea del Sur (TLC):** 80% con 0% arancel inmediato, 16% desgravación gradual.
 - **Singapur (TLC):** mayormente puerto libre (0% arancel).
 - **Hong Kong y Macao:** puertos libres, sin aranceles a mayoría de bienes.
- **Otros impuestos (IVA/GST):** además de aranceles, se aplica IVA o similar en destino (ej. UE 15-27% con tasas reducidas para alimentos; China 13% agrícola; Japón 8-10% consumo; Corea del Sur 10% IVA; Singapur 9% GST >400 SGD). Este costo debe considerarse en la estructura de precios.

La precisión en la clasificación arancelaria es crítica para evitar pagos incorrectos o pérdida de preferencias. PROCOMER destaca su importancia.

e. Permisos y proceso de exportación desde Costa Rica

La exportación implica una serie de pasos e interacción con entidades gubernamentales.

- **Regulaciones y entidades en Costa Rica**

- **Proceso general de exportación:**

- Registro como exportador:**

- Ante PROCOMER (VUCE 2.0): Obtener Registro Único de Exportador (RUE).
 - Ante INCOPESCA (vía VUCE 2.0): Para productos pesqueros y acuícolas, registrarse detallando plantas y productos.

- Habilitación de establecimientos y productos:**

- Plantas de Proceso: Deben tener Certificado Veterinario de Operación (CVO) de SENASA y, para muchos mercados, implementar HACCP. SENASA (DIPOA) aprueba establecimientos para exportar.
 - Productos Alimenticios: Deben obtener Registro Sanitario ante el Ministerio de Salud (\$100, vigencia 5 años). Materias primas requieren notificación (\$20).

- Obtención de permisos y certificados específicos por envío:**

- Certificado de Origen (CO): Emitido por PROCOMER (VUCE) para preferencias arancelarias (\$3).
 - Certificado Sanitario de Exportación (CSE): Emitido por SENASA (DIPOA).
 - Permisos de INCOPESCA: Permiso de comercialización/industrialización. Concesión para maricultura y estudio de impacto ambiental son previos.
 - Certificado de Libre Venta (CLV): Emitido por Min. Salud si lo requiere el importador.
 - Notas Técnicas: Otros permisos (MAG, MINAE) gestionados vía VUCE.

Declaración aduanera de exportación (DUA): Documento electrónico transmitido vía sistema TICA a la Dirección General de Aduanas (DGA). Puede ser preparada por agente aduanero (opcional para exportaciones).

Despacho y embarque: Tras aceptación de DUA y autorización de levante, la mercancía se carga. Manifiesto de carga se transmite a aduana.

- **Instituciones involucradas clave:**

- **PROCOMER:** promoción, asesoría, VUCE, Certificados de Origen.
 - **VUCE:** plataforma electrónica para trámites de exportación.

- **DGA (Aduanas):** legislación aduanera, controla mercancías, opera TICA.
- **SENASA:** autoridad sanitaria; DIPOA (inocuidad de productos de origen animal, CSE, habilita plantas), DCA (cuarentena animal).
- **INCOPESCA:** ente rector de pesca y acuicultura; otorga concesiones, licencias, permisos.
- **Ministerio de Salud:** Registro Sanitario de alimentos, CLV.

La obtención inicial de registros y habilitaciones puede tomar meses; los trámites por envío son más rápidos con VUCE. La digitalización vía VUCE 2.0 es clave, pero requiere capacitación. La coordinación interinstitucional es vital.

f. Requisitos clave en mercados de destino

El cumplimiento de normativas de importación es crucial.

- **Estados Unidos (FDA):** registro de instalaciones, FSVP, HACCP para pescados/mariscos, etiquetado conforme, Notificación Previa. Pepinos de mar regulados por FDA, NMFS, FWS; posible requisito CITES para *I. fuscus*. Macroalgas como alimento deben cumplir requisitos FDA.
- **Unión Europea (DG SANTE, EFSA):** establecimientos aprobados y listados, certificados sanitarios modelo UE, controles en PCF, cumplimiento del "Paquete de Higiene", etiquetado según Reglamento (UE) 1169/2011, plan de vigilancia de residuos aprobado, certificados de captura (INDNR) para pesca silvestre. Macroalgas pueden requerir certificado fitosanitario si no son alimento procesado.
- **China (GACC):** registro de fabricantes extranjeros (Decreto 248), etiquetado en chino simplificado con información detallada (incl. No. GACC del productor), certificado sanitario (a menudo bilingüe y modelo acordado), posible Permiso de Cuarentena para Entrada, inspección en puerto. Macroalgas deben cumplir el estándar GB 19643-2016.
- **Japón (MAFF, MHLW):** notificación de Importación de Alimentos, cumplimiento Ley de Sanidad Alimentaria, certificados sanitarios, etiquetado según Ley de Etiquetado de Alimentos, posible requisito de certificados de captura para pepino de mar (monitorear extensión a importaciones). Algunas algas sujetas a cuotas de importación.
- **Corea del Sur (MFDS):** registro de instalaciones alimentarias extranjeras, inspección de importación, etiquetado en coreano, certificado sanitario.
- **Hong Kong (CFS):** alimentos aptos para consumo humano, se recomiendan certificados sanitarios para productos marinos, etiquetado preciso.

Más allá de lo obligatorio, certificaciones de sostenibilidad (MSC, ASC) son valoradas y pueden dar ventaja competitiva. La preparación documental precisa y la comunicación con el importador son críticas.

g. Desafíos y recomendaciones en la logística de exportación

- Posibles cuellos de botella y desafíos:

1. Congestión portuaria (especialmente Caldera) y eficiencia.
2. Capacidad limitada de carga aérea especializada, especialmente a Asia.
3. Mantenimiento de la cadena de frío "end-to-end".
4. Complejidad y costos de cumplimiento regulatorio y certificaciones.
5. Tiempos de trámite aduanero y para-aduanero, coordinación interinstitucional.
6. Adaptación a requisitos específicos de cada mercado.
7. Volatilidad de costos logísticos.
8. Limitada oferta logística para movilizar mercancías frescas y congeladas.
9. Mayor capacidad de bodegas de frío en los puntos de salida del país.
10. Seguridad de las mercancías.
11. Mayor conocimiento en profesionales de logística en Cadenas de frío para productos frescos.

4.17. Gobernanza e instituciones

La gobernanza de la maricultura en Costa Rica implica una compleja red de actores institucionales, marcos normativos y procedimientos técnicos que determinan el acceso, operación y sostenibilidad de las actividades productivas en ambientes marinos. A pesar de avances significativos, persisten limitaciones estructurales que afectan la eficiencia institucional, la transparencia en la toma de decisiones y la equidad en el acceso a oportunidades productivas, especialmente para nuevos actores privados o proyectos comunitarios emergentes. Este apartado aborda las instituciones clave del sector, su rol y desempeño, así como las barreras existentes y propuestas para mejorar la eficiencia y robustez del sistema.

Instituciones clave y sus funciones

- a. INCOPESCA: Es la entidad rectora de la pesca y acuicultura. Administra el registro de licencias, aprueba listas de especies de interés acuícola, coordina la Comisión de Coordinación Científico Técnica (CCCT), y lidera la planificación sectorial (Ley N.º 7384 y N.º 8436). A pesar de su rol estratégico, la falta de una lista actualizada de especies cultivables limita el ingreso de nuevas especies como macroalgas, pepinos de mar y moluscos no bivalvos, generando incertidumbre jurídica (Ramírez et al., 2023).
- b. SETENA: Evalúa y aprueba la viabilidad ambiental de los proyectos mediante formularios D5 diferenciados según la escala del proyecto. El

D5-SF se aplica para iniciativas social-familiares con apoyo institucional, mientras que los formularios DJCA, P-PGA y EsIA se aplican a pequeñas, medianas y grandes escalas respectivamente (Decreto Ejecutivo N.º 42755-MINAE) (MINAE,2020). Sin embargo, la tramitología puede prolongarse más allá de los plazos máximos de 10 a 60 días, con demoras reales de entre 6 y 12 meses.

- c. SINAC: Regula el uso de especies bajo la Ley de Vida Silvestre y autoriza investigaciones cuando las especies no están incluidas en la lista de INCOPECA. Esto añade una capa adicional de permisos, especialmente en proyectos con nuevas especies.
- d. Dirección de Aguas: Otorga las concesiones de aguas superficiales marinas. El proceso incluye tres fases: admisibilidad (registro, publicación y audiencias), técnica (inspección e informe), y legal (resolución final). A pesar de estar bien estructurado, los tiempos efectivos de resolución superan ampliamente los establecidos.
- e. MOPT: Regula permisos de instalación de estructuras flotantes (jaulas, long-lines) en la zona marítimo-terrestre, así como la seguridad en navegación. Se requiere autorización expresa para el fondeo de cualquier infraestructura.
- f. Ministerio de Salud (MINSA): Emite permisos sanitarios obligatorios para proyectos que involucren procesamiento o contacto humano con organismos, especialmente si se relaciona con actividades de turismo o venta directa.
- g. Municipalidades: Su participación varía según el cantón, pero normalmente otorgan patentes y validan el uso de suelo compatible con proyectos acuícolas. La falta de normativas claras para maricultura en los planes reguladores cantonales representa una barrera frecuente.
- h. SENASA: Vigila la sanidad animal y establece normativas de bioseguridad para laboratorios y centros de reproducción.
- i. Academia y centros de investigación: Universidades públicas como UNA, UCR, UTN, UNED, y centros como el PMP, juegan un papel esencial en la innovación tecnológica, transferencia de conocimiento y acompañamiento técnico. Según Chacón-Guzmán *et al.* (2021), el PMP ha sido pionero en la producción de juveniles de pargo manchado, mientras que instituciones como la UNA lideran procesos de capacitación, elaboración de manuales y soporte técnico a proyectos comunitarios.
- j. Entidades de fomento: IMAS, INAMU, INDER y PROCOMER financian y respaldan iniciativas de maricultura como estrategia de desarrollo económico local. No obstante, sus intervenciones aún no están articuladas en un sistema integral con INCOPECA y SETENA.

Ineficiencia en tiempos y barreras de acceso

Aunque el marco normativo está bien definido, su aplicación enfrenta importantes retos en términos de eficiencia y equidad. Por ejemplo:

- a. Los formularios D5, en teoría, establecen plazos máximos claros (de 10 días para proyectos D5-SF hasta 60 días para EslA), pero en la práctica el proceso completo puede extenderse hasta 14 meses por falta de personal, coordinación y digitalización efectiva entre instituciones.
- b. La carencia de una lista oficial de especies de interés acuícola desde la anulación del acuerdo AJDIP-057-2023 por el AJDIP-094-2023 ha generado una laguna legal que bloquea nuevos cultivos, como pepinos de mar y macroalgas, hasta que la CCCT emita una resolución definitiva.
- c. Proyectos privados deben presentar estudios ambientales más complejos (P-PGA o EslA), contratar especialistas externos y asumir costos que dificultan el ingreso de pequeños empresarios al sector.
- d. No existe una ventanilla única o sistema digital integrado para coordinar la obtención de permisos entre SETENA, INCOPESCA, MOPT, MINSA, DA y las municipalidades.

Casos ilustrativos

El Registro Ambiental D5-0002-2024 muestra el proceso de aprobación de una granja mixta de ostras, peces y camarones en El Jobo, Guanacaste. Aunque el proyecto cumplió con los requisitos técnicos y obtuvo su viabilidad como D5-SF, el proceso tomó más de 9 meses desde su formulación hasta la resolución final, debido a observaciones técnicas múltiples y validaciones de acompañamiento institucional (SETENA, 2024).

Asimismo, el documento elaborado por Ramírez *et al.* (2023) identifica que la gobernanza se ve afectada por duplicidad de trámites, desconocimiento institucional mutuo, y ausencia de planificación territorial acuícola. Estas deficiencias limitan el escalamiento de la maricultura como estrategia para enfrentar el desempleo en zonas costeras, estimado en un 14% en regiones como el Golfo de Nicoya.

Recomendaciones para mejorar la gobernanza

- a. Reestablecer y actualizar periódicamente la lista oficial de especies acuícolas, mediante procesos científicos, participativos y transparentes.
- b. Crear una plataforma digital interinstitucional para centralizar y seguir en tiempo real los trámites técnicos, ambientales, sanitarios y territoriales.
- c. Desarrollar protocolos diferenciados para proyectos privados y sociales, incluyendo formularios estandarizados, requisitos proporcionales y guías técnicas por tipo de especie.

- d. Desconcentrar las oficinas de SETENA y Dirección de Aguas, aumentando la capacidad operativa regional y reduciendo los tiempos de respuesta.
- e. Promover reformas a planes reguladores cantonales para incorporar explícitamente zonas aptas para maricultura y establecer lineamientos para estructuras flotantes.
- f. Fomentar instancias de diálogo interinstitucional permanente, con participación activa del sector productivo, comunidades costeras y academia.

Gobernanza en Costa Rica: potencial transformador y desafíos estructurales

Costa Rica ha construido una arquitectura institucional notable en materia de pesca y acuicultura, que combina marcos legales robustos, capacidades científicas consolidadas y un compromiso con la sostenibilidad ambiental. No obstante, la gobernanza actual de la maricultura se encuentra tensionada entre un diseño normativo ambicioso y una realidad operativa fragmentada.

Las oportunidades que ofrece la maricultura son estratégicas: generación de empleo en zonas costeras con alto desempleo estructural, diversificación de la economía azul, fortalecimiento de la soberanía alimentaria y potencial de exportación sostenible. El país ya cuenta con tecnologías viables desarrolladas por universidades públicas y centros como el PMP, y con organizaciones costeras capacitadas para liderar proyectos. Sin embargo, este potencial no se traduce plenamente en crecimiento sectorial debido a cuellos de botella institucionales, ausencia de coordinación intersectorial y falta de planificación territorial específica para maricultura.

La falta de una lista oficial de especies aprobadas, la superposición de trámites, la dispersión de competencias y los tiempos de respuesta desalineados con la dinámica productiva generan un entorno incierto tanto para comunidades organizadas como para inversionistas responsables.

Superar estos desafíos requiere comprender que la gobernanza no se agota en la existencia de leyes, sino en la capacidad de operativizarlas con visión de país. Se necesita avanzar hacia un modelo de gobernanza articulado, descentralizado y centrado en el usuario, que facilite, acompañe y fiscalice con criterios técnicos, de equidad y sostenibilidad. Un Estado moderno no es solo el que regula, sino el que habilita y potencia capacidades locales.

A la luz del contexto costarricense, las propuestas deben integrar una visión territorial (zonificación ecológica-productiva), mecanismos de gobernanza participativa (comités locales interinstitucionales), digitalización del Estado (plataformas únicas) y una cultura institucional de servicio público proactivo. Esto no solo dinamizará el sector, sino que permitirá consolidar a la maricultura

como una herramienta estructural para el desarrollo resiliente, justo y sostenible del país.

4.18. Análisis Comparativo

El desarrollo de la maricultura ha estado determinado por factores como el acceso a zonas costeras apropiadas, la inversión en sistemas de cultivo tecnificados, la integración de las cadenas productivas, y la capacidad para diferenciar productos mediante certificaciones o nichos de mercado. Este apartado, referido a las comparaciones entre países de la región que realizan maricultura, se basó principalmente en datos de la FAO (2022) y el análisis de la complejidad se realizó tomando en cuenta los siguientes rubros:

Cuadro 22. Criterios para establecer la comparación a nivel económico, de acuerdo con los productos de maricultura.

Criterio	Descripción
Tecnificación productiva	Nivel de tecnología en engorde (automatización, bioseguridad, alimentación, genética)
Integración de cadena	Si las empresas controlan reproducción, engorde, procesamiento, distribución
Escala de producción	Volumen total anual en toneladas
Diferenciación comercial	Certificaciones, marcas, orientaciones a nichos premium, valor agregado en presentaciones
Diversificación	Variedad de especies y resiliencia ante fluctuaciones del mercado

Información tomada de comunicación personal con Dr. Ángel Herrera (2025).

A continuación, se caracterizan los países de la región con maricultura registrada por la FAO (2022):

México

México ocupa una posición destacada en la producción regional de camarón marino. Según la FAO (2022), el volumen anual de cultivo de camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*) se aproxima a 180.000 toneladas, con un valor económico estimado superior a 1.200 millones de dólares. La producción se concentra principalmente en los estados de Sinaloa, Sonora y Nayarit, donde predominan sistemas semi-intensivos con alimentación balanceada, aeración mecánica y ciertas mejoras en bioseguridad. La infraestructura nacional incluye laboratorios de larvas y plantas de procesamiento que abastecen tanto el mercado interno como exportaciones hacia Estados Unidos, principal destino comercial (CONAPESCA, 2022).

En peces marinos, México mantiene proyectos relevantes de engorde de atún aleta azul (*Thunnus orientalis*), con volúmenes anuales estimados entre 2.000 y 3.000 toneladas, destinados en su mayoría al mercado japonés de sushi (FAO, 2022). Asimismo, existen experiencias de cultivo de pargo y totoaba con producciones combinadas cercanas a 1.500 toneladas anuales, si bien su volumen es menor en comparación con otras especies.

La producción ostrícola mexicana es una de las más relevantes en América Latina. Según la FAO (2022), en 2021 se reportaron alrededor de 7.000 toneladas de ostión cultivado, principalmente *Crassostrea gigas* y *C. corteziensis*. Estas ostras abastecen el mercado nacional y, en menor proporción, exportaciones a Estados Unidos.

Respecto a complejidad productiva, la maricultura mexicana se caracteriza por un nivel intermedio-alto. El camarón cuenta con integración parcial de la cadena (laboratorios de larvas, fábricas de alimento balanceado, plantas procesadoras), producción semi-intensiva consolidada y experiencia exportadora. En peces marinos, la dependencia de juveniles capturados en el caso del atún implica retos de sostenibilidad. En ostras, la estructura productiva se basa principalmente en cooperativas y unidades pequeñas con limitada capacidad de procesamiento y valor agregado.

Ecuador

Ecuador se consolidó como el principal productor y exportador de camarón marino de América Latina. Según la FAO (2022), en 2022 se alcanzó una producción de más de 1,2 millones de toneladas de camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*), equivalente a cerca del 25% de la producción mundial de esta especie.

La industria ecuatoriana destaca por su alto nivel de integración vertical, en el que grandes empresas controlan toda la cadena: laboratorios de producción de larvas, granjas semi-intensivas e intensivas, plantas de procesamiento con valor agregado y logística internacional. La tecnificación incluye selección genética de reproductores, bioseguridad avanzada y certificaciones internacionales (FAO, 2022).

En términos de complejidad productiva, el modelo ecuatoriano se considera de complejidad alta, tanto por la escala industrial como por la diversificación de presentaciones y la capacidad logística de exportación hacia Asia, Europa y Norteamérica.

Chile

Chile es el líder regional en la producción de peces cultivados en ambientes marinos, aunque se trate principalmente de especies introducidas. Según la FAO (2022), el volumen total de salmónes Atlántico (*Salmo salar*) y trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) superó 1 millón de toneladas anuales, con exportaciones superiores a 5.000 millones de dólares. Estas especies se producen en jaulas flotantes en fiordos del sur del país bajo sistemas altamente tecnificados, con control de parámetros ambientales, alimentación automatizada y bioseguridad rigurosa. En ostras, Chile mantiene una producción moderada. En 2021 se reportaron aproximadamente 12.000 toneladas de *Crassostrea gigas*, destinadas principalmente al consumo interno y a mercados especializados de exportación.

La maricultura chilena de salmónes y truchas se caracteriza por un nivel de complejidad muy alto, sustentado en integración vertical completa, centros de investigación genética, certificaciones internacionales, sofisticadas cadenas logísticas y una amplia red de mercados internacionales (Billi *et al.*, 2022).

Honduras

Honduras es uno de los productores más relevantes de camarón marino en Centroamérica. Según datos de la FAO (2022), la producción anual alcanzó aproximadamente 90.000 toneladas de camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*), destinadas principalmente a exportaciones hacia Europa y Estados Unidos. La actividad productiva se concentra en el Golfo de Fonseca, donde predominan sistemas extensivos mejorados y semi-intensivos, con niveles de tecnificación intermedios.

La industria hondureña cuenta con empresas de tamaño mediano y grande que controlan parcialmente la cadena de valor, incluyendo plantas de procesamiento y sistemas de distribución internacional (Veterinaria Digital, 2021).

En términos de complejidad productiva, la maricultura hondureña se considera de complejidad media, caracterizada por la competitividad basada en bajos costos de producción y cierta capacidad exportadora, pero con menor diferenciación de producto y menor nivel de certificaciones internacionales en comparación con Ecuador o Chile.

Panamá

Panamá mantiene una producción camaronera más modesta en volumen. Según la FAO (2022), el país produjo cerca de 10.000 toneladas de camarón blanco anuales, con sistemas extensivos y semi-intensivos. La mayor parte de la producción se comercializa en el mercado interno, aunque existen exportaciones puntuales hacia Norteamérica.

Una experiencia relevante en maricultura panameña ha sido el cultivo de cobia (*Rachycentron canadum*) en jaulas marinas offshore. Si bien los volúmenes son limitados (cientos de toneladas anuales), estos proyectos representan un ejemplo innovador de diversificación productiva en ambientes tropicales (Peña & Chacón, 2019).

Respecto a complejidad económica, la maricultura panameña se ubica en un nivel bajo-medio, con baja escala productiva, limitada integración vertical y escasa diferenciación de producto, salvo los casos específicos de cobia que introducen innovación tecnológica.

Costa Rica

Costa Rica mantiene un perfil de producción marina relativamente pequeño en volumen, pero con experiencias innovadoras y diferenciadas. Según la FAO (2022), la producción anual de camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*) se aproxima a 2.500 toneladas, obtenidas principalmente en sistemas extensivos y semi-intensivos localizados en la costa Pacífica. Una parte de esta producción se ha orientado a nichos de mercado con certificaciones orgánicas y estándares de sostenibilidad, representando un diferencial competitivo frente a otros países productores (Marviva, 2020).

En peces marinos, Costa Rica es uno de los pocos países de la región que desarrolló un cultivo comercial sostenido de pargo mancha (*Lutjanus guttatus*). Aunque el volumen es reducido (alrededor de 600 toneladas anuales), la experiencia de la empresa Martec ha sido pionera en América Latina por integrar reproducción, engorde en jaulas marinas offshore y exportación principalmente al mercado estadounidense (Herrera-Ulloa, 2019); sin embargo, la empresa actualmente se encuentra sin actividad comercial. Esta integración de la cadena de valor y el enfoque en calidad ambiental convierten al cultivo de pargo en un modelo destacado de innovación en pequeña escala.

La ostricultura costarricense se encuentra en fase inicial, con volúmenes muy reducidos. Según la FAO (2022), la producción anual reportada es inferior a 20 toneladas de ostras del Pacífico (*Crassostrea gigas*), destinadas principalmente al consumo local.

En términos de complejidad productiva, Costa Rica presenta un nivel bajo-medio en camarón, dado su volumen limitado y la dependencia de insumos importados, pero se distingue por su diferenciación mediante certificaciones y reputación ambiental. En peces marinos, el país ha alcanzado un nivel intermedio de complejidad, debido a la innovación técnica y la integración de procesos en pargo mancha. En ostras, la producción es incipiente, con baja tecnificación y fragmentación de las cadenas productivas.

De acuerdo con el análisis se puede resumir:

- Ecuador es el líder absoluto en camarón, con un modelo de complejidad alta, altamente integrado y orientado a mercados globales.
- Chile domina la producción de peces marinos (salmónidos), con una industria de complejidad muy alta que constituye una referencia mundial.
- México mantiene un volumen relevante en camarón y ostras, y un modelo de complejidad media-alta por su diversificación y capacidad exportadora.
- Honduras y Panamá presentan producciones de menor volumen, con complejidad intermedia o baja, pero con experiencias innovadoras en nichos específicos.
- Costa Rica, aunque con volúmenes reducidos, muestra un enfoque diferenciado orientado a sostenibilidad y calidad, con niveles medios de complejidad en peces marinos y bajos en camarón y ostras.

La información evidencia que los retos regionales incluyen la baja diversificación de especies, la vulnerabilidad sanitaria y la limitada capacidad de agregar valor en la mayoría de los países. No obstante, existen oportunidades relevantes para fortalecer nichos premium, implementar certificaciones internacionales y aprovechar la reputación ambiental como un activo comercial estratégico. A continuación, se muestra un cuadro donde se puede analizar con mayor detalle cada país.

Cuadro 23. Complejidad económica de acuerdo con países latinoamericanos.

País	Especie principal	Producción anual (toneladas)	Valor económico estimado (USD)	Principales mercados	Tecnificación	Integración cadena	Certificaciones/Diferenciación	Complejidad económica
Ecuador	Camarón blanco (<i>L. vannamei</i>)	+1,200,000	>5,000 millones	China, EE. UU., Europa	Alta	Muy alta	ASC, BAP	Alta
México	Camarón blanco, atún aleta azul, ostras	180,000 (camarón), ~3,000 (atún), ~7,000 (ostras)	>1,200 millones	EE. UU., Japón	Media-Alta	Media	Parcial certificación, diferenciación en atún	Media-Alta
Chile	Salmón, trucha, ostras	~1,000,000 (salmones/trucha), 12,000 (ostras)	>5,000 millones	EE. UU., Europa, Asia	Muy alta	Muy alta	ASC, GlobalGAP, BAP	Muy Alta

Honduras	Camarón blanco	~90,000	~800 millones	Europa, EE. UU.	Media	Media	Algunas certificaciones	Media
Panamá	Camarón blanco, cobia	~10,000 (camarón), centenares (cobia)	N/D	EE. UU., mercado local	Media en cobia	Baja-Media	Diferenciación innovadora en cobia	Baja-Media
Costa Rica	Camarón blanco, pargo mancha, ostras	~2,500 (camarón), ~600 (pargo), <20 (ostras)	N/D	EE. UU., mercado local	Baja-Media	Baja (camarón), Media (pargo)	Certificación orgánica camarón, sostenibilidad parga	Baja-Media en camarón y ostras, Media en pargo

4.19. Motivadores de consumo y tendencias globales

En el panorama global de los recursos marinos, los pepinos de mar y las macroalgas emergen como componentes de creciente relevancia económica y ecológica. La demanda de productos derivados del mar está experimentando una transformación significativa, impulsada por factores interconectados como el aumento de la población mundial, una mayor conciencia sobre la nutrición y la salud, y la necesidad de adoptar prácticas de explotación y cultivo más sostenibles. Este apartado profundiza en el análisis de los factores que motivan a los consumidores finales a demandar pepinos de mar y macroalgas, examinando asimismo las tendencias que configuran sus respectivos mercados globales. El análisis se basa exclusivamente en las fuentes referenciadas, proporcionando una visión detallada de las dinámicas actuales y futuras para estos valiosos recursos marinos.

Pepinos de mar: impulsores del consumo y dinámica del mercado global

Motivaciones del Consumidor

La demanda de pepinos de mar está impulsada por una combinación de factores culturales, de percepción de salud y nutricionales, que varían en importancia según el mercado, pero que colectivamente sustentan su alto valor económico.

- a. **Valor culinario y estatus de lujo:** una de las principales motivaciones para el consumo de pepinos de mar reside en su estatus como producto gourmet y de lujo, particularmente arraigado en la cultura y gastronomía asiática. Son considerados "Manjares del Mar" (Sonnenholzner-Varas, 2021) y un componente esencial en celebraciones de alto perfil como bodas y festividades de año nuevo (Agudelo-Martínez *et al.*, 2016). La

apreciación culinaria se centra en la calidad de su carne, valorando atributos como la textura, el grosor de la pared corporal, el olor y el color (Agudelo-Martínez *et al.*, 2016). Esta percepción se refuerza con denominaciones como "ginseng del mar" (Agudelo-Martínez *et al.*, 2016), que evocan exclusividad y beneficios superiores.

El consumo predominante se realiza en forma de producto seco, conocido internacionalmente como "beche-de-mer", "trepang" o "hǎishēn" (Agudelo-Martínez *et al.*, 2016). Este formato no solo facilita su conservación y comercio a larga distancia, sino que también concentra su valor. La fuerte asociación con el lujo y la exquisitez es un motor fundamental de la demanda en mercados específicos. Sin embargo, esta misma característica, junto con los elevados precios que puede alcanzar el producto, actúa como una barrera de entrada significativa para consumidores fuera de los círculos tradicionales asiáticos o de aquellos segmentos con menor poder adquisitivo. La demanda, por tanto, tiende a concentrarse en nichos que valoran y pueden permitirse este estatus, lo que intensifica la presión sobre las especies más cotizadas.

- b. **Aplicaciones medicinales y beneficios para la salud percibidos:** más allá de su valor culinario, los pepinos de mar ocupan un lugar destacado en la medicina tradicional asiática, donde se les atribuyen numerosas propiedades curativas (Agudelo-Martínez *et al.*, 2016). Esta percepción se fundamenta en siglos de uso y, más recientemente, en la identificación de compuestos bioactivos específicos. Se cree que contribuyen a la reducción del dolor articular debido a su alta concentración de mucopolisacáridos, como el condroitín sulfato. Contienen también saponinas, a las que se asocian propiedades analgésicas, antiinflamatorias, antioxidantes y potenciales efectos anticancerígenos (Agudelo-Martínez *et al.*, 2016).

Estudios han identificado un espectro aún más amplio de moléculas bioactivas, incluyendo péptidos, carbohidratos, ácidos grasos y colágeno, con potenciales efectos neuroprotectores, antivirales, antitumorales, anticoagulantes, antimicrobianos y antioxidantes (Sonnenholzner-Varas, 2021). Incluso se ha aislado una proteína, la mucotina, que podría retardar el envejecimiento y actuar como agente antitumoral y coagulante, así como la CEL-III, relevante para bloquear la transmisión de la malaria (Agudelo-Martínez *et al.*, 2016). Estos beneficios percibidos para la salud, profundamente arraigados en la tradición y crecientemente respaldados por la investigación científica, constituyen una motivación de compra poderosa. La dualidad de su uso –como alimento de lujo y como producto con beneficios para la salud– amplía su atractivo a diferentes segmentos de consumidores o refuerza las razones de compra dentro de un mismo

segmento. Esta doble vertiente de valor (estatus y bienestar) puede conferir a la demanda una mayor resiliencia frente a fluctuaciones económicas que podrían afectar a productos considerados puramente suntuarios.

- c. **Factores nutricionales:** aunque a menudo eclipsado por su estatus de lujo y sus usos medicinales, el perfil nutricional del pepino de mar también contribuye a su valoración como alimento de alta calidad (Sonnenholzner-Varas, 2021). Destaca su elevado contenido proteico, que puede alcanzar hasta el 50% de su peso húmedo (Agudelo-Martínez et al., 2016). Además, son fuente de colágeno, vitaminas y minerales esenciales (Sonnenholzner-Varas, 2021). Si bien la demanda principal en los mercados tradicionales no se enfoca primordialmente en estos atributos nutricionales, sí refuerzan la imagen general del producto. Existe una perspectiva interesante derivada de este perfil: el alto contenido proteico podría, eventualmente, abrir puertas para el desarrollo de subproductos (como extractos proteicos o suplementos) o para posicionar especies de menor valor estético en mercados occidentales, donde la nutrición funcional y el aporte proteico son criterios de compra cada vez más relevantes. Aunque las fuentes actuales no señalan esto como una tendencia dominante, representa una vía potencial de diversificación si la acuicultura logra generar volúmenes suficientes o productos que no cumplan los estrictos estándares estéticos del mercado de lujo asiático.

Tendencias globales de la demanda

El mercado global de pepinos de mar muestra una dinámica de crecimiento constante, aunque enfrenta desafíos significativos relacionados con la sostenibilidad del recurso.

- a. **Tamaño y crecimiento del mercado:** el interés comercial por los pepinos de mar no es reciente, habiendo experimentado un aumento drástico en el comercio internacional desde la década de 1980, alcanzando volúmenes globales de producto seco significativos (Agudelo-Martínez et al., 2016). En términos de valor, el mercado global fue estimado en USD 1.38 mil millones en 2024. Las proyecciones indican una continuación de esta tendencia al alza, esperando que el mercado alcance los USD 2.19 mil millones para el año 2033, lo que representa una Tasa de Crecimiento Anual Compuesta (CAGR) del 5.29% durante el período de pronóstico 2025-2033 (Business Research Insights, 2024). Estas cifras reflejan un mercado considerable y en expansión, aunque su tasa de crecimiento es más moderada si se compara con otros sectores de la acuicultura, como el de las macroalgas.

- b. **Principales mercados y precios:** la demanda global de pepinos de mar está fuertemente concentrada geográficamente. Los mercados asiáticos son, con diferencia, los principales motores de esta demanda, con China destacando como el principal consumidor e importador (Reef Resilience Network, s.f.; Sonnenholzner-Varas, 2021). Otros centros importantes de importación incluyen Singapur, Taiwán, Malasia y Corea del Sur (Agudelo-Martínez *et al.*, 2016). Esta concentración geográfica subraya la importancia de las preferencias culturales y tradicionales en la configuración del mercado.

Una característica distintiva del mercado es la extrema variabilidad y, a menudo, los elevados precios del producto. El valor del pepino de mar seco puede oscilar enormemente, desde unos pocos dólares hasta más de mil dólares por kilogramo, dependiendo de factores cruciales como la especie, el origen geográfico, el tamaño, la apariencia general (integridad, color) y, fundamentalmente, la calidad del procesamiento post-captura (Agudelo-Martínez *et al.*, 2016; Sonnenholzner-Varas, 2021). Especies específicas de América Latina, como *Isoetichopus fuscus*, pueden alcanzar precios aún mayores, reportándose valores de hasta US\$1,200 kg, mientras que *Athyonidium chilensis* llegó a cotizarse en US\$2,500 kg en 2015 (Sonnenholzner-Varas, 2021). Esta marcada sensibilidad del precio a la calidad y a las características específicas del producto tiene implicaciones directas para la industria. Sugiere que la capacidad de ofrecer un producto estandarizado y de alta calidad constante será un factor crítico para que los productores acuícolas puedan acceder y competir exitosamente en los segmentos más lucrativos del mercado, superando la variabilidad inherente a la pesca extractiva.

- c. **Impacto de la demanda y auge de la acuicultura:** La sostenida y creciente demanda, combinada con los altos precios, ha ejercido una presión inmensa sobre las poblaciones silvestres de pepinos de mar en todo el mundo. La sobreexplotación es un problema ampliamente documentado, que ha llevado a la disminución drástica de stocks naturales en numerosas regiones (Agudelo-Martínez *et al.*, 2016; Sonnenholzner-Varas, 2021). Esta situación no solo amenaza la biodiversidad marina, sino también la sostenibilidad a largo plazo de las propias pesquerías y las economías locales que dependen de ellas.

Como respuesta directa a esta crisis de sobreexplotación y a la incapacidad de las pesquerías silvestres para satisfacer la demanda del mercado, ha surgido un creciente interés y desarrollo en la acuicultura de pepino de mar (Agudelo-Martínez *et al.*, 2016). El cultivo se presenta como una alternativa viable para complementar la oferta, reducir la presión sobre los recursos naturales, asegurar una fuente de ingresos más estable

y diversificar los medios de vida de las comunidades costeras. Este ciclo, alta demanda que conduce a sobreexplotación, la cual a su vez impulsa la necesidad de desarrollar la acuicultura, crea una tensión inherente. Por un lado, existe la urgencia de escalar la producción acuícola rápidamente para aliviar la presión extractiva.

Por otro lado, este desarrollo debe realizarse de manera sostenible, evitando replicar problemas ambientales asociados a otras formas de acuicultura intensiva, y asegurando que el producto cultivado sea aceptado por un mercado que tiende a valorar cada vez más la sostenibilidad. El éxito a largo plazo de la acuicultura de pepino de mar dependerá, por tanto, no solo de superar los desafíos técnicos de la producción, sino también de gestionar su desarrollo de forma ambientalmente responsable y comunicar eficazmente sus credenciales de sostenibilidad.

Macroalgas: un recurso versátil con demanda en expansión

Las macroalgas, comúnmente conocidas como algas marinas, están experimentando un notable aumento en su demanda global, impulsado por una convergencia única de factores relacionados con la alimentación, la salud, la sostenibilidad y la innovación industrial.

Motivaciones del Consumidor

A diferencia de los pepinos de mar, cuya demanda está más concentrada, las macroalgas atraen a un espectro más amplio de consumidores e industrias debido a su versatilidad y a su alineación con múltiples tendencias globales.

- a. **Usos alimentarios y nutricionales:** el consumo humano directo de macroalgas tiene una larga tradición, especialmente en países asiáticos donde especies como *Porphyra* (nori), *Laminaria* (kombu) y *Undaria* (wakame) son ingredientes comunes (Saavedra *et al.*, 2019). En regiones como Chile, también existe un consumo tradicional de especies locales como el *Luche* (*Porphyra/Pyropia* spp.) y el *Cochayuyo* (*Durvillaea antarctica*) (Saavedra *et al.*, 2019). Sin embargo, la tendencia actual muestra una expansión significativa más allá de estos usos tradicionales. Se observa una creciente incorporación de macroalgas en las dietas occidentales y en el mercado gourmet (Saavedra *et al.*, 2019).

Un factor clave en esta expansión es la innovación en el desarrollo de productos con valor agregado. Han surgido nuevas presentaciones que facilitan el consumo y la integración en la cocina moderna, tales como mermeladas, pastas alimenticias, snacks, harinas y sazónadores molidos (Saavedra *et al.*, 2019). Además, las macroalgas se utilizan cada vez más

como aditivos e ingredientes en salsas, sopas, dulces y, de forma destacada, en alimentos y bebidas funcionales diseñados para consumidores preocupados por la salud. Esta innovación es fundamental, ya que actúa como un puente cultural y de mercado, ayudando a superar posibles barreras de aceptabilidad relacionadas con texturas o sabores desconocidos en mercados no tradicionales, y permitiendo que un público más amplio acceda a sus beneficios.

Estos beneficios radican en su atractivo perfil nutricional. Las macroalgas son generalmente bajas en calorías, pero ricas en nutrientes esenciales. Poseen un contenido significativo de proteínas (algunas especies como el *Luche* y la *Carola* superan el 20%), fibra dietética, una amplia gama de minerales (incluyendo yodo, calcio, potasio) y vitaminas (A, B1, B12, C, D, E) (Saavedra *et al.*, 2019.). Algunas fuentes incluso señalan que su contenido vitamínico puede superar al de frutas y verduras terrestres cultivadas convencionalmente (Saavedra *et al.*, 2019). Además, contienen ácidos grasos esenciales omega-3, beneficiosos para la salud cardiovascular.

- b. **Beneficios para la salud y aplicaciones emergentes:** Más allá de la nutrición básica, las macroalgas son reconocidas por sus compuestos bioactivos con propiedades específicas beneficiosas para la salud. Se utilizan como base para productos farmacéuticos, incluyendo tratamientos contra el cáncer y suplementos nutricionales. Se les atribuyen efectos como la reducción del colesterol y la presión sanguínea, así como actividad antiviral. Algunas especies, como *Ahnfeltia plicata*, contienen agarosa de alta calidad con propiedades anticoagulantes y antioxidantes (Saavedra *et al.*, 2019).

Este potencial terapéutico y de bienestar ha impulsado su uso en la industria cosmética y de cuidado personal. Los extractos de algas, ricos en antioxidantes y agentes antiinflamatorios, se incorporan cada vez más en productos para el cuidado de la piel (hidratación, antiarrugas, protección solar), cuidado capilar y maquillaje, valorados por sus propiedades naturales y beneficiosas. La identificación, extracción y purificación de estos compuestos bioactivos específicos está transformando la percepción de las macroalgas: de ser un recurso primario o un alimento básico, están pasando a ser consideradas una fuente valiosa de ingredientes funcionales de alto valor. Este cambio impulsa la inversión en investigación y desarrollo (I+D) en múltiples sectores (farmacéutico, nutracéutico, cosmético), creando mercados especializados con potencial para márgenes de beneficio superiores a los del mercado alimentario tradicional.

- c. **Sostenibilidad como factor de atracción:** Un elemento diferenciador clave que impulsa la demanda de macroalgas es su perfil de sostenibilidad inherente, especialmente en el contexto del cultivo marino. A diferencia de la agricultura terrestre, el cultivo de macroalgas en el mar no requiere tierra arable, agua dulce ni fertilizantes, ya que absorben los nutrientes directamente del medio marino. Esto las posiciona como una alternativa de producción de biomasa de bajo impacto ambiental. Además, juegan un papel ecológico importante al absorber dióxido de carbono durante la fotosíntesis, contribuyendo potencialmente a la mitigación del cambio climático.

El cultivo también se presenta como una alternativa sostenible a la recolección de praderas naturales, que en muchos casos sufren de sobreexplotación (Saavedra *et al.*, 2019). Fomentar la acuicultura de macroalgas puede ayudar a conservar estos ecosistemas marinos al tiempo que proporciona una fuente de ingresos para las comunidades costeras. Más recientemente, las macroalgas están emergiendo como una materia prima prometedora para la producción de bioplásticos y biocombustibles. Su biodegradabilidad y el potencial de producción a gran escala sin competir por recursos terrestres las convierten en una opción atractiva en la búsqueda de alternativas a los plásticos derivados del petróleo y a los combustibles fósiles.

Esta combinación de atributos nutricionales, funcionales y, sobre todo, de sostenibilidad coloca a las macroalgas en una posición excepcionalmente favorable. Se encuentran en la intersección de múltiples megatendencias globales: la búsqueda de salud y bienestar, el auge de las dietas basadas en plantas y proteínas alternativas, la transición hacia una economía circular y la necesidad de descarbonización. Pocos recursos naturales presentan una convergencia tan fuerte con las principales corrientes transformadoras actuales. Esta alineación multifacética sugiere que la demanda de macroalgas no dependerá de un único factor, sino que será impulsada por un conjunto sinérgico de fuerzas poderosas, otorgándoles un potencial de crecimiento y diversificación que podría ser exponencial y disruptivo a largo plazo.

d. Tendencias globales de la demanda

El mercado global de macroalgas refleja su creciente importancia y versatilidad, mostrando un tamaño considerable y tasas de crecimiento robustas.

- **Crecimiento robusto del mercado:** Las cifras del mercado global de algas marinas (seaweed) evidencian una industria en plena expansión. Valorada en \$7.0 mil millones en 2023, se proyecta que alcance los \$16.1 mil millones para 2033, lo que implica una Tasa de Crecimiento Anual Compuesta

(CAGR) del 8.7% durante el período 2024-2033 (Allied Market Research, s.f.). Este dinamismo supera notablemente al del mercado de pepinos de mar, reflejando la mayor amplitud de aplicaciones y la creciente aceptación global de las macroalgas.

Dentro de este mercado general, segmentos específicos como el de las proteínas derivadas de algas (tanto micro como macroalgas) también muestran un crecimiento significativo. Este submercado se estimó en \$962.8 millones en 2023 y se espera que crezca hasta \$1.3 mil millones para 2028, con una CAGR del 6.8% (BCC Research, 2023). Este crecimiento está impulsado por la demanda de fuentes de proteína alternativas y sostenibles en la industria alimentaria, de piensos y de suplementos dietéticos (BCC Research, 2023).

- **Diversificación de aplicaciones:** Una de las tendencias más definatorias del mercado de macroalgas es la extraordinaria diversificación de sus aplicaciones. Más allá del consumo humano directo y la extracción tradicional de ficocoloides (agar, carragenina, alginatos), la demanda se expande vigorosamente hacia nuevos sectores. Esto incluye su uso creciente en alimentos y bebidas funcionales, productos de cuidado personal y belleza, alimentación animal, suplementos dietéticos, biofertilizantes para la agricultura, aplicaciones industriales (textiles, papel), y los emergentes campos de los biocombustibles y bioplásticos.

Esta extrema diversificación confiere una notable resiliencia al mercado global de macroalgas. A diferencia de los mercados que dependen de una única aplicación o de un número limitado de ellas, la demanda de macroalgas se sustenta en múltiples pilares. Una posible desaceleración en un sector específico (por ejemplo, el alimentario) podría ser compensada por el crecimiento en otro (como el de los biomateriales). Esta distribución del riesgo a través de diversas industrias y aplicaciones hace que la demanda general sea potencialmente más estable y robusta frente a fluctuaciones económicas o cambios en las preferencias de un único sector.

- **Dinámicas regionales y segmentación:** Geográficamente, la región de Asia-Pacífico domina actualmente el mercado global de macroalgas, tanto en términos de producción como de consumo. Esta región representó la mayor cuota de mercado en 2023 y se espera que mantenga su liderazgo, beneficiándose de condiciones climáticas favorables, extensas líneas costeras adecuadas para el cultivo a gran escala y una larga tradición en el uso y manejo de algas (Allied Market Research, s.f.). Asia-Pacífico también lidera el mercado específico de proteínas de algas (BCC Research, 2023).

Sin embargo, si bien la producción primaria de biomasa está concentrada en Asia-Pacífico, la demanda de productos procesados y de valor agregado (como proteínas, extractos nutracéuticos, bioplásticos) es cada vez más global. Esto sugiere que el crecimiento futuro del mercado global dependerá significativamente del desarrollo y la adopción de tecnologías de procesamiento y aplicación en otras regiones, como Europa y América. Establecer capacidades de transformación y desarrollo de productos finales más cerca de los mercados de consumo en estas regiones podría ser clave para capitalizar eficientemente la creciente demanda local, reduciendo costos logísticos asociados al transporte de materia prima a granel y permitiendo una mejor adaptación de los productos a las preferencias y regulaciones específicas de cada mercado.

El siguiente cuadro resume las proyecciones de tamaño y crecimiento para los mercados globales de pepinos de mar y macroalgas, proporcionando una visión comparativa de su escala y dinamismo:

Cuadro 24. Tabla comparativa de mercados y proyección para pepinos de mar y macroalgas.

Producto	Mercado Global (Año Base)	Proyección Mercado (Año Final)	CAGR (%)	Fuentes Clave
Pepino de Mar	USD 1.38B (2024)	USD 2.19B (2033)	5.29%	(Business Research Insights, 2024)
Macroalgas (Total)	USD 7.0B (2023)	USD 16.1B (2033)	8.7%	(Allied Market Research, s.f.)
Proteína de Algas	USD 962.8M (2023)	USD 1.3B (2028)	6.8%	(BCC Research, 2023)

Nota: Las cifras corresponden a estimaciones y proyecciones de las fuentes indicadas.

Esta comparación cuantitativa subraya la mayor magnitud actual y la tasa de crecimiento proyectada más elevada para el mercado global de macroalgas en su conjunto, en comparación con el mercado de pepinos de mar. También destaca el tamaño emergente pero ya considerable del segmento específico de proteínas derivadas de algas.

En conclusión, el análisis de las motivaciones del consumidor y las tendencias globales de la demanda revela trayectorias distintas, pero igualmente significativas para los pepinos de mar y las macroalgas dentro de la economía azul global.

Los pepinos de mar mantienen una demanda sólida, aunque concentrada, impulsada principalmente por su estatus de lujo culinario y sus usos medicinales tradicionales en los mercados asiáticos, complementados por un perfil nutricional valioso. El mercado global muestra un crecimiento constante pero moderado. Sin embargo, esta demanda ha generado una presión insostenible sobre las poblaciones silvestres, convirtiendo el desarrollo de una acuicultura responsable y de alta calidad en una necesidad crítica, no sólo para satisfacer el mercado, sino también para la conservación del recurso. El desafío principal radica en escalar la producción acuícola de manera sostenible y lograr la consistencia en la calidad que exigen los segmentos de alto valor.

Por otro lado, las macroalgas se benefician de una base de demanda mucho más amplia y diversificada, impulsada por su versatilidad nutricional, sus aplicaciones en salud y bienestar, y, de manera crucial, por su favorable perfil de sostenibilidad. El mercado global de macroalgas es considerablemente mayor que el de los pepinos de mar y exhibe una tasa de crecimiento más robusta, alimentada por su expansión en sectores tan variados como la alimentación funcional, los cosméticos, los piensos, los biofertilizantes y los emergentes biomateriales (bioplásticos, biocombustibles). Su alineación única con múltiples tendencias globales transformadoras sugiere un potencial de crecimiento a largo plazo excepcional.

Ambos recursos marinos presentan oportunidades significativas para el desarrollo económico, particularmente en el ámbito de la acuicultura sostenible y la innovación de productos. Sin embargo, también enfrentan desafíos importantes: la gestión eficaz de las pesquerías remanentes y el desarrollo de una acuicultura verdaderamente sostenible para los pepinos de mar; y la necesidad de escalar la producción y desarrollar tecnologías de procesamiento eficientes para las macroalgas, asegurando al mismo tiempo la gestión ambiental de las zonas de cultivo.

En última instancia, el papel futuro que jugarán los pepinos de mar y las macroalgas en la seguridad alimentaria, la salud humana y la economía global dependerá de la capacidad de la industria, los reguladores y los consumidores para fomentar prácticas de explotación y cultivo que sean ambientalmente sostenibles, socialmente responsables y económicamente viables, adaptándose continuamente a las dinámicas cambiantes de la demanda global.

4.20. Brechas de conocimiento y capacidades

El sector maricultor costarricense, con experiencias en el cultivo de peces marinos, camarones y moluscos, continúa enfrentando brechas de conocimiento y capacidades que condicionan su expansión y consolidación competitiva:

- a. **Brechas técnicas y de producción consolidada:** aunque se han desarrollado protocolos de cultivo larval y engorde para especies como pargo manchado (*Lutjanus guttatus*), persisten vacíos en la optimización de tasas de supervivencia, conversión alimenticia y control sanitario a escala comercial (Herrera-Ulloa, 2019). En moluscos y camarones, la bioseguridad, la prevención de enfermedades y el manejo ambiental siguen siendo desafíos críticos.
- b. **Limitaciones en evaluación ambiental y ordenamiento:** la mayoría de las áreas costeras con potencial maricultor carecen de estudios actualizados de capacidad de carga ecológica y de lineamientos claros de ordenamiento espacial, fundamentales para un crecimiento responsable (Fisher *et al.*, 2023).
- c. **Ausencia de zonificación acuícola nacional actualizada:** Costa Rica no cuenta con un marco de zonificación técnica que identifique áreas prioritarias, zonas de exclusión y corredores de uso múltiple que orienten el desarrollo de granjas marinas de peces, camarones y moluscos. Esta brecha impide planificar inversiones de largo plazo, genera inseguridad jurídica y eleva el riesgo de conflictos con otros sectores, como la pesca artesanal, el turismo o la conservación marina (FAO, 2023).
- d. **Capacidades de gestión empresarial y comercialización:** los productores establecidos enfrentan limitaciones en planificación financiera, estrategias de mercado y cumplimiento de certificaciones internacionales de sostenibilidad e inocuidad alimentaria. Estas carencias restringen la competitividad frente a proveedores de países vecinos con mayores economías de escala (Leiva *et al.*, 2022).
- e. **Transferencia tecnológica e innovación limitada:** si bien existen centros académicos y programas piloto, la adopción comercial de tecnologías avanzadas (monitoreo digital, sistemas multitróficos, trazabilidad) sigue siendo de bajo nivel comercial.
- f. **Brecha sobre modelo de operación:** la maricultura costarricense se ha desarrollado sobre todo en proyectos subvencionados o de pequeña escala asociativa, no como un sector privado competitivo y consolidado. Eso genera: dependencia de recursos estatales, escasa inversión de riesgo y limitada capacidad de expansión comercial.
- g. **Brecha en adquisición de insumos y dependencia externa:** la mayoría de los insumos especializados (semillas, alimento balanceado marino, redes, instrumentación, suplementos nutricionales) deben importarse y están sujetos a: tiempos de entrega prolongados, altos costos logísticos y aduanales y variaciones de precio por tipo de cambio o escasez global.

4.21. Obstáculos y barreras de entrada para nuevas empresas

El establecimiento de nuevas empresas maricultoras, especialmente en especies consolidadas como peces, camarones y ostras, enfrenta barreras estructurales que dificultan su viabilidad y escalamiento:

- a. **Tramitología extensa y regulación ambiental exigente:** los procesos de concesión marítimo-terrestre, estudios de impacto ambiental y permisos sectoriales pueden superar los 18-24 meses. La falta de lineamientos específicos por especie genera incertidumbre y aumenta la discrecionalidad administrativa (Leiva et al., 2022).
- b. **Carencia de zonificación técnica que brinde seguridad jurídica y ambiental:** la inexistencia de un plan nacional de zonificación acuícola dificulta identificar áreas idóneas y preaprobadas para proyectos marinos. Esta situación prolonga la tramitología, incrementa el riesgo de rechazo de solicitudes y reduce la certeza jurídica para inversionistas, al desconocer si las áreas seleccionadas son aptas ambiental y socialmente (FAO, 2023).
- c. **Escasez de material biológico certificado:** si bien existen esfuerzos de producción de semilla de peces y moluscos, la escala actual es insuficiente para abastecer una expansión sostenida. La dependencia de importaciones o lotes experimentales eleva costos y riesgos productivos.
- d. **Competencia regional y logística limitada:** las empresas locales enfrentan competencia con proveedores de países como Chile y Ecuador, que poseen cadenas logísticas consolidadas y menores costos operativos. A esto se suma la falta de infraestructura nacional de acopio, frío y transporte especializado (Muñiz & del Río, 2024).
- e. **Vulnerabilidad climática y ambiental:** eventos como huracanes, floraciones algales y variaciones térmicas extremas afectan la continuidad productiva y elevan los costos de contingencia y seguros (Fisher et al., 2023).
- f. **Dificultad en la adquisición ágil de insumos estratégicos:** La maricultura en Costa Rica depende en buena medida de insumos importados, tales como sistemas de recirculación, alimento balanceado de calidad marina, suplementos nutricionales y equipos de monitoreo. Esta situación genera dificultades logísticas, demoras prolongadas en la entrega y altos costos aduanales. La carencia de proveedores locales consolidados y de inventarios en el país limita la capacidad de respuesta de las empresas ante contingencias productivas, incrementa los plazos de instalación de nuevos proyectos y afecta la continuidad operativa durante eventos climáticos o fluctuaciones internacionales de oferta (Muñiz & del Río, 2024; FAO, 2023).

4.22. Principales Hallazgos

Se propone *Ecosistema del Mar Sostenible*, ya que lo evaluado confirma que la iniciativa no solo es rentable, sino que alcanza su máximo potencial económico y social bajo un modelo de negocio asociativo, estructurado como un clúster o "ecosistema productivo" (Ver Figura 13).

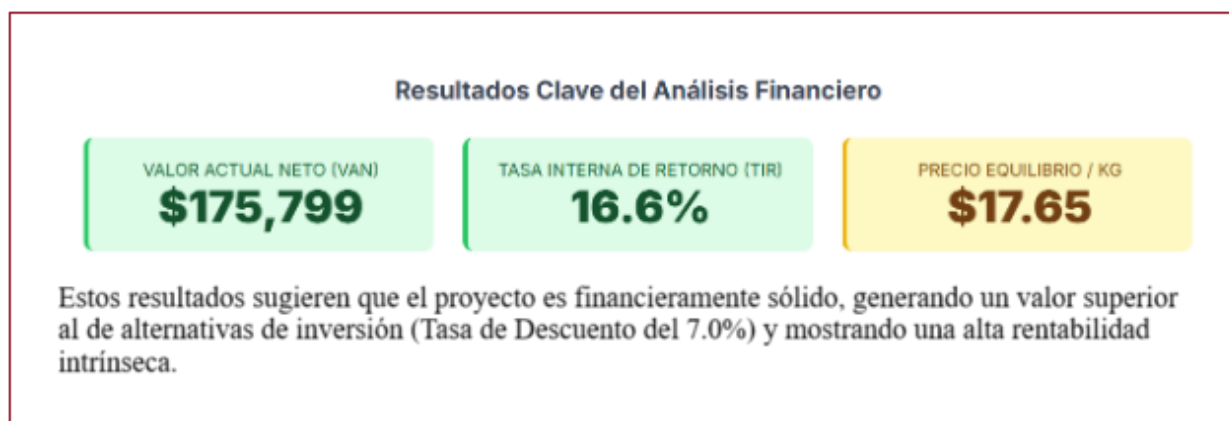


Figura 13. Resultados claves de los análisis económicos realizados en el presente trabajo.

La cadena de valor de estos productos es inherentemente compleja y ofrece múltiples oportunidades para la generación de subproductos y la especialización. Sin embargo, hemos identificado que muchos eslabones, aunque son complementarios y estratégicos, podrían no ser rentables si se desarrollan de forma aislada. Esto subraya la necesidad de una visión integrada que fomente la colaboración y las sinergias entre los distintos actores.

Para ilustrar este potencial, proponemos el concepto de un "Ecosistema del Mar". Tomando como base las actividades existentes en comunidades costeras como las de Guanacaste, este ecosistema integraría desde pequeños pescadores dedicados al cultivo de las especies estudiadas —y otras complementarias como camarón y ostras— hasta modelos de negocio sofisticados. Esto incluye la venta directa a grandes consumidores (hoteles, sector público), la inclusión de productos frescos en canales locales como las ferias del agricultor para fortalecer la seguridad alimentaria, y la exportación de productos de alto valor agregado, como alimentos preparados o suscripciones directas al consumidor final en mercados internacionales.

Actualmente, el desarrollo del sector es precario y se caracteriza por dos barreras principales: la ausencia de políticas públicas multisectoriales y claras, y profundas ineficiencias en la cadena de valor. Un ejemplo concreto es la logística: un camión refrigerado de 20 toneladas a menudo transporta solo 12 toneladas de un único producto, dejando un 40% de capacidad ociosa. Un modelo de clúster permitiría optimizar esta infraestructura, consolidando cargas de diversas especies (ej. 12 toneladas de pescado, 4 de otras especies, 1.5 de

pepinos de mar y 2.5 de macroalgas), reduciendo así costos hundidos y mejorando la competitividad de todos los participantes.

Para catalizar la creación de este ecosistema, nuestra principal recomendación de política pública es el diseño de un Régimen Especial para el Ecosistema del Mar. Inspirado en el éxito comprobado del régimen de Zonas Francas, el sector de mayor crecimiento en el país a pesar de los choques económicos, este esquema ofrecería incentivos fiscales no condicionados a una ubicación geográfica específica, sino a la pertenencia al sector (pesca, acuicultura, turismo, servicios de apoyo) y al enfoque en la exportación o el turismo.

Este régimen especial debería incorporar un esquema laboral innovador de jornadas 4x3, donde los colaboradores dediquen parte de su tiempo a la formación técnica intensiva. Proponemos un modelo de 8 horas de trabajo productivo y 4 horas de capacitación diarias, seguido de 3 días de descanso. Este sistema no solo potenciaría las habilidades de la fuerza laboral, sino que también serviría como una estrategia proactiva para la reconversión laboral ante la transición tecnológica impulsada por la Inteligencia Artificial. Para su financiamiento, se plantea una reasignación de componentes de las cuotas a la CCSS (destinados a pobreza y educación) para crear un fondo de becas que cubra los salarios y cargas sociales durante las horas de formación.

A continuación, se desglosan los análisis técnicos que validan esta propuesta, respondiendo a preguntas clave mediante:

- a. El cálculo del Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el punto de equilibrio.
- b. Un esquema visual de la cadena de valor y sus interconexiones.
- c. Mecanismos de financiamiento detallados y recomendaciones específicas de política pública.

Los datos que se presentan a continuación no solo validan un proyecto, sino que revelan el mapa para transformar las costas de Costa Rica en un motor de desarrollo sostenible, inclusivo y de alto valor para el siglo XXI.

Para comprender en mayor detalle esta información, desarrollamos el presente apartado en que se explicará paso a paso los principales hallazgos que sustentan la información descrita en la anterior infografía.

Para ello analizaremos la cadena de valor en el siguiente esquema:



Figura 14. Esquema del proyecto Ecosistema del mar.

Detalle de eslabones habilitadores y sus interrelaciones

Estos cuatro eslabones no forman parte del flujo físico del producto, sino que crean el ambiente y los recursos necesarios para que toda la cadena de valor prospere.

a. Política pública y régimen especial

• Actividades detalladas:

- **Marco normativo:** creación de una ley específica para la maricultura que ofrezca seguridad jurídica a los inversores y productores.
- **Agilización de permisos:** diseño de un sistema de "ventanilla única" para gestionar concesiones de áreas marinas y permisos de operación, coordinado por entidades como INCOPECA.
- **Incentivos fiscales:** establecimiento de exenciones o reducciones de impuestos en la importación de equipos, tecnologías y alimentos especializados que no se producen en el país. Además de un componente de subsidio para el pago de las horas de los estudiantes, ese subsidio para los empleos de 4 por tres se debe pagar en 50% por la persona estudiante y el otro 50% por la empresas como parte del pago de la compensación salarial. Ese 50% aportado por el estudiante le da libertad para que elija el centro de formación y el empleador definirá las áreas de formación. Los aportes del estudiante son un desgaste, es decir un ahorro por el no pago de un servicio y para el empleador es un porcentaje de no pago de las cargas sociales iniciando con los recursos para el INA.

- **Promoción y apertura de mercados:** programas liderados por PROCOMER para posicionar los productos de la maricultura costarricense en ferias internacionales, certificar la sostenibilidad y facilitar los contactos para la exportación.
 - **Estándares de Calidad:** definición de normas técnicas y sanitarias para el cultivo, procesamiento y transporte, garantizando la inocuidad y la calidad del producto final. Incorporar procesos de formación innovadores que permitan masificar el conocimiento de los estándares y de las técnicas.
- b. **I+D y genética (Investigación, Desarrollo e Innovación)**
- **Actividades detalladas:**
 - **Laboratorios de larvas y semillas:** producción controlada de post-larvas de pepino de mar, pargo, ostras y "semillas" (plántulas) de macroalgas, asegurando un suministro constante y de alta calidad para los productores.
 - **Mejora genética:** investigación en universidades y centros especializados para seleccionar especímenes con mejores tasas de crecimiento, resistencia a enfermedades y adaptación al cambio climático.
 - **Biotecnología aplicada:** investigación para extraer compuestos de alto valor (colágeno, carragenanos, Omega-3) de las especies cultivadas, abriendo la puerta a los mercados farmacéutico y cosmético.
 - **Optimización de cultivos:** desarrollo de dietas y alimentos sostenibles, y diseño de sistemas de cultivo más eficientes y de menor impacto ambiental.
- c. **Sinergia con el sector turismo**
- **Actividades detalladas:**
 - **Gastronomía sostenible:** creación de alianzas para que hoteles y restaurantes (sector HORECA) ofrezcan en sus menús producto de maricultura locales y frescos, promoviendo el concepto "del mar a la mesa" y fortaleciendo la marca país de sostenibilidad.
 - **Experiencias turísticas:** diseño de "rutas de la maricultura" donde los turistas puedan visitar granjas marinas, aprender sobre el cultivo sostenible y participar en degustaciones.
 - **Productos de retail turístico:** venta de productos con valor agregado (snacks de algas, cosméticos a base de colágeno marino,

conservas gourmet) en tiendas de hoteles, aeropuertos y zonas turísticas.

- o **Branding conjunto:** campañas de marketing que unen la imagen de Costa Rica como destino ecológico con la innovación y sostenibilidad de su maricultura. Esto aprovechando los valores agregados que tienen estos cultivos para la buena alimentación y la tendencia a consumir productos del mar y eso adicionado a los beneficios de una actividad productiva que más bien genera una huella ambiental y bajo este esquema social muy grande.

d. Capital humano y formación

- **Actividades detalladas:**

- o **Programas educativos:** Creación de carreras técnicas y universitarias enfocadas en acuicultura, biología marina, ingeniería de alimentos y gestión de agronegocios marinos.
- o **Formación continua:** Implementación de modelos flexibles como el Esquema 4x3 (4 días de trabajo, 3 de estudio/formación) para que los trabajadores de comunidades costeras puedan capacitarse sin abandonar sus empleos. Las clases se realizarán en primera instancia para personas que trabajen en empresas del ecosistema, principalmente en los esquemas de trabajo 4x3 en donde 4 horas deben ser para procesos de formación, en el esquema de pago por resultados en que la empresa aporta un porcentaje que además es reducido del pago de las cargas sociales y como beneficio adicional puede elegir los temas en que la persona trabajadora se formará y esta persona pagará el otro porcentaje para completar el 100% del costo del programa que incluiría el costo proporcional a 4 horas de salario por día durante 4 días, más el costo del proceso de formación dependiendo de la temática y del proveedor.
- o **Certificación de competencias:** cursos cortos para certificar a pescadores y operarios en buenas prácticas de manejo, cosecha, mantenimiento de la cadena de frío y seguridad laboral. Inteligencia artificial y otros similares.
- o **Capacitación empresarial:** formación para pequeños productores y cooperativas en temas de administración, finanzas, marketing y logística para que puedan gestionar sus negocios de forma rentable.

¿Cómo se relacionan entre sí y con la cadena?

Estos cuatro eslabones forman un círculo virtuoso de soporte. La Política Pública crea un entorno seguro que atrae Financiamiento y justifica la inversión en I+D. La I+D genera las innovaciones (larvas, técnicas) que hacen viable y rentable la

producción. El capital humano bien formado incluso en modelos nuevos de formación con el respaldo de centros de formación públicos, que es esencial para ejecutar con eficiencia tanto la I+D como la producción y el procesamiento. Finalmente, la Sinergia con el Turismo no solo actúa como un canal de venta premium, sino que también genera una demanda de productos innovadores y sostenibles, enviando una señal clara a I+D y a los productores sobre hacia dónde dirigir sus esfuerzos, a la vez que valida la inversión en Política Pública y Capital Humano al demostrar un impacto económico y social tangible en las comunidades costeras.

Detalle del flujo principal de la cadena de valor

Este conjunto de eslabones representa el viaje del producto desde su origen hasta el consumidor final, impulsado por el capital y la información.

El ciclo comienza con el financiamiento e inversión, dónde capital público (capital semilla) y privado (fondos de inversión, banca) se inyectan para construir infraestructura, financiar la investigación y proveer capital de trabajo a los productores. Este financiamiento es el catalizador que permite al eslabón de Producción y Cultivo Sostenible adquirir las larvas y semillas desarrolladas por I+D y llevar a cabo el engorde en jaulas marinas, estanques en tierra o sistemas de líneas largas (longlines). Aquí se integra a pescadores artesanales, diversificando sus ingresos y aprovechando su conocimiento del medio marino.

Una vez que el producto alcanza el tamaño deseado, la Logística Optimizada y Cadena de Frío se activa con la cosecha planificada, el transporte en camiones refrigerados y la consolidación de la producción de varias fincas en centros de acopio locales; este paso es crítico para mantener la calidad y reducir costos. Desde el acopio, el producto pasa al Procesamiento y Valor Agregado, donde se transforma: una parte se somete a un procesamiento primario (seco, congelado) para su exportación a granel, mientras que otra parte se convierte en productos de alto valor, como extractos para la industria farmacéutica y cosmética o alimentos listos para consumir.

Finalmente, estos productos llegan al mercado a través de los Canales de Comercialización Diversificada, que incluyen la exportación B2B a grandes distribuidores internacionales, la venta directa al sector turístico, la distribución en supermercados y ferias locales para la seguridad alimentaria, y la venta directa al consumidor a través de plataformas de e-commerce. Este último eslabón es fundamental, ya que no solo genera los ingresos que fluyen de vuelta a través de toda la cadena (flujo de dinero), sino que también recopila datos cruciales sobre las tendencias del consumidor, los cuales retroalimentan a I+D y Producción para planificar ciclos futuros y desarrollar nuevos productos, cerrando así el ecosistema (Ver Figura 15).



Figura 15. Esquema detallado del proyecto Ecosistema del mar.

El ejercicio bajo un nuevo enfoque estratégico redefine las fronteras y relaciones entre los eslabones, centrando el análisis en el núcleo productivo y optimizando el resto de la cadena a través de alianzas y especialización.

Este modelo propone un "desacoplamiento" estratégico de la cadena, reconociendo que no todas las actividades deben ser realizadas por la misma entidad. El objetivo es fortalecer el eslabón de producción, permitiendo que otros actores especializados maximicen la eficiencia en sus respectivas áreas.

Redefinición del Ecosistema: un modelo de especialización y alianzas

a. Logística y cadena de frío: el socio estratégico externalizado (outsourcing)

En este modelo, este eslabón no se considera una actividad interna del productor, sino un servicio especializado contratado. Se parte de la premisa de que este es un negocio diferente, con un nivel de desarrollo avanzado en Costa Rica en áreas complementarias (agroindustria, pesca de captura, etc.). Intentar replicarlo sería ineficiente y costoso.

- **Modelo de operación:** se opera bajo un modelo de outsourcing. El productor (sea una cooperativa de pescadores o una empresa de cultivo) se enfoca exclusivamente en cultivar y cosechar. La empresa de logística, un socio estratégico, se encarga de la recolección, el transporte refrigerado y la entrega al siguiente eslabón. El "Precio de Venta en Playa": Este concepto es fundamental. La responsabilidad y el análisis financiero del productor terminan en el momento de la cosecha. Se establece un "precio de venta en playa" (o en el muelle de la finca), que es el ingreso que recibe el productor. A partir de este punto, el producto es propiedad

del siguiente actor en la cadena. Esto simplifica drásticamente el modelo de negocio del productor y permite que su viabilidad (medida con indicadores como el VAN y la TIR) se calcule sobre una base clara y definida: la producción sostenible. Esta es una de las recomendaciones que se logró extraer de la experiencia del caso chileno gracias a la información de las entrevistas realizadas al experto Felipe, las dos académicas de Chile y don Beto ostionería del Jobo.

Esta aproximación se basa en la presunción del precio en playa, con lo cual se puede establecer un precio único a nivel nacional para hacer los supuestos y que los costos de la logística se puedan compartir con cadenas globales de logística ya existentes. Además, reconoce la ausencia de información suficiente para realizar la investigación y con ello disminuir el riesgo de sobre o subestimación de la rentabilidad de la actividad. Es decir, si estudiamos la producción el punto de inicio es el costo relacionado con la producción de la materia prima, que en este caso se puede incluir la inversión para las instalaciones de la cría de larvas. Con un costo cercano a los \$29.000, y un costo de \$80.000 para la primera cría. Luego detallamos los valores establecidos.

b. Industrialización y comercialización: alianzas para el valor social y económico, siguiendo la misma lógica de especialización, los eslabones de Industrialización y Valor Agregado y Comercialización Diversificada se conciben como actividades secundarias a la producción, integradas mediante alianzas estratégicas, no como departamentos internos.

- **Modelo de integración:**

- **Alianzas comerciales privadas:** Para la exportación a granel o la venta a grandes cadenas, se establecen contratos con empresas procesadoras y comercializadoras ya existentes que tienen la experiencia, las certificaciones y el acceso a los mercados.
- **Esquemas de valor social y económico:** Aquí yace un enorme potencial. El modelo fomenta la creación de "subeslabones" operados por grupos comunitarios bajo esquemas de asociatividad. Por ejemplo, una asociación de mujeres de comunidades costeras, como las tradicionales peladoras de camarón, pueden ser capacitadas y equipadas para realizar el procesamiento primario o incluso la transformación del pepino de mar en productos deshidratados para la industria farmacéutica o en conservas para el mercado gourmet. Esto no solo genera eficiencia, sino un profundo impacto social, creando empleo de calidad y empoderando a grupos vulnerables.

- c. **El Rol catalizador del estado y el capital privado:** este modelo de especialización sólo es viable con un entorno habilitador proactivo y bien definido.
- **El régimen especial del Ecosistema del Mar:** similar a los beneficios de las Zonas Francas, este régimen ofrecería incentivos fiscales y regulatorios potentes, no solo al productor, sino también a la empresa de logística, a la planta de procesamiento comunitaria y al exportador. Esto convierte a todo el ecosistema en un polo de atracción de inversión.
 - **Financiamiento dual para la innovación:** el involucramiento del gobierno debe ser fuerte, pero focalizado. El Estado debe facilitar y financiar directamente la investigación y desarrollo (I+D) de base: la genética de especies, las nuevas técnicas de cultivo y el descubrimiento de aplicaciones biotecnológicas. Sin embargo, para la "puesta en marcha" de estas innovaciones (escalar un prototipo, construir una planta piloto), debe existir un actor privado (un fondo de inversión de impacto, por ejemplo) que financie estas etapas, asumiendo un riesgo calculado a cambio de un retorno. Esta sinergia público-privada asegura que la ciencia se convierta en negocio.

En resumen, al separar la actividad en eslabones especializados se obtienen datos claros sobre el sujeto de estudio principal: la producción. Al mismo tiempo, se revela que el verdadero potencial económico y social del ecosistema se desata cuando estos eslabones operan en red, mediante esquemas de asociatividad y alianzas estratégicas, todo bajo un régimen especial que incentiva la participación y la inversión.

- d. **Análisis de producción y estructura de costos para un Modelo AMTI**
- **El Modelo Productivo Estratégico: Acuicultura Multitrófica Integrada (AMTI):** al analizar las opciones productivas, se concluye que el modelo más avanzado y beneficioso no es un simple policultivo, sino un sistema ecológicamente integrado. La AMTI, o *IMTA* por sus siglas en inglés, es la alternativa seleccionada.

Este enfoque replica un ecosistema natural, donde los subproductos o desechos de una especie se convierten en insumos o alimento para otra. Las especies se seleccionan por su rol en la cadena trófica, creando un ciclo virtuoso:

- **Nivel trófico Aato (especies alimentadas):** como el pepino de mar o los camarones, que consumen alimento externo.
- **Nivel trófico medio (especies filtradoras):** como las ostras, que limpian la columna de agua al filtrar materia orgánica.
- **Nivel trófico bajo (especies extractivas):** como las macroalgas, que absorben los nutrientes inorgánicos disueltos (nitratos y fosfatos) que liberan las otras especies.

Este modelo no sólo mitiga el impacto ambiental, sino que también diversifica la producción, reduce los riesgos económicos y mejora la eficiencia de los recursos. Para efectos de este análisis, se plantea un escenario optimista basado en un sistema AMTI de tres cultivos: pepino de mar, macroalgas y ostras.

La optimización de este sistema requerirá una inversión estratégica en investigación y desarrollo, vinculando a la academia (universidades públicas) con proyectos ya en marcha financiados por la cooperación internacional y promovidos por diversas entidades del ecosistema productivo. Es crucial entender que la consolidación de este ecosistema socio productivo debe ser tratada como una política de Estado de largo plazo, trascendiendo los ciclos de gobierno para garantizar la seguridad jurídica y la continuidad.

- e. **Estructura de inversión inicial (costos de arranque):** para establecer una unidad productiva inicial, se han identificado los siguientes costos de inversión, basados en información proporcionada por productores de ostras en El Jobo y estimaciones técnicas (Ver Cuadro 25).

(Nota: Se utiliza un tipo de cambio de referencia de ₡500 por \$1 USD para la estandarización).

Cuadro 25. Componentes de inversión de acuerdo con el monto económico.

Componente de Inversión	Monto (Moneda Original)	Monto Estimado (USD)	Notas
Infraestructura de Cultivo	₡1,520,000	\$3,040	Malla para 4 jaulas tamaño familiar tipo D5 y líneas de cultivo.
Insumos Biológicos (1er Ciclo)	\$80,000	\$80,000	Costo de 4 millones de larvas de pepino de mar para la siembra inicial.
Permisos y Cánones	\$2,000 + ₡100,000	\$2,200	Incluye canon inicial y pagos adicionales. No considera costos de formalización.
INVERSIÓN INICIAL TOTAL		\$85,240	Costo para establecer la granja y arrancar el primer ciclo de uno de los cultivos. Costo no incluye la inversión del laboratorio, ya que se asume la compra de las crías y no la producción.

- Nota: Los \$2.000 de permisos y cánones, corresponde a los costos para contratar estudios que se requieren para solicitar los permisos.

Se recomienda que el Estado, mediante alianzas con universidades públicas, subsidie los costos de honorarios profesionales para la formalización de las cooperativas o empresas, como una barrera de entrada menos para los productores. Considerando que los resultados de las investigaciones son

producto que se puede facilitar como parte de la inversión del Estado mediante el aporte derivado de los proyectos de investigación de las universidades. En el siguiente esquema se resumen los principales elementos (Ver Figura 16).



Figura 16. Esquema de estructura de inversión inicial.

- f. **Costos operativos fijos mensuales:** independientemente del volumen o tipo de producción, e incluso si se generan ingresos por turismo, la granja acuícola incurre en costos fijos para garantizar su seguridad y operación básica (Ver Cuadro 24).

Cuadro 24. Concepto de costos fijos de acuerdo con el costo.

Concepto de Costo Fijo	Monto Mensual (CRC)	Monto Estimado (USD)
Personal de Vigilancia 24/7	C1,000,000	\$2,000
Costos Adicionales Fijos	C500,000	\$1,000
COSTO OPERATIVO FIJO TOTAL	C1,500,000	\$3,000

En la siguiente imagen se muestra el total de costos operativos fijos, el cual permite comprender de mejor manera el componente económico.



Figura 17. Esquema del costo operativo fijo.

Un beneficio importante de trabajar bajo el modelo de ecosistema es que en un mismo lugar (plantación), se puede generar un servicio de turismo, similar incluso a la cría de tilapias y el servicio de restaurante acuático, tipo de servicio que ya existen precedentes en el país.

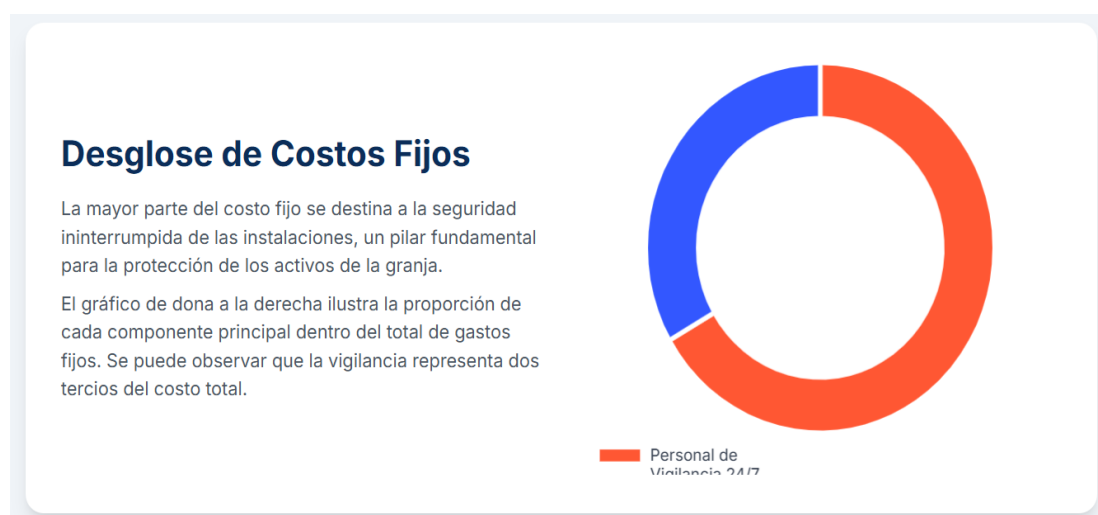


Figura 18. Desglose de costos fijos dentro de la propuesta.

Tanto la inversión en instalaciones como el personal de vigilancia son costos fijos que en el caso de mezclar cultivos y actividad turística se puede compartir y con ello disminuir ese costo en al menos 4 unidades productivas (macroalga, pepino, ostras y servicios turísticos) (Ver Figura 18).

Importancia Estratégica

Comprender estos costos fijos es crucial para la planificación financiera y la estrategia de precios. Aseguran la viabilidad a largo plazo de la granja al establecer una línea base de gastos que debe ser cubierta consistentemente. La optimización de los costos variables será clave para maximizar la rentabilidad sobre esta base fija.

Figura 19. Información necesaria para tomar en cuenta dentro de la propuesta.

g. Análisis de escenarios: distribución de costos fijos por colaboración

El modelo IMTA revela su máximo potencial económico en la capacidad de diluir los costos fijos entre múltiples empresas o líneas de negocio que comparten la misma infraestructura. A continuación, se comparan cuatro escenarios:

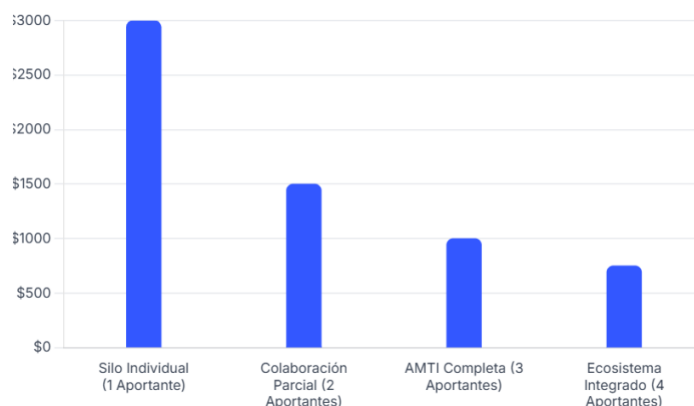
Cuadro 26. Escenarios con su respectiva descripción y costo fijo (USD).

Escenario	Descripción	Aportantes	Costo Fijo Mensual por Empresa (USD)
1. Silo Individual	Una sola empresa (ej. solo de pepino de mar) asume el 100% de los costos fijos.	1	\$3,000
2. Colaboración Parcial	Dos empresas (ej. pepino y ostras) comparten los costos fijos al 50%.	2	\$1,500
3. Colaboración AMTI Completa	Tres empresas (pepino, ostras y algas) operan en el mismo sitio y comparten los costos.	3	\$1,000
4. Ecosistema Integrado (AMTI + Turismo)	Las tres empresas de producción más una cuarta empresa de turismo comparten los costos.	4	\$750

En la siguiente figura se muestra el análisis de escenarios de acuerdo con el poder de colaboración.

Análisis de Escenarios: El Poder de la Colaboración

El modelo AMTI revela su máximo potencial al diluir los costos fijos entre múltiples empresas. Este gráfico compara cómo disminuye la carga financiera para cada participante a medida que aumenta la colaboración.



La transición de un modelo individual a un ecosistema integrado con turismo puede **reducir la carga de costos fijos para cada empresario en un 75%**, pasando de \$3,000 a solo \$750 al mes.

Figura 20. Análisis de escenarios de acuerdo con la colaboración.

Una ventaja estratégica externa al modelo es que el poder compartir la carga de inversión y mantenimiento posibilita también compartir el riesgo y los esfuerzos por aumentar la productividad individual y colectiva.

Ventaja Competitiva Decisiva

Comprender y diluir los costos fijos es crucial para la viabilidad a largo plazo. La asociatividad y la integración no son solo un beneficio ambiental, sino una poderosa estrategia financiera que aumenta la resiliencia y rentabilidad de cada colaborador.

Figura 21. Información importante para tomar en cuenta dentro de la propuesta.

h. Inventarios y proyección de producción inicial (datos base)

Las siguientes cifras sientan las bases para un análisis financiero detallado, considerando las mermas desde el laboratorio hasta la venta "en playa (Ver Cuadro 26).

Cuadro 27. Descripción de productos de acuerdo con densidad y producción final.

Producto	Densidad / Insumo Inicial	Producción Final Estimada (por ciclo)
Pepino de Mar	4,000,000 de larvas	5,440 kg
Ostras	200,000 unidades en 2 hectáreas	10,000 kg (10 Toneladas)
Macroalgas	Líneas de cultivo (se asume una densidad similar a la de ostras)	Por determinar

(Nota: Se asume un valor de venta en playa de \$200,000 por ciclo productivo para cada ostras y pepinos, cifra que debe ser validada con estudios de mercado detallados).

En la siguiente figura se muestra proyecciones de producción por ciclo de acuerdo con el producto ya sea pepino de mar o macroalga.



Figura 22. Proyecciones de producción por ciclo de acuerdo con la especie cultivada.

i. Resultados clave del análisis financiero

Basado en los supuestos detallados más adelante, el proyecto muestra una sólida viabilidad financiera:

- Valor Actual Neto (VAN): \$175,799
- Tasa Interna de Retorno (TIR): 16.6%
- Precio Unitario de Equilibrio: \$17.65 por kg (promedio para todos los productos)

Estos resultados sugieren que el proyecto no solo recuperará la inversión inicial, sino que también generaría un valor significativamente superior al de una inversión alternativa con un rendimiento del 7.0%. Con una TIR del 16.6%, el proyecto supera cómodamente el costo de oportunidad del capital (Ver Figura 23).

Flujo de Caja Anual Proyectado

CONCEPTO	MONTO ANUAL (USD)
Ingresos Totales	\$400,000
(-) Costos Fijos	(\$36,000)
(-) Costos Variables (50% Ingresos)	(\$200,000)
(-) Gastos Administrativos (10%)	(\$23,600)
(-) Gastos por Imprevistos (5%)	(\$12,980)
Utilidad Bruta (UAI)	\$127,420
(-) Impuestos (30%)	(\$38,226)
Utilidad Neta (Flujo de Caja Anual)	\$89,194

Figura 23. Flujo de caja anual proyectado en la propuesta.

j. Supuestos clave para el análisis

Para realizar los cálculos, fue necesario establecer varios supuestos fundamentales, dado que no estaban detallados en la información provista. La validez de estos resultados depende directamente de la precisión de estos supuestos.

- **Inversión inicial (IO):** se asume una inversión inicial de \$500.000 para cubrir infraestructura, equipamiento, permisos y capital de trabajo inicial. Aunque se consideraron en la primera etapa una inversión de \$85.240 correspondientes al costo de las instalaciones en mar y costo del inventario inicial. Se asume para el cálculo una inversión inicial de 500 mil dólares, considerando una mayor cantidad de infraestructura del mar e incorporando un monto adicional por posibles inversiones que no fueron identificadas, esto asumiendo una posición conservadora al momento de determinar este rubro, para una prueba de sensibilidad.

- **Horizonte del proyecto:** se analiza un período de **10 años**.
- **Duración del ciclo productivo:** Se asume un **ciclo productivo por año** para simplificar el flujo de caja anual.
- **Costos variables:** se estiman en un **50% de los ingresos anuales**. Esto cubre alimentación, mano de obra variable, mantenimiento, etc.
- **Gastos por imprevistos:** se asigna una partida del **5% sobre el total de los costos** (fijos, variables y administrativos) para cubrir eventualidades.
- **Ingresos por turismo y macroalgas:** no se incluyen en el cálculo debido a la falta de datos. Su futura incorporación **mejoraría los resultados** del análisis.
- **Tasa de descuento (k):** se utiliza una tasa del **7.0%**, basada en la Tasa Básica Pasiva (TBP) del Banco Central de Costa Rica, que representa el costo de oportunidad del capital o el rendimiento mínimo aceptable.
- **Impuesto sobre la renta:** se aplica una tasa del **30%** sobre las utilidades, correspondiente al régimen corporativo general en Costa Rica.

Supuestos Clave: Inversión Inicial: \$500k | Horizonte: 10 años | Tasa de Descuento (k): 7.0%. Los ingresos de turismo y macroalgas no están incluidos y mejorarían estos resultados.

Figura 24. Información resumen relacionada a los supuestos claves utilizados en la propuesta.

k. Cálculo del Valor Actual Neto (VAN)

El VAN es un indicador que mide la rentabilidad de un proyecto en dólares de hoy (Ver Figura 25), descontando los flujos de caja futuros a una tasa de descuento (k). La fórmula es:

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_{Ct}}{(1+k)^t}$$

Donde:

- I_0 = Inversión Inicial
- F_{Ct} = Flujo de Caja en el año t
- k = Tasa de descuento
- t = Año del proyecto

Flujo de Caja Anual Proyectado		
CONCEPTO	MONTO ANUAL (USD)	CÁLCULO
Ingresos Totales	\$400,000	\$200,000 (Pepino) + \$200,000 (Ostras)
(-) Costos Fijos	(\$36,000)	\$3,000/mes * 12
(-) Costos Variables	(\$200,000)	50% de los Ingresos
(-) Gastos Administrativos	(\$23,600)	10% de (Costos Fijos + Variables)
(-) Gastos por Imprevistos	(\$12,980)	5% de (Costos Fijos + Var. + Admin.)
Utilidad Bruta (UAIL)	\$127,420	Ingresos - Todos los Costos
(-) Impuestos (30%)	(\$38,226)	30% de la Utilidad Bruta
Utilidad Neta (Flujo de Caja)	\$89,194	Utilidad Bruta - Impuestos

Figura 25. Flujo de caja anual proyectado.

Con un flujo de caja constante de **\$89,194** por año durante 10 años, una tasa de descuento del **7.0%** y una inversión de **\$500,000**, el VAN del proyecto es **\$175,799**. Un VAN positivo indica que el proyecto es rentable y genera valor por encima del rendimiento mínimo esperado.

Es de vital importancia considerar que estos resultados se basan en un escenario muy pesimista en el que se no se consideran ingresos por ventas de macroalgas y que se estima un beneficio por cultivo de \$200 mil, siendo que ese monto se puede llegar a incrementar hasta valores cercanos al \$1.000.000 de dólares con un incremento en el precio de venta por mejoras derivadas a mejoras en los procesos productivos.

Conclusión del VAN: Con un flujo de caja constante de \$89,194 por año durante 10 años, una tasa de descuento del 7.0% y una inversión de \$500,000, el VAN del proyecto es \$175,799. Un VAN positivo indica que el proyecto es rentable y genera valor por encima del rendimiento mínimo esperado.

Figura 26. Información resumen relacionada al valor del VAN utilizada en el proyecto.

A continuación, en la figura, se resumen los aspectos tomados en cuenta dentro del proyecto:

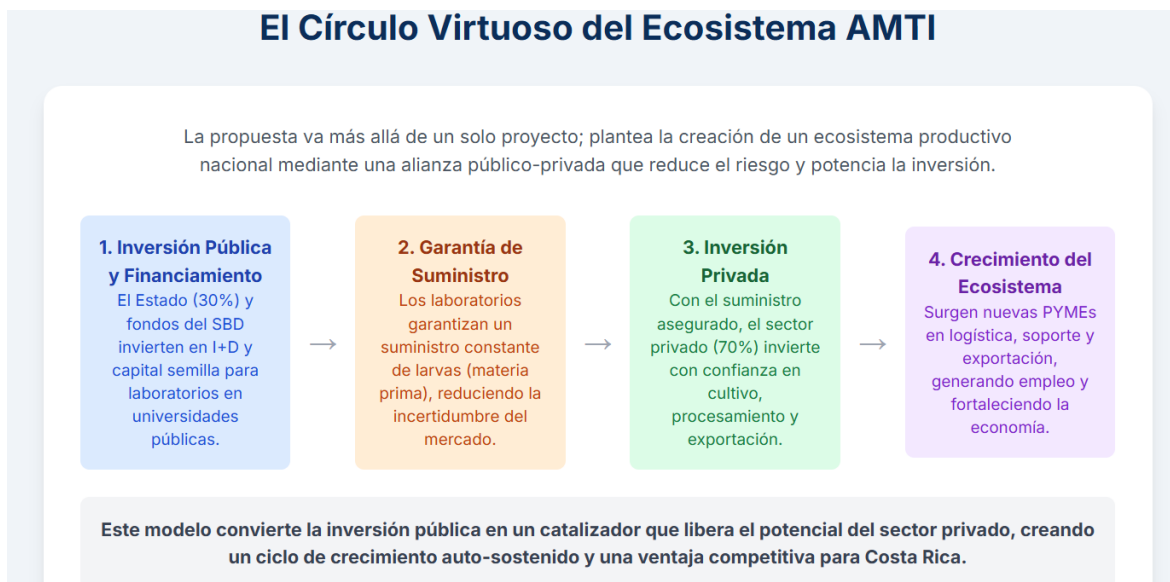


Figura 27. Resumen de aspectos tomados en cuenta dentro del proyecto.

I. Cálculo y análisis de la Tasa Interna de Retorno (TIR)

La Tasa Interna de Retorno (TIR) es la tasa de descuento que hace que el Valor Actual Neto (VAN) de los flujos de caja de un proyecto sea exactamente igual a cero. En esencia, representa la rentabilidad intrínseca y anualizada del proyecto (Ver Figura 28). Un proyecto se considera financieramente atractivo si su TIR es mayor que la tasa de descuento o costo del capital (WACC).

Fórmula de la TIR

$$0 = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + TIR)^t}$$

I₀
 Inversión inicial

FC_t
 Flujo de caja en periodo t

t y n
 Periodo y número total

Figura 28. Fórmula del TIR utilizada en análisis económicos.

- TIR en un escenario base

Para este proyecto, la TIR calculada es del **16.6%**.

Es crucial destacar que **este cálculo se basa en un escenario conservador**, utilizando un precio de **venta de \$17.65 por unidad** (pepino). Este precio se considera una base de referencia, similar a un valor de mercado a nivel de mayoreo. En un precio estimado realista es de \$89 el kilogramo, con lo que solo por vía de incremento en el pepino se logra aumentar el ingreso hasta los \$484,160 (Ver Figura 29).

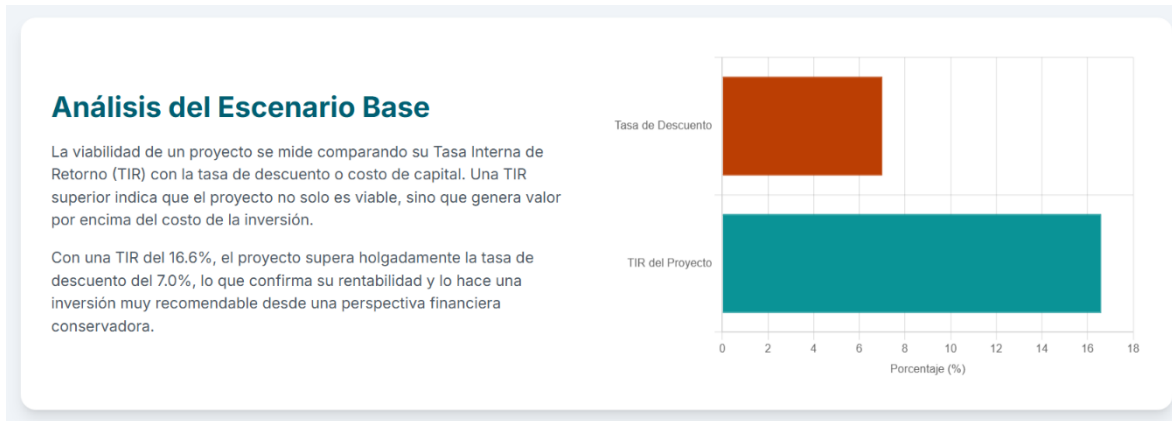


Figura 29. Resultados del TIR en un escenario base.

- Interpretación del escenario base:
 - **Criterio de aceptación:** Como **16.6% (TIR) > 7.0% (Tasa de Descuento)**, el proyecto es financieramente viable y muy recomendable, incluso bajo esta premisa **conservadora**.
 - **Rentabilidad:** el resultado significa que el proyecto no solo cubre su costo de capital, sino que genera un rendimiento anual promedio del 16.6% sobre los fondos invertidos que permanecen en el proyecto. Es un claro indicador de la eficiencia con la que la inversión genera ganancias. Esto sin considerar los beneficios económicos y sociales y los flujos proyectados de estos (Ver Figura 30).

Análisis de Rentabilidad y Viabilidad

Una visualización de los datos financieros clave y el potencial de impacto del proyecto.

Veredicto Financiero: Escenario Base

Incluso en el escenario más conservador, el proyecto demuestra una sólida viabilidad financiera.

16.6%

Tasa Interna de Retorno (TIR)

Figura 30. Análisis de rentabilidad y viabilidad del proyecto.

- m. **Análisis de sensibilidad y potencial real del proyecto:** la rentabilidad del proyecto es altamente sensible al precio de venta final del producto. El análisis no estaría completo sin valorar escenarios más optimistas y realistas, basados en la calidad del producto y el acceso a mejores mercados.
- **Precios de mercado:** investigaciones previas del mercado indican que el producto se vende en diferentes categorías, con precios que parten desde un límite inferior de \$20.00. Un ajuste del precio de venta a este nivel ya implicaría un aumento significativo de la TIR.
 - **Potencial con inversión estratégica:** si se concretan las inversiones propuestas, especialmente las que cuentan con apoyo estatal para mejorar la producción, la logística y el acceso a mercados, el producto podría posicionarse en segmentos premium. En dichos mercados, no es irrazonable proyectar precios de venta que podrían alcanzar hasta los \$100.00 por unidad. Un precio en este rango transformaría radicalmente la rentabilidad, disparando la TIR a niveles excepcionalmente altos (Ver Figura 31).

El Potencial Oculto: Sensibilidad al Precio

La rentabilidad del proyecto es extremadamente sensible al precio de venta final. El escenario base del 16.6% es solo el punto de partida. A medida que el producto accede a mejores mercados y precios, la rentabilidad se dispara, revelando el verdadero potencial de la inversión.

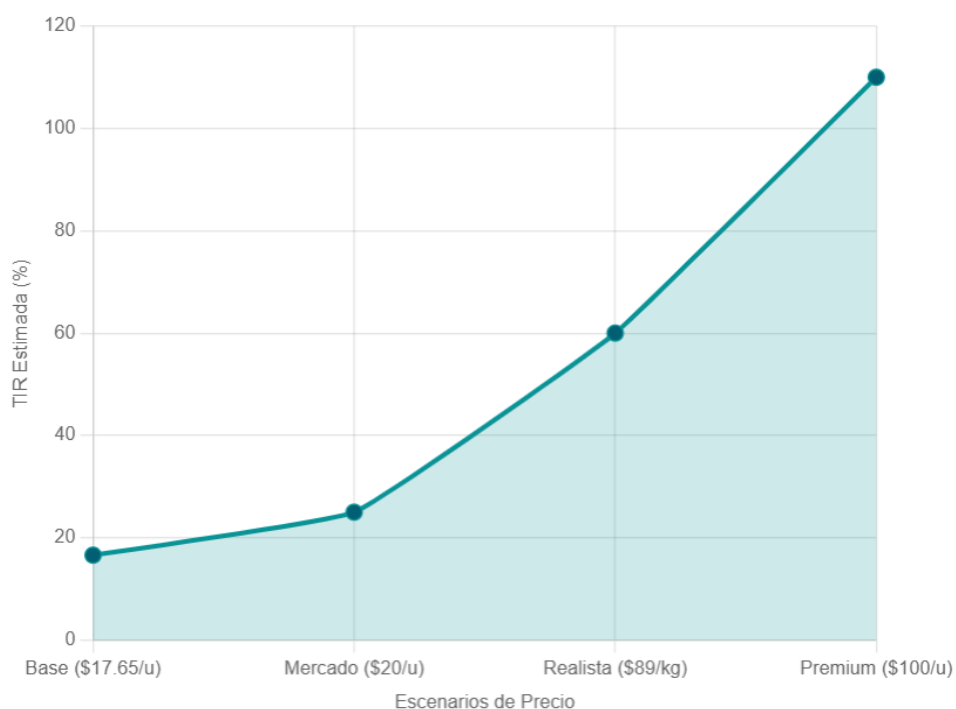


Figura 31. Variabilidad porcentual del TIR de acuerdo con diferentes escenarios de precio (USD).

- n. **El Valor Social del Retorno (SROI):** finalmente, es fundamental subrayar que un análisis puramente financiero como la TIR es insuficiente para capturar el valor total del proyecto. Aunque el Retorno Social de la Inversión (SROI) es más complejo de cuantificar en una sola tasa, su valor es inmenso y, en este caso, superior al retorno financiero. Aspectos como la creación de empleo local, la mejora de la infraestructura comunitaria y el fortalecimiento de la economía regional son beneficios clave que validan la inversión más allá de los números (Ver Figura 32).



Figura 32. Impacto social del proyecto propuesto.

En resumen, la TIR del 16.6% debe considerarse como el suelo de la rentabilidad del proyecto. El verdadero potencial, que es considerablemente mayor, se revela al analizar la sensibilidad del precio y, sobre todo, al integrar el invaluable retorno social que esta inversión generará.

- o. **Determinación del precio unitario de equilibrio:** el precio de equilibrio es el precio mínimo al que se debe vender cada unidad (en este caso, cada kg de producto) para cubrir todos los costos operativos y financieros, sin generar ni ganancias ni pérdidas.

Cálculo:

- **Costos totales anuales:**
 - o Suma de todos los costos (fijos, variables, admin, imprevistos) = **\$272,580**
- **Producción total anual:**
 - o 5,440 kg (Pepino de Mar) + 10,000 kg (Ostras) = **15,440 kg**
- **Precio de equilibrio por kg:** \$17.65/kg

Este precio promedio de **\$17.65 por kilogramo** es el punto de referencia crucial. Cualquier precio de venta superior a este valor contribuirá directamente a la utilidad del proyecto. Además, al compararlo con los precios de los mercados se encuentra por ejemplo que ese precio se encuentra cerca del límite inferior del pago que se realiza por el pepino de mar en su categoría más baja (Ver Figura 33).

Conclusión: Un Proyecto Robusto y Rentable

La combinación de costos fijos diluidos a través de la colaboración, un potencial de producción significativo y sólidos indicadores financieros (VAN y TIR positivos) sientan las bases para un modelo de negocio resiliente y altamente rentable. La asociatividad es la clave para maximizar tanto el impacto ambiental como el retorno de la inversión.

Figura 33. Resumen de la conclusión del proyecto propuesto.

El análisis confirma que el desarrollo de la maricultura de pepinos de mar y macroalgas es una iniciativa rentable y de alto impacto, cuyo potencial se maximiza bajo un modelo de clúster o "ecosistema productivo". Para catalizar este ecosistema, se propone una robusta arquitectura financiera y de política pública que articula al sector público y privado, reduce riesgos y garantiza un suministro constante, como se detalla a continuación.

- p. **Arquitectura financiera y mecanismos de inversión:** para superar las barreras de financiamiento, especialmente en las etapas de investigación y arranque, se propone un modelo de financiamiento multifuente canalizado principalmente a través de la banca privada, pero nutrido por fondos estratégicos del Estado (Ver Figura 34).

1. Arquitectura Financiera y de Inversión

Para superar las barreras de financiamiento inicial, se propone un modelo de inversión público-privado que articula capital del Estado con la banca privada para crear un ecosistema de riesgo compartido y alta rentabilidad.

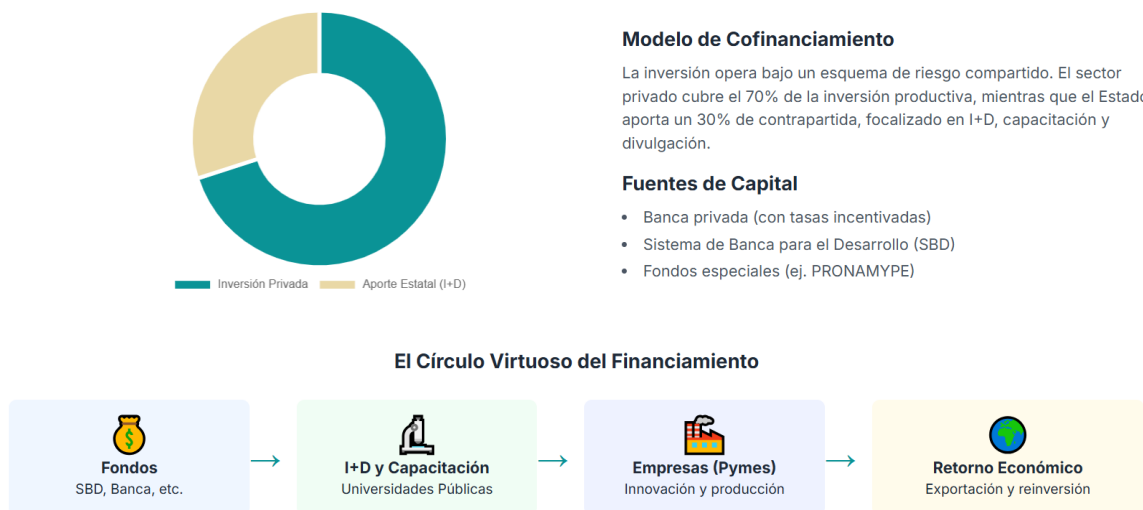


Figura 34. Explicación de la arquitectura financiera y de inversión.

- **Fuentes de capital semilla y de desarrollo:** el financiamiento provendrá de un conjunto de fuentes que incluyen:

- o Recursos propios de las entidades financieras reguladas, incentivadas a participar con tasas de interés diferenciadas.
- o Fondos del Sistema de Banca para el Desarrollo (SBD), diseñados para apoyar a las pymes y proyectos con impacto social y ambiental.
- o Fondos especiales como PRONAMYPE, enfocados en el fortalecimiento de la micro y pequeña empresa.
- **Modelo de cofinanciamiento público-privado:** la inversión operará bajo un esquema de riesgo compartido. Se propone que el sector privado cubra el 70% de la inversión en proyectos productivos, mientras que el Estado aportará un 30% de contrapartida, focalizado en Investigación y Desarrollo (I+D) y la divulgación (entrenamiento y capacitación). Este modelo se apoya en el Régimen Especial para el Ecosistema del Mar, que ofrecería beneficios fiscales a las empresas participantes, haciendo más atractiva la inversión privada.
- **El Círculo virtuoso del financiamiento:** este esquema crea un ciclo de reinversión sostenible. Los fondos, como los del SBD, pueden ser canalizados para financiar no solo la infraestructura (laboratorios), sino también proyectos de investigación aplicada en las universidades públicas. Los resultados de esta investigación (innovaciones, protocolos, patentes) y la capacitación de personal (por ejemplo, en logística de puerta a puerta y cumplimiento de normativas) se transfieren directamente a las empresas del ecosistema, especialmente a pymes con potencial exportador. Esto genera un retorno económico y social que fortalece a todo el sistema, justificando la inversión inicial.
- q. **El rol estratégico de la I+D: garantizando el suministro para reducir el riesgo:** la mayor barrera para la inversión privada es la incertidumbre en el suministro de materia prima (larvas y semillas). La propuesta ataca este problema de raíz mediante una inversión estratégica en laboratorios universitarios. Se puede tomar como referencia el proyecto de la UCR y gobierno de Korea (Ver Figura 34).

2. El Rol Estratégico de la I+D

La principal barrera para la inversión es la incertidumbre en el suministro. La propuesta ataca este riesgo de raíz, garantizando la producción continua de larvas y semillas a través de laboratorios universitarios financiados estratégicamente.

Figura 35. Resumen del rol estratégico I+D.

- **Laboratorios de producción continua:** se plantea que el SBD y otras fuentes, como fondos de tasa cero o no reembolsables, financien directamente la infraestructura y operación de los laboratorios de larvas y semillas en las universidades públicas. Esto permite al sector privado beneficiarse del uso de instalaciones de alto costo sin asumir la inversión inicial.
- **Sincronización de ciclos y climáticos:** Este modelo permite una planificación productiva sin precedentes:
 - **Ciclo de laboratorio:** la fase de cultivo en laboratorio dura aproximadamente **dos semanas**.
 - **Ciclo de mar:** el cultivo en el mar para el pepino de mar, por ejemplo, requiere **12 meses**.
 - **Producción anual:** un laboratorio operando continuamente puede generar hasta **26 ciclos de producción de larvas al año**.
- **Planificación nacional por microclimas:** esta capacidad de producción se puede armonizar con los microclimas de Costa Rica para asegurar un flujo constante de actividad económica en las costas. Por ejemplo:
 0. **Región Chorotega (enero-mayo):** el laboratorio suministra larvas a un ciclo de hasta 8 comunidades costeras (una cada 2 semanas). Inicia su periodo de crecimiento de 12 meses.
 1. **Región Brunca y Huetar (meses siguientes):** El laboratorio continúa su producción, abasteciendo a las comunidades de estas regiones para que inicien sus propios ciclos de cultivo.
 2. **Puntos de reorden:** se establece un calendario nacional para garantizar que, una vez que una región cosecha, ya está lista para recibir la siguiente siembra del laboratorio.
- **Reducción de incertidumbre:** al garantizar el suministro de materia prima de alta calidad y de forma planificada, se elimina uno de los mayores riesgos para el sector privado. Con un abastecimiento seguro, las empresas pueden asumir con mayor confianza las inversiones necesarias en otros eslabones de la cadena, como la industrialización, la logística y la apertura de mercados internacionales (Ver Figura 36).



Figura 36. Planificación de la producción de acuerdo con los microclimas de Costa Rica.

La propuesta presenta un proyecto financieramente robusto, con un VAN de \$175,799 y una TIR del 16.6%. Más allá de su rentabilidad, su verdadera fortaleza radica en la creación de un ecosistema resiliente. Al integrar una arquitectura financiera detallada, que articula fondos del SBD con la banca privada y un modelo de cofinanciamiento 70/30, se cataliza la inversión privada. La inversión pública estratégica en los laboratorios universitarios no es un subsidio, sino una herramienta para eliminar la incertidumbre del suministro, permitiendo una planificación productiva a nivel nacional sincronizada con los microclimas del país. Esta garantía de materia prima habilita al sector privado a enfocarse en la innovación y el mercado, transformando las costas de Costa Rica en un motor de desarrollo sostenible, inclusivo y de alto valor (Ver Figura 36).



Figura 37. Esquema del círculo virtuoso del IMTA.

5. Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

Costa Rica se encuentra en un momento decisivo para definir su rol en el panorama regional e internacional de la maricultura sostenible. A través del presente análisis, se constata que el país posee condiciones ecológicas, capacidades técnicas iniciales y un entorno institucional que, si bien aún presenta vacíos, permite avanzar hacia la construcción de un modelo de maricultura basado en especies nativas, prácticas regenerativas y encadenamientos territoriales.

Una de las fortalezas más significativas identificadas en este proceso es que la maricultura ya no es una idea emergente, sino una realidad en construcción. La existencia de investigaciones pioneras en pepinos de mar y macroalgas, desarrolladas por instituciones académicas, demuestra que se está generando conocimiento aplicado que puede sostener decisiones estratégicas a corto, mediano y largo plazo.

Asimismo, el documento confirma que Costa Rica tiene un capital humano en crecimiento, compuesto por investigadores, extensionistas, estudiantes y técnicos vinculados a la biología marina, acuicultura, biotecnología y sostenibilidad. Este talento local representa una oportunidad clave para desarrollar sistemas productivos adaptados a las realidades ecológicas y socioculturales del país, especialmente en regiones costeras marginadas por los modelos económicos tradicionales.

Desde una perspectiva económica, el cultivo de pepinos de mar y macroalgas en Costa Rica es viable y presenta un alto potencial de rentabilidad, siempre que se cuente con condiciones habilitantes adecuadas y una planificación técnica rigurosa. Los datos analizados en este informe muestran que ambos portafolios productivos tienen una sólida demanda internacional, precios competitivos en el mercado global, y aportes adicionales en términos ecológicos que pueden traducirse en valor agregado comercial (por ejemplo, trazabilidad, servicios ecosistémicos o carbono azul).

Continuando con el aspecto económico, en particular, especies como *Isostichopus fuscus* o *Gracilaria* spp. ya han demostrado retornos positivos en países latinoamericanos con condiciones similares, lo cual indica que Costa Rica puede replicar o incluso mejorar estos resultados, especialmente si se enfoca en nichos premium, marcas país diferenciadas y encadenamientos productivos locales. La inclusión de modelos comunitarios, cooperativos o familiares también permitirían reducir costos fijos, distribuir los ingresos y generar impacto social tangible.

Sin embargo, a pesar de estos avances, persisten desafíos estructurales que amenazan con ralentizar el desarrollo de la maricultura si no se abordan con urgencia y visión sistémica. Entre ellos, se destacan:

- La fragmentación normativa y la falta de una gobernanza sectorial articulada. Actualmente, los trámites para iniciar proyectos de maricultura involucran múltiples instituciones (INCOPECA, SINAC, MINAE, SETENA, SENASA, entre otras), lo cual genera sobrecarga burocrática, duplicidad de requisitos, tiempos de espera prolongados y falta de claridad en los procedimientos.
- Uno de los desafíos estructurales más relevantes para el desarrollo de la maricultura en Costa Rica es la falta de instrumentos financieros diseñados específicamente para esta actividad productiva. Aunque el país dispone de opciones de financiamiento a través del Sistema de Banca para el Desarrollo (SBD), banca estatal, fondos de cooperación y programas públicos, la mayoría de estas líneas no consideran las particularidades técnicas, biológicas y productivas del cultivo de especies marinas nativas, como los largos ciclos de engorde, el riesgo ambiental, la necesidad de infraestructura especializada o los tiempos regulatorios prolongados.

Continuando con esta misma idea, esta situación genera una desconexión entre la oferta de capital y la demanda real del sector, lo cual limita el acceso a crédito, encarece las inversiones iniciales y frena el escalamiento de proyectos con alto potencial. Sin embargo, es importante señalar que existe disposición institucional para financiar iniciativas viables, especialmente si están bien estructuradas, cuentan con acompañamiento técnico y tienen respaldo del Estado. Por tanto, se vuelve imprescindible que las entidades financieras públicas y privadas, en articulación con instituciones sectoriales como INCOPECA, MAG y PROCOMER, desarrollen productos financieros acuícolas adaptados, como líneas de crédito flexibles, fondos semilla, seguros climáticos o esquemas de garantía compartida.

- La insuficiente articulación entre ciencia, política pública y mercado. Aunque se han generado avances técnicos relevantes, estos no siempre logran traducirse en políticas sectoriales, regulaciones ágiles o productos exportables con valor agregado. La desconexión entre estos tres pilares debilita la sostenibilidad a largo plazo de la maricultura como política de Estado.

Frente a este panorama, es urgente construir una visión país que integre a actores públicos, privados, comunitarios y académicos bajo un marco de colaboración continua, transparencia y propósito común. La experiencia

internacional demuestra que los países que han logrado desarrollar maricultura a gran escala y con éxito como, Chile, México, Ecuador o China, lo han hecho gracias a una sinergia institucional fuerte, acompañada de inversión sostenida en I+D, marcos regulatorios inteligentes y plataformas público-privadas de gobernanza.

En este sentido, Costa Rica no necesita empezar de cero con la exploración de nuevos organismos para la maricultura. Puede acortar su curva de aprendizaje mediante alianzas estratégicas con países latinoamericanos que ya han recorrido este camino. La cooperación Sur-Sur, los programas de transferencia tecnológica, las redes regionales de investigación y las alianzas entre universidades e industrias son instrumentos claves para ahorrar años de ensayo y error. De forma particular, países como México y Ecuador han desarrollado protocolos avanzados para el cultivo de *Isostichopus fuscus*; Chile ha logrado escalar con éxito el cultivo de macroalgas como *Gracilaria chilensis* y Brasil está consolidando técnicas de biotecnología marina para procesamiento de algas. Costa Rica puede aprender de estos modelos y adaptarlos a sus condiciones tropicales, con visión de soberanía científica y enfoque bioético.

Además, la maricultura puede integrarse de manera natural con los valores ambientales que Costa Rica ya proyecta internacionalmente. Su liderazgo en certificaciones ambientales y comercio ético le permite diferenciar sus productos marinos como bienes con trazabilidad ecológica, bajo impacto ambiental y contribución directa a los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Esto no solo representa una ventaja comercial, sino también una oportunidad para canalizar fondos de cooperación, atraer inversión de impacto y posicionarse como un país pionero en economía azul.

Como último aspecto debe subrayarse que la maricultura de cualquier especie no es una actividad de corto plazo: es una estrategia de país que debe proyectarse a largo plazo, con políticas de Estado, inversión progresiva y planificación territorial inclusiva. No obstante, el punto de partida ya existe: hay especies viables, capacidades humanas activas, redes de colaboración y una urgencia productiva, ecológica y social que exige nuevas respuestas. Acelerar este proceso depende, en gran parte, de la capacidad del país para coordinar esfuerzos, crear marcos habilitantes y articular saberes diversos en función de un objetivo común: construir una maricultura costarricense sostenible, equitativa y resiliente.

Recomendaciones

Ahora dentro de las recomendaciones se pueden indicar las siguientes:

1. Consolidar un portafolio nacional de especies nativas cultivables. Se recomienda priorizar el desarrollo biotecnológico y comercial de especies costarricenses que ya han sido identificadas como viables, tanto por su valor ecológico como por su demanda internacional. Este portafolio debería nutrirse de investigaciones aplicadas, experimentación en campo y validación de modelos productivos en zonas piloto del país.
2. Articular la maricultura con políticas nacionales de conservación, carbono azul y sostenibilidad.
3. El cultivo de pepinos de mar y macroalgas debe promoverse no solo como una alternativa de ingreso económico, sino como una estrategia de conservación activa. La integración con mecanismos como las certificaciones ambientales podría aumentar el valor agregado del producto nacional, facilitar el acceso a mercados premium y atraer fondos verdes o de impacto social.
4. Desarrollar una Ventanilla Única de Maricultura. Para destrabar la actual tramitología y permitir el escalamiento productivo, se debe crear un sistema digital interinstitucional que concentre los procesos ante INCOPECA, SINAC, SETENA, SENASA y otras entidades clave. Este sistema debe ser transparente, con trazabilidad en línea, y contemplar protocolos diferenciados para proyectos comunitarios, académicos y comerciales.
5. Establecer un fondo nacional para la maricultura en el que actores claves tanto académicos, comunitarios o institucionales tengan acceso. Proponemos la creación de un fondo especializado, alimentado con recursos del Sistema de Banca para el Desarrollo, cooperación internacional y alianzas público-privadas, destinado a financiar investigación aplicada, infraestructura, industrialización y encadenamientos productivos. Este fondo debería priorizar proyectos en zonas costeras con alto índice de pobreza o vulnerabilidad climática.
6. Impulsar polos territoriales de maricultura y centros logísticos regionales. Se sugiere desarrollar tres polos piloto (Pacífico norte, central y sur) que articulen iniciativas productivas con centros de acopio, laboratorios, plantas de secado o procesamiento, y redes logísticas. Esto permitirá reducir costos, fomentar economías de escala y crear ecosistemas de innovación acuícola regional.
7. Fomentar incubadoras y cooperativas de base comunitaria especializadas en este tipo de proyecto de maricultura. Las universidades, ONGs y gobiernos locales pueden liderar procesos de formación, asistencia técnica y desarrollo de modelos asociativos que integren a mujeres, jóvenes, pescadores artesanales y poblaciones costeras en esquemas de

producción sostenible, con enfoque de economía circular y equidad territorial.

8. Promover alianzas internacionales con países líderes en maricultura. Costa Rica debe buscar activamente acuerdos de cooperación con naciones latinoamericanas con experiencia consolidada en maricultura de pepinos de mar y macroalgas. Estas alianzas pueden incluir transferencia tecnológica, validación conjunta de especies, pasantías técnicas y codiseño de modelos comerciales sostenibles.
9. Desarrollar un sistema nacional de certificaciones acuícolas sostenibles. Se recomienda trabajar en conjunto con instituciones como PROCOMER, MAG, MINAE y MICITT para diseñar una certificación nacional que garantice prácticas productivas sostenibles, bioseguridad, trazabilidad, bienestar animal y valor ecológico. Este sello permitiría diferenciar los productos costarricenses en mercados globales.
10. Crear un Observatorio Nacional de Maricultura que apoye al INCOPESCA. Se sugiere la creación de un ente técnico/académico multisectorial que recopile, analice y divulgue información científica, económica y social sobre la evolución del sector maricultura. El observatorio puede generar reportes anuales, identificar brechas de conocimiento, apoyar la toma de decisiones y servir como plataforma de diálogo entre actores públicos, privados y comunitarios.
11. A partir del análisis de capacidades instaladas, factores de factibilidad y encadenamientos productivos, se recomienda adoptar un enfoque de clúster acuícola costero, bajo el concepto de *Ecosistema del Mar Sostenible*. Este modelo plantea la articulación territorial de productores, centros de acopio, investigación aplicada, financiamiento especializado, servicios logísticos y plataformas de comercialización, con base en principios de sostenibilidad, regeneración ecológica y equidad social.

Su implementación permitiría maximizar el valor agregado, fomentar economías de escala, reducir costos de transacción y fortalecer la competitividad internacional de los productos marinos costarricenses. Además, este enfoque facilita el diseño de políticas públicas focalizadas, incentivos diferenciados y mecanismos de gobernanza participativa, contribuyendo al posicionamiento de Costa Rica como referente regional en maricultura regenerativa.

6. Bibliografía

- Acosta, E. J., Rodríguez-Forero, A., Werding, B., & Kunzmann, A. (2021). Effect of density, temperature and diet on the growth, survival and development of larvae and juveniles of *Isostichopus* sp. *Aquaculture Research*, 52(2), 611-624. <https://doi.org/10.1111/are.14918>
- Agudelo-Martínez, V., Vergara Hernández, W., Villazón Turizo, M., Pabón Caro, L., & Rodríguez Forero, A. (2016). *Manual para el cultivo y procesamiento de pepino de mar*. Universidad del Magdalena.
- Akamine, J. (2024). The McDonaldization of the sea cucumber: Changes in foodways of an ancient delicacy in Northeastern Asia. En A. Mercier, J.-F. Hamel, A. Suhrbier, & C. Pearce (Eds.), *The world of sea cucumbers* (pp. 51-63). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95377-1.00013-8>
- Alemañ, A. E., Robledo, D., & Hayashi, L. (2019). Development of seaweed cultivation in Latin America: current trends and future prospects. *Phycologia*, 58(5), 462-471.
- Alvarado, J. J., Chacón-Monge, J. L., Azofeifa-Solano, J. C., & Cortés, J. (2022). Diversity of Deep-Sea Echinoderms from Costa Rica. *Frontiers in Marine Science*, 9, 918878. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.918878>
- Arantzamendi, L., Andrés, M., Basurko, O. C., & Suárez, M. J. (2023). Circular and lower impact mussel and seaweed aquaculture by a shift towards bio-based ropes. *Reviews in Aquaculture*, 15(3), 1010-1019. <https://doi.org/10.1111/raq.12816>
- Ask, E. I., & Azanza, R. V. (2002). Advances in cultivation technology of commercial eucheumatoid species: A review. *Aquaculture*, 206(3-4), 257-277.
- Aung, T., Abdul Razak, R., & Md Nor, A. R. B. (2024). Artificial intelligence methods used in various aquaculture applications: A systematic literature review. *Journal of the World Aquaculture Society*, 56(1), e13107. <https://doi.org/10.1111/jwas.13107>
- Banik, U., et al. (2023). Comparative performance of three culture systems for *Gracilaria* sp. in Bangladesh. *Aquaculture*, 574, 739675. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.739675>
- Barclay, K., Fabinyi, M., Kinch, J., & Foale, S. (2019). Governability of high-value fisheries in low-income contexts: a case study of the sea cucumber fishery in Papua New Guinea. *Human Ecology*, 47(3), 381-396. <https://doi.org/10.1007/s10745-019-00078-8>

Balar, N., Depani, P., Baraiya, M., Jaiswar, S., Rathore, M. S., Singh, V., & Mantri, V. A. (2025). Scaled-up clonal propagule production in *Gracilaria dura* (Rhodophyta) for sustainable feedstock production and implications for circular economy. *Aquaculture International*, 33, 20.

Battaglione, S., Seymour, J., Ramofafia, C., & Lane, I. (2002). Spawning induction of three tropical sea cucumbers, *Holothuria scabra*, *H. fuscogilva* and *Actinopyga mauritiana*. *Aquaculture*, 207, 29-47. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(01\)00725-6](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(01)00725-6)

Besoña, J. F., et al. (2024). Bioremediation efficiency of *Holothuria scabra* on water and sediment quality. *International Journal of Aquatic Biology*, 12(1), 57-67.

Bhatt, N., Al-Subhi, L., & Waly, M. (2022). Seaweeds as functional food: A comprehensive review of its antioxidants and therapeutic merits. In A. R. Rao & G. A. Ravishankar (Eds.), *Sustainable Global Resources of Seaweeds Volume 2* (pp. 77-92). Springer.

Billi, M., Mascareño, A., Henríquez, P. A., Rodríguez, I., Padilla, F., & Ruz, G. A. (2022). Learning from crises? The long and winding road of the salmon industry in Chiloé Island, Chile. *Marine Policy*, 140, 105069.

Blikra, M. J., Altintzoglou, T., Løvdal, T., et al. (2021). Seaweed products for the future: Using current tools to develop a sustainable food industry. *Trends in Food Science & Technology*, 118, 765-776.

Bordbar, S., Anwar, F., & Saari, N. (2011). High-value components and bioactives from sea cucumbers for functional foods: A review. *Marine Drugs*, 9(10), 1761-1805. <https://doi.org/10.3390/md9101761>

Buschmann, A. H., Camus, C., Infante, J., Neori, A., Israel, Á., Hernández-González, M. C., ... & 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.

Cai, J., et al. (2021). Seaweeds and microalgae: An overview for unlocking their potential in global aquaculture development. *FAO Fisheries and Aquaculture Circular* No. 1229. <https://doi.org/10.4060/cb5670en>

Calleja, F., Chacón Guzmán, J., & Alfaro Chavarría, H. (2022). Marine aquaculture in the Pacific coast of Costa Rica: Identifying the optimum areas for a sustainable development. *Ocean and Coastal Management*, 219, 106033. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2022.106033>

Calvo, E. (2024). Evaluación técnica del cultivo de juveniles de *Cynoscion albus* en condiciones de baja salinidad como alternativa de diversificación para el sector camaronero en Costa Rica [Tesis de licenciatura no publicada, Universidad Nacional].

Carvajal, M. M. (2025). *Contribución al conocimiento del pepino de mar en cautiverio en el Pacífico costarricense*. Universidad Nacional, Costa Rica.

Cerca, M., Menchaca, I., O'Connor, I., & Creed, J. C. (2024). Coastal infrastructure and supply hubs for sustainable seaweed production in Ireland. *Marine Policy*, 163, 106140. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2024.106140>

Chacón-Guzmán, J., Carvajal-Oses, M., & Herrera-Ulloa, A. (2021). Optimización del cultivo larvario para la producción de juveniles del pargo manchado (*Lutjanus guttatus*) en Costa Rica. *Uniciencia*, 35(2), 1-17. <https://doi.org/10.15359/ru.35-2.2>

Chacón-Monge, J., Azofeifa-Solano, J. C Alvarado, J. J., L. & Cortés, J. (2021). Área de Conservación Guanacaste Echinoderms, North Pacific of Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 69(S1), 487-500. <https://doi.org/10.15517/rbt.v69iSuppl.1.46391>

Chang, Y., Yu, Z., Song, X., Mu, Y., & Sun, J. (2004). Studies on ranching techniques of sea cucumber, *Apostichopus japonicus*. *Marine Sciences*, 28(10), 21-25.

Charrier, B., Le Bail, A., & de Reviers, B. (2017). Furthering knowledge of seaweed growth and development to facilitate sustainable aquaculture. *New Phytologist*, 216(4), 967-975. <https://doi.org/10.1111/nph.14728>

Chen, S., Ye, Z., Jin, R., Zhu, J., Wang, N., Zheng, Y., He, J., & Wu, J. (2025). High-precision remote sensing monitoring of extent, species, and production of cultured seaweed for Korean Peninsula. *Remote Sensing*, 17, 1150.

Cheng, C., Wu, F., Ren, C., Jiang, X., Zhang, X., Xiaomin, L., Luo, P., Hu, C., & Chen, T. (2021). Aquaculture of the tropical sea cucumber, *Stichopus monotuberculatus*: Induced spawning, detailed records of gonadal and embryonic development, and improvements in larval breeding by digestive enzyme supply in diet. *Aquaculture*, 540, 736690..

Ciriminna, L., Signa, G., Cilluffo, G., Rakaj, A., & Vizzini, S. (2024). Aquaculture of emerging species in North-Eastern Atlantic and Mediterranean Sea: A systematic review on sea cucumber farming and potential development. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1381836. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1381836>

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2024). *Balance preliminar de las economías de América Latina y el Caribe 2024*. Naciones Unidas. <https://www.cepal.org/es/publicaciones>

Conand, C. (2017). Tropical sea cucumber fisheries: Changes during the last decade. *Marine Pollution Bulletin*, 118(1-2), 311-318.

Conand, C. (2018). Tropical sea cucumber fisheries: Changes during the last decade. *Marine Pollution Bulletin*, 133, 590-594. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.05.014>

CONAPESCA (2021). *Anuario Estadístico de Acuacultura y Pesca*. (Cifras producción camarón y ostión México). CONAPESCA.

Cotas, J., Pacheco, D., Silva, J. W. A., et al. (2020). Food applications and health benefits of the genus *Gigartina* (Rhodophyta). In A. R. Rao & G. A. Ravishankar (Eds.), *Sustainable Global Resources of Seaweeds*, 2,135-144.

Cutajar, K., Falconer, L., Massa-Gallucci, A., Cox, R., Schenke, L., Bardócz, T., Sharman, A., Deguara, S., & Telfer, T. (2022). Culturing the sea cucumber *Holothuria poli* in open water integrated multi-trophic aquaculture at a coastal Mediterranean fish farm. *Aquaculture*, 550 (15),737881.

David, F., Hubas, C., Laguerre, H., Badou, A., Herault, G., & Bordelet, T. et al. (2020). Food sources, digestive efficiency, and resource allocation in the sea cucumber *Holothuria forskali* (Echinodermata: Holothuroidea): Insights from pigments and fatty acids. *Aquaculture Nutrition*, 26(5), 1568-1583. <https://doi.org/10.1111/anu.13103>

Deauna, R. P., Ingles, J. A., Fernandez, R. H. B., Conales, S. M., Deocareza, M. A. M., Yambao, A. C., & Garces, L. R. (2021). Identification of priority sites to support management of commercially important sea cucumber species *Holothuria scabra* and *Stichopus horrens* in the Philippines. *Ocean & Coastal Management*, 210, 105680.

Dirección de Aguas. (2023). *Procedimiento para concesión de aguas superficiales*. <https://www.da.go.cr>

Dolganov, S., Rogachev, V., & Medvedev, V. (2024). A plant and method of cultivation for sea cucumber *Apostichopus japonicus* (Selenka, 1867). *Izvestiya TINRO*, 204 (2), 444-464.

Du, Y., Xu, J., Zhou, L., Chen, F., Qiu, T., & Sun, J. (2021). Retrofitting sea cucumber nursery tanks to recirculating aquaculture systems for highly intensive *Litopenaeus vannamei* aquaculture. *Applied Sciences*, 11(20), 9478.

FAO. (2021). Seaweeds and microalgae: An overview for unlocking their potential in global aquaculture development. FAO Circular 1229. <https://doi.org/10.4060/cb5670en>

FAO FishStat (2022). *Global Aquaculture Production Dataset*. FAO Fisheries Division.

FAO. (2023). Aquaculture development trends in Latin America and the Caribbean. FAO Fisheries and Aquaculture Circular. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Félix, P. M., Sousa, P., Lima, F. P., Pires, A., Queiroz, N., & Fonseca, V. F. (2024). Modelling the habitat preferences of the NE-Atlantic Sea cucumber *Holothuria forskali* using Generalised Additive Models. *Marine Environmental Research*, 197, 106126.

Feng, Q., Ru, X., Zhang, L., Zhang, S., & Yang, H. (2022). Differences in feeding behavior and intestinal microbiota may relate to different growth rates of sea cucumbers (*Apostichopus japonicus*). *Aquaculture*, 559 (15), 738368. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738368>

Hossain, M. S., Sharifuzzaman, S. M., Nobil, M. N., Chowdhury, M. S. N., Sarker, S., Alamgir, M., Uddin, S. A., Chowdhury, S. R., Rahman, M. M., Rahman, M. S., Sobhan, F., & Chowdhury, S. (2021). Seaweeds farming for sustainable development goals and blue economy in Bangladesh. *Marine Policy*, 128, 104469. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2021.104469>

Fernández-García, C., Salas-Moya, C., Mena, S., Azofeifa-Solano, J. C., & Alvarado, J. J. (2021). Diversidad de los hábitats submareales de la Península de Santa Elena e Islas Murciélagos, Pacífico Norte, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 69(Suppl. 2), S160–S179.

Fisher, J., et al. (2023). Ecological carrying capacity in mariculture: Consideration and application. *Marine Policy*, 150, 105516. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2023.105516>

Freshwater, D. W., Idol, J. N., Parham, S. L., Fernández-García, C., León, N., Gabrielson, P. W., & Wysor, B. (2017). Molecular assisted identification reveals hidden red algae diversity from the Burica Peninsula, Pacific Panama. *Diversity*, 9(2), 19. <https://doi.org/10.3390/d9020019>

Gamboa-Álvarez, M. Á., Poot-Salazar, A. V., Aguilar-Perera, A., Rojas-González, R. I., & Ruiz-Pineda, C. (2023). Sea cucumber catch reconstruction and species composition as determined by seizures analyses from the IUU fishing in the Campeche Bank, Mexico. *Marine Policy*, 147, 105291.

Gangadaran, S., & Cheema, S. (2017). A high fat diet enriched with sea cucumber gut powder provides cardio-protective and anti-obesity effects in C57BL/6 mice. *Food research international*, 99, 1, 799-806 .
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.06.066>.

García-Poza, S., Cotas, J., Morais, T., et al. (2022). Global trade of seaweed foods. In A. R. Rao & G. A. Ravishankar (Eds.), *Sustainable Global Resources of Seaweeds Volume 2* (pp. 325–337). Springer.

Giangrande, A., Mutlu, E., Licciano, M., & Castriota, L. (2020). An innovative IMTA system involving polychaetes, sponges and sea cucumbers: Potential for sustainable aquaculture in coastal ecosystems. *Aquaculture*, 526, 735393.

Giraspy, D. A. B., & Ivy, G. (2008). The influence of commercial diets on growth and survival in the commercially important sea cucumber *Holothuria scabra* var. *versicolor* (Conand, 1986) (Echinodermata: Holothuroidea). *SPC Beche-de-mer Information Bulletin*, 28, 46–52.

Guo, S., et al. (2025). Integrating photovoltaic with sea cucumber aquaculture. *Aquaculture Reports*, 41, 102686.

Guzmán, H. M., Guevara, C. A., & Hernández, I. C. (2003). Reproductive cycle of two commercial species of sea cucumber (Echinodermata: Holothuroidea) from Caribbean Panama. *Marine Biology*, 142, 271–279.

Hair, C. A., Foale, S. J., Kinch, J., & Yaman, L. (2020). Social and economic challenges to community-based sea cucumber mariculture development in New Ireland Province, Papua New Guinea. *Marine Policy*, 117, 103940.

Hamel, J. F., Hidalgo, R. Y., & Mercier, A. (2003). Larval development and juvenile growth of the Galapagos Sea cucumber *Isostichopus fuscus*. *SPC Bêche-de-Mer Information Bulletin*, 18, 3–8.

Han, Q., Keesing, J. K., & Liu, D. (2016). A review of sea cucumber aquaculture, ranching, and stock enhancement in China. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 24(4), 326–341.

Hartati, R., Alya, T. S., Zainuri, M., Ambariyanto, A., Widianingsih, W., Ario, R., Pratikto, I., & Sulisyati, R. (2021). Modeling of habitat suitability for sea cucumber ranching in Sintok Island, Karimunjawa National Park, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 944, 012022.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/944/1/012022>

Heery, E. C., Lian, K. Y., Loke, L. H. L., Tan, H. T. W., & Todd, P. A. (2020). Evaluating seaweed farming as an eco-engineering strategy for ‘blue’ shoreline

infrastructure. *Ecological Engineering*, 152, 105857.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105857>

Heinen, A., & Quist, C. (2001). Between meal and market: Some initial experiences with community-based resource management in Danao Bay in the Philippines revolve around the humble sea cucumber. *Samudra Report*, 28, 13-18.

Herrera Ulloa, Á. (2019). *Producción de peces marinos juveniles en Costa Rica*. Editorial Universidad Nacional (EUNA).

Herrera-Ulloa, A., Chacón-Guzmán, J., Zúñiga-Calero, G., Fajardo, Ó., & Jiménez-Montealegre, R. (2009). Acuicultura de pargo la mancha (*Lutjanus guttatus*) en Costa Rica dentro de un enfoque ecosistémico. *Revista de Mar y Costas*, 1, 197-213. <https://doi.org/10.15359/revmar.1.11>

Hou, H., Shao, S., Zhang, Y., et al. (2019). Life cycle assessment of sea cucumber production: A case study, China. *Journal of Cleaner Production*, 213, 158-164. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.141>

Huang, Y.-P., & Khabusi, S. P. (2025). Artificial Intelligence of Things (AIoT) Advances in Aquaculture: A Review. *Processes*, 13(1), 73.

Huo, D., Sun, L., Zhang, L., Ru, X., Liu, S., & Yang, H. (2019). Metabolome responses of the sea cucumber *Apostichopus japonicus* to multiple environmental stresses: Heat and hypoxia. *Marine pollution bulletin*, 138, 407-420. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11.063>.

INCOPESCA. (2019). *Plan Estratégico de la Acuicultura en Costa Rica 2019-2023*. INCOPESCA

INCOPESCA. (2023). Acuerdo AJDIP/057-2023. *Aprueba Listas de Especies de Interés Acuicola*.

INCOPESCA. (2024). *Plan Nacional de Desarrollo Pesquero y Acuicola 2025-2030*. INCOPESCA.

James, D. B. (2004). *Manual on hatchery production of sea cucumber Holothuria scabra*. Central Marine Fisheries Research Institute, India.

Jia, X., & Chen, J. (2001). Sea cucumber juvenile ranching and enhancing experiments. *Fisheries Science*, 20(3), 21-24.

Jönsson, M. (2024). *Savouring the sea: Production and consumption of future seaweed foods* [Tesis doctoral, Lund University]. Lund University Repository.

Jia, X., & Chen, J. (2001). Sea cucumber juvenile ranching and enhancing experiments. *Fisheries Science*, 20(3), 21-24.

Ju, Z., Li, X., Yang, W., & Xiong, D. (2024). Immune responses of sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) to combined environmental stress from high temperature and oil pollution. *Marine and Freshwater Research*, 75, MF23161

Khan, N., Mustaqeem, M., Zulfiqar, S., Shahid, M., Aftab, R., Khan, M. H. U., Ahmad, H., & Nawaz, M. Z. (2024). A comprehensive insight into the challenges and solutions for sustainable macroalgae cultivation. *Heliyon*, 10(5), e28208. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28208>

Khan, N., Sudhakar, K., & Mamat, R. (2023). Seaweed farming: A perspective of genetic engineering and nano-technology application. *Heliyon*, 9, e15168. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15168>

Kotowicz, D. M., Concepcion, A., Bradt, G., Chadsey, M., Clemetson, A., Good, M., ... & Robidoux, J. (2024). Identifying challenges of the US domestic seaweed aquaculture industry. *Aquaculture*, 593, 741314. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2024.741314>

Laguerre, H., Raymond, G., Plan, P., Améziane, N., Bailly, X., & Chevalier, P. (2020). First description of embryonic and larval development, juvenile growth of the black sea-cucumber *Holothuria forskali* (Echinodermata: Holothuroidea), a new species for aquaculture in the north-eastern Atlantic. *Aquaculture*, 521, 734961. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.734961>

Langford, A., Turupadang, W., & Waldron, S. (2023). Interventionist industry policy to support local value-adding: Evidence from the Eastern Indonesian seaweed industry. *Marine Policy*, 151, 105561.

Leiva, G. E., Flores, L., & Cárdenas, L. (2022). Barriers and drivers for sustainable aquaculture in Latin America. *Aquaculture Reports*, 24, 101153.

Li, J., Weinberger, F., de Nys, R., Thomas, T., & Egan, S. (2023). A pathway to improve seaweed aquaculture through microbiota manipulation. *Trends in Biotechnology*, 41(4), 544-554.

Li, L., Li, Q., & Kong, L. (2010). The effect of different substrates on larvae settlement in sea cucumber, *Apostichopus japonicus* Selenka. *Journal of the World Aquaculture Society*, 41, 123-130. <https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.2009.00341.x>.

Li, Q., & Li, Y. (2010). Effects of salinity on larval development of sea cucumber *Apostichopus japonicus*. *Aquaculture Research*, 41(4), e584-e589.

Li, X., & Zhu, Y. (2025). Optimization of Sea Ranching Techniques for Sustainable Tropical Sea Cucumber Aquaculture. *ProQuest*, 14 (3), 245-255.

Liu, X., et al. (2024). Development and application of molecular markers in sea cucumber aquaculture. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1423096. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1423096>

Lüning, K., & Pang, S. (2003). Mass cultivation of seaweeds: current aspects and approaches. *Journal of Applied Phycology*, 15(2-3), 115-119.

Magdy, M., Otero-Ferrer, F., & Viçose, G. (2021). Preliminary spawning and larval rearing of the sea cucumber *Holothuria sanctori* (Delle Chiaje, 1823): A potential aquaculture species. *Aquaculture Reports*, 21, 100846. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.100846>.

Marviva (2020). *La comercialización de camarón marino de la costa pacífica de Costa Rica*. MARVIVA.

Masyahoro, A., & Mappiratu, A. (2012). Effect of nitrate and phosphate concentration on seaweed growth. *Journal of Fisheries Research*, 6(2), 34-41.

Meirinawati, H., Anggraini, R., & Arbi, U. Y. (2020). The effect of water quality and sediment composition on the distribution of sea cucumber (*Holothuria scabra*) in Pangkep Islands, South Sulawesi. IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*, 473, 012013.

Méndez-Solano, R. A. (2025). *Implementación de Jardines Oceánicos 3D para la Acuicultura Sostenible y la Restauración de Ecosistemas Marinos en Costa Rica*. Universidad Estatal a Distancia, Costa Rica.

Mendez, C., Bustamante, D. E., Calderón, M. S., Gauna, C., Hayashi, L., Robledo, D., ... & 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>

Méndez-Vargas, B., Marín-Arribas, G., & Brenes-Madrigal, J. (2022). *Bioseguridad y sostenibilidad de la acuicultura marina en Costa Rica*. Escuela de Biología, Universidad de Costa Rica.

Mercier, A., Ycaza Hidalgo, R., & Hamel, J.-F. (2005). *Aquaculture of the Galapagos sea cucumber, Isostichopus fuscus*. In A. Lovatelli, C. Conand, S. Purcell, S. Uthicke, J.-F. Hamel, & A. Mercier (Eds.), *Advances in sea cucumber aquaculture and management* (pp. 347-358). FAO Fisheries Technical Paper No. 463. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

MINAE. (2020). Decreto Ejecutivo N.º 42755-MINAE. Diario Oficial La Gaceta.

MINAE. (2023). Estrategia Nacional de Carbono Azul. Gobierno de Costa Rica. MINAE.

Morgan, A. (2000). Induction of Spawning in the Sea Cucumber *Holothuria scabra* (Echinodermata: Holothuroidea). *Journal of The World Aquaculture Society*, 31, 186-194.

Morroni, L., Rakaj, A., Grosso, L., Flori, G., Fianchini, A., Pellegrini, D., & Regoli, F. (2023). Echinoderm larvae as bioindicators for the assessment of marine pollution: Sea urchin and sea cucumber responsiveness and future perspectives. *Environmental pollution*, 122285. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122285>.

Mu, Y. (1999). *The Technology of Sea Cucumber Farming*. Ocean University of China Press.

Muñiz, R. M., & del Río, J. A. J. (2024). The fishing and aquaculture production of Latin America. *Journal of Economic Studies*, 16, 10891-10908. <https://doi.org/10.1007/s13132-024-02240-0>

Murúa, P., Muñoz, L., Bustamante, D., Gauna, C., Hayashi, L., Robledo, D., Strittmatter, M., Arce, P., Westermeier, R., Müller, D. G., & Gachon, C. M. 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>

Nakhate, P., & van der Meer, Y. (2021). A systematic review on seaweed functionality: A sustainable bio-based material. *Sustainability*, 13(11), 6174. <https://doi.org/10.3390/su13116174>

Nova, P., Martins, A. P., Teixeira, C., et al. (2020). Foods with microalgae and seaweeds fostering consumers health: A review on scientific and market innovations. *Journal of Applied Phycology*, 32, 1789-1802. <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02129-w>

Parque Marino del Pacífico. (2023). *Documento de trabajo interinstitucional. Parque Marino del Pacífico, UNA.PMP*

Pattinasarany, M. M., Palinussa, E. M., & Matakupan, J. (2024). Growth of black sea cucumber *Holothuria atra* in an integrated aquaculture system. *Depik Jurnal Ilmu-Ilmu Perairan, Pesisir dan Perikanan*, 13(3), 461-468. <https://doi.org/10.13170/depik.13.3.40045>

Pessarrodona, A., Assis, J., Filbee-Dexter, K., et al. (2022). Global seaweed productivity. *Science Advances*, 8(37), eabn2465. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abn2465>

Purcell, S. W., et al. (2012). Sea cucumber fisheries: Global analysis of stock status, management measures and socioeconomic contexts. *Fish and Fisheries*, 14(1), 34–59. <https://doi.org/10.1111/j.1467-2979.2011.00443.x>

Purcell, S., Hair, C., & Mills, D. (2012). Sea cucumber culture, farming, and sea ranching in the tropics: Progress, problems, and opportunities. *Aquaculture*, 368, 68–81. <https://doi.org/10.1016/J.AQUACULTURE.2012.08.053>

Purcell, S. W. (2014). Value, market preferences and trade of beche-de-mer from Pacific island sea cucumbers. En C. Xue (Ed.), *Advances in sea cucumber processing technology and product development* (pp. 3–25). Springer.

Purcell, S. W., Ngaluafe, P., Lalavanua, W., & Ceccarelli, D. M. (2018). Market price trends of Latin American and Caribbean Sea cucumbers inform fisheries management. *Regional Studies in Marine Science*, 17, 127–132. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2017.12.003>

Radulovich, R., Umanzor, S., Cabrera, R., & Mata, R. (2014). Tropical seaweeds for human food, their cultivation, and its effect on biodiversity enrichment. *Aquaculture*, 433, 1–10.

Ramírez, S., et al. (2023). *Antecedentes y situación actual de la maricultura en Costa Rica, con énfasis en el cultivo de camarón en el Golfo de Nicoya*. MARVIVA.

Rao, A. R., & Ravishankar, G. A. (2022). *Sustainable global resources of seaweeds: Food, pharmaceutical and health applications* (Vol. 2). Springer. link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-030-92174-3.pdf

Rioja, R. A., Palomar-Abesamis, N., & Juinio-Meñez, M. A. (2020). Development of nocturnal feeding and photosensitivity in early juveniles of the warty sea cucumber *Stichopus cf. horrens*. *Behavioural Processes*, 178, 104181.

Robinson, G., Caldwell, G., Jones, C., & Stead, S. (2019). The effect of resource quality on the growth of *Holothuria scabra* during aquaculture waste bioremediation. *Aquaculture*, 499 (15), 101–108. <https://doi.org/10.1016/J.AQUACULTURE.2018.09.024>.

Robles-Herrera, A., Brugarola, M., Herrera-Ulloa, A., Rádrigan, R., & Guzmán, T. (2025). Potential sustainability assessment indicators toward sustainable management for aquaculture in the Gulf of Nicoya, Costa Rica. *The International*

Journal of Sustainability Policy and Practice, 21(1), 51-75.
<https://doi.org/10.18848/2325-1166/CGP/v21i01/51-75>

Rodrigues, T., Silva, A., Sousa, J., Félix, P., & Pombo, A. (2023). Effect of Enriched Substrate on the Growth of the Sea Cucumber *Holothuria arguinensis* Koehler and Vaney, 1906 Juveniles. *Diversity*, 15 (3),458. [Effect of Enriched Substrate on the Growth of the Sea Cucumber *Holothuria arguinensis* Koehler and Vaney, 1906 Juveniles](#)

Rogers, C. (2019). Evaluation of the growth and survival rate of juvenile sea cucumber *Isostichopus badionotus* in a pilot-scale pond in Belize. *World Aquaculture Magazine*, 50(1), 32–37.

Saavedra, S., Henríquez, L., Leal, P., Galleguillos, F., Cook, S., & Cárcamo, F. (2019). *Cultivo de Macroalgas: Diversificación de la Acuicultura de Pequeña Escala en Chile*. Instituto de Fomento Pesquero. https://www.ifop.cl/wp-content/contenidos/uploads/biblioteca/libros_digitales/cultivo_de_macroalga_s.pdf

Sánchez-Tapia, A., Olvera-Novoa, M. A., & Palacios, E. (2018). Growth and survival of hatchery-produced juvenile sea cucumber *Isostichopus badionotus* under different culture conditions. *Journal of the World Aquaculture Society*, 49(4), 747–757.

Seeruttun, C. G., Ramsaha, S., & Bhagooli, R. (2008). Effects of temperature and salinity on the growth and survival of juvenile sea cucumber *Holothuria atra*. *Western Indian Ocean Journal of Marine Science*, 7(1), 113–118.

SETENA. (2024). Registro Ambiental D5-0002-2024.
<https://tramites.setena.go.cr/Expedientes/registros>

SINAC. (s.f.). *Formulario PI-01 para solicitud de permisos de investigación*. Ministerio de Ambiente y Energía

SINAC. (s.f.). *Requisitos para investigaciones científicas sobre biodiversidad*. Ministerio de Ambiente y Energía

Sithisak, C., Dumrongvuthichai, P., & Menasveta, P. (2013). Co-culture of sandfish (*Holothuria scabra*) and red tilapia (*Oreochromis niloticus*) in earthen ponds. *Aquaculture International*, 21(2), 283–293.

Snethlage, J. S., de Koning, S., Giesbers, E., et al. (2023). Knowledge needs in realising the full potential of seaweed for world food provisioning. *Global Food Security*, 37, 100692. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2023.100692>

Sonnenholzner-Varas, J. I. (2021). ¿Hacia dónde va la acuicultura de equinodermos en América Latina? Potencial, retos y oportunidades. *Revista de Biología Tropical*, 69(Suppl.1), 514-549. <https://doi.org/10.15517/rbt.v69iSuppl.1.46393>

Sunde, J., & Christophersen, G. (2023). Appetite in captivity – feeding studies of the red sea cucumber *Parastichopus tremulus*. *Frontiers in Marine Science*, 9, 1052968. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1052968>

Tu, C., Liu, C., Gao, W., Shan, H., & Bao, W. (2023). Induction of sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) larval settlement by bacterial biofilms and its application of hatchery rearing. *Aquaculture*, 566, 739182. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.739182>.

Tullberg, R. M., Nguyen, H. P., & Wang, C. M. (2022). Review of the status and developments in seaweed farming infrastructure. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(1447), 1-29. <https://doi.org/10.3390/jmse10101447>

Tuwo, A., Zamrun, F., & Taqiuddin, M. (2012). Water quality parameters and the growth of sandfish (*Holothuria scabra*) juvenile in pond culture. *Journal of Coastal Development*, 15(3), 317-322.

Universidad de Costa Rica. (2020). *Bachillerato y Licenciatura en Biología*, Plan 2. UCR.

Universidad Nacional. (2024). *Bachillerato y Licenciatura en Biología Marina*. UNA.

Universidad Técnica Nacional. (2023). *Licenciatura en Ingeniería en Acuicultura*.

Vega-Álvarez, G., Azofeifa-Solano, J. C., Fernández-García, C., Soto-Molinari, R., Rojas-Angulo, M., Amador-Fernández, X., & Vargas-Gamboa, A. (2018). New records of benthic marine macroalgae from the Caribbean coast of Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 66(Supl. 1), S328-S339.

Veterinaria Digital. (2022, enero 4). *La producción de camarón cerrará el 2021 con cifras positivas en Latinoamérica*. <https://www.veterinariadigital.com/noticias/la-produccion-de-camaron-en-2021-tuvo-cifras-positivas-en-latinoamerica/>

Visch, W., Layton, C., Hurd, C. L., Macleod, C., & Wright, J. T. (2023). A strategic review and research roadmap for offshore seaweed aquaculture—A case study from southern Australia. *Reviews in Aquaculture*, 15, 1467-1479. <https://doi.org/10.1111/raq.12788>

Watanabe, S., Asha, P. S., & Hitoshi, T. (2012). *Sea cucumbers in integrated multi-trophic aquaculture systems*. In: Aquaculture and the Environment. Nova Science Publishers, Inc.

Wei, Z., & Chang, Y. (2023). The extraction, separation technology, and new product development of sulfated polysaccharides from sea cucumber. In C. Xue (Ed.), *Advances in Sea Cucumber Processing Technology and Product Development* (pp. 229-258). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16512-2_9

Xiao, H., et al. (2024). The Effectiveness of Biofloc Technology in *Apostichopus japonicus* Aquaculture: A Review. *Fishes*, 9(11), 457. <https://doi.org/10.3390/fishes9110457>

Xie, L. (2004). Studies on selecting sites and constructing ranching area of sea cucumber, *Apostichopus japonicus*. *Fisheries Science*, 23(4), 33-36.

Xing, L., & Wang, Y. (2000). Studies on salinity tolerance of sea cucumber *Apostichopus japonicus*. *Marine Science Bulletin*, 2, 72-76.

Xuan, K., et al. (2023). SO-YOLOv5: Small object recognition algorithm for sea cucumber in complex seabed environments. *Fisheries Research*, 264, 106710. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2023.106710>

Xue, C. (2007). Research and application of sea cucumber healthy aquaculture technologies. *China Fisheries*, 7, 74-76.

Xue, C. (2023). *Advances in Sea Cucumber Processing Technology and Product Development*. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-16512-2>

Xuereb, A., Kimber, C. M., Curtis, J. M., Bernatchez, L., & Fortin, M. J. (2018). Putatively adaptive genetic variation in the giant California sea cucumber (*Parastichopus californicus*) as revealed by environmental association analysis of restriction-site associated DNA sequencing data. *Molecular Ecology*, 27(24), 5035-5042. <https://doi.org/10.1111/mec.14942>.

Yesuraj, D., Deepika, C., Ravishankar, G. A., & Rao, A. R. (2022). *Seaweed-based recipes for food, health-food applications, and innovative products including meat and meat analogs*. In A. R. Rao & G. A. Ravishankar (Eds.), *Sustainable Global Resources of Seaweeds Volume 2* (pp. 267-291). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-92174-3>

Yoshida, T., et al. (2024). Estimating body weight of caged sea cucumbers using time-lapse cameras and image analysis. *Smart Agricultural Technology*, 8, 100520. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100520>

Yu, S., Song, Z., & Chen, S. (2010). Physiological limits of *Holothuria scabra* in different environmental conditions. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 28(2), 270–276.

Yu, Z., Wu, H., Tu, Y., Hong, Z., & Luo, J. (2022). Effects of Diet on Larval Survival, Growth, and Development of the Sea Cucumber *Holothuria leucospilota*. *Aquaculture Nutrition*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/8947997>.

Yu, Z., Zhang, Q., & Xue, C. (2010). *Advances in sea cucumber aquaculture and processing technology*. Chemical Industry Press.

Zacarias-Soto, M., Olvera-Novoa, M. A., Pensamiento-Villaraiz, S., & Sánchez-Tapia, I. (2013). Spawning and Larval Development of the Four-Sided Sea Cucumber, *Isostichopus badionotus* (Selenka 1867), under Controlled Conditions. *Journal of the World Aquaculture Society*, 44(5), 694–705. <https://doi.org/10.1111/jwas.12061>

Zhang, L., Liao, W., Huang, Y., Wen, Y., Chu, Y., & Zhao, C. (2022). Global seaweed farming and processing in the past 20 years. *Food Production, Processing and Nutrition*, 4(23). <https://doi.org/10.1186/s43014-022-00103-2>

Zhang, X., & Liu, L. (1998). Effects of pH on survival and growth of sea cucumber. *Journal of Fisheries of China*, 22(1), 44–49.

Zhao, S., Xia, Z., Liu, J., Zhou, Y., & Wang, Y. (2023). Morphology, growth, and photosynthesis of *Ulva prolifera* O.F. Müller (Chlorophyta, Ulvophyceae) gametophytes, the dominant green species in the Southern Yellow Sea. *Journal of Sea Research*, 193, 102375.

7. Anexos

Anexo 1. Diseño de granjas marinas resilientes: infraestructura, distribución y defensa.

Introducción

Para la implementación y diseño de infraestructura para el cultivo de acuicultura de pepinos y macroalgas, se requiere integrar una variedad de principios de ingeniería, biotecnología y sostenibilidad ambiental. El presente documento es una propuesta del diseño de sistemas de producción marina para laboratorios experimentales y granjas marinas. Ambos espacios fueron concebidos no sólo como unidades operativas, sino también como fuentes de innovación, monitoreo ambiental y desarrollo de la maricultura.

Desde la ingeniería, el laboratorio ha sido diseñado considerando los flujos lógicos, control sanitario, efectividad y operatividad. Se incluyó en el diseño espacios especializados para las diferentes etapas críticas del cultivo (preparación de medios, cultivo larvario, pre acondicionamiento y maduración), se incorporaron tecnologías para sistemas de producción, UV, controles de fotoperiodo, mecanismos de aireación. El uso de estas soluciones se hace para garantizar las condiciones óptimas para el desarrollo de las especies y la minimización del riesgo de contaminación cruzada; mientras que se optimizaron el uso de recursos como agua, materiales y espacio.

Para el desarrollo de las granjas marinas se desarrollaron sistemas flotantes adaptables, con estructuras técnicas capaces de operar en las condiciones costeras del país. Para el diseño se consideraron los anclajes, flotabilidad, circulación hidráulica y señalización náutica, así como estrategias de defensa frente a depredadores mediante soluciones físicas (mallas, trampas, jaulas).

En un conjunto, esta propuesta busca dar una base conceptual, para la innovación de la maricultura, promoviendo nuevos cultivos con productividad, resiliencia, diseño ingenieril y aplicación de tecnologías apropiadas

Infraestructura de Laboratorios Marinos

Laboratorio de Pepinos de Mar

El laboratorio se planeó de tal manera que estuviera organizado en 6 zonas: preparación personal, medios y herramientas, cultivo larvario, pre engorde, maduración y almacenamiento. También la forma de organizar el laboratorio permite un flujo que minimiza riesgos de contaminación cruzada y manteniendo condiciones sanitarias óptimas, al tiempo que se facilita la eficiencia a la hora de operar en el laboratorio.

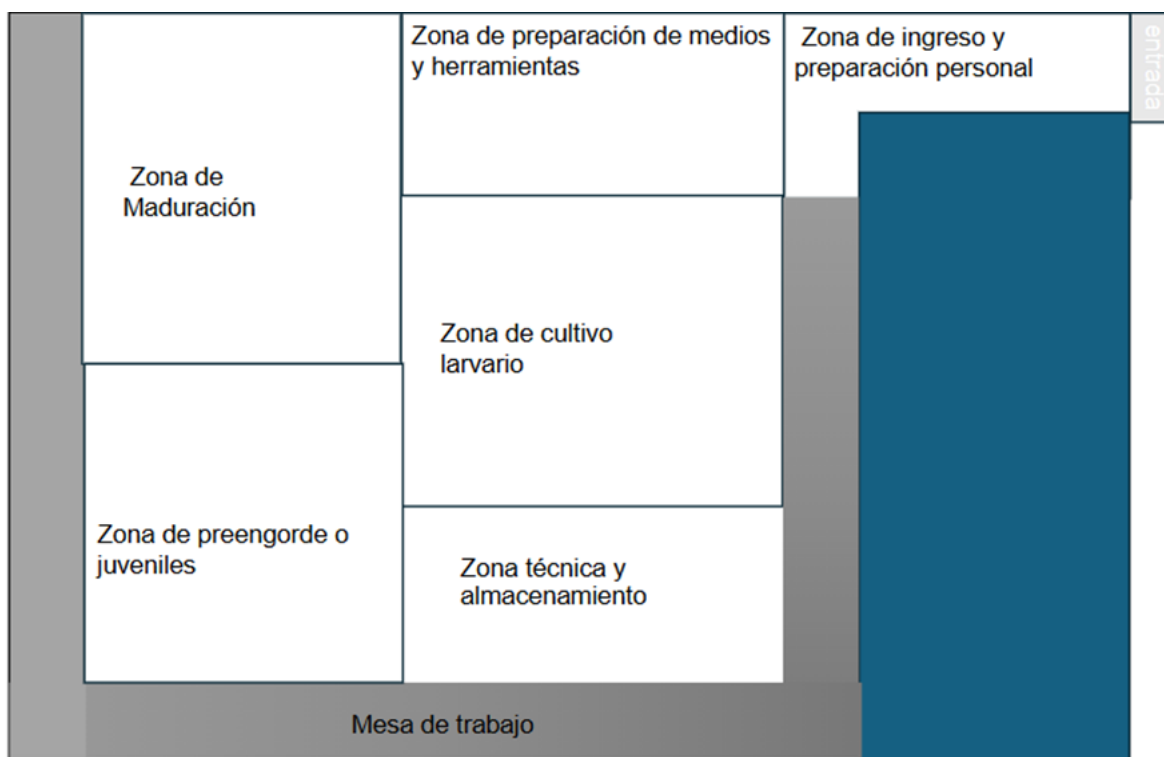


Figura. Plano esquemático de distribución interna de un laboratorio de cultivo larvario y preengorde. El diseño facilita el flujo unidireccional del personal y materiales, garantizando la bioseguridad y eficiencia operativa.

El laboratorio está compuesto por:

Zona de ingreso y preparación personal: Espacio destinado al ingreso del personal técnico, donde se realiza la desinfección, cambio de vestimenta y preparación antes de entrar a las zonas de trabajo. En la zona se hace indispensable tener un lavamanos, armarios de EPP (equipo de protección personal) y dispensadores de alcohol y papel. Esta área es clave para mantener condiciones de bioseguridad y evitar contaminaciones cruzadas.

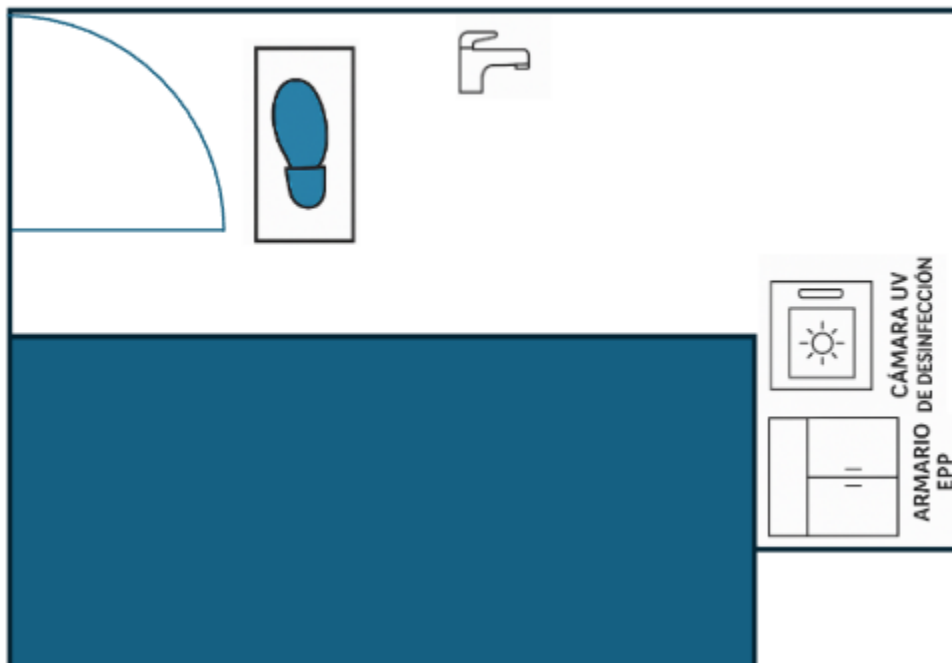


Figura. Zona de ingreso y preparación personal del laboratorio. El área está equipada para la desinfección y el cambio de vestimenta, con el fin de asegurar el control sanitario y minimizar riesgos de contaminación.

Zona de preparación de medios y herramientas: Área dedicada a la limpieza, desinfección, preparación y almacenamiento de herramientas, utensilios, y medios de cultivo. Para esta zona se debe tener un mesón de trabajo, microondas, estanterías para medios, sal marina, utensilios y un fregadero. Aquí se elaboran soluciones nutritivas, se esterilizan materiales y se organizan los insumos antes de su uso en el cultivo.



Figura. Área destinada a la preparación de medios de cultivo, soluciones nutritivas y desinfección de herramientas. Se busca asegurar la calidad de los insumos utilizados en el cultivo larvario.

Zona de maduración: Sección destinada a los reproductores en fase de maduración gonadal. está equipada con racks verticales que contienen peceras individuales con capacidades entre 40 y 100 litros cada una. Puede utilizarse un sistema de recirculación de agua (RAS), ya sea independiente o compartido con otras áreas del laboratorio. Cada nivel cuenta con su propio sistema de aireación, y se emplean mallas separadoras para organizar o aislar organismos según sea necesario. Además, se dispone de un mesón auxiliar para facilitar la manipulación y un armario cerrado destinado al almacenamiento de material reproductivo. Esta área cuenta con condiciones ambientales controladas para inducir o mantener la madurez sexual y garantizar una producción continua de gametos viables para el cultivo larvario.

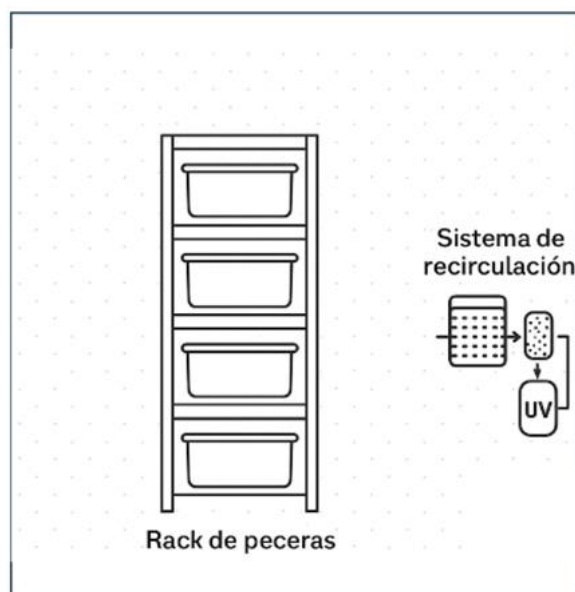


Figura. Zona de maduración para reproductores. Se acondiciona con parámetros específicos de temperatura, luz y alimentación para estimular el desarrollo gonadal de los organismos cultivados.

Zona de cultivo larvario: Área especializada para el mantenimiento y desarrollo de larvas desde la eclosión hasta etapas tempranas de vida. Está compuesta por tanques cilíndricos de 100–300 L (mínimo 4), con desagüe inferior, sistemas de aireación, luces reguladas, entrada y salidas con agua controlado. Está equipada con sistemas de control ambiental, recambio de agua y monitoreo constante para asegurar condiciones óptimas de crecimiento y supervivencia.

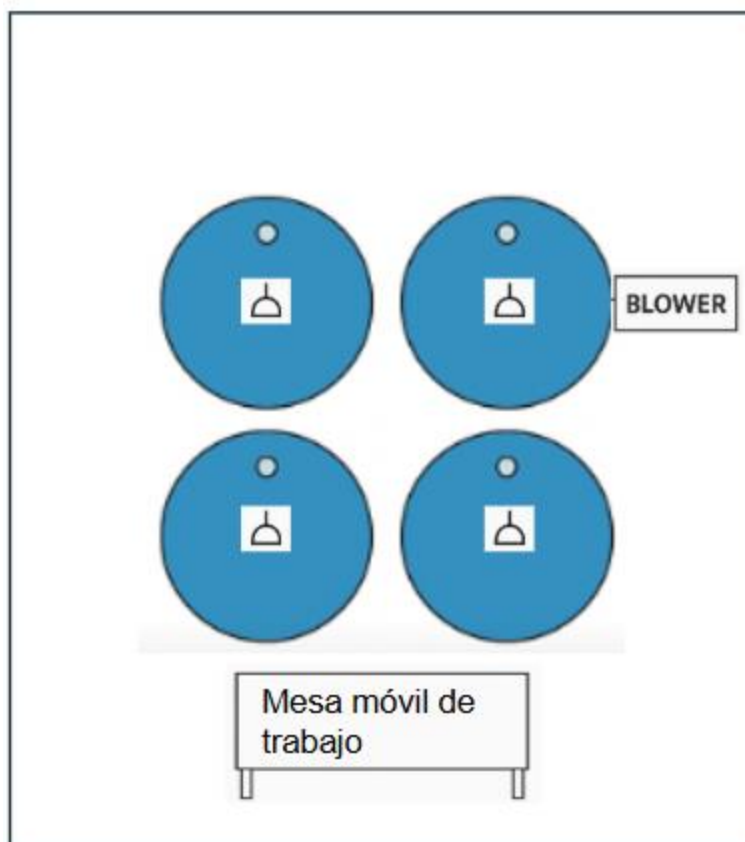


Figura. Tanques y equipos de la zona de cultivo larvario. Esta sección está diseñada para mantener condiciones óptimas de densidad, alimentación y recambio de agua para el desarrollo larval.

Zona de preengorde o juveniles: Espacio donde se trasladan los organismos larvarios una vez alcanzan una etapa de desarrollo más robusta. La zona tiene tanques rectangulares o raceways con capacidades entre 500 y 1000 litros, los cuales pueden dividirse según el tamaño de los organismos, un sistema de recirculación (RAS) que incluya un filtro mecánico, un biofiltro (utilizando bolas de plástico o esponjas) y un sistema de desinfección por luz ultravioleta (UV). Además, se considera el control de temperatura como un componente opcional, dependiendo de las necesidades del cultivo. Aquí se les mantiene bajo condiciones de crecimiento controlado antes de ser transferidos a sistemas de engorde o siembra definitiva.

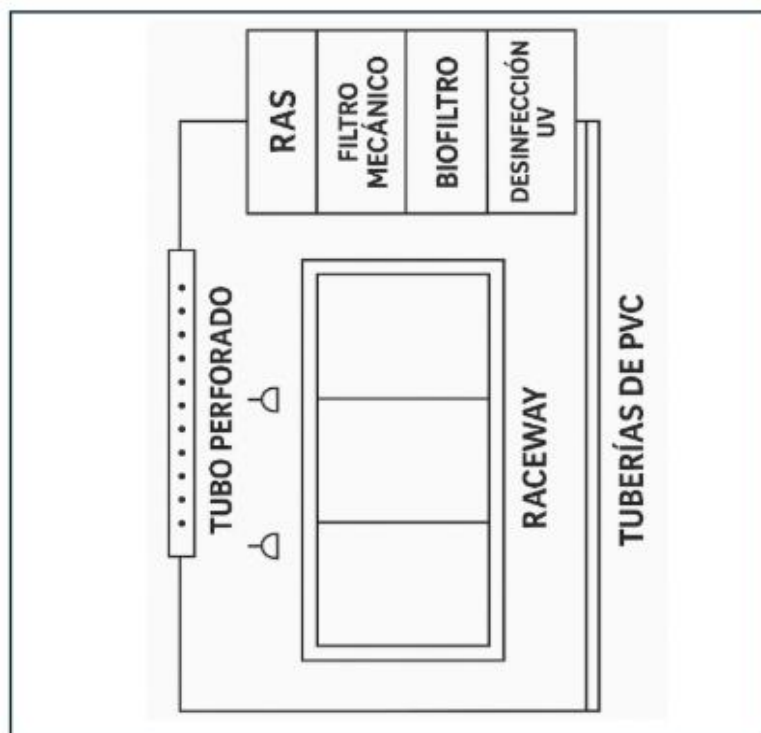


Figura. Área de preengorde para organismos juveniles. Se observan sistemas que permiten el crecimiento controlado de las larvas hasta alcanzar un tamaño apto para transferencia o engorde.

Zona técnica y almacenamiento: Zona utilizada para almacenar equipos, insumos no perecederos, documentos técnicos y herramientas especializadas. También puede incluir pequeños sistemas de soporte técnico como bombas de respaldo, filtros o tableros de control.

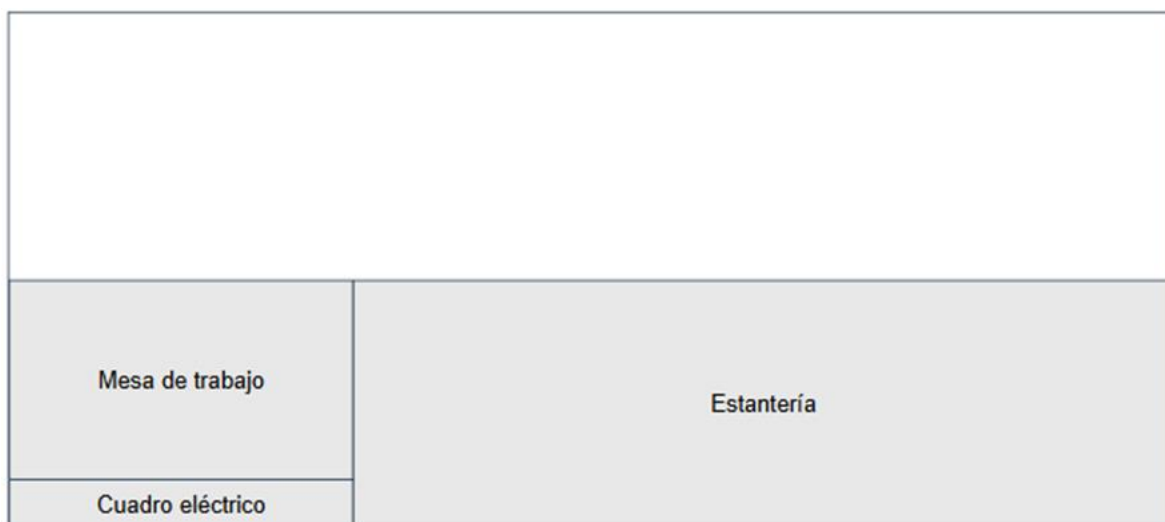


Figura. Espacio técnico y de almacenamiento del laboratorio. Se utiliza para resguardo de equipos auxiliares, repuestos, herramientas, productos químicos y documentos técnicos.

Flujo operativo y consideraciones finales

El diseño del laboratorio está pensado para garantizar un flujo operativo eficiente y seguro, tanto para el personal como para los organismos en cultivo. El recorrido debe iniciarse en la zona de preparación personal, seguido por la preparación de medios, pasando luego al cultivo larvario, el preengorde, la maduración y finalmente, la salida. Este flujo unidireccional evita la contaminación cruzada y favorece una gestión sanitaria adecuada.

Para asegurar el funcionamiento del laboratorio y la integridad de los cultivos, se deben considerar aspectos técnicos clave, como la pendiente de los pisos hacia drenajes, iluminación LED blanca, ventilación cruzada o extractores, tomas eléctricas seguras con interruptores diferenciales y el uso de materiales no corrosivos en toda la infraestructura. Estas medidas contribuyen a crear un ambiente de trabajo seguro, higiénico y eficiente.

Laboratorio de Macroalgas

El laboratorio de macroalgas está diseñado para el manejo controlado de cepas, procesos de desinfección, preparación de medios y escalamiento progresivo de cultivos. Su distribución permite mantener un flujo técnico ordenado, reduciendo riesgos de contaminación y facilitando operaciones especializadas en cada etapa del cultivo.

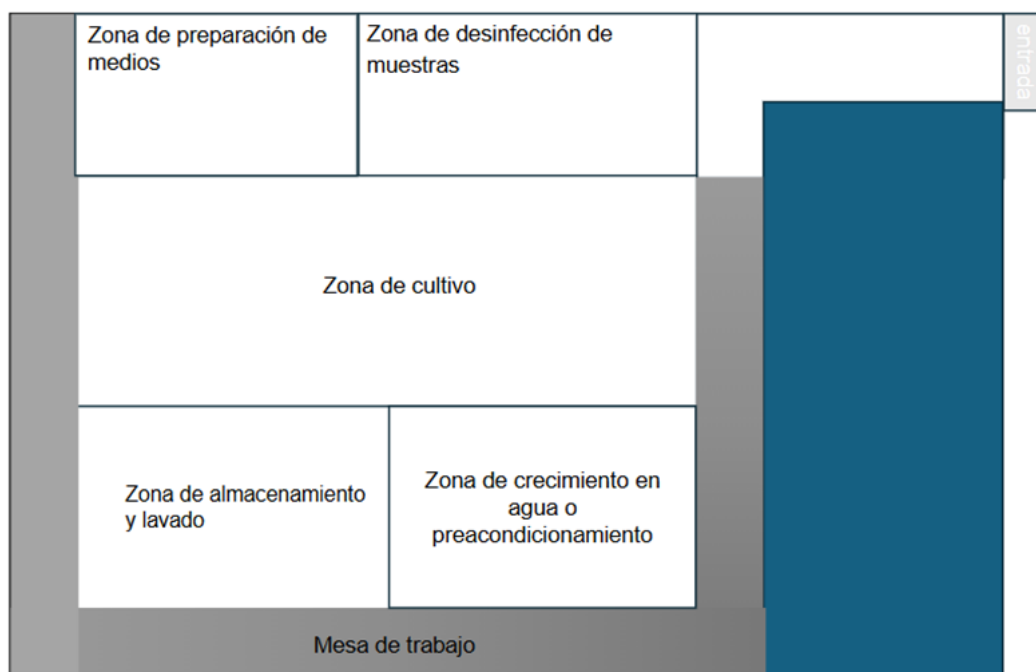


Figura. Distribución funcional del laboratorio de macroalgas. Se ilustran las zonas de ingreso y preparación personal, desinfección de muestras, preparación de medios, cultivo e inóculo, crecimiento en agua o pre acondicionamiento, almacenamiento y lavado.

Zonas funcionales

La zona de ingreso y preparación personal incluye estaciones para cambio de calzado y vestimenta, lavado de manos con lavamanos de pedal o sensor, y almacenamiento de equipo de protección personal. Esto asegura condiciones higiénicas antes de acceder a las áreas de cultivo.

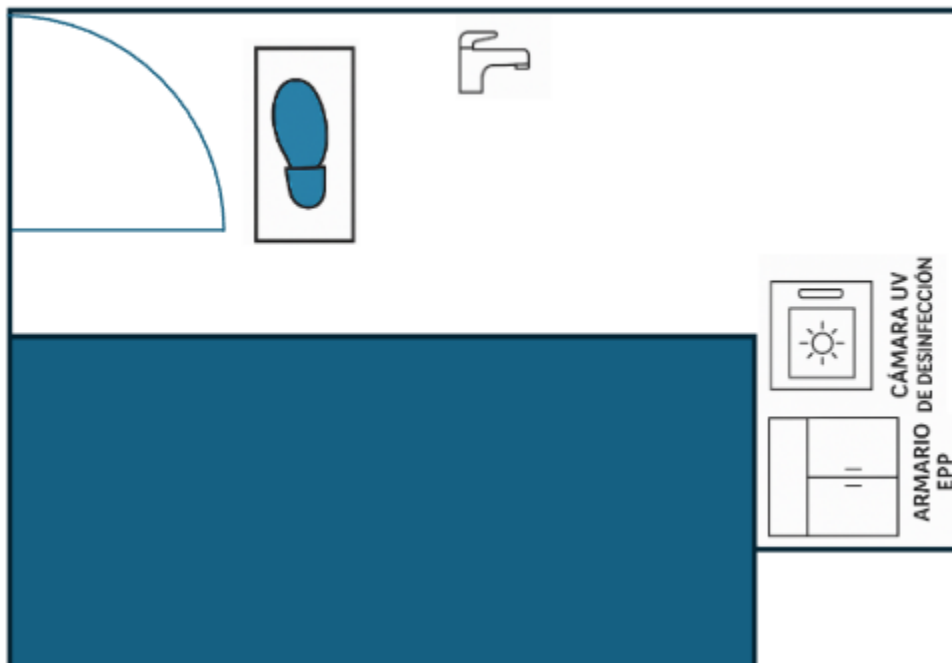


Figura. Zona de ingreso y preparación personal del laboratorio de macroalgas. Incluye estaciones de higiene y almacenamiento de EPP.

La zona de desinfección de muestras permite tratar macroalgas traídas del mar o de sistemas externos. Cuenta con una mesa de trabajo, una cámara UV o uso de alcoholes, lavamanos independiente y un microscopio estereoscópico para revisión de epífitas y organismos adheridos.

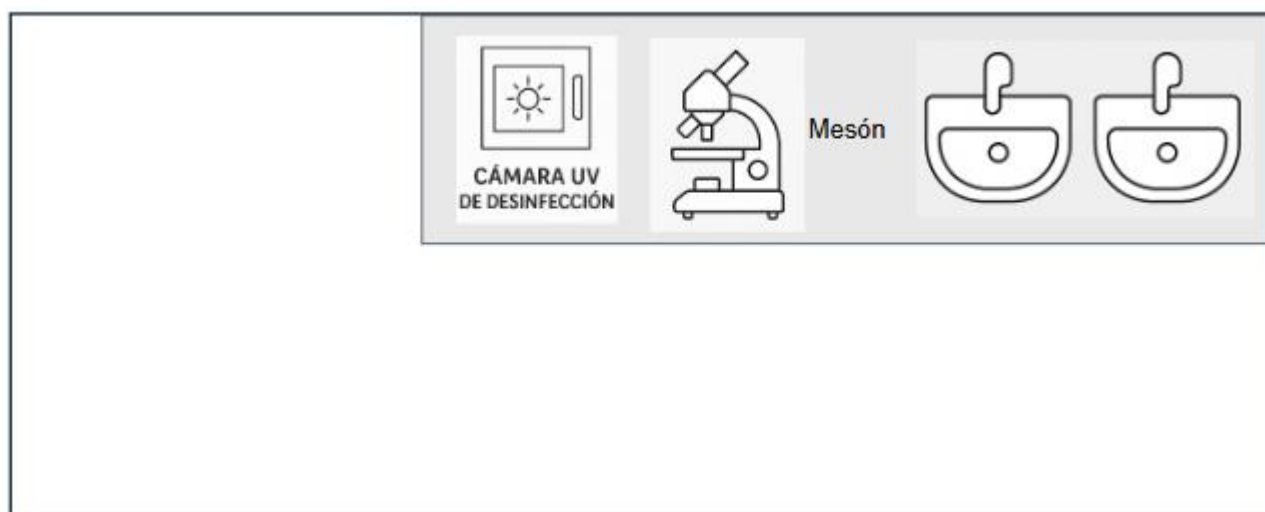


Figura. Zona de desinfección de muestras. Equipamiento para descontaminación y revisión de macroalgas.

En la zona de preparación de medios se almacenan nutrientes y sales, y se procesan mediante balanza de precisión, mezcladores magnéticos y autoclave. Incluye fregadero y espacio para rotulado y preparación de envases.



Figura. Zona de preparación de medios. Área técnica para mezclar, esterilizar y preparar soluciones de cultivo.

La zona de cultivo o inóculo alberga frascos, bolsas o bandejas con cultivos mantenidos en estanterías con luz controlada. Dispone de aireación suave, control de temperatura y fotoperiodo, y un mesón para trasplantes o subcultivos.

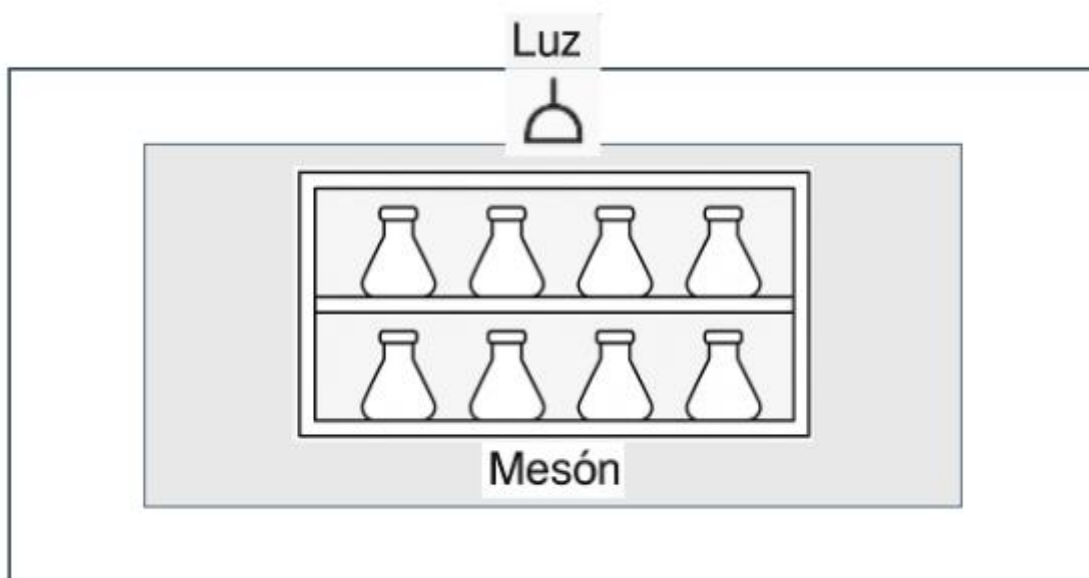


Figura. Zona de cultivo o inóculo. Estanterías con luz controlada y condiciones ambientales estables.

La zona de crecimiento en agua o pre acondicionamiento está equipada con tanques de fibra o policarbonato, sistemas de recirculación, aireación, control de luz y temperatura, y posible inyección de CO₂.

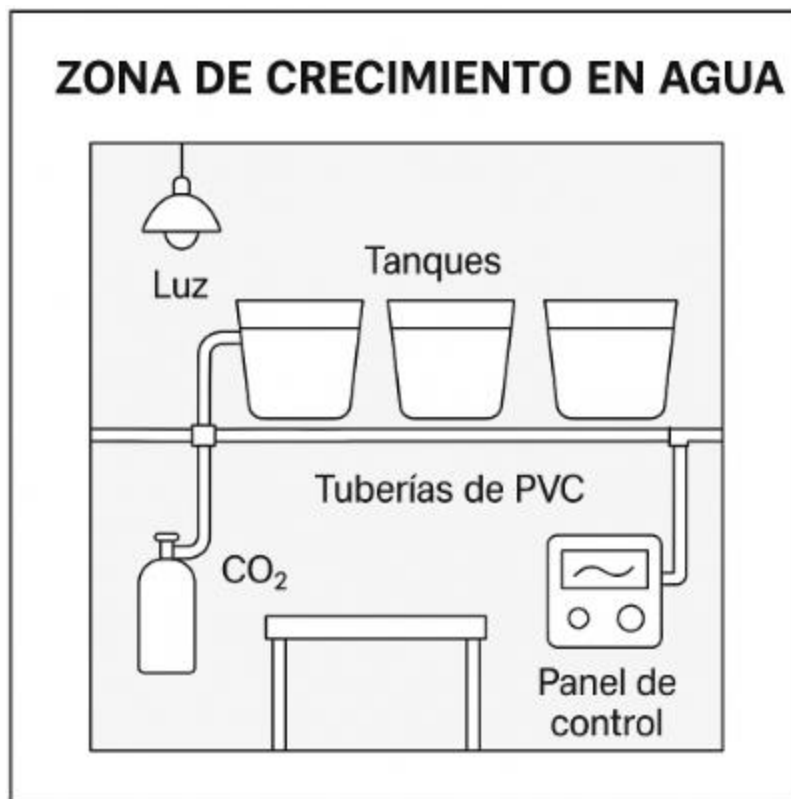


Figura. Zona de crecimiento en agua o pre acondicionamiento. Tanques y sistemas de soporte para cultivos avanzados.

Finalmente, la zona de almacenamiento y lavado contiene fregaderos grandes, rejillas y escurridores para el lavado y secado de frascos, pipetas, bandejas y mangueras. También se utiliza para almacenar materiales ya desinfectados. Esterilización, y condiciones personalizables de fotoperiodo y temperatura es crítica para garantizar el éxito del cultivo en condiciones ex situ.

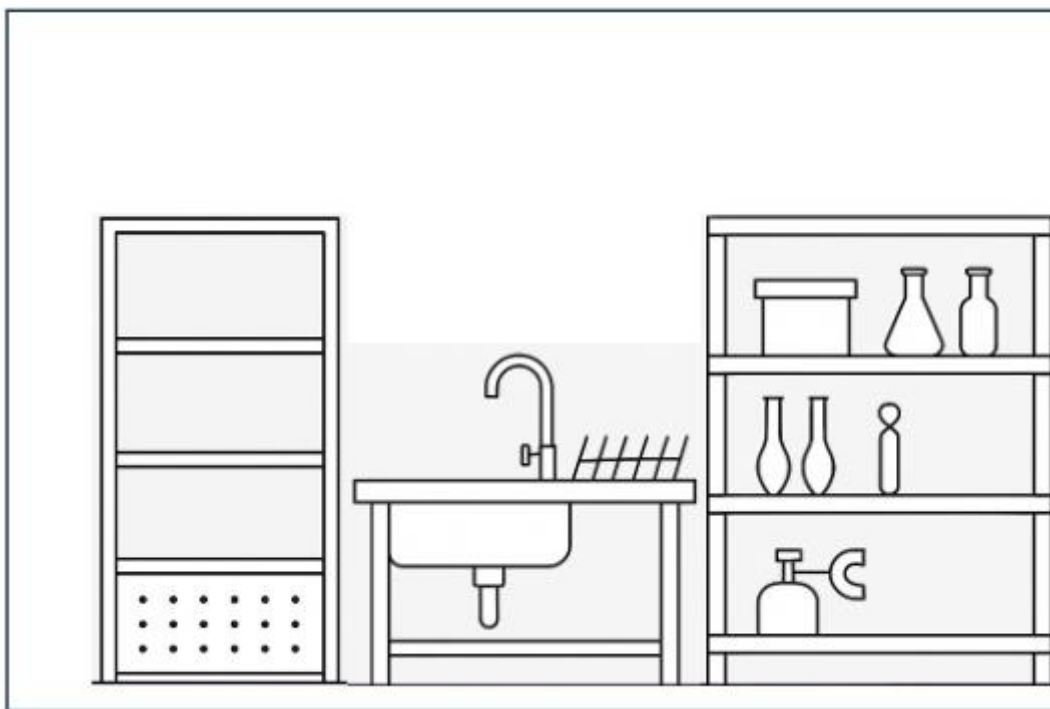


Figura. Zona de almacenamiento y lavado. Espacio de limpieza profunda y resguardo de materiales limpios.

Infraestructura de Granjas Marinas

Las granjas marinas son el componente externo del sistema productivo. El diseño de las granjas debe ser resiliente, modular, y adaptado a las condiciones hidrodinámicas, biológicas y sociales del sitio. Estas granjas funcionan como estaciones para probar y para validar escalabilidad, tolerancia ambiental y estrategias de defensa contra depredadores. En este documento se presentan dos diseños adaptados a especies clave en el desarrollo marino-costero: el pepino de mar y las macroalgas.

Granja de Pepinos de Mar

Basada en estructuras de bandejas flotantes de baja altura, esta granja permite el cultivo de pepinos a densidades óptimas bajo control parcial. Incluye zonas técnicas, áreas de alimentación, monitoreo biológico, y una unidad de preacondicionamiento para juveniles. Se recomienda una señalización náutica clara y un sistema de fondeo robusto que permita su operación segura en aguas costeras someras.

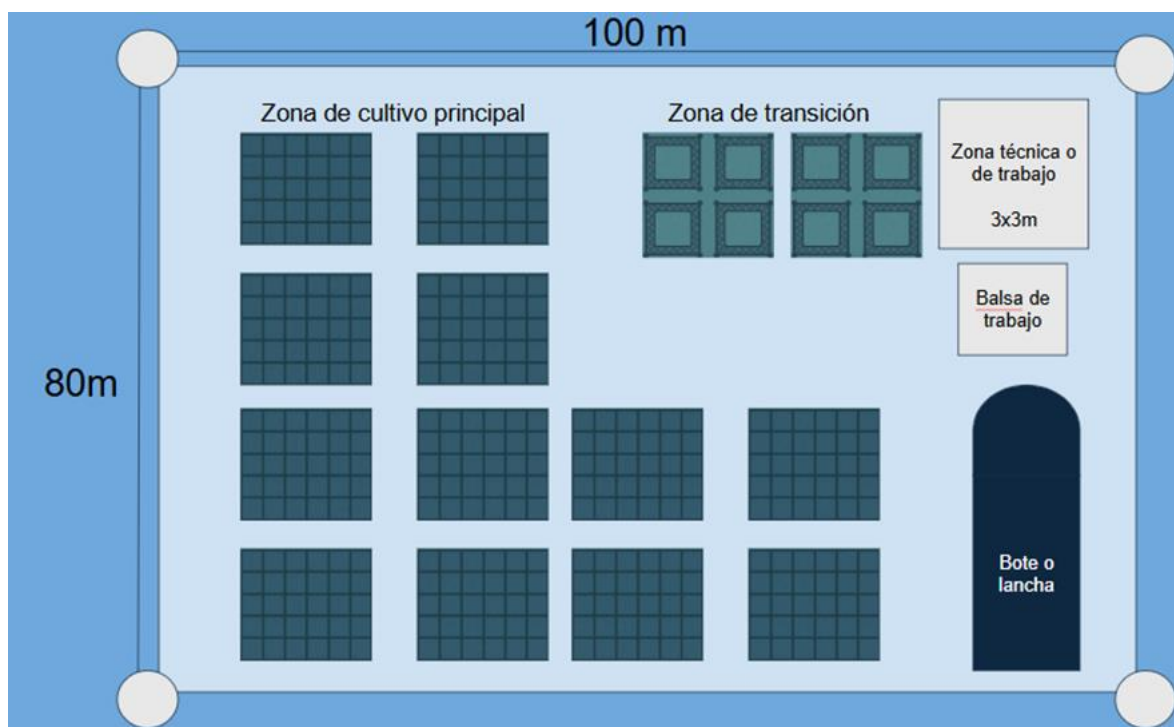


Figura. Diagrama general de una granja marina para el cultivo de pepinos de mar. Se observa la zona de producción con jaulas tipo bandeja plana ubicadas sobre el fondo marino, una zona técnica flotante para manejo de herramientas, alimentación y monitoreo, así como una zona de transición opcional para el pre acondicionamiento de juveniles. El diseño incluye señalización perimetral, puntos de fondeo seguros y delimitaciones visibles, optimizando la seguridad operativa, la eficiencia de manejo y la resiliencia ante condiciones marinas variables.

La forma recomendada para estas unidades de cultivo es una jaula rectangular del tipo de “bandeja plana”, caracterizada por su estructura baja, ancha y estable. Su altura, que varía entre 15 y 30 cm, se define para limitar el movimiento vertical innecesario de los pepinos de mar. Las jaulas están construidas con marcos rígidos de PVC, aluminio marino o varilla plástica, y recubiertas con malla plástica rígida o red de HDPE de 10 a 15 mm.

Los tamaños más comunes son de 1x1 metro o 1x2 metros, dependiendo de la densidad deseada. El fondo de cada jaula se refuerza con una malla más densa o una lona microperforada para evitar pérdidas de individuos juveniles y mejorar la retención del alimento. La densidad óptima de cultivo recomendada es de 1 a 2 pepinos por metro cuadrado, lo cual permite un desarrollo adecuado y facilita el monitoreo individual de los organismos.

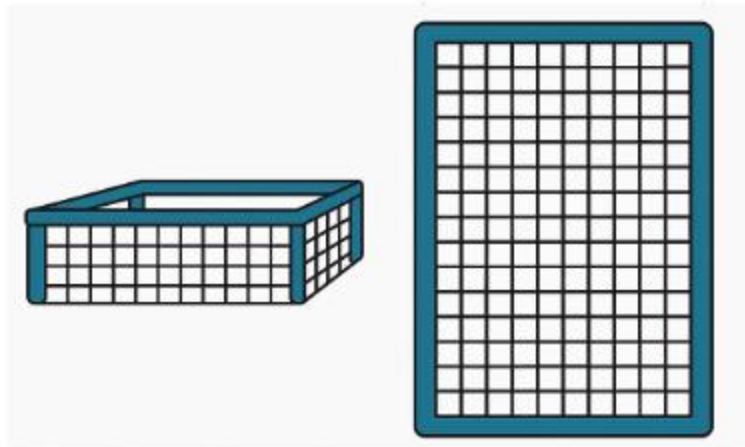


Figura. Vista lateral y superior de una jaula tipo “bandeja plana” para el cultivo sumergido de pepinos de mar. La estructura está construida con marcos rígidos y malla plástica o HDPE, y presenta un diseño rectangular de baja altura (15–30 cm), ideal para limitar el movimiento vertical y facilitar el monitoreo de los organismos.

Granja de Macroalgas

La granja de macroalgas está compuesta por estructuras flotantes tipo longline, redes verticales o jaulas, ubicadas en áreas de alta transparencia y circulación natural. Estas estructuras permiten el crecimiento eficiente de macroalgas para bioproductos, biofiltros o alimentación. Se detallan configuraciones espaciales como líneas en parcela o disposición radial, y se incluyen soluciones innovadoras contra depredadores como redes, trampas y sistemas de cultivo cerrado.

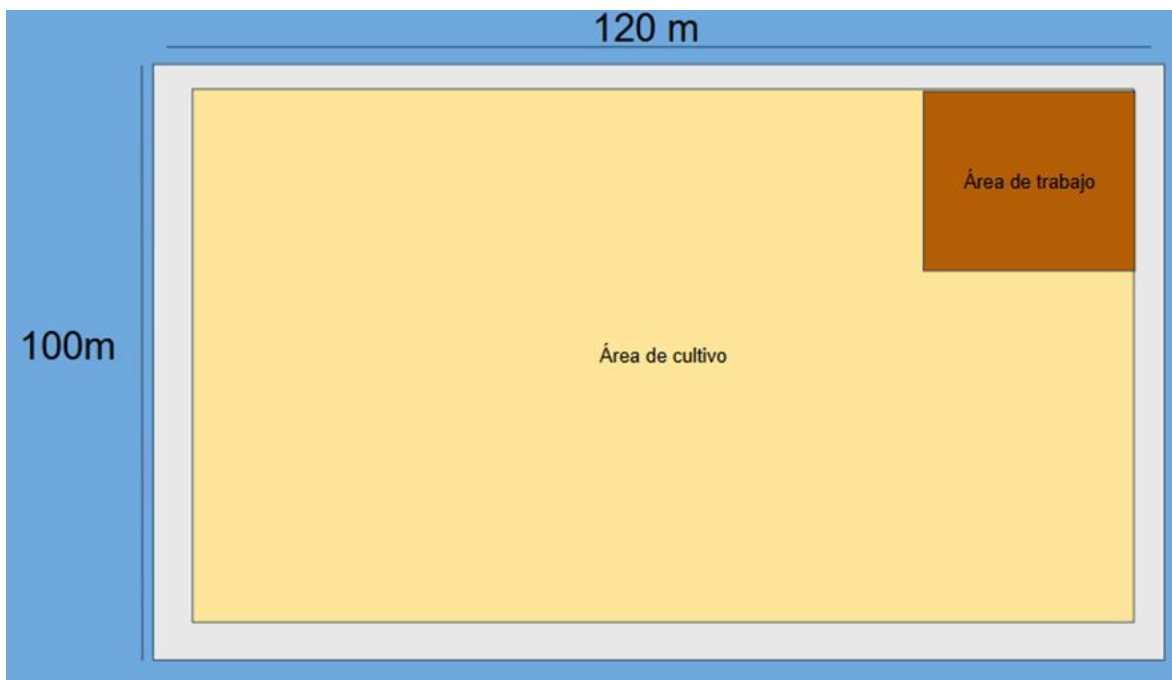


Figura. Vista general del área de cultivo en una granja marina de pepinos de mar. Se representan estructuras sumergidas tipo bandeja plana utilizadas para el crecimiento de los organismos, acompañadas por un sistema de fondeo con anclas y líneas de amarre, así como señalización de superficie mediante boyas con bandera. El diseño busca estabilidad estructural, visibilidad náutica y condiciones óptimas para el desarrollo de los pepinos.

Una granja marina de macroalgas se debe ubicar en una zona costera que está protegida, con una buena circulación de agua y sin exposición directa a oleaje extremos, debido a que las condiciones hidrodinámicas son claves para que exista un intercambio de nutrientes y la eliminación de los sedimentos. El fondo marino preferible para el cultivo es arenoso o rocoso y que además facilita el anclaje de las estructuras.

La profundidad del sitio del cultivo debe ser de 2 y 10 metros, permitiendo un acceso seguro, manejo eficiente y adecuada penetración de luz. Para el cultivo se requiere transparencia del agua, preferiblemente con valores del disco Secchi mayores a 1.5 m, para garantizar la fotosíntesis. Además, se requiere tanto la temperatura y salinidad estables y adecuadas a los requerimientos específicos de la especie de alga cultivada.

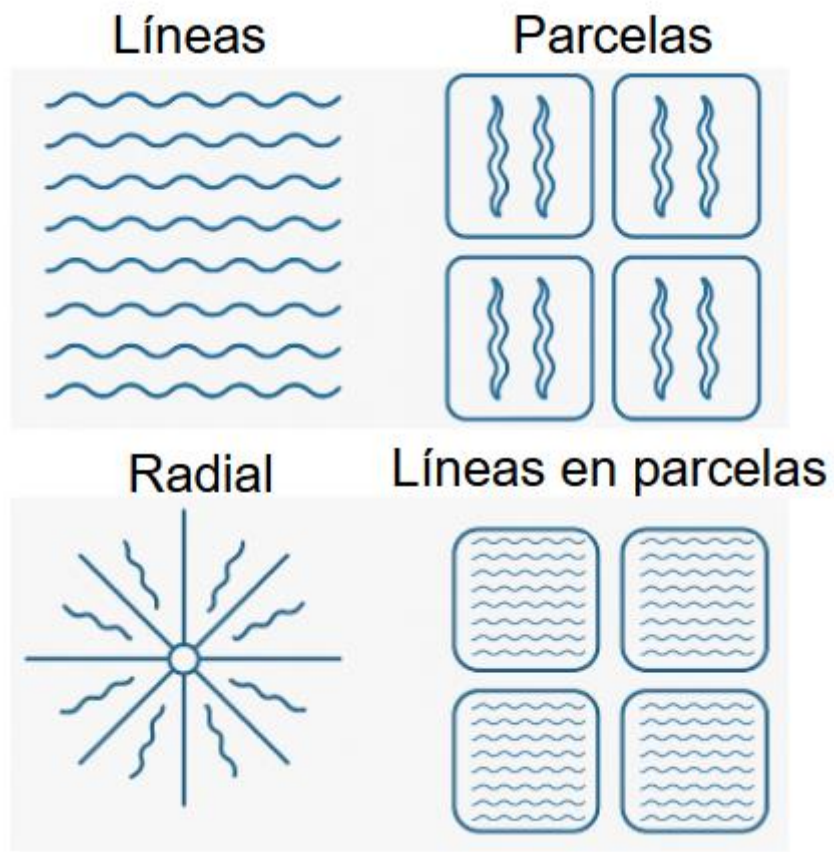
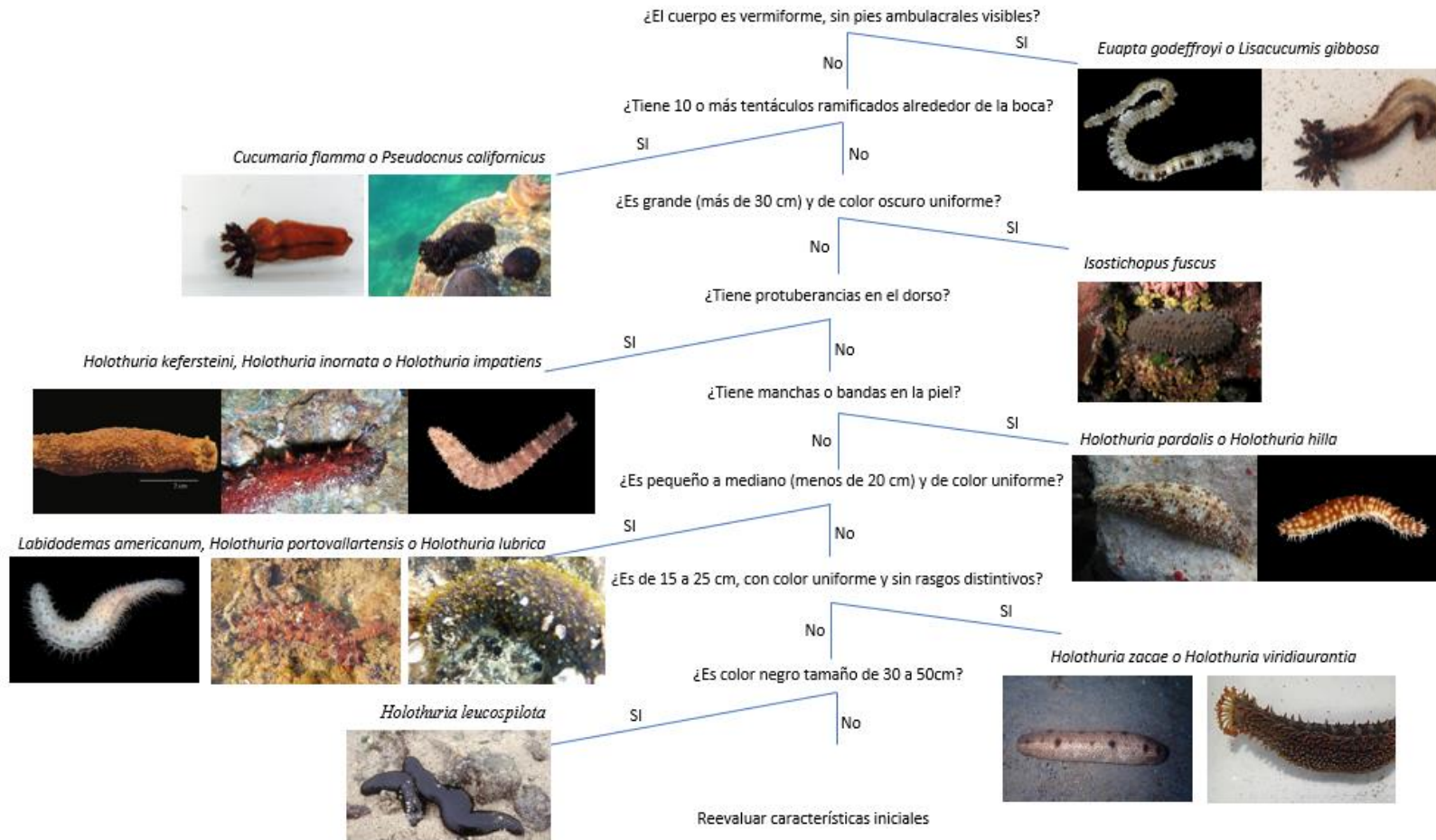


Figura. Formas de acomodo de las líneas de cultivo para macroalgas

Anexo 2. Guía de pepinos de mar en Costa Rica.

Pepinos de mar



Elaborado por Emmanuel Esquivel Murillo

Anexo 3. Guía de algunas macroalgas presentes en Costa Rica.



Escuela de
Ciencias Biológicas
Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica



UNA
UNIVERSIDAD NACIONAL
COSTA RICA



Escuela de
Administración
EDA
Universidad Nacional

MACROALGAS

GUÍA

UNIVERSIDAD NACIONAL

Anadyomene stellata



Avrainvillea rawsonii



Bryopsis sp.



Boodlea composita



Chlorophytas

Caulerpa racemosa



Caulerpa sertularioides



Caulerpa verticillata



Chaetomorpha sp.



Anadyomene stellata



Avrainvillea rawsonii



Bryopsis sp.



Boodlea composita



Chlorophytas

Caulerpa racemosa



Caulerpa sertularioides



Caulerpa verticillata



Chaetomorpha sp.



Halimeda simulans



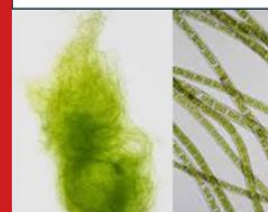
Parvocaulis parvula



Penicillus capitatus



Rhizoclonium sp.



Chlorophytas

Rhodophytas

Udotea sp.



Ulva lactuca



Amphiroa fragilissima



Amphiroa tribulus



Asparagopsis taxiformis



Acanthophora spicifera



Bryothamnion seaforthii



Bryothamnion triquetrum



Rhodophytas

Ceramium sp.



Champia salicornioides



Galaxaura marginata



Galaxaura rugosa



Gelidiella acerosa



Gracilaria sp.



Jania adhaerens



Hypnea spinella



Rhodophytas

Meristotheca gelidium



Polysiphonia sp.

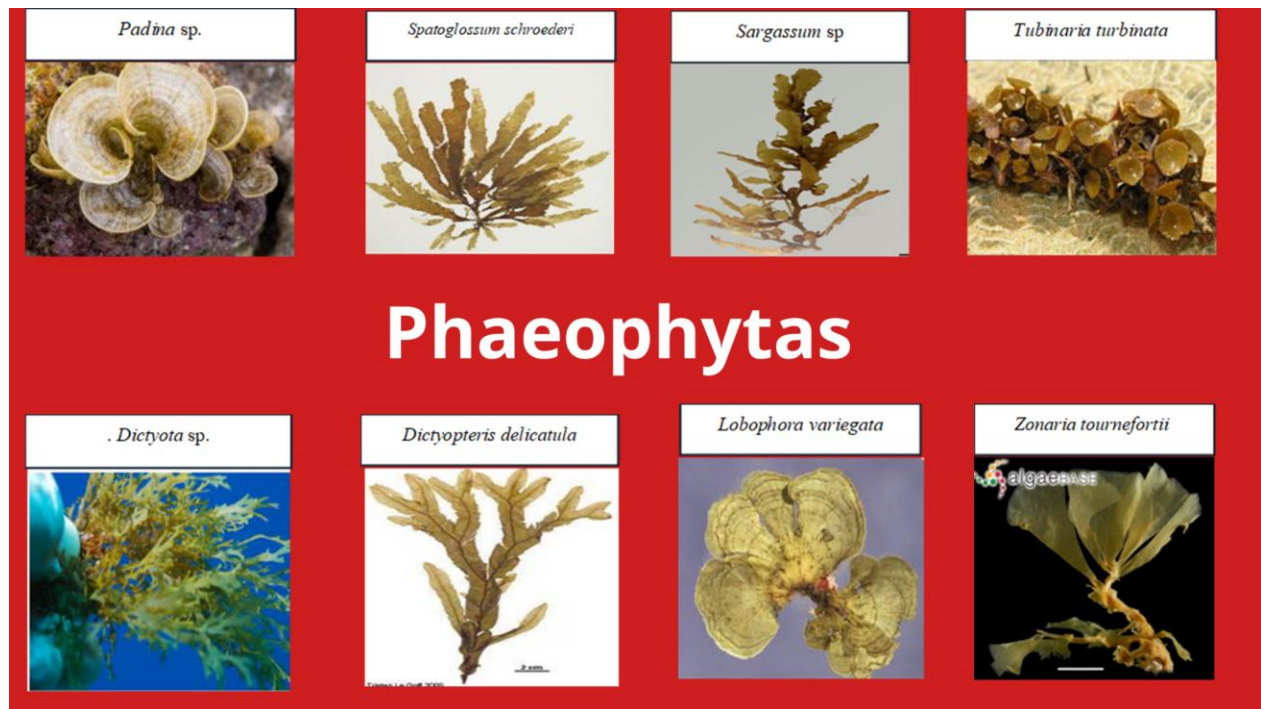


Trichogloea raquienii



Yuzurua poiteaui





Elaborada por Milagro Carvajal Oses

Anexo 4. Entrevistas realizadas a expertos de la Universidad de Costa Rica.

Con el objetivo de recopilar criterios científicos sobre aspectos estratégicos del cultivo de macroalgas y pepinos de mar en Costa Rica, se realizaron entrevistas semiestructuradas a dos especialistas reconocidos en el área de biología marina:

- Dra. Cindy Fernández-García, investigadora del Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología (CIMAR) y del Centro de Investigación en Biodiversidad y Ecología Tropical (CIBET), con especialidad en ecología de macroalgas marinas.
- Dr. Juan José Alvarado, biólogo marino del CIMAR-UCR, con trayectoria en ecología de invertebrados marinos y estudios sobre equinodermos tropicales.

Guía de entrevista

Tema general: Perspectivas científicas sobre el cultivo de macroalgas y pepinos de mar en Costa Rica

Sección 1: Potencial del cultivo en Costa Rica

1. ¿Cuál considera que es el potencial del cultivo de (macroalgas/pepinos de mar) en Costa Rica desde su experiencia científica?
2. ¿Qué especies recomendaría priorizar para cultivos comerciales a corto y mediano plazo?

Sección 2: Tecnología y transferencia de conocimiento

3. ¿Cómo evalúa el estado actual de la tecnología disponible en el país para llevar a cabo cultivos eficientes y sostenibles?
4. ¿Qué tipo de asistencia técnica, capacitación o innovación considera más urgente para desarrollar la actividad?

Sección 3: Importación de organismos

5. Desde un enfoque ecológico, ¿cuáles serían los principales riesgos o consideraciones ante la eventual importación de organismos para cultivo?
6. ¿Qué postura considera más prudente: cultivar únicamente especies nativas o permitir, bajo regulación, la introducción de especies foráneas?

Sección 4: Investigación y monitoreo

7. ¿Qué zonas costeras recomendaría como prioritarias para realizar investigación aplicada o cultivos experimentales?
8. ¿Qué vacíos de conocimiento identifica como más urgentes en el caso de [macroalgas/pepinos]?

Sección 5: Sostenibilidad y visión a futuro

9. ¿Cómo visualiza el papel que podría tener esta actividad en el desarrollo de comunidades costeras y en la economía azul nacional?
10. ¿Qué condiciones considera necesarias para garantizar la sostenibilidad ecológica, económica y social del cultivo en Costa Rica?

Anexo 5. Inventario preliminar de instalaciones relacionadas con acuicultura (en general).

El siguiente anexo incluye instalaciones de maricultura y acuicultura general pues en eventuales cambios son instalaciones que podrían utilizarse para producciones de apoyo/investigaciones con enfoques marinos.

Tipo de cultivo	Instalación / Entidad	Ubicación	Tipo de Cultivo	Área Aproximada (m ²)	Tipo de Instalación	Fuente de Información
Continental	Aqua Corporación Internacional	Cañas, Guanacaste	Tilapia	3300000	Estanques industriales al aire libre	Ficha técnica AquaCorporación / INCOPESCA
Continental	Truchas Reales - San Gerardo	San Gerardo de Dota, San José	Trucha arcoíris	3630	Estanques de montaña	Ficha técnica INA / visitas 2023
Continental	Truchas Reales - Piedra de Rivas	Pérez Zeledón, San José	Trucha arcoíris	300	Estanques artesanales	Ficha técnica INA / visitas 2023
Continental	Estación Exp. 'Los Diamantes' (INCOPESCA)	Guápiles, Limón	Tilapia y otros	210	Centro experimental	Sitio web INCOPESCA / FAO

Peces marinos	Laboratorio Bejuco (antiguo Martec)	Bejuco y Quepos	Pargo mancha (Lutjanus guttatus)	1500000	Jaulas flotantes offshore	Cesada
Camarón	Cosechas Marinas S.A.	Parrita, Puntarenas	Camarón blanco	3200000	Estanques semi-intensivos	Certificación orgánica UE / Proyecto CamaronOrgánicoCR
Camarón	Camaronera Copal	Guanacaste	Camarón blanco	352000	Estanques semi-intensivos	Certificación orgánica UE / Proyecto CamaronOrgánicoCR
Camarón	Camaronera Tierra Adentro	Guanacaste	Camarón blanco	655000	Estanques semi-intensivos	Certificación orgánica UE / Proyecto CamaronOrgánicoCR
Camarón	Camaronera Camaronex	Guanacaste	Camarón blanco	745000	Estanques semi-intensivos	Certificación orgánica UE / Proyecto CamaronOrgánicoCR
Camarón	Camaronera La Palmera	Guanacaste	Camarón blanco	310000	Estanques semi-intensivos	Certificación orgánica UE / Proyecto

						Camaron Orgánico CR
Ostras	Ostras Chira - Puerto Palito	Isla Chira, Puntarenas	Ostra japonesa	300	Granja ostrícola artesanal	Informes FAO / INCOPECA / Proyecto ECOMAR
Ostras	Granja Ostrícola Isla Venado	Isla Venado, Puntarenas	Ostra japonesa	300	Granja ostrícola artesanal	Informes FAO / INCOPECA / Proyecto ECOMAR
Ostras	Granja Ostrícola Costa de Pájaros	Costa de Pájaros, Puntarenas	Ostra japonesa	300	Granja ostrícola artesanal	Informes FAO / INCOPECA / Proyecto ECOMAR
Marino flotante	Proyecto piloto granja flotante - Golfo Dulce	Golfo Dulce, Pacífico Sur	mixto	100	Granja flotante piloto	Proyecto piloto Golfo Dulce 2023
Marino flotante	Proyecto piloto granja flotante - Isla Venado	Isla Venado, Puntarenas	mixto	100	Granja flotante piloto	INCOPECA
Científico	Universidad de Costa Rica (UCR) - CIMAR	San Pedro, San José	Investigación marina general	150	Laboratorio universitario marino	UCR / CIMAR publicaciones 2022

Científico	Parque Marino del Pacífico - MINAE/UNA	Puntarenas centro	Peces ornamentales y marinos	300	Centro público de divulgación	Parque Marino / MINAE-UNA / INA
Científico	Laboratorio de Acuicultura Marina (LABM) - UNA	Punta Morales, Puntarenas	Peces marinos, moluscos, alimento vivo	2600	Laboratorio marino universitario	LABM-UNA / Parque Marino / FAO
Científico	Centro CRÍA - AquaCorporación	Cañas, Guanacaste	Tilapia (alevines)	200	Hatchery privado	Ficha técnica AquaCorporación

Anexo 6. Hectáreas de industrias dedicadas exclusivamente a la maricultura según comunicación personal con el INCOPESCA.

	Nombre de Proyecto	Dirección	Área	Especie de cultivo	Autorización de cultivo
1	Laboratorio de alevines Marinos, MARTEC.	Pilas de Bejuco Nandayure, Guanacaste	1 ha	Pargo mancha	Suspendida
2	Granja Oceánica de Cultivo. MARTEC.	Distrito de Quepos y Parrita	25 jaulas 6672.5 m ³ .	Pargo Mancha	Suspendida
3	Granja Marina COOPEACUICULTORES	Isla Verano, Golfo de Nicoya. Puntarenas.	1.5 ha	Camarón y Pargo Mancha.	Activa
4	Granja Marina AQUALOR	Isla Cedro, Paquera Puntarenas.	1.5 ha	Camarón y Pargo Mancha.	Activa
5	Granja Marina COOPEDELIMAR	Golfito, Puntarenas	1.5 ha	Camarón y Pargo Mancha	Activa
6	Granja Marina, UTN	Manzanillo, Puntarenas	1.5	Pargo Mancha y ostras.	Pendiente pago
7	Granja Marina MUDECOOP	Manzanillo, Puntarenas	1.5 ha	Camarón, ostras, Pargo mancha, mejillones.	Aprobada

8	Granja cultivo Ostras ASLOPE	Isla Venado, La Florida. Puntarenas	1.5ha	Ostra japonesa.	Activa
9	Oyster seafarm	Punta Cuchillo, Paquera.	1.5 ha	Ostra Japonesa	Aprobada, no activa.
10	Granja Ostras ASOPECUPACHI	Isla de Chira. Puntarenas	1.5 ha	Ostra Japonesa	No
11	Granja de ostras ACUAMAR	Isla Cedros, Paquera	1.5 ha	Ostra Japonesa	En Tramite.
12	Comunidad Marina Los Muñecos	Jobo, La Cruz. Guanacaste . Camarón	1.5 ha	Ostra Japonesa Pargo mancha.	Aprobada, en construcción.
13	Granja de ostras Huertos Marinos	Costa de Pájaros Puntarenas.	1.5 ha	Ostra Japonesa.	Sin Autorización.
14	Granja de ostras Sindicato	Costa de Pájaros. Puntarenas	1.5 ha	Ostra Japonesa	Sin Autorización
15	Granja Ostras Cerro Gordo	Colorado Abangares Guanacaste .	1.5 ha	Ostra Japonesa	Sin Autorización