



**INFORME FINAL**

Convenio de Desempeño 2021:  
Programa Integral de Desarrollo de Acuicultura para  
Pescadores Artesanales y Acuicultores de Pequeña Escala.  
Etapa V.

**SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y EMT / Marzo 2022**

## **INFORME FINAL**

Convenio de Desempeño 2021:  
Programa Integral de Desarrollo de Acuicultura para Pescadores Artesanales y  
Acuicultores de Pequeña Escala. Etapa V.

**SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y EMT / Marzo 2022**

### **REQUIRENTE**

#### **SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y EMPRESAS DE MENOR TAMAÑO**

Subsecretario de Economía y  
Empresas de Menor Tamaño  
**Javiera Constanza Petersen Muga**

### **EJECUTOR**

#### **INSTITUTO DE FOMENTO PESQUERO, IFOP**

Director Ejecutivo  
**Luis Parot Donoso**  
  
Jefe División Investigación en Acuicultura  
**F. Leonardo Guzmán Méndez**

### **JEFE PROGRAMA**

Francisco Cárcamo Vargas

### **AUTORES**

Francisco Cárcamo Vargas  
Luis Henríquez Antipa  
Francisco Galleguillos Foix  
Sandra Saavedra Muñoz  
Denisse Torres Avilés  
Sebastián Cook Alvarado  
Pablo Leal Sandoval  
Yeriko Alanis Villalobos

### **COLABORADORES**

Karla Álvarez Millán  
Daniela Uribe Vargas

### **CONSULTORES**

1. Eduardo Pérez Espinoza
2. Laboratorio de Tecnología en Pesca y Acuicultura  
(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)



## RESUMEN EJECUTIVO

El presente programa tiene como objetivo “Establecer estrategias de desarrollo de Acuicultura de Pequeña Escala en Áreas de Manejo y Explotación de Recursos Bentónicos (AMERB) y concesiones de acuicultura (CCAA) cuyos titulares sean pescadores artesanales y/o acuicultores de pequeña escala”. Para su desarrollo se propone un enfoque de investigación multidimensional (e.g., biológico, social, económico, productivo, ambiental) que se refleja en múltiples actividades y metodologías, para de esta forma, tratar con la complejidad inherente del desarrollo del sistema de acuicultura de pequeña escala (APE) en Chile.

Para el desarrollo del objetivo específico 1 “**Proponer modelos de gestión y producción asociados al desarrollo de la acuicultura de pequeña escala**”, se ejecutaron dos actividades principales: **i)** Análisis bio-económico del modelo de cultivo APE con aprovechamiento de recursos bentónicos (Fase 1); y **ii)** Validación de modelo de gestión y productivo para APE en base a portafolio multi-especie propuesto para la zona sur (Fase 1).

- En esta etapa, el análisis bio-económico del modelo de cultivo APE con aprovechamiento (Fase 1), consistió en la propuesta de un modelo conceptual denominado Modelo Económico–Productivo con Hábitat Emergente (i.e., basado en la existencia de bancos y/o hábitats emergentes asociados a la mitilicultura, descritos y estudiados a partir de la etapa previa del presente programa). Consta de cuatro subsistemas: Subsistema Ambiental, que incluye las principales variables ambientales (físico–químicas) y se conecta con las variables biológicas que son afectadas en el Subsistema Biológico. En el Subsistema Tecnológico se identifica el sistema de cultivo a emplear y todo el sistema de soporte requerido para éste. El Subsistema Económico (o integrado) incluye los principales componentes financieros involucrados tanto en el cultivo suspendido como en el costo asociado a la comunidad bentónica bajo el cultivo. En este mismo submodelo se incluyen los indicadores de desempeño productivo–económico. Se identificaron los parámetros críticos para avanzar en un modelo cuantitativo en etapas posteriores.

- A partir de las propuestas de modelos de gestión y productivo basado en cultivo multi-especies o tipo portafolio desarrolladas en etapas anteriores del programa, durante el año 2021, se inició la validación de éstos. Para ello, se implementó una actividad de acuicultura experimental, previa obtención de los permisos correspondientes, en la CCAA administrada por el Sr. Justo Garcia (bahía Hueihue, Chiloé). Se instaló un experimento con 5 recursos hidrobiológicos: ostión del norte, ostra japonesa, chorito, choro zapato y pelillo. Todos los recursos fueron instalados en un sistema de cultivo suspendido tipo long-line doble. Los recursos ostión del norte y ostra japonesa fueron inicialmente cultivados en pearl-nets (n=3 por cada recurso) a 3 profundidades diferentes (1, 2 y 3 m), con una densidad inicial de 50 individuos/pearl-net. Los recursos chorito y choro zapato fueron cultivados en cuelgas de 3 m de largo (n=3 cuelgas por recurso). El recurso pelillo fue cultivado en cuelgas (n=3) dispuestas verticalmente. A la fecha del presente informe, a excepción del pelillo, los recursos moluscos han crecido satisfactoriamente (~5 meses de cultivo de engorda), pero aún no han alcanzado las respectivas tallas comerciales.



Para el objetivo específico 2 “**Desarrollar cultivos pilotos de pequeña escala en diferentes zonas geográficas del país**”, se implementaron y monitorearon 5 cultivos en 4 sitios de estudios:

- i) Cultivo algal en sistemas de planas de chicorea y pelillo en CCAA Quinchao, administrada por Corporación Municipal de Quinchao para la Educación, Salud y Atención al menor, Comuna de Quinchao, Chiloé, región de Los Lagos.
- ii) Cultivo algal en sistemas de planas de chicorea y pelillo en CCAA (agua y fondo) en bahía Hueihue, Cultivo Marinos Cholche, administrada por el Sr. Justo García, comuna de Ancud, Chiloé, región de Los Lagos.
- iii) Co-cultivos en camillas, de pelillo y ostra japonesa, y pelillo y choro zapato, en CCAA rio Pudeto, administrada por Sindicato de Trabajadores Independientes Cultivadores y Explotadores de algas y recursos bentónicos Pupelde, Chiloé, región de Los Lagos.
- iv) Cultivo multi-especies suspendido (ostra, ostión del norte y huiro flotador) en AMERB Chungungo B, administrada por la Organización Comunitaria de Buzos Mariscadores “Los Castillo”, Caleta Chungungo, región de Coquimbo.
- v) Cultivo de fondo (replacación) de huiro palo en AMERB Chungungo B, administrada por la Organización Comunitaria de Buzos Mariscadores “Los Castillo”, Caleta Chungungo, región de Coquimbo.

- En los sitios de Quinchao y Hueihue se hicieron experimentos para evaluar el efecto de la densidad de siembra y poda (cosecha) sobre el rendimiento productivo algal. A excepción, del cultivo de algas en Hueihue, donde se registraron problemas mecánicos que afectaron los cultivos algales, los desempeños productivos de los cultivos de bivalvos y algas en los sitios del archipiélago de Chiloé presentaron desempeños productivos variables, pero dentro de los rangos reportados en la literatura y en etapas previas del programa. Respecto al efecto de la densidad de siembra, la incorporación de distintas densidades de cultivo de pelillo y chicorea en los sistemas de cultivo tipo planas, permitieron obtener al final del ciclo productivo, biomasa cosechables equivalentes. Respecto a la aplicación de podas, éstas, permitieron obtener biomasa cosechable finales superiores que los controles sin poda.

- Para el sitio Pudeto, se evidencia que la incorporación de organismos filtradores en cultivos estuarinos o de baja profundidad, presentan crecimientos exitosos. De esta forma, los co-cultivos son una real alternativa de diversificación productiva para zonas históricas de mono-cultivos de pelillo, proporcionando, además, servicios ecosistémicos (e.g., biorremediación), que a futuro será necesario cuantificar y valorizar.

- Para el cultivo suspendido en la AMERB Chungungo B, es destacable la transferencia tecnológica e iniciación en APE de algas y bivalvos de esta OPA.

- Para el cultivo de fondo (replacación) de huiro palo (*L. trabeculata*) en la AMERB Chungungo B, se monitoreo la supervivencia y crecimiento de 105 plántulas sembradas en 5 sitios, además de la realización de un estudio comunitario previo y posterior a la siembra. Luego de 60 días, no se encontraron las plántulas. Se discute el tamaño de la plántula y las corrientes en los sitios de adhesión como factores explicativos de mortalidad y/o desprendimiento.

Para el objetivo específico 3 “**Evaluar el efecto del origen y condiciones de cultivo sobre el desempeño fisiológico-productivo de especies claves para el desarrollo de APE**”, se implementaron las siguientes actividades: i) Dos experimentos de co-cultivo (pelillo *A. chilense* con



chorito *M. chilensis*, y chicorea *C. chamissoi* con chorito *M. chilensis*); y **ii)** Determinación del efecto de origen en la concentración de fenoles en cochayuyo *D. incurvata*.

- Los experimentos de co-cultivo consistieron en la medición del desempeño fisiológico-productivo de macroalgas y bivalvos, utilizando como proporciones de cultivo entre macroalga y bivalvo, 1:0, 2:1, 1:1, 1:2 y 0:1. Se observó un Rendimiento Relativo Total (RRT) significativamente  $> 1,0$  en co-cultivos de ambos experimentos, indicando que existe una relación mutuamente positiva en las proporciones iniciales de biomasa de 2:1, 1:1 y 2:1. Además, se observó una clara (pero no significativa) tendencia de que un RRT mayor podría ser obtenido usando una proporción inicial de biomasa de 2:1. En los co-cultivos, las tasas de crecimiento de las macroalgas y los bivalvos no fueron estadísticamente diferentes (excepto pelillo en el experimento 1), pero se observó una tendencia que podría indicar que sufrieron un mayor estímulo en comparación a los mono-cultivos, debido a su interacción metabólica que genera beneficios mutuos al excretar/utilizar de los desechos de cada especie en el medio de cultivo. El análisis de series de reemplazo De Wit (1960) demuestra ser una herramienta consistente y útil para la identificación de proporciones óptimas para el co-cultivo APE.

- Se midió la concentración de fenoles en muestras de cochayuyo de dos localidades de Chiloé, distantes a  $\sim 7$  kilómetros. La concentración de fenoles de *D. incurvata* de Mar Brava fue significativamente mayor a la cuantificada en individuos provenientes de Guabún, indicando que la producción de estas biomoléculas estaría asociada a las condiciones ambientales locales.

Para el objetivo específico 4 “**Evaluar interacciones ambientales de la acuicultura de pequeña escala**”, se ejecutaron las siguientes actividades: **i)** Desarrollo de 3 modelos semicuantitativos con sus respectivos escenarios de estabilidad/inestabilidad basado en la metodología de *Análisis de Loop*, y que representan las diversas interacciones ambientales y flujos que ocurren en 3 casos: *cultivo de macroalgas*, *co-cultivo de mitílidos y macroalgas*, y *re población de huiro palo*; **ii)** Desarrollo de 2 modelos tróficos cuantitativos (iniciales) basados en la metodología propuesta en *Ecopath con Ecosim*, y que representan las diversas interacciones ambientales y flujos tróficos que ocurren en 2 casos: *co-cultivo de mitílidos y macroalgas con banco o hábitat emergente*, y *re población de huiro palo en fondos blanqueados*; **iii)** Monitoreo del efecto de la APE sobre comunidades bentónicas a través de 2 campañas de terreno en 6 sitios de estudio (N Total= 6 sitios, 2 mitiliculturas en 3 escalas productivas); y **iv)** Identificación y descripción de servicios ecosistémicos (SE) asociadas a la APE, realizada principalmente, a través de una revisión bibliográfica, que incluyo también, una revisión de métodos de valoración de SE y la identificación de oportunidades y brechas de aplicación de este marco asociado a la APE en Chile.

- Los 3 modelos semicuantitativos permitieron describir e interpretar interacciones múltiples entre organismos, grupos funcionales, variables abióticas y sociales de un sistema complejo, analizando diferentes escenarios para sugerir alternativas de manejo sostenibles. Para el *cultivo de macroalgas APE* (chicorea) la estrategia para lograr un desarrollo sostenible (i.e., estabilidad local) consiste en mantener un manejo (limpieza de macroalgas e infraestructura de cultivo) continuo sobre el sistema, independiente del tipo de cosecha que el acuicultor decida implementar. Para el *co-cultivo de mitílidos y macroalgas*, los resultados de la modelación indican que éste puede alcanzar estabilidad dentro del ecosistema, y que es posible el aprovechamiento del banco emergente. Pero, se requiere aplicar un enfoque precautorio de conservación para garantizar la función del ecosistema que sustenta tanto al



banco como al cultivo. Estrategias que apunten a mejorar y dirigir la percepción del acuicultor hacia las consecuencias de su actividad ligada al funcionamiento del ecosistema parecen ser claves para evitar prácticas no-sostenibles. Para huir de palo, la *repoblación* en comunidades de fondos blanqueados es factible, siempre y cuando, la acción se realice considerando la incorporación del manejo de otras especies clave como consumidores primarios y secundarios. Esto permitiría la desestabilización del sistema estable de fondo blanqueado.

- Se construyeron 2 modelos tróficos. Inicialmente, se determinaron las respectivas matrices de dietas y grupos funcionales con los organismos identificados en terreno en los sitios de Hueihue (*co-cultivo de mitílidos y macroalgas con banco o hábitat emergente*) y AMERB Chungungo B (*repoblación de huir de palo en fondos blanqueados*), a través de una revisión de literatura de especies o grupos afines. También se determinaron las abundancias y biomásas de los principales especies y grupos. Los modelos iniciales (matriz de dieta), posteriormente serán validados con análisis de contenidos estomacales de muestras obtenidas en terreno, lo que permitirá la simulación de resultados (i.e., indicadores de propiedades macroscópicas del sistema ecológico) y la determinación de la dinámica y la salud del sistema en diferentes escenarios de manejo (e.g., aumento del volumen cultivado).

- Respecto del monitoreo del efecto de la APE sobre comunidades bentónicas, durante el año 2021, se ejecutaron dos campañas (marzo y noviembre) en 6 sitios (i.e., mitiliculturas) según la escala productiva: Micro-escala (1. Canal Quihua, archipiélago de Calbuco; 2. Bahía Hueihue, noreste de la isla de Chiloé); Meso-escala (3. Molulco, estero Compu, Chiloé central; 4. Chalihué, norte de isla Lemuy) y Macro-escala (5. Lingue y 6. La Estancia, ambos en el sector de Rilán, Chiloé central). Se presentan, entre otros, resultados de cobertura del sustrato biogénico, estructura comunitaria epibentónica y de la infauna (e.g., riqueza, riqueza funcional, abundancia, equitatividad), y química del sedimento (materia orgánica total, potencial redox, pH, sulfuros). Mediante análisis uni y multivariados, se han obtenido a la fecha, como principales resultados y conclusiones que: a) la acuicultura de mitílidos tiene la capacidad de generar hábitats biogénicos emergentes que facilitan una estructura comunitaria con mayor número de especies; b) la APE muestra efectos que favorecen una comunidad más diversa en términos específicos y funcionales comparada con cultivos de mayor escala; c) los bancos emergentes en cultivos de mayor escala pueden promover mayor riqueza funcional de invertebrados omnívoros, carnívoros, detritívoros, y a pequeña escala de herbívoros/generalistas y una variedad de carnívoros; y d) algunas especies del banco emergente son de importancia comercial (jaibas, erizo rojo), sin embargo, la prevalencia de especies del mismo grupo podría disminuir la riqueza funcional de otras especies clave, menos abundantes, dentro del ecosistema.

- La revisión de literatura internacional indica que, son 17 los servicios ecosistémicos (SE) que generalmente se describen como proporcionados por la acuicultura. Los servicios más estudiados son los de regulación. Para Chile, los SE asociados a la acuicultura, en cuanto a dimensión, flujos, *trade-offs* y valoración, han sido escasamente estudiados. Sin embargo, es probable que los efectos netos sobre los SE de la APE en Chile sean positivos (más allá del SE de aprovisionamiento), dado principalmente, el tipo de acuicultura (i.e., especies bio-extractoras, acuicultura extensiva) y la escala productiva que la caracterizan. Desde la perspectiva de la creación y modificación de políticas públicas, normativas y regulaciones, un mejor conocimiento de las dinámicas de provisión de SE (incluyendo su valoración), permitiría mantener o fomentar la provisión de éstos a través de la APE (e.g., Pago por Servicios Ecosistémicos).



Para el objetivo específico 5 “**Evaluar diseños de sistemas de cultivos para implementar acuicultura de pequeña escala**”, se desarrollaron las siguientes actividades: **i)** Revisión de diseños y características de los sistemas de cultivos disponibles a nivel nacional para el desarrollo de APE; y **ii)** Propuesta de diseño de sistema de cultivo APE para zona norte y sur, y/o condiciones de mayor exposición.

-Se revisaron y analizaron 11 sistemas y tecnologías de cultivo a nivel nacional e internacional, potencialmente utilizables en APE

-Para la propuesta de diseño, se trabajó en base a un sistema long-line para cultivo de ostión del norte con 100 linternas. Se simularon condiciones hidrodinámicas de alta (boca fiordo Reloncaví, sur de Chile) y baja (Bahía Coquimbo, norte de Chile) energía o exposición sobre el desempeño del sistema de cultivo. Los principales resultados de la simulación muestran que, a menores velocidades de corriente, la acción del oleaje predomina, afectando principalmente en las primeras linternas. A mayores intensidades de corriente y oleaje, las últimas linternas (entre la 50 y 100) poseen mayor desplazamiento respecto a las primeras. Para los resultados de tensiones y desplazamientos se apreció que su variación es sensible a las intensidades de la corriente y el oleaje, por lo tanto, a medida que las condiciones ambientales eran extremas, los desplazamientos y tensiones tienden a ser similares en casi todo el sistema. Respecto a la propuesta de diseño, para el sistema de fondeo se recomienda utilizar muertos másicos mínimos de 6,5 toneladas para la zona sur (mayor energía) y 2,6 toneladas para la zona norte (menor energía) respecto las condiciones hidrodinámicas evaluadas.

El desarrollo del objetivo específico 6 “**Realizar acciones de difusión asociadas al desarrollo de la acuicultura de pequeña escala**”, fue abordado principalmente a través de: **i)** Mantención y actualización de página web APE ([www.sembrandoelmar.cl](http://www.sembrandoelmar.cl)); **ii)** Realización de 2 seminarios de difusión y transferencia APE (1. *Experiencias y Desafíos en el Valor Agregado en prácticas APE*, modalidad on-line vía Google Meet, con asistencia de aproximadamente 30-40 personas; y 2. *Sistemas y tecnologías de cultivo para desarrollar APE*, modalidad on-line vía Google Meet, con asistencia de aproximadamente 60-110 personas); **iii)** Taller de difusión de resultados del Informe Final (modalidad on-line vía Google Meet, con asistencia de aproximadamente 80 personas); y **iv)** Otras actividades de difusión de resultados que incluyeron: participación en entrevistas radiales y televisivas, festival de ciencia escolar, y asistencia a congresos y seminarios científicos.

Es importante indicar que si bien el país aún se encuentra con restricciones de movimiento y agrupación derivadas de la Pandemia COVID-19, la afectación, en cuanto a la ejecución de las actividades planificadas fue significativamente menor que en etapas anteriores.

En resumen, el presente informe final da cuenta de las actividades desarrolladas y los resultados obtenidos desde enero del 2021 a fines de marzo del 2022.



## ÍNDICE GENERAL

<b>RESUMEN EJECUTIVO</b> .....	<b>I</b>
<b>ÍNDICE GENERAL</b> .....	<b>VI</b>
<b>1. ANTECEDENTES</b> .....	<b>9</b>
<b>2. OBJETIVO GENERAL</b> .....	<b>12</b>
<b>3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	<b>12</b>
<b>4. METODOLOGÍA</b> .....	<b>13</b>
4.1. Análisis bio-económico de modelo de cultivo APE con aprovechamiento de recursos bentónicos (Fase 1) .....	13
4.2. Validación de modelo de gestión y productivo para APE en base a portafolio multi-especie propuesto para la zona sur (Fase 1) .....	13
4.3. Obtención de semillas/plántulas de macroalgas e invertebrados para cultivos multi-especies	14
4.4. Implementación y seguimiento de cultivos pilotos de macroalgas y multi-especies en el norte y sur de Chile .....	14
4.5. Evaluación del desempeño fisiológico-productivo de macroalgas y bivalvos co-cultivados (Fase 3) .....	18
4.6. Determinación del efecto del origen sobre la calidad de la macroalga (Fase 2) .....	18
4.7. Validación de modelos tróficos para evaluar impactos ecosistémicos de acuicultura de macroalgas e invertebrados.....	19
4.8. Monitoreo del efecto de la APE sobre comunidades bentónicas .....	21
4.9. Identificación de servicios ecosistémicos asociadas a la APE.....	22
4.10. Revisión de diseños y características de los sistemas de cultivos disponibles a nivel nacional para el desarrollo de APE .....	22
4.11. Propuesta de diseño de sistema de cultivo APE para zona norte y sur, y/o condiciones de mayor exposición (Fase 1).....	22
4.12. Mantenimiento y actualización de página web APE.....	24
4.13. Realización de seminarios de difusión y transferencia APE .....	24
<b>5. RESULTADOS</b> .....	<b>25</b>
5.1. Análisis bio-económico de modelo de cultivo APE con aprovechamiento de recursos bentónicos (Fase 1) .....	25
5.2. Validación de modelo de gestión y productivo para APE en base a portafolio multi-especie propuesto para la zona sur (Fase 1) .....	34
5.3. Obtención de semillas/plántulas de macroalgas e invertebrados para cultivos multi-especies	40
5.4. Implementación y seguimiento de cultivos pilotos de macroalgas y multi-especies en el norte y sur de Chile .....	40
5.5. Evaluación del desempeño fisiológico-productivo de macroalgas y bivalvos co-cultivados (Fase 3) .....	87



5.6.	Determinaci3n del efecto del origen sobre la calidad de la macroalga (Fase 2).....	99
5.7.	Validaci3n de modelos tr3ficos para evaluar impactos ecosist3micos de acuicultura de macroalgas e invertebrados.....	101
5.8.	Monitoreo del efecto de la APE sobre comunidades bent3nicas.....	144
5.9.	Identificaci3n de servicios ecosist3micos asociadas a la APE.....	167
5.10.	Revisi3n de dise1os y caracteristicas de los sistemas de cultivos disponibles a nivel nacional para el desarrollo de APE.....	187
5.11.	Propuesta de dise1o de sistema de cultivo APE para zona norte y sur, y/o condiciones de mayor exposici3n (Fase 1).....	192
5.12.	Mantenci3n y actualizaci3n de p3gina web APE.....	217
5.13.	Realizaci3n de seminarios de difusi3n y transferencia APE.....	220
5.14.	Actividades generales.....	224
<b>6.</b>	<b>DISCUSI3N</b> .....	<b>226</b>
6.1.	An3lisis bio-econ3mico de modelo de cultivo APE con aprovechamiento de recursos bent3nicos (Fase 1).....	226
6.2.	Validaci3n de modelo de gesti3n y productivo para APE en base a portafolio multi-especie propuesto para la zona sur (Fase 1).....	228
6.3.	Desempe1o productivo y ambiental de los cultivos.....	229
6.4.	Evaluaci3n del desempe1o fisiol3gico-productivo de macroalgas y bivalvos co-cultivados.....	233
6.5.	Fenoles solubles e insolubles en <i>D. incurvata</i> .....	234
6.6.	Validaci3n de modelos tr3ficos para evaluar impactos ecosist3micos de acuicultura de macroalgas e invertebrados.....	235
6.7.	Monitoreo del efecto de la APE sobre comunidades bent3nicas.....	240
6.8.	APE y servicios ecosist3micos.....	243
6.9.	Propuesta de dise1o de sistema de cultivo APE para zona norte y sur, y/o condiciones de mayor exposici3n.....	244
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>246</b>
7.1.	An3lisis bio-econ3mico de modelo de cultivo APE con aprovechamiento de recursos bent3nicos (Fase 1).....	246
7.2.	Validaci3n de modelo de gesti3n y productivo para APE en base a portafolio multi-especie propuesto para la zona sur (Fase 1).....	246
7.3.	Desempe1o productivo y ambiental de los cultivos.....	246
7.4.	Evaluaci3n del desempe1o fisiol3gico-productivo de macroalgas y bivalvos co-cultivados.....	247
7.5.	Fenoles solubles e insolubles en <i>D. incurvata</i> .....	247
7.6.	Modelos para evaluar impactos ecosist3micos de acuicultura de macroalgas e invertebrados.....	247
7.7.	Monitoreo del efecto de la APE sobre comunidades bent3nicas.....	249
7.8.	APE y servicios ecosist3micos.....	249
7.9.	Propuesta de dise1o de sistema de cultivo APE en condiciones de mayor exposici3n.....	249
<b>8.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGR3FICAS</b> .....	<b>251</b>



## **ANEXOS**

- Anexo 1.** Documentos asociados a gesti3n de permisos APE en sitios de estudio
- Anexo 2.** Documentos Consultor3a "Evaluaci3n de dise1os de sistemas de cultivos para implementar acuicultura de peque1a escala"
- Anexo 3.** Documentos asociados a las actividades de difusi3n y divulgaci3n del Programa
- Anexo 4.** Contenido de Base de Datos del Programa



## 1. ANTECEDENTES

---

En la actualidad, la acuicultura chilena es dominada por la producción de salmónidos y en menor porcentaje de mitílidos y pelillo. Iniciativas públicas actuales para el desarrollo de la acuicultura nacional promueven y fomentan el desarrollo de Acuicultura de Pequeña Escala (APE) y la diversificación de las especies cultivadas, con la subsecuente búsqueda de nuevos productos y nichos de mercados. Se espera que el impulso de este tipo de acciones permita disminuir la presión extractiva sobre los recursos hidrobiológicos actualmente explotados, incorporando alternativas de diversificación productiva para las comunidades costeras, pudiendo mejorar sus ingresos y calidad de vida. Mundialmente, se ha reconocido que el desarrollo de la acuicultura de especies nativas es una buena alternativa para la diversificación de productos regionales y uso eficiente de los recursos disponibles (Ross et al. 2008). Por otra parte, la FAO declaró el 2022 como el Año Internacional de la Pesca y la Acuicultura Artesanales (AIPA 2022). Adicionalmente, se ha sugerido que la diversificación de la acuicultura debe considerar la incorporación de especies con diferentes niveles tróficos y funciones ecológicas diferentes para balancear el flujo de materia y energía en sistemas costeros (Naylor et al. 2000, Buschmann et al. 2014) y diferentes sistemas de cultivos y especies para dar mayor resiliencia al sistema de global de alimentación (Troell et al. 2014).

Por su parte, la acuicultura de macroalgas ha alcanzado preponderancia mundial respecto a las oportunidades de desarrollo económico y ambiental que ofrecería su implementación, fundamentado principalmente en los diversos usos y propiedades de éstas, entre las que destacan su uso como alimento humano y alimento de otras especies en cultivo, producción de ficoloides utilizados en la industria cosmética, farmacéutica y alimenticia, producción de biocombustibles, usos en acuicultura integrada e iniciativas de biorremediación de ambientes, captura de carbono, entre otros (Neori et al. 2007, Vásquez et al. 2014, Radulovich et al. 2015, Moreira & Pires 2016).

La acuicultura de macroalgas y la APE están siendo promovida como una alternativa productiva y de diversificación de la acuicultura chilena, y también como una alternativa o complemento al desarrollo económico de comunidades de pescadores artesanales en un escenario de sobre-explotación o agotamiento de las praderas y bancos naturales. A mediano plazo se espera que los impactos productivos aumenten significativamente. Desde el punto de vista normativo existen dos instrumentos que regulan y promueven el desarrollo de la APE: el Decreto N°96 de 2015 que regula las actividades de acuicultura en Áreas de Manejo y Explotación de Recursos Bentónicos (AMERB), y la Ley de Bonificación para el repoblamiento y cultivo de algas. Otras normativas se encuentran en preparación como el reglamento APE, que fortalecerá y facilitará el desarrollo de nuevas iniciativas productivas. También se puede destacar el impulso esperado a través del financiamiento de iniciativas por parte del Instituto Nacional de Desarrollo Sustentable de la Pesca Artesanal y de la Acuicultura de Pequeña Escala (INDESPA), en reciente implementación.

Por otro lado, para diversas especies de macroalgas nativas se han desarrollado tecnologías de cultivo (por ejemplo pelillo *A. chilense*, las lugas *Sarcothalia crispata* y *Gigartina skottsbergii*, los huiros *Lessonia trabeculata* y *Macrocystis pyrifera*, luche *Pyropia sp.*, chicorea de mar *Chondracanthus chamissoi*), lo que junto a la disponibilidad de abastecimiento de semillas de invertebrados como



mitílidos y ostreidos, permiten implementar cultivos experimentales y pilotos y evaluar su desempeño productivo, económico y ambiental.

Uno de los nichos potenciales para la implementación de la acuicultura de macroalgas y la APE lo constituyen las AMERB, las concesiones de acuicultura (CCAA) otorgadas a pescadores artesanales y acuicultores de pequeña escala, Espacios Costeros Marinos para Pueblos Originarios (ECMPO) y caletas pesqueras, otorgando una superficie potencial cultivable de más de cien mil hectáreas, sin embargo, para pasar de lo potencial a lo factible, hay que considerar y profundizar en el conocimiento de una serie de factores para aumentar las probabilidades de éxito, como por ejemplo:

- Características de sistemas de cultivo, crecimiento y productividad es dependiente de la especie a cultivar y de las características ambientales que imponen diversas zonas geográficas.
- Factibilidad del escalamiento a nivel masivo de la producción de plántulas de macroalgas en invernadero o hatchery.
- Realización de estudios que integren aspectos biológicos, tecnológicos, sociales y económicos para evaluar factibilidad de cultivos a escalas comerciales, dado que éstos son escasos para especies chilenas lo que dificulta la decisión respecto a la inversión (Zuniga-Jara et al. 2016).
- La práctica de la acuicultura requiere de procesos de aprendizaje, capacitación y apropiación tecnológica de parte de los pescadores artesanales y acuicultores de pequeña escala que posibiliten su desarrollo como actividad productiva (Rebours et al. 2014).
- La acuicultura podrá abarcar todas o alguna(s) fases del cultivo (e.g. producción en hatchery hasta crecimiento en mar) lo que estará asociado a factibilidad técnico-económica y a ciertos niveles de aprendizaje y apropiación tecnológica por parte de los pescadores artesanales y acuicultores de pequeña escala.
- El desarrollo de la acuicultura debe considerar el capital humano (por ejemplo, trabajo colaborativo, asociatividad, redes) y conocimiento tradicional existente en las organizaciones que administran las AMERB y en los titulares de CCAA.
- La acuicultura de algas debe dar valor agregado a sus productos o explorar nuevos nichos de mercado (Hafting et al. 2015).
- La posibilidad de cultivar especies de distintos niveles tróficos (por ejemplo, cultivos integrados, cultivos multi-especies, policultivos, co-cultivos) como una aproximación para rentabilizar cultivos y/o mitigación ambiental (Chopin 2006, Xiao et al. 2017).
- El desarrollo de la APE será un proceso de mediano a largo plazo que requerirá seguimiento y apoyo estatal para transformarse en una actividad de relevancia para acuicultores en AMERB y CCAA.

Dado el contexto anterior, es de alta relevancia contar con experiencias pilotos y actividades de monitoreo y seguimiento que permitan implementar, evaluar y corregir el desarrollo de la APE en Chile.

La acuicultura de algas no existe como una actividad consolidada que permita diversificar la acuicultura nacional e incorporar al sector pesquero artesanal y pequeños acuicultores. El Decreto N°96 que regula las actividades de acuicultura en Áreas de Manejo y Explotación de Recursos Bentónicos (AMERB), la Ley de Bonificación para el Repoblamiento y Cultivo de Algas, y el futuro reglamento APE constituyen instancias para promover y facilitar el desarrollo de la APE. Es importante destacar que para los tres primeros años de funcionamiento de la Ley de Bonificación (i.e., 2017-2019), se han



presentado y aprobado principalmente iniciativas para cultivo de fondo de pelillo *A. chilense* (<http://www.subpesca.cl>).

El presente programa en su Etapa V, se desarrolla orientado por el marco que otorgan las instancias anteriormente mencionadas, adicionalmente, se agregan nuevos objetivos y actividades en los ámbitos del mejoramiento productivo de cultivos de pequeña escala y la evaluación de interacciones ambientales de la APE, entre otros, que permiten una mejor comprensión y proyección de su desarrollo en Chile, así como apoyar la toma de decisión de la institucionalidad en términos de fomento y regulación ambiental.



## **2. OBJETIVO GENERAL**

---

Establecer estrategias de desarrollo de Acuicultura de Pequeña Escala en Áreas de Manejo y Explotación de Recursos Bentónicos (AMERB) y concesiones de acuicultura (CCAA) cuyos titulares sean pescadores artesanales y/o acuicultores de pequeña escala.

## **3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

---

1. Proponer modelos de gestión y producción asociados al desarrollo de la acuicultura de pequeña escala.
2. Desarrollar cultivos pilotos de pequeña escala en diferentes zonas geográficas del país.
3. Evaluar el efecto del origen y condiciones de cultivo sobre el desempeño fisiológico-productivo de especies claves para el desarrollo de APE.
4. Evaluar interacciones ambientales de la acuicultura de pequeña escala.
5. Evaluar diseños de sistemas de cultivos para implementar acuicultura de pequeña escala.
6. Realizar acciones de difusión asociadas al desarrollo de la acuicultura de pequeña escala.



## 4. METODOLOGÍA

---

La metodología a utilizar se detalla de acuerdo a los objetivos específicos y actividades establecidas:

**Objetivo específico 1:** *Proponer modelos de gestión y producción asociados al desarrollo de la acuicultura de pequeña escala.*

### 4.1. Análisis bio-económico de modelo de cultivo APE con aprovechamiento de recursos bentónicos (Fase 1)

Esta actividad se desarrollará considerando el enfoque metodológico general para modelación y análisis bio-económico aplicado en las etapas anteriores (Cárcamo et al. 2020). Considerando que el modelo productivo de cultivo APE con aprovechamiento de recursos bentónicos es un concepto nuevo (recientemente incluido en propuesta de Reglamento APE), que no existe mayor información de su desempeño productivo y ambiental, y que el estudio de su dinámica se ha iniciado recién en la cuarta etapa del programa, la información disponible para modelación de escenarios de manejo y productivos es aún escasa. Por lo tanto, en la presente etapa, se desarrollará un modelo bio-económico conceptual que contendrá los sub-modelos: biológico, tecnológico, económico y ambiental del sistema, las relaciones entre variables de los sub-modelos, y los parámetros requeridos para la posterior modelación de escenarios de manejo y explotación (e.g., aprovechamiento del 10 % de la cosecha del centro según nuevo reglamento APE). Dicho modelo se construirá incorporando resultados de modelos bio-económicos mono y multi-especies desarrollados en etapas anteriores del programa, y la información generada a partir del desarrollo del objetivo 4.

### 4.2. Validación de modelo de gestión y productivo para APE en base a portafolio multi-especie propuesto para la zona sur (Fase 1)

El desarrollo de esta actividad considera la puesta a prueba del desempeño productivo de especies de interés para la APE en la Región de los Lagos, tomando como referencia las propuestas de cultivo multi-especies APE desarrolladas en la Etapa III (Cárcamo et al. 2020). En base un esquema tipo portafolio, se desarrollarán siembras y cosechas sucesivas de 4-5 especies, incluyendo macroalgas e invertebrados, a fin de evaluar empíricamente la factibilidad de poder gestionar dentro de al menos un año calendario el crecimiento, cosecha y re-siembra de más de un recurso de interés comercial dentro de una CCAA o AMERB. Dada la factibilidad de realizar cultivos multi-especies (e.g., disponibilidad de permisos y operatividad), esta experiencia se realizará en la CCAA de Cultivo Marinos Cholche, administrada por el Sr. Justo García, reconocido acuicultor nacional. La selección de especies en cultivo será consensuada entre este último y el equipo técnico, considerando las especies con mayor potencial de desarrollo para APE (**Tabla 1**). Los parámetros de crecimiento y productividad de macroalgas e invertebrados serán los mismos que se consideran en la actividad del objetivo específico 2. Dada los períodos de crecimiento requeridos para alcanzar tallas comerciales, sobre todo de invertebrados, esta actividad se mantendrá en al menos una etapa sucesiva del Programa.



**Objetivo específico 2:** *Desarrollar cultivos pilotos de pequeña escala en diferentes zonas geográficas del país.*

#### **4.3. Obtención de semillas/plántulas de macroalgas e invertebrados para cultivos multi-especies**

Plántulas de macroalgas y semillas de invertebrados serán obtenidas desde cultivo en hatchery mediante producción propia (Centro Experimental Hueihue) o mediante compra a proveedores externos autorizados, y de acuerdo a protocolos de producción vigentes. Especímenes serán utilizados para implementación de experiencias de cultivos suspendidos y de fondo (ver actividades siguientes).

#### **4.4. Implementación y seguimiento de cultivos pilotos de macroalgas y multi-especies en el norte y sur de Chile**

Considerando que el cultivo simultáneo de especies de distintos niveles tróficos puede mejorar el desempeño de la APE, en esta etapa se continuará evaluando el desempeño productivo de diversas configuraciones de co-cultivos y cultivos multi-especies. Cultivos experimentales que se han iniciado durante el período 2019-2020, se continuarán evaluando en nuevos ciclos productivos, y además, se implementarán nuevas configuraciones de combinaciones de especies en cultivo en los siguientes 4 sitios pilotos, previa obtención/actualización de los permisos sectoriales correspondientes:

- CCAA (agua y fondo) en bahía Hueihue, Cultivo Marinos Cholche, administrada por el Sr. Justo García, comuna de Ancud, Chiloé, región de Los Lagos.
- AMERB Chungungo B, cuyo titular es la Organización Comunitaria de Buzos Mariscadores “Los Castillo”, Caleta Chungungo, comuna de La Higuera, región de Coquimbo.
- CCAA (agua y fondo) en río Pudeto, cuyo titular es el Sindicato de Trabajadores Independientes Cultivadores y Explotadores de algas y recursos bentónicos Pupelde, Chiloé, región de Los Lagos.
- CCAA (agua y fondo) en estero Quinchao, cuyo titular es la Corporación Municipal de Quinchao para la Educación, Salud y Atención al Menor, Comuna de Quinchao, Chiloé, región de Los Lagos.

##### **4.4.1. Configuración de co-cultivos y cultivos multi-especies**

Para la presente etapa del programa, la selección de especies a cultivar y sus proporciones (i.e., configuración del cultivo) será discutida y definida junto a las OPA o acuicultores, considerando como portafolio de especies a seleccionar, las que en la actualidad cuentan con un desarrollo tecnológico-productivo que permite una certeza relativa de suministro de semillas o plántulas (**Tabla 1**). Independiente de lo anterior, en la **Tabla 2** se presentan las propuestas iniciales de configuraciones de cultivo que se propondrán a las OPA para implementar durante el año 2021.



**Tabla 1.**  
Listado de especies potenciales de incorporar en cultivos multi-especies.

Grupo	Especie (nombre común)	Tipo especie
Mitilidos	<i>Aulacomya atra</i> (Cholga)	extractiva orgánica
Mitilidos	<i>Mytilus chilensis</i> (Chorito)	extractiva orgánica
Mitilidos	<i>Choromytilus chorus</i> (Choro zapato)	extractiva orgánica
Pectínidos	<i>Argopecten purpuratus</i> (Ostión del Norte)	extractiva orgánica
Ostreidos	<i>Tiostrea chilensis</i> (Ostra chilena)	extractiva orgánica
Ostreidos	<i>Crassostrea gigas</i> (Ostra japonesa o del pacífico)	extractiva orgánica
Tunicados	<i>Pyura chilensis</i> (Piure)	extractiva orgánica
Equinodermos	<i>Loxechinus albus</i> (Erizo)	extractiva orgánica
Macroalgas	<i>Macrocystis pyrifera</i> (Huiro flotador)	extractiva inorgánica
Macroalgas	<i>Lessonia trabeculata</i> (Huiro palo)	extractiva inorgánica
Macroalgas	<i>Sarcothalia crispata</i> (Luga negra)	extractiva inorgánica
Macroalgas	<i>Gigartina skottsbergii</i> (Luga roja)	extractiva inorgánica
Macroalgas	<i>Agarophyton chilense</i> (Pelillo)	extractiva inorgánica
Macroalgas	<i>Chondracanthus chamissoi</i> (Chicorea de mar)	extractiva inorgánica
Macroalgas	<i>Durvillaea incurvata</i> (cochayuyo)	extractiva inorgánica
Macroalgas	<i>Pyropia</i> sp. (luche)	extractiva inorgánica

**Tabla 2.**  
Configuraciones de co-cultivos y cultivos multi-especies según sitio de estudio.

Sitio Estudio	Tipo Cultivo	Macroalgas	Invertebrados
CCAA Hueihue	-Multi-especies suspendido en plansa*	Chicorea, pelillo	
AMERB Chungungo	-Multi-especies suspendido en long-lines**	Huiro	Ostión, ostra japonesa
CCAA río Pudeto	-Co-cultivo de fondo en camillas	Pelillo	Ostra japonesa, choro zapato
CCAA Quinchao	-Multi-especies suspendido en plansa*	Chicorea, pelillo	

\* En este sitio y cultivo se evaluará el efecto de la densidad de siembra y/o régimen de cosecha.

\*\*Este cultivo se implementará asociado a la etapa IV del Programa, y previa aprobación del permiso correspondiente. Por lo tanto, en la presente etapa se procederá con su monitoreo.

#### 4.4.2. Monitoreo del desempeño productivo y ambiental

El crecimiento de macroalgas e invertebrados en cultivos será monitoreado mensualmente y hasta alcanzar talla comercial según la especie. Muestras representativas serán obtenidas desde cada uno de los cultivos y de cada una de las especies cultivadas. Para macroalgas, muestras serán extraídas para calcular biomasa  $m^{-1}$  lineal (e.g., cultivo en long-lines o plansa). Se calculará la tasa de crecimiento standard relativa (i.e.,  $rSGR = ((Ln \text{ peso}_{\text{final}} - Ln \text{ peso}_{\text{inicial}}) / (t_{\text{inicial}} - t_{\text{final}}))$ ) y cuantificación de epibiontes (g peso húmedo  $m^{-1}$  lineal). Para invertebrados, se estimará crecimiento en longitud y

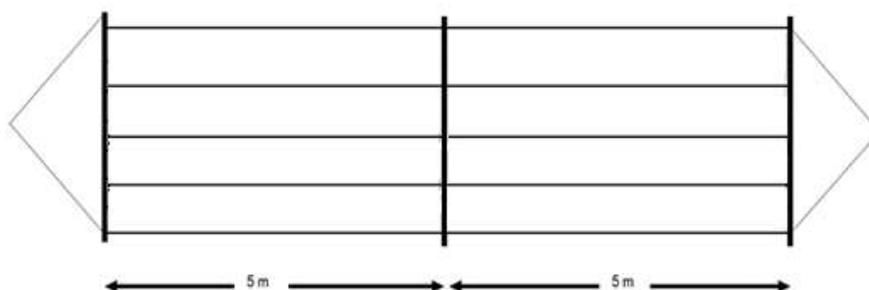


peso, 3ndice de condici3n como:  $IC \text{ o } K = Pfc/Pv \times 100$ , donde Pfc es el peso fresco de la carne y Pv es el peso de las valvas. Adem3s, se determinar3 el 3ndice de rendimiento productivo como:  $IRP = (Pfc/Pt) \times 100$ , donde Pt es el peso total del individuo. Para el caso de ostra japonesa, choro zapato y ostiones se estimar3 mortalidad. En el caso de los bivalvos cultivados en el AMERB Chungungo B, se realizar3 un seguimiento mensual de 6 pisos, con el fin de determinar el crecimiento en longitud de las valvas, biomasa total y mortalidad del piso.

En todos los sitios de cultivo, se instalar3n data loggers para realizar mediciones continuas de luz y temperatura superficial (HOBO Onset Pendant Temp/light, 64k), conductividad (HOBO Onset U24-002-C) y ox3geno disuelto (HOBO Onset U26-001). Adicionalmente, se obtendr3n muestras de agua para el an3lisis de nutrientes (nitratos totales y fosfatos). Peri3dicamente y junto a pescadores y/o acuicultores se realizar3 acompa1amiento y supervisi3n en la mantenci3n de los cultivos.

#### 4.4.3. Efecto de la densidad de siembra

En el sitio Quinchao se determinar3 el efecto de dos densidades de siembra (alta y baja) sobre la productividad de pelillo y chicorea de mar. Para cada especie y en cada sitio, se utilizar3 como sistema de cultivo, un sistema de planzas de 50 m compuesto de 10 unidades de planza de 5 m de longitud x 1 m de ancho (**Figura 1**). A su vez, cada unidad del sistema estar3 compuesta por 5 l3neas, las que ser3n sembradas con dos densidades de macroalgas. Las l3neas con alta y baja densidad de siembra dentro de cada unidad de planza (5 m) ser3n ubicadas siguiendo un dise1o "aleatorio" de manera que cada unidad de planza tendr3 l3neas con ambas densidades a lo largo de los 50 m del sistema de cultivo. Este arreglo permitir3 determinar efectos aleatorios de borde que puedan aumentar la variabilidad de las mediciones. Por lo tanto, cada l3nea sembrada dentro de cada unidad de planza ser3 tratada como una muestra independiente. Mensualmente, se realizar3n mediciones seg3n lo indicado en la secci3n 4.4.2. Las mediciones mensuales ser3n llevadas a cabo hasta que la tasa de crecimiento en cada monocultivo tienda a cero, previa revisi3n e interpretaci3n de la tasa de crecimiento de los datos colectado de terreno. La producci3n total final de ambas densidades ser3 medida como la extrapolaci3n final del peso h3medo promedio ( $\pm$  SD) de ambas densidades en 100 m de cultivo tipo planza para cada especie y sitio de cultivo. Las potenciales diferencias entre densidades, especies y sitios ser3n medidas a trav3s de An3lisis de Varianza del peso h3medo m3ximo de ambas densidades con el factor densidad como factor fijo y sitio como factor aleatorio.



**Figura 1.** Esquema de la vista superior del sistema de planzas (2 unidades) para cultivo de macroalgas.



#### 4.4.4. Efecto del régimen de cosecha

Para evaluar el efecto de cosechas repetidas (régimen de cosecha), se determinará un tiempo óptimo/viable de cosecha, previo análisis de datos de crecimiento standard relativo (SGR en etapas anteriores del Programa). Con este intervalo de tiempo como referencia, se realizarán cosechas o raleos repetidos para evaluar la capacidad de crecimiento de pelillo y chicorea de mar en sistemas de cultivo.

En el sitio Quinchao, se implementará un sistema de cultivo tipo planza de características similares al anteriormente descrito (sección 5.2.2.3), donde se evaluará el efecto de dos regímenes de cosecha. La longitud del sistema será de 30 m, compuesto por 3 unidades de pelillo (15 m) y 3 unidades de chicorea (15 m). Una unidad de planza compuesta de 5 líneas de 5 m de longitud será cosechada con una Frecuencia 1, mientras que, una segunda unidad de planza será cosechada con una Frecuencia 2, registrando en ambas y en cada ocasión, el peso húmedo promedio ( $\pm$  SD). Esta operación será repetida para ambas especies en cultivo. Finalmente, una unidad de planza de cada especie será evaluada mensualmente sin cosecha y utilizada como control, según lo indicado en la sección 4.4.2. El crecimiento sucesivo será evaluado contra el crecimiento continuo del control, comparando la biomasa total producida al final del periodo de cultivo. Las potenciales diferencias entre regímenes de cosecha serán medidas a través de Análisis de Varianza.

Todos los datos obtenidos desde los cultivos pilotos permitirán:

- Proporcionar datos para corregir/ajustar modelos bio-económicos
- Medir potenciales efectos sinérgicos de diferentes especies y sitios de cultivo
- Identificar relaciones estadísticas entre variables ambientales y productivas

#### 4.4.5. Monitoreo de cultivo de fondo de algas pardas

Un cultivo de fondo de huiro palo (*L. trabeculata*) se implementó en el AMERB de Chungungo B, asociado a la etapa IV del Programa, y previa aprobación del permiso correspondiente. Por lo tanto, en la presente etapa se procedió con su monitoreo.

Huiro palo ha sido una de las especies objetivo más estudiadas por su importancia ecológica y económica en Chile. Sus características únicas (plantas de aproximadamente 2 m que forman poblaciones perennes en el submareal, crecimiento lento y larga vida útil) lo han convertido en una de las algas más explotadas en el país para la producción de alginatos y alimento para cultivos de abalón (Westermeier et al. 2017). Su importancia ecológica no solo radica en que puede constituir la base de cadenas tróficas bentónicas, sino porque además constituyen hábitat y refugio, zonas de reproducción, asentamiento larval y reclutamiento de juveniles de numerosas especies de invertebrados y peces (Edding et al. 1993, Vásquez & Vega 2005, Villegas et al. 2008, Uribe et al. 2015, Stotz et al. 2016), albergando otras especies de importancia económica y social (e.g., lapas, loco, erizos, peces de roca) (Vásquez et al. 2008). En conjunto con otras especies de algas pardas forman parte clave de las economías costeras de la zona norte de Chile (Vásquez & Vega 2005). En el informe del Estudio de Situación Base realizado en el año 2000 del área de manejo Chungungo B, se señala la presencia de una comunidad bentónica de huiro palo que hoy ya no existe por efectos antrópicos.



Durante la segunda etapa del Programa (2018-19) se realizó un experimento de pequeña escala de adhesión de plántulas de huairo palo con resultados positivos en cuanto a supervivencia y crecimiento, En la IV etapa del Programa se inició un cultivo de fondo mediante translocación de ~ 100plántulas desde la AMERB de Chañaral de Aceituno. Esta actividad consistió en la selección de 5 sectores en los cuales se adhirieron ~ 20 plántulas. En la presente etapa (2021-22) se realizó el seguimiento, lo que consistió en el conteo y tamaño de esporofitos presentes. Adicionalmente, se evaluó la recuperación de hábitat, midiendo cobertura de algas bajo el dosel (%) y evaluación de comunidades del sitio antes y después de la acción de siembra.

**Objetivo específico 3:** *Evaluar el efecto del origen y condiciones de cultivo sobre el desempeño fisiológico-productivo de especies claves para el desarrollo de APE.*

#### **4.5. Evaluación del desempeño fisiológico-productivo de macroalgas y bivalvos co-cultivados (Fase 3)**

Macroalgas y bivalvos podrían beneficiarse mutuamente al ser co-cultivadas (Abreu et al. 2009). Macroalgas podrían beneficiar a los bivalvos ya que utilizan CO<sup>2</sup> y liberan O<sup>2</sup> al medio durante la fotosíntesis (Krause-Jensen & Duarte 2016). Además, al utilizar CO<sup>2</sup>, las macroalgas aumentan el pH del agua de mar, generando un refugio de protección para organismos calcificadores expuestos a reducciones de pH del agua de mar (Hofmann et al. 2011, Cornwall et al. 2013). Además de liberar CO<sup>2</sup> durante la respiración, los bivalvos excretan nitrógeno durante el proceso de alimentación, generando condiciones favorables (aumento de CO<sup>2</sup> y nutrientes) para el crecimiento de las macroalgas (Buschmann, Troell, et al. 2001, Xiao et al. 2017). Sin embargo, esta posible relación beneficiosa entre estos organismos es necesaria evaluarla en laboratorio para determinar su existencia.

En la tercera fase de esta actividad, se evaluarán el desempeño fisiológico de las macroalgas *C. chamissoi* y *A. chilense* y el molusco bivalvo *M. chilensis* co-cultivados en distintas proporciones de biomasa por un periodo de 30 días. Las proporciones de cultivo entre macroalga y bivalvo serán 1:0, 2:1, 1:1, 1:2 y 0:1. Se monitorearán procesos fisiológicos (e.g., crecimiento, fotosíntesis, respiración) bajo las distintas proporciones de cultivo en laboratorio.

Con el desarrollo de estos experimentos, se espera identificar la proporción óptima de co-cultivo entre algas y bivalvos para ser aplicada en el desarrollo de cultivos multi-especies a pequeña escala.

#### **4.6. Determinación del efecto del origen sobre la calidad de la macroalga (Fase 2)**

A nivel mundial, la industria de compuestos químicos originados desde macroalgas está en constante crecimiento (Buschmann, Hernández-González, et al. 2008). Las macroalgas pardas acumulan compuestos fenólicos (e.g., florotaninos) los cuales pueden ser usados como ingredientes funcionales en alimentos con beneficios para la salud humana tales como anti-inflamatorio, anti-diabetes, anti-hipertensión (Santos et al. 2019). Además de ser utilizados como antioxidantes en la industria de la



alimentación, los compuestos fenólicos tienen el potencial de combatir el sobrepeso debido a que mejoran la digestión de grasas (Santos et al. 2019). El creciente interés por estos compuestos químicos ha llevado la búsqueda de especies y/o cepas de macroalgas que contengan compuestos fenólicos de alta calidad. Las macroalgas, incluyendo a las pardas, están adaptadas a las condiciones ambientales del lugar en el que habitan (Buschmann et al. 2004, 2006). En este contexto, distintas poblaciones de una misma especie pueden presentar diferencias genéticas en algún proceso fisiológico relacionado a producción (e.g., crecimiento, composición química). Por lo tanto, es esperable que diferentes poblaciones de una misma especie de macroalga produzcan compuestos químicos que difieren en calidad. En esta actividad, se evaluará la concentración de compuestos fenólicos del cochayuyo *D. incurvata* provenientes de diferentes poblaciones. Para esto se medirá el contenido de compuestos fenólicos en dos poblaciones, a través de la metodología descrita en la literatura (Huovinen et al. 2010, Santos et al. 2019).

**Objetivo específico 4:** *Evaluar interacciones ambientales de la acuicultura de pequeña escala.*

#### **4.7. Validación de modelos tróficos para evaluar impactos ecosistémicos de acuicultura de macroalgas e invertebrados**

Los modelos desarrollados en la tercera y cuarta etapa del programa fueron representados por las relaciones e interacciones ecosistémicas de la APE de algas e invertebrados (e.g., biomasa, tasa de producción, consumo, asimilación, mortalidad, eficiencia ecotrófica, cosecha e interacciones tróficas) con la aproximación de *Loop Análisis* (Dambacher et al. 2009, Marzloff et al. 2011). Tales modelos fueron construidos en base a datos obtenidos desde sitios de estudio del presente programa (Objetivo 2), conocimiento de expertos y revisión de información científica, describiendo tres casos o modelos ecosistémicos de estudio: i) cultivo de macroalgas, ii) cultivo multi-especies, y iii) cultivo de fondo de huiro palo en fondo blanqueado. En la presente etapa, los criterios múltiples de estabilidad ambiental de los modelos semicuantitativos construidos en las etapas anteriores son determinados y, posteriormente, validados tróficamente con datos de campañas de terreno. Para el caso del cultivo de fondo, su validación y obtención de datos de terreno, dependerá de la implementación del cultivo en el AMERB de Chungungo B (ver actividad 4.4.5).

##### 4.7.1. Desarrollo de escenarios de estabilidad/ inestabilidad

Los modelos cualitativos serán desarrollados hasta una versión semicuantitativa permitiendo simular y evaluar su desempeño económico, productivo y ambiental (i.e., Etapa IV Programa). Esto será determinado mediante el cómputo de las matrices de interacción generadas para determinar criterios de estabilidad de Routh-Hurwitz I y II y Levins. La determinación y análisis de escenarios potenciales de estabilidad, es decir, las interrogantes de los modelos propuestos ligados principalmente a las auto-retro-acciones de algunos elementos claves, permitirá entender escenarios de toma de decisiones y predecir efectos potenciales. Estos escenarios pueden incluir aumento de la biomasa, aumento de la cosecha o efectos de estas variables sobre el ecosistema circundante, como la disminución de



nutrientes, fitoplancton o rol del detritus del cultivo. Tales variables han sido previamente determinadas e interconectadas en las redes de interacción de los modelos propuestos.

#### 4.7.2. Desarrollo de balance trófico de modelos propuestos

Posteriormente, en una etapa de validación cuantitativa se utilizará la metodología descrita en Ortiz (2008) y Ortiz (2018), integrando la aproximación de modelación trófica Ecopath con Ecosim (Pauly et al. 2000, Christensen & Walters 2004). En donde el balance de flujos de masas entre productividad y consumo de los organismos de un ecosistema marino puede ser calculado en términos de biomasa y relaciones tróficas. Para esto, las matrices comunitarias (incluidas las especies cultivadas) de los modelos semicuantitativos “base” serán reconstruidos usando el análisis clásico de contenido estomacal para establecer relaciones tróficas específicas en términos de g de peso húmedo o seco. Por otro lado, el análisis de isótopos estables, una técnica reconocida para establecer este tipo de relaciones en ecosistemas tiende a reducir la riqueza y complejidad de las conexiones tróficas, linearizando las relaciones (Ortiz 2008), por lo tanto, al menos para el propósito de esta actividad la técnica podría ser desestimada.

En campañas de terreno se obtendrán ejemplares de aquellos organismos descritos en las redes de interacciones propuestas en los modelos semicuantitativos (Cárcamo et al. 2020). Aquellas especies que por algún motivo no aparezcan en los muestreos serán obtenidos desde literatura sobre especies afines cuya metodología haya sido validada en terreno. Usando tres transectos aleatorios de 30 m en cada sitio de estudio y compuestos por al menos 3 estaciones, se recolectaran entre 3-5 ejemplares de cada especie (Prado et al. 2010), bien desde la columna de agua (e.g., choritos de cultivo) o del fondo a través de buceo autónomo. Los organismos serán disectados para extraer el contenido gastrointestinal en laboratorio. El tracto intestinal completo de todos los consumidores será cuidadosamente removido, puesto en placas petri para observar y separar su contenido usando una lupa (o microscopio si correspondiese). Los componentes de alimento observados serán expresados como % total de la biomasa (g peso seco o peso húmedo) ingerida por cada individuo.

Para el análisis se determinará la frecuencia de ocurrencia (FO) numérica ( $FN = n$ ) y/o volumétrica ( $FV = g / \text{peso seco/ húmedo}$ ). Tales parámetros han sido utilizados para construir índices de importancia relativa (IIR) de acuerdo a lo postulado por Hyslop (1980). La selección de grupos tróficos funcionales o grupos de organismos que poseen dietas similares (e.g., detritívoros, depredadores, generalistas) será adoptada para facilitar la interpretación y manejo de resultados, esto dependerá del número de especies observadas por grupo funcional o bien por sólo una especie que cumpla un rol funcional específico (e.g., *M. chilensis* = Filtrador de suspensión/ingeniero ecosistémico) en cuyo caso, se utilizará el nombre específico del organismo. Además, sobre los transectos aleatorios de 30 m (i.e., 3 estaciones en cada sitio de estudio), se medirá, *in situ*, la abundancia en peso húmedo de los todos organismos presentes en cuadrantes o cores circulares de 0,625 m<sup>2</sup>. Además, la determinación de biomasa en m<sup>2</sup> de macroalgas como productores primarios será medida en cuadrantes de 0,25 m<sup>2</sup> sobre las mismas estaciones.

Tanto los análisis de contenido gastrointestinal como los datos de abundancia relativa de especies serán utilizados en la construcción de modelos y simulaciones con la herramienta de modelamiento trófico y balance de masas Ecopath (Pauly et al. 2000, Christensen & Walters 2004, Ortiz 2008).



#### **4.8. Monitoreo del efecto de la APE sobre comunidades bentónicas**

La acuicultura a micro y pequeña escala en Chile está representada por la producción de bivalvos, principalmente chorito (*M. chilensis*) y secundariamente por el ostión del norte (*A. purpuratus*) y ostras (*C. gigas* y *O. chilensis*). Para evaluar el efecto de cultivos o granjas APE sobre las comunidades bentónicas, se determinarán diferencias en la estructura comunitaria epibentónica, macroinfauna y carga de materia orgánica del sedimento del fondo inmediatamente bajo módulos de cultivo que representen distintos niveles productivos.

Se utilizará una aproximación metodológica comparativa (Norling & Kautsky 2008), que se orienta a determinar cambios en la abundancia y riqueza de especies en parches de distinto tamaño de *Mytilus edulis* sobre fondos blandos. Esta será complementada con la metodología de Henríquez *et al.* (en preparación) que compara indicadores de diversidad y abundancia de la comunidad epibentónica en sitios con y sin APE de bivalvos.

El diseño muestreal incluirá la evaluación de granjas APE (~ 200 ton año<sup>-1</sup>); granjas comerciales de tamaño intermedio (>200 - 500 ton año<sup>-1</sup>) y granjas de escala industrial (> 600 ton año<sup>-1</sup>) o bien múltiples granjas APE, las que agrupadas ocupen gran área de cultivo. Dichas granjas serán contrastadas contra sitios de referencia sin la influencia directa de granjas.

Se realizará una prospección de sitios que cumplan con las características de tamaño, acceso y profundidad (~ 15 m) para evaluar potenciales correlaciones entre el tamaño de la operación de cultivo y los efectos sobre la biota. Se determinarán parámetros hidrodinámicos sitio-específicos (e.g., dirección y magnitud de corrientes) con ayuda del sistema de información oceanográfica CHONOS del IFOP ([www.chonos.ifop.cl](http://www.chonos.ifop.cl)). Estos parámetros han demostrado representar influencia significativa en la biodeposición, así como, correlación con el impacto sobre comunidades bentónicas (Gutiérrez *et al.* 2003, Keeley *et al.* 2009, 2013).

Al menos un sitio de cada nivel productivo (i.e., APE, mediana y escala industrial), con sus respectivos sitios de referencia, serán evaluados mediante buceo autónomo. Buzos científicos evaluarán independientemente y al azar tres transectos aleatorios de 30 m. En cada transecto, y con cuadrantes reticulados (100 puntos de contacto al alzar) dispuestos cada 5 m, se evaluará el número de invertebrados móviles y la cobertura de especies sésiles o que crecen en agregaciones (e.g., macroalgas, tunicados, cirripedios, choritos). Este protocolo será replicado en cada sitio y sus sitios de referencia. La evaluación se realizará al menos una vez durante el período de baja (invierno-primavera) y alta productividad (verano-otoño). Adicionalmente, durante las campañas de muestreo cada buzo tomará cinco cores de sedimento en cada sitio de muestreo para evaluar macroinfauna asociada y la carga de materia orgánica del sedimento. Los datos biológicos serán evaluados con técnicas univariadas (i.e., Análisis de Varianza, posiblemente correlaciones simples) separados por grupo funcionales, tamaño y efecto de las granjas. Además, posibles diferencias en la estructura comunitaria epibentónica y macroinfauna serán evaluadas con estadística multivariada. La carga de materia orgánica también será evaluada con técnicas univariadas. La abundancia de grupos funcionales y su contribución a la estructura comunitaria de todos los sitios evaluados y que puedan estar siendo disminuidos o potenciados por la presencia de los cultivos y la escala de producción (e.g.,



suspensivos, onmívoros, bioingenieros) serán evaluadas con análisis del porcentaje de similitud (SIMPER analysis) (Clarke 1993, Clarke et al. 2014).

En el marco de la etapa IV del Programa se ha iniciado esta actividad (primavera 2020), retrasada respecto a planificación original, producto de las restricciones derivadas de la Pandemia COVID-19. En la presente etapa, los sitios de cultivo y ecosistemas identificados y evaluados en la etapa anterior serán monitoreados para conocer los efectos a mediano plazo de los niveles productivos sobre comunidades bentónicas y la dinámica/permanencia de recursos bentónicos potenciales para “aprovechamiento” según nueva propuesta normativa APE.

#### **4.9. Identificación de servicios ecosistémicos asociadas a la APE**

Bienes y servicios ecosistémicos (definidos como los beneficios que las poblaciones humanas obtienen directa o indirectamente desde las funciones ecosistémicas (Costanza et al. 1997)) asociados directa o indirectamente al funcionamiento APE, serán identificados a partir de la caracterización de los cultivos pilotos implementados en el programa, considerando la descripción y categorización de servicios ecosistémicos existentes para ecosistemas en general (De Groot et al. 2002), ecosistemas marinos y costeros (Beaumont et al. 2007), y trabajos más recientes y específicos sobre beneficios de la acuicultura extensiva (Smaal et al. 2018, Hasselström et al. 2018, Weitzman 2019, Suplicy 2020).

**Objetivo específico 5:** *Evaluar diseños de sistemas de cultivos para implementar acuicultura de pequeña escala.*

#### **4.10. Revisión de diseños y características de los sistemas de cultivos disponibles a nivel nacional para el desarrollo de APE**

Se realizará una revisión bibliográfica respecto a estudios científicos e informes técnicos existentes a nivel nacional entorno a tecnologías de cultivo aplicables a la APE de macroalgas e invertebrados. Una vez identificadas las tecnologías propuestas y disponibles para el desarrollo de la APE en Chile, se procederá a evaluar las características de cada alternativa considerando criterios que permitan identificar los diseños que podrían ser utilizados para el cultivo de macroalgas e invertebrados, tales como moluscos, equinodermos, tunicados.

#### **4.11. Propuesta de diseño de sistema de cultivo APE para zona norte y sur, y/o condiciones de mayor exposición (Fase 1)**

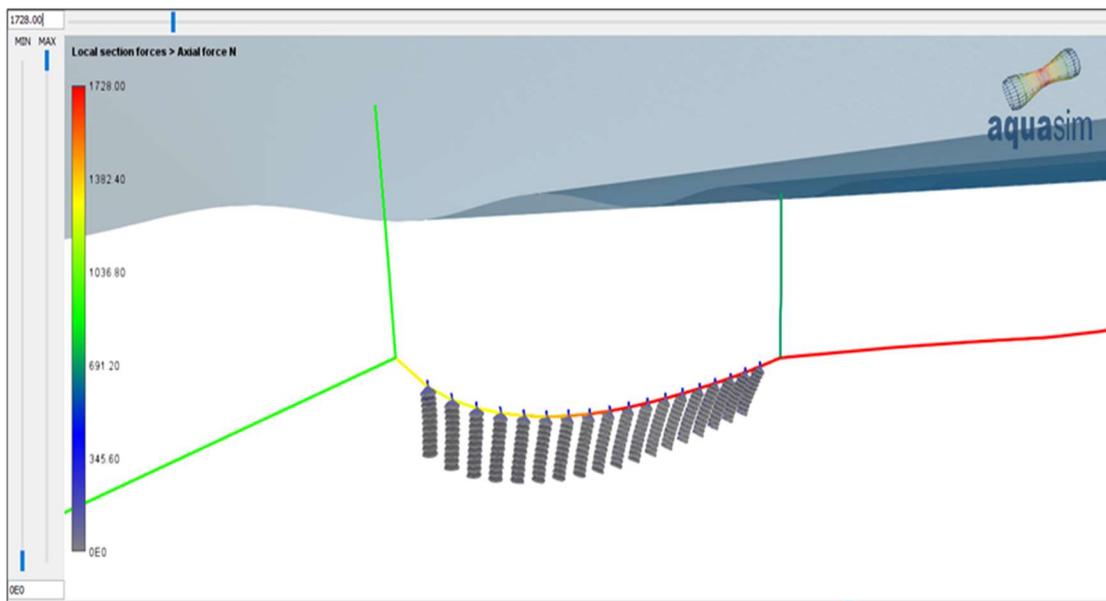
En esta etapa, se seleccionará un sistema de cultivo para ser evaluado mediante análisis numérico a través del software de simulación dinámica AquaSim®, herramienta desarrollada por Aquastructure y basado en el método de elementos finitos (MEF), el cual realiza un análisis global de fuerzas de transición entre componentes rígidos y flexibles con dominio del tiempo, junto con calcular las fuerzas locales en cada componente, como por ejemplo deformaciones, esfuerzos, tensiones, desplazamientos y aceleraciones de cada elemento (Berstad et al. 2004) (**Figura 2**). Adicionalmente,



de ser necesario, se utilizar3n los softwares de simulaci3n est3tica como Inventor® y/o el software basado en el m3todo de volumen finito ANSYS®. Este dise1o estructural de sistema se evaluar3 a diferentes condiciones oceanogr3ficas representativas de la costa chilena en ambientes de alta energ3a. Para ello, se realizar3 una revisi3n de informaci3n secundaria disponible sobre intensidad de oleaje, corrientes y viento en las costas chilenas (Bey3 et al. 2016).

El an3lisis num3rico entregar3 informaci3n relevante que permitir3 dimensionar el sistema de cultivo, para ello se determinarn y dimensionarn los componentes y su materialidad, tales como cabos, cadenas, cables, flotadores, elementos de anclaje (muerto o ancla). Paralelamente se realizar3 un an3lisis hidrost3tico que permitir3 establecer los niveles de boyantes del sistema en las distintas etapas del proceso productivo, el cual ser3 integrado en la simulaci3n din3mica. Finalmente, ambos an3lisis se ver3n reflejados en una ingenier3a de detalle, el cual dar3 cuenta del dise1o y dimensionamiento del sistema para un nivel de energ3a ambiental establecida anteriormente (corriente, oleaje y viento).

El resultado de esta actividad ser3 insumo clave e inicial para el desarrollo de propuestas de dise1os de nuevos sistemas APE aplicables en zonas de mayor exposici3n tanto en el norte como sur de Chile.



**Figura 2.** Ejemplo de simulaci3n num3rica en software AQUASIM® de un cultivo de ostiones en linternas en un sistema tipo long-line.



**Objetivo específico 6:** *Realizar acciones de difusión asociadas al desarrollo de la acuicultura de pequeña escala.*

#### **4.12. Mantenimiento y actualización de página web APE**

En la etapa IV del programa se diseñó e implementó un sitio web para difundir y promover el desarrollo de la acuicultura de macroalgas en Chile. Dicho sitio contendrá información multidimensional (e.g., legal, económica, productiva, científica) y multimedia (e.g., videos, ilustraciones, publicaciones, manuales, fotografías, links de utilidad) de apoyo al cultivador y/o emprendedor. Además, será un repositorio de la información generada en el programa.

En la presente etapa del programa, se mantendrá y actualizará dicho sitio, reforzando la incorporación de múltiples contenidos para promover el desarrollo sostenible de la APE en Chile.

#### **4.13. Realización de seminarios de difusión y transferencia APE**

Se realizarán dos seminarios de difusión y transferencia para promover el desarrollo sostenible de la APE. Se realizarán bajo modalidad on-line y con la participación de representantes de la pesca artesanal, acuicultores, institucionalidad, academia, empresa, entre otros. Durante el primer semestre del 2020, se realizará un primer seminario orientado a presentar los avances y desafíos en diseño e implementación de sistemas de cultivo para desarrollar APE en Chile. Durante el segundo semestre, un segundo seminario abordará la temática del valor agregado para la APE. El programa y los expositores serán consensuados con la contraparte técnica. De esta forma, se espera que potenciales cultivadores (OPA y acuicultores APE) y público general conozcan los avances y desafíos actuales en ambas temáticas.

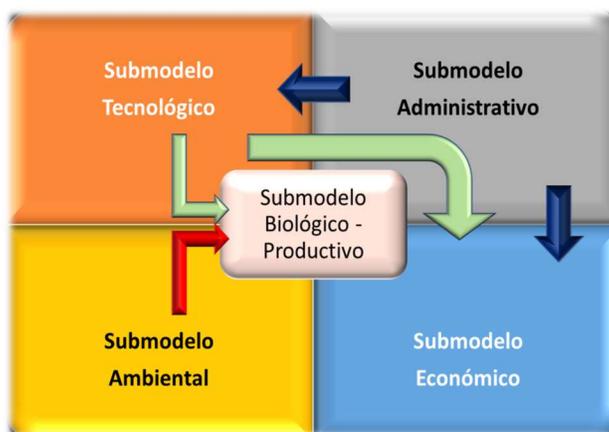


## 5. RESULTADOS

**Objetivo específico 1:** *Proponer modelos de gestión y producción asociados al desarrollo de la acuicultura de pequeña escala.*

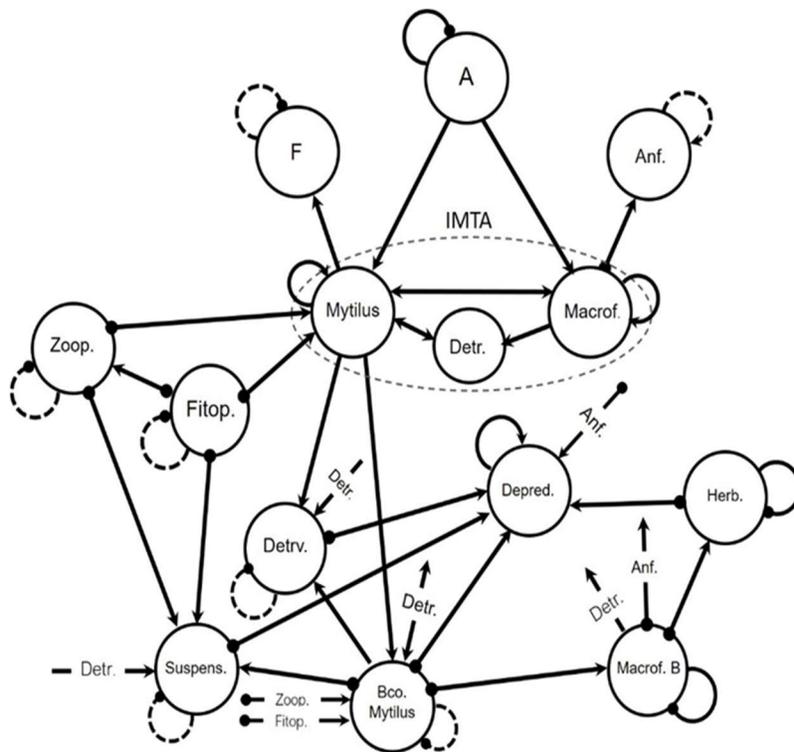
### 5.1. Análisis bio-económico de modelo de cultivo APE con aprovechamiento de recursos bentónicos (Fase 1)

El modelo conceptual se desarrolló sobre la base del mismo enfoque metodológico empleado en las etapas anteriores, esto es, basado en submodelos interrelacionados que giran sobre un submodelo biológico – productivo (**Figura 3**). El primer submodelo lo constituye el sistema biológico – productivo, el cual contiene en esencia dos niveles: un nivel que incluye el sistema de cultivo en la columna de agua y un segundo nivel que incorpora la comunidad bentónica que se desarrolla justo debajo del cultivo suspendido. La base para desarrollar este submodelo será lo expuesto por Henríquez (2021) y que se representa en la **Figura 4**. Así, se revisará el tipo de comunidad bentónica que ocurre durante el proceso de sucesión ecológica bajo el cultivo suspendido y las especies cultivadas bajo el esquema APE. De esta manera se determinan con mayor detalle las interacciones interespecíficas de la comunidad bentónica y la interacción biológica – ambiental.



**Figura 3.** Representación esquemática del enfoque metodológico básico.

El submodelo ambiental es el segundo sistema para modelar. Aquí se identificaron las principales variables ambientales (físico – químicas) y se conectaron con las variables biológicas que son afectadas en el submodelo biológico – productivo. En el submodelo tecnológico se identificaron, en detalle, el sistema de cultivo a emplear y todo el sistema de soporte requerido para este (e.g., botes, muelle, casetas flotantes, equipamiento de trabajo). Por otra parte, en el submodelo económico (o integrado) se identificaron los principales componentes financieros involucrados tanto en el cultivo suspendido como en el costeo asociado a la comunidad bentónica asociada al cultivo (e.g., monitoreo y eventuales costos por cosecha). En este mismo submodelo se describieron posibles indicadores de desempeño productivo – económico.



**Figura 4.** Submodelo Biológico de base según Henríquez (2021). Corresponde a un modelo cualitativo de redes que representa las relaciones de un cultivo mixto a pequeña escala en crecimiento inicial dentro del ecosistema circundante. Las flechas indican interacciones que son positivas, mientras que círculos sólidos (—●) indican un efecto negativo. Depredación (●—→), Comensalismo (—→), Autorretroacción negativa (—●) y Autorretroacción positiva (—→).

A diferencia de las etapas anteriores, se incorpora explícitamente el componente regulatorio a través del submodelo administrativo. La idea es relevar los principales lineamientos del nuevo Reglamento APE que pueden afectar directamente tanto al subsistema tecnológico como al económico (**Figura 3**) y que abarcan aspectos tales como quien o quienes acceden al sistema de APE, nivel de producción, tamaño del área, tipo de proyecto productivo, nivel de aprovechamiento de hábitat emergentes, condiciones de operatividad, accesos a créditos.

#### 5.1.1. Identificación de variables del modelo

Se identificaron las variables e interacciones del modelo en base al concepto de hábitat o banco emergente (indicado como “aprovechamiento” en el nuevo Reglamento APE). El modelo se centró en un cultivo de choritos tradicional, que utiliza un sistema de long lines. Esto se basó fundamentalmente en que los choritos son la especie precursora de la comunidad del fondo, denominada HE.

Para la identificación de las especies involucradas en el HE, se desarrolló una aproximación cuantitativa de la ocurrencia de especies en el HE y sus cualidades funcionales: especies facilitadoras, especies sésiles secundarias (detrívoros, suspensívoros), consumidores y depredadores móviles.



Dado que no existe un seguimiento detallado de cada una de las especies que podrían ocurrir durante los estadios sucesionales en el hábitat emergente, se prefirió identificarlas a nivel de grupos funcionales o gremios, por ejemplo, especies facilitadoras, jaibas, peces, etc. Estos grupos se muestran en la **Tabla 3**. En ella se muestran las especies que potencialmente pueden ocurrir tanto en los estadios sucesionales tempranos del HE como en estadios tardíos donde las especies consumidoras ya están instaladas en el sistema ecológico de fondo.

**Tabla 3.**

Lista de especies o grupos funcionales esperables de ser encontrados por nivel y sistema.

Nivel	Sistema	Especies
Cultivo Suspendido	Long lines	Chorito
	HE Emergente primario	Chorito
Fondo	HE : Organismos sésiles secundarios	Especies facilitadoras; esponjas; anémonas; <i>Macrocystis pyrifera</i>
	HE : Consumidores	Jaibas; camarones; erizos; tegulas; pepino de mar
	HE : Depredadores móviles	Peces; pulpo; asteroideos

### 5.1.2. Construcción del modelo cualitativo

Inicialmente, se construyó un modelo general para entender el sistema que se intenta modelar. Este modelo general se denomina Modelo Económico – Productivo con Hábitat Emergente (**Figura 5**). Consta de cuatro subsistemas: Subsistema Ambiental, que incluye las principales variables ambientales (físico – químicas) y se conectan con las variables biológicas que son afectadas en el Subsistema Biológico. En el Subsistema Tecnológico se identifica el sistema de cultivo a emplear y todo el sistema de soporte requerido para éste (e.g., botes, muelle, casetas flotantes, equipamiento de trabajo). Por otra parte, el Subsistema Económico (o integrado) incluye los principales componentes financieros involucrados tanto en el cultivo suspendido como en el costo asociado a la comunidad bentónica bajo el cultivo (e.g., monitoreo y eventuales costos por cosecha). En este mismo submodelo se incluyen los indicadores de desempeño productivo – económico.

El modelo general esquematizado en la **Figura 5** muestra también las interacciones esperables de encontrar entre los subsistemas. Así, por ejemplo, las variables ambientales tienen su efecto directo sobre las unidades biológicas, tanto de cultivo como las que se desarrollan en el HE. La biomasa cosechada (Subsistema Biológico) determinará el flujo de beneficios obtenidos por la comercialización de la producción a los cuales pueden añadirse potenciales beneficios originados desde el HE. El Subsistema Administrativo afecta la tecnología que se permitirá en la producción, lo cual puede afectar al tipo de especie o especies que se podrá cultivar en un área determinada. Eventualmente efectos de cascada pueden emerger, en el sentido que un efecto sobre una variable de otro subsistema puede afectar indirectamente a otra variable en una parte más alejada del modelo. A modo de ejemplo, la regulación sobre aspectos tecnológicos puede afectar la carga productiva en el sistema suspendido lo que a su vez puede afectar la existencia, el tamaño o las tasas de desarrollo del HE y finalmente determinar de algún modo el flujo de beneficios en el Subsistema Tecnológico-Económico.

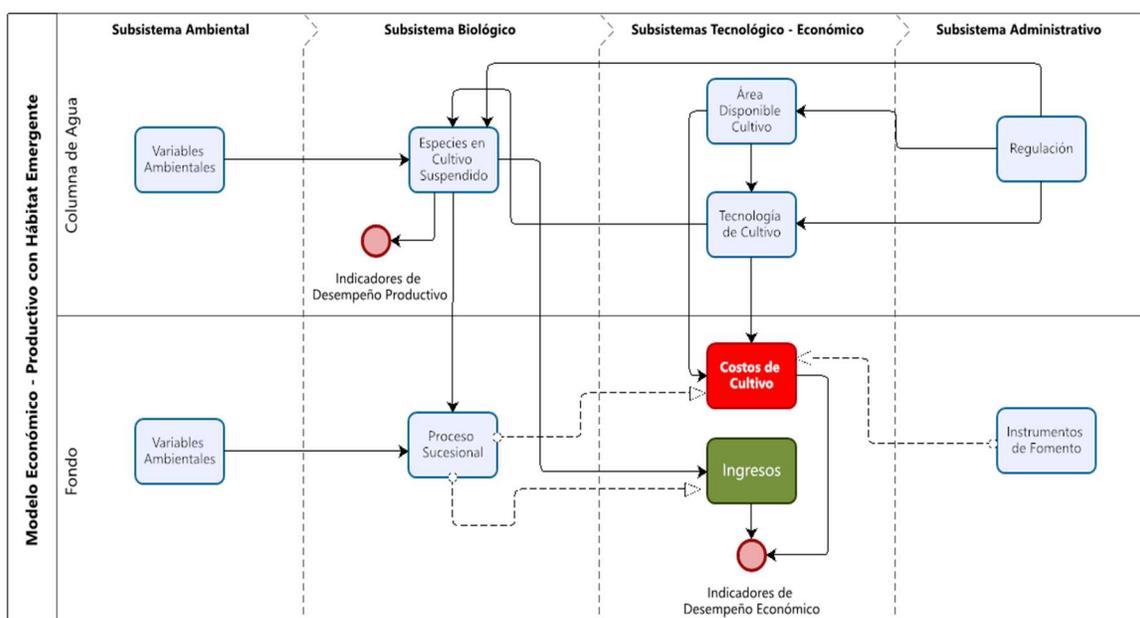


Figura 5. Propuesta inicial de Modelo Económico – Productivo con Hábitat Emergente (HE).

La **Figura 6** representa el modelo conceptual general básico más detallado. Entre las variables más conspicuas en el Submodelo Ambiental aparece la concentración de nutrientes, temperatura, intensidad de luz, oxígeno disuelto, las cuales en otros casos (Pérez 2021), han mostrado tener impacto sobre las tasas de crecimiento ( $dB/dt$ , Subsistema Biológico) de las especies en el cultivo suspendido. En el modelo conceptual se representa un cultivo bi-específico mixto, donde la fase de producción incluye un bivalvo (chorito) y un alga que pudiera ser pelillo, chicoria de mar o huiro. También se representa la dinámica de la biomasa de epífitos, la que también está modulada por las variables ambientales. Eventualmente esta biomasa de epífitos puede tener su impacto en las tasas de crecimiento tanto de choritos como de algas, lo cual impacta directamente a la producción de biomasa al final del ciclo productivo del cultivo. Las mismas variables ambientales descritas anteriormente, pero ahora medidas en el fondo, debajo del cultivo suspendido, modularán las tasas de crecimiento de especies que comienzan a poblar el HE a través de la sucesión ecológica. Se asume que el cultivo suspendido generará un reclutamiento inicial en el fondo dando comienzo al desarrollo del HE. En la medida que la sucesión ecológica ocurre las variables ambientales regularán el crecimiento mediante cambios en las tasas  $dB/dt$  de especies sésiles secundarias, consumidores y depredadores móviles (**Figura 6**).

El orden de magnitud de la biomasa cosechable dependerá de variables que tiene su origen en el Subsistema Tecnológico, esto a través del número de líneas de cultivo en una superficie disponible que a su vez proviene de los instrumentos de regulación que se originan en el Subsistema Administrativo. El tamaño del centro de cultivo determinará a su vez la cantidad de operarios permanentes y ocasionales. Así, los factores de producción (tecnología, mano de obra, capital) pueden ser traducidos en un flujo de costos a través del tiempo. Aquí son importantes ítems tales como: pago



de concesiones, costos de mano de obra, costos de los sistemas de cultivos, depreciaciones, costos de capital, impuestos. Por el lado de los ingresos resultan relevantes el valor de la producci3n, incluyendo choritos y algas (y eventualmente cosechas derivadas del HE), subsidios u otros flujos derivados de instrumentos de fomento que tienen su origen en el subsistema administrativo. Del flujo de ingresos y costos se derivan los indicadores de desempe1o para el cultivo tales como valor actual neto (VAN) (Sapag & Sapag 2008), costo medio por kilo producido ( $\$ \text{kg}^{-1}$ ) y la estructura de este costo medio con la finalidad de identificar los principales ítems que explican dicho costo medio. Una vez identificados se puede pasar a una etapa de optimizaci3n con la finalidad de reducir el costo medio y obtener sí mejores resultados financieros por ciclo cerrado de cultivo.

### 5.1.3. Subsistema hábitat emergente

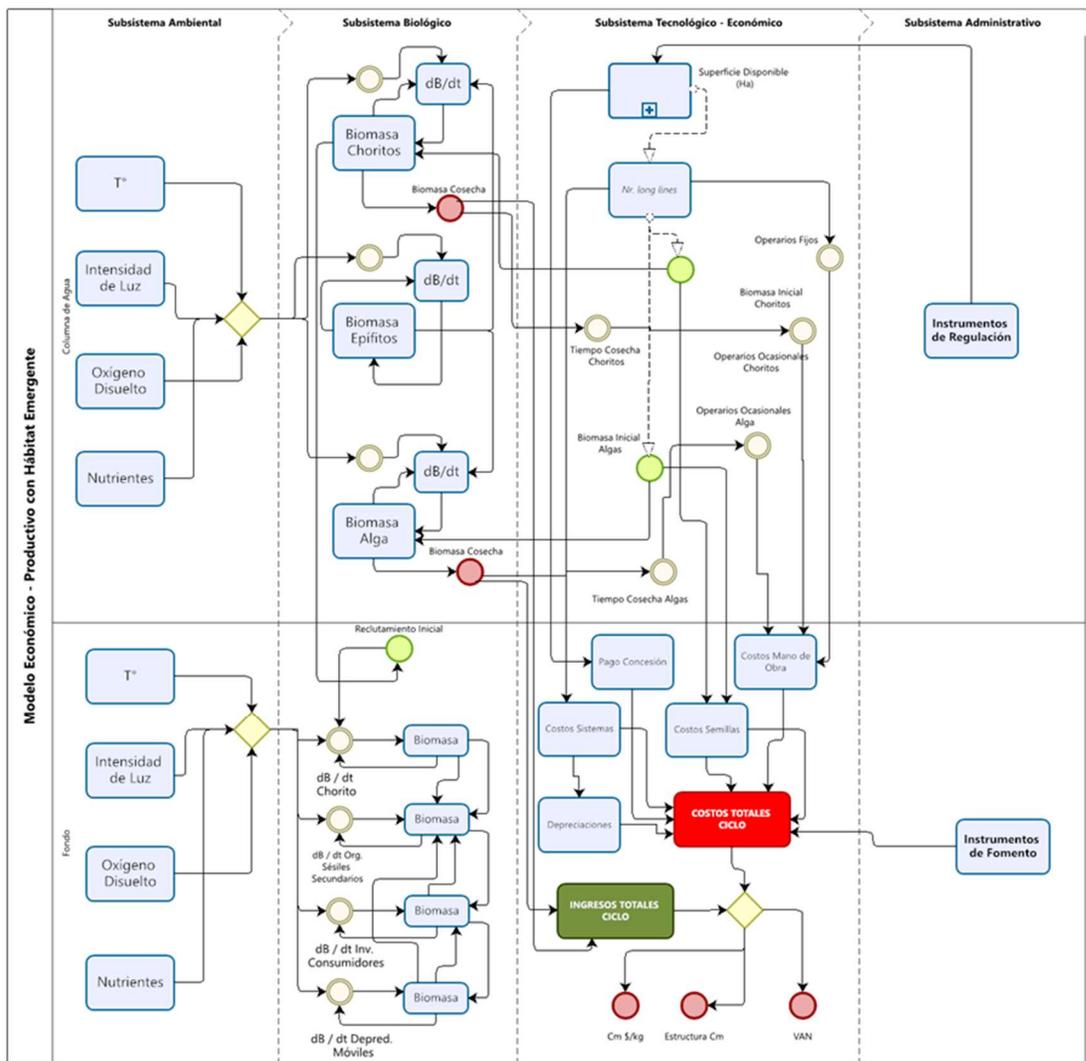
De especial interés es detallar con la mayor precisi3n posible la estructura del Subsistema HE, es decir, el Subsistema Biológico de fondo. Una primera aproximaci3n, se resume en la **Figura 6**, donde se representa el proceso de sucesi3n ecol3gica bajo la denominaci3n de fases. Cada fase representa de alg3n modo una escala de tiempo cualitativa a trav3s de la cual van ocurriendo los distintos estadios en el desarrollo del HE.

La fase inicial de este HE est3 dado por dos fuentes. La principal, eventualmente ser3 el propio cultivo suspendido. Los propios choritos y algas pueden generar larvas o semillas competentes que podrían reclutar bajo el sistema de cultivo, el cual se va desarrollando a trav3s del aporte de organismos adultos que se desprenden del cultivo en la columna de agua; del desprendimiento de estructuras de cultivo con o sin organismos vivos; aporte de materia org3nica y sedimentos provenientes de la columna de agua. Se configura así un hábitat inicial que constituye un lugar apto para el asentamiento de nuevos individuos. La segunda fuente para el establecimiento de este hábitat inicial son fuentes remotas, es decir, semillas y propágulos que colonizan el HE a trav3s de las corrientes u otras formas de transporte, pero que en su origen no operan en el cultivo suspendido. Mediante este mecanismo queda configurado un ecosistema inicial que dar3 origen al HE maduro a trav3s de un mecanismo de sucesi3n ecol3gica.

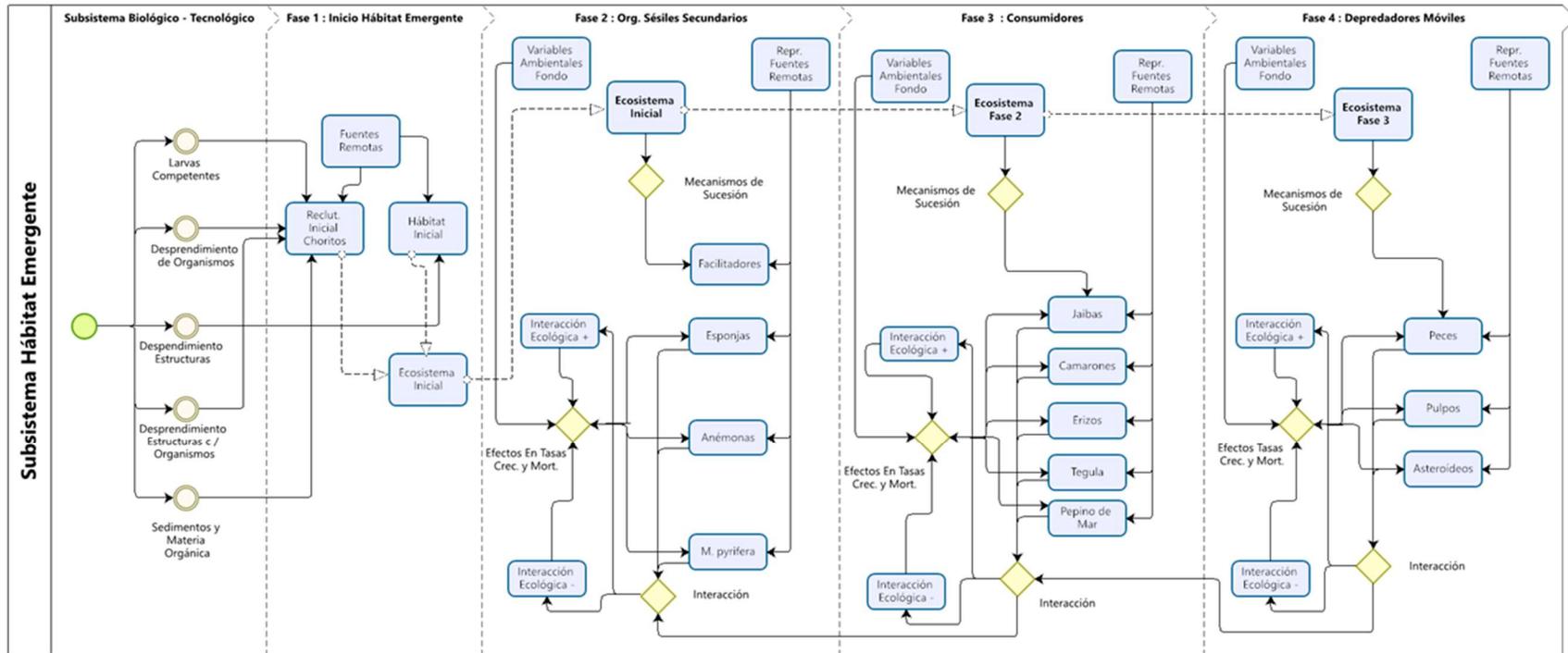
En una segunda fase aparecen organismos s3siles secundarios, en el sentido que la composici3n específica va más allá de los choritos y algas que forman parte del sistema de cultivo suspendido y que dan inicio al HE. Aquí se pueden encontrar especies facilitadoras s3siles, esponjas, macroalgas típicas como *M. pyrifera*, otros bivalvos formadores de banco y anémonas (**Figura 7**). Tales especies pueden provenir de fuentes remotas distintas al cultivo suspendido. La interacci3n entre las especies que van poblando el HE, así como la interacci3n de las variables ambientales sobre estas modularán las tasas de crecimiento y de mortalidad natural, lo que permitirá a su vez un aumento en cobertura del HE y propiciar3 el surgimiento de una nueva fase sucesional en la medida que el hábitat vaya modificándose.

La fase 3 implica la aparici3n de consumidores tales como jaibas, camarones, erizos, caracoles y holoturias (pepinos de mar), entre otras. El nivel de complejidad del HE se incrementa ya que la interacci3n del ambiente sobre variables tales como la tasa de crecimiento especie – específica se mezcla con la interacci3n depredador – presa que surge paralelamente a posibles mecanismos de competencia interespecífica si alguno de los recursos disponibles en el HE llega a ser un factor limitante.

Finalmente, en una fase 4 se esperaría la aparición de depredadores móviles tales como peces, pulpos y una variedad de asteroideos. Esta nueva fase, terminal en el proceso de sucesión ecológica, introduce nuevas complejidades al sistema, ya que a las interacciones ecológicas establecidas en las fases anteriores se incorporan las interacciones a un nivel trófico superior entre los depredadores móviles (depredación y potencialmente competencia por recursos presa comunes). Este nuevo nivel trófico tendrá impacto en los niveles tróficos más bajos, afectando la dinámica en el HE ya sea directa o indirectamente mediante efectos cascada.



**Figura 6.** Diagrama de flujo ampliado, basado en el modelo general inicial (Figura 5). Los rombos indican la interacción de variables cuyo flujo puede tomar caminos alternativos; los círculos blancos representan eventos intermedios; los círculos rosados indican el fin de un proceso; los círculos amarillos indican el inicio de un nuevo proceso. Las líneas de flujo discontinuas representan aquellas variables bajo control del Administrador.



**Figura 7.** Detalle del subsistema hábitat o banco emergente, esto es el Subsistema Biológico de fondo, con su mecanismo sucesional representado por cada una de las cuatro fases.



#### 5.1.4. Identificación de parámetros críticos para la modelación

Finalmente, se hizo un listado de los principales parámetros a considerar para una etapa siguiente, que es la implementación del modelo cuantitativo. El modelo cualitativo desarrollado, contienen una alta complejidad y requiere de la cuantificación exhaustiva de parámetros en cada uno de los subsistemas. Los principales parámetros, inicialmente, identificados se muestran en la **Tabla 4**.

Aunque el cultivo suspendido y su HE asociado ocurren en el mismo espacio geográfico, es posible y altamente probable que las condiciones ambientales entre la columna de agua y el fondo sean marcadamente diferentes. Esto obliga a mantener un sistema de monitoreo constante de las variables ambientales a través del tiempo. Esto es necesario dado que se conoce que dichas variables afectan tanto a la tasa de crecimiento como a la tasa de mortalidad natural de las unidades biológicas que se desarrollan tanto en el cultivo suspendido como en aquellas que comiencen a desarrollarse en el HE. En cuanto a las tasas de crecimiento en el cultivo suspendido (ya sea en número o en peso) son críticas para evaluar la producción del ciclo (tanto para chorito como para el alga) y su disponibilidad a través del tiempo. Esto último es un factor clave para el acuicultor con fines de monitoreo y manejo, ya que de ello depende el nivel de producción y la rentabilidad del cultivo en última instancia. Se debe evaluar si la carga de epífitos modela o no el crecimiento del cultivo, o solo implica un elemento a considerar en la etapa de cosecha, dado que puede implicar un costo adicional en limpieza.

Si bien el monitoreo de variables y la estimación de parámetros del sistema es viable en el sistema cultivo suspendido no es del todo claro si es factible en el HE, dado el aumento en complejidad ecológica que va ocurriendo conforme éste se desarrolla. En este sentido, los coeficientes de competencia y de depredación son claves, ya que, a través de ellos, se puede ir determinando factores de coexistencia o de exclusión competitiva a distintos niveles tróficos y del equilibrio entre las poblaciones de depredadores y presas. De particular interés resulta el monitoreo de las especies agrupadas en la categoría de depredadores móviles y la estimación de parámetros asociados a éstos. Dado que es posible y probable que estas especies puedan constituir recursos de interés comercial para el cultivador. En este sentido se debe evaluar si el aumento en la densidad de estas especies resulta de la concentración en el HE de individuos provenientes de otras áreas o la producción secundaria generada exclusivamente por la aparición del HE. En este sentido el monitoreo y estimaciones de tasa de producción a partir de reclutamiento de juveniles dentro del HE es crítico.

Los parámetros asociados tanto a aspectos tecnológicos y económicos del cultivo son ciertamente más sencillos de registrar. Algo similar ocurre con las variables de estado o factores fijos que emerjan desde el Subsistema Administrativo (e.g., Reglamento de APE).

La complejidad en la cuantificación de los parámetros asociados al modelo económico – productivo con HE está indexada a la necesidad de contar con la medición de la producción del sistema de cultivo suspendido que se convertirá primero en cosecha y luego en ingresos brutos sumando el potencial comercial que pueda implicar el HE como un subsidio al ingreso del acuicultor. En este sentido el término “aprovechamiento” contenido en la visión de la SSPA se asocia al aprovechamiento comercial potencial asociado a especies de interés asociadas al HE. En el caso que el término “aprovechamiento” sea modificado por el de “valor del HE” el enfoque de evaluación de parámetros pudiera ser diferente. Como ha sido mencionado anteriormente, en el enfoque de valor el HE proporciona un enfoque más amplio, donde los efectos en la conservación, restauración de hábitats costeros y provisión de servicios ecosistémicos pueden ser considerados, más allá del simple



“aprovechamiento” (ver **Sección 5.7 y 5.8**). En esta perspectiva el monitoreo de los cambios en la riqueza de especies debiera ser evaluado, fundamentalmente de aquellas especies más importantes en términos de conservación.

**Tabla 4.**  
Principales parámetros por cuantificar en una siguiente etapa de modelación.

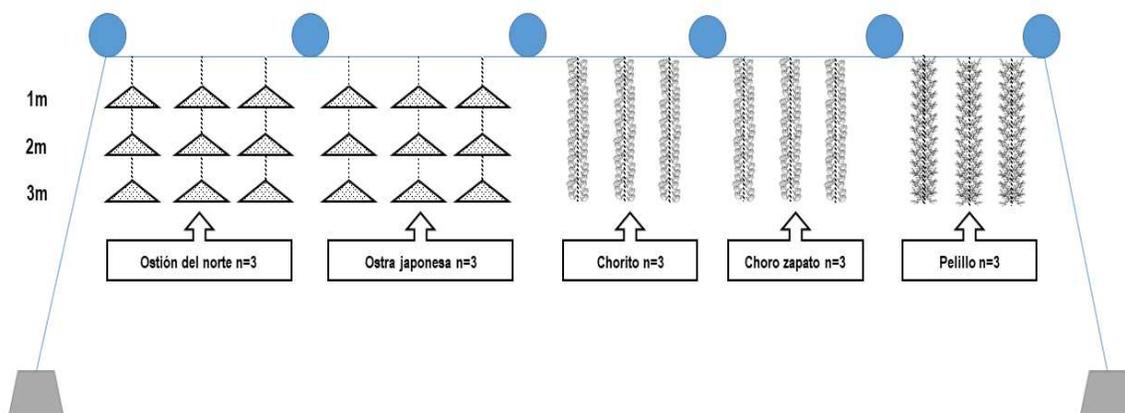
Parámetro	SUBSISTEMA						Administrativo
	Ambiental		Biológico		Tecnológico - Económico		
	Suspendido	Fondo	Suspendido	Fondo	Suspendido	Fondo	
Temperatura	X	X					
Salinidad	X	X					
Nutrientes	X	X					
Oxígeno disuelto	X	X					
Intensidad de Luz	X	X					
Corrientes	X	X					
Tasa crecimiento choritos			X	X			
Tasa mortalidad natural choritos			X	X			
Tasa reproductiva choritos			X	X			
Tasa crecimiento alga			X				
Tasa mortalidad natural alga			X				
Tasa reproductiva alga			X				
Superficie primaria emergente				X			
Reclutamiento choritos				X			
Reclutamiento organismos sésiles secundarios				X			
Coefficiente de competencia organismos sésiles secundarios				X			
Tasa de crecimiento y mortalidad natural organismos sésiles secundarios				X			
Reclutamiento organismos consumidores				X			
Coefficiente de competencia organismos consumidores				X			
Tasa de crecimiento y mortalidad natural organismos consumidores				X			
Tasa de consumo presas				X			
Coefficiente de competencia organismos consumidores				X			
Reclutamiento depredadores móviles				X			
Coefficiente de competencia depredadores móviles				X			
Tasa de crecimiento y mortalidad natural depredadores móviles				X			
Tasa de consumo presas niveles inferiores				X			
Coefficiente de competencia organismos consumidores				X			
Costos concesión					X		
Costos sistemas de cultivo					X		
Costos mano de obra					X		
Costos de semilla					X		
Costos administración					X		
Costos cosecha y maquila					X	X	
Depreciaciones					X		
Otros costos (vigilancia, monitoreo, etc.)					X	X	
Valor producción					X	X	
Tasa de descuento					X		
Parámetros específicos tipo de especie, superficies, tipo de sistemas, etc.							X
Parámetros específicos dado los instrumentos de fomento (subsídios directos e indirectos; impuestos, etc.)							X



## 5.2. Validaci3n de modelo de gesti3n y productivo para APE en base a portafolio multi-especie propuesto para la zona sur (Fase 1)

Para desarrollar esta actividad en conformidad a la normativa vigente, fue necesario gestionar y obtener una Resoluci3n por parte de SUBPESCA que autorice el desarrollo de actividades de investigaci3n en acuicultura dentro de una de las concesiones del Sr. Justo Garcia (CCAA C3digo Centro 102658). Dicho permiso (Resoluci3n) se gestion3 a trav3s de una Solicitud de Investigaci3n en Acuicultura (Acuicultura Experimental). Indicar que esta Solicitud fue enviada el 11 de enero de 2021. Luego de algunos ajustes menores de 3ndole t3cnica al documento enviado, esta Solicitud ingresa a tr3mite de manera formal (con n3mero de Control Interno 2029) el 11 de junio de 2021. Finalmente se obtuvo la respectiva resoluci3n que autoriza actividades de acuicultura experimental a fines de agosto del 2021 (ver **Anexo 1**).

Para esta fase, la validaci3n del modelo de gesti3n y productivo para APE en base a un portafolio multi-especie consider3 la instalaci3n de un experimento con 5 recursos hidrobiol3gicos: osti3n del norte (*A. purpuratus*), ostra japonesa (*C. gigas*), chorito (*M. chilensis*), choro zapato (*C. chorus*) y pelillo (*A. chilense*). Todos los recursos fueron instalados en un sistema de cultivo suspendido tipo long-line doble. Los recursos osti3n del norte y ostra japonesa fueron inicialmente cultivados en pearl-nets (n=3 por cada recurso) a 3 profundidades diferentes (1, 2 y 3 m), con una densidad inicial de 50 individuos/pearl-net. Los recursos chorito y choro zapato fueron cultivados en cuelgas de 3 m de largo (n=3 cuelgas por recurso). El recurso pelillo fue cultivado en cuelgas (n=3) dispuestas verticalmente en el cultivo suspendido (**Figura 8**).



**Figura 8.** Representaci3n esquem3tica del sistema de cultivo tipo portafolio implementado.



La instalaci3n de este m3dulo experimental se concret3 a fines de octubre de 2021, una vez completada la tramitaci3n total de los permisos sectoriales requeridos.

La condici3n inicial (talla) de los moluscos filtradores al inicio del experimento se indica en la **Tabla 5**.

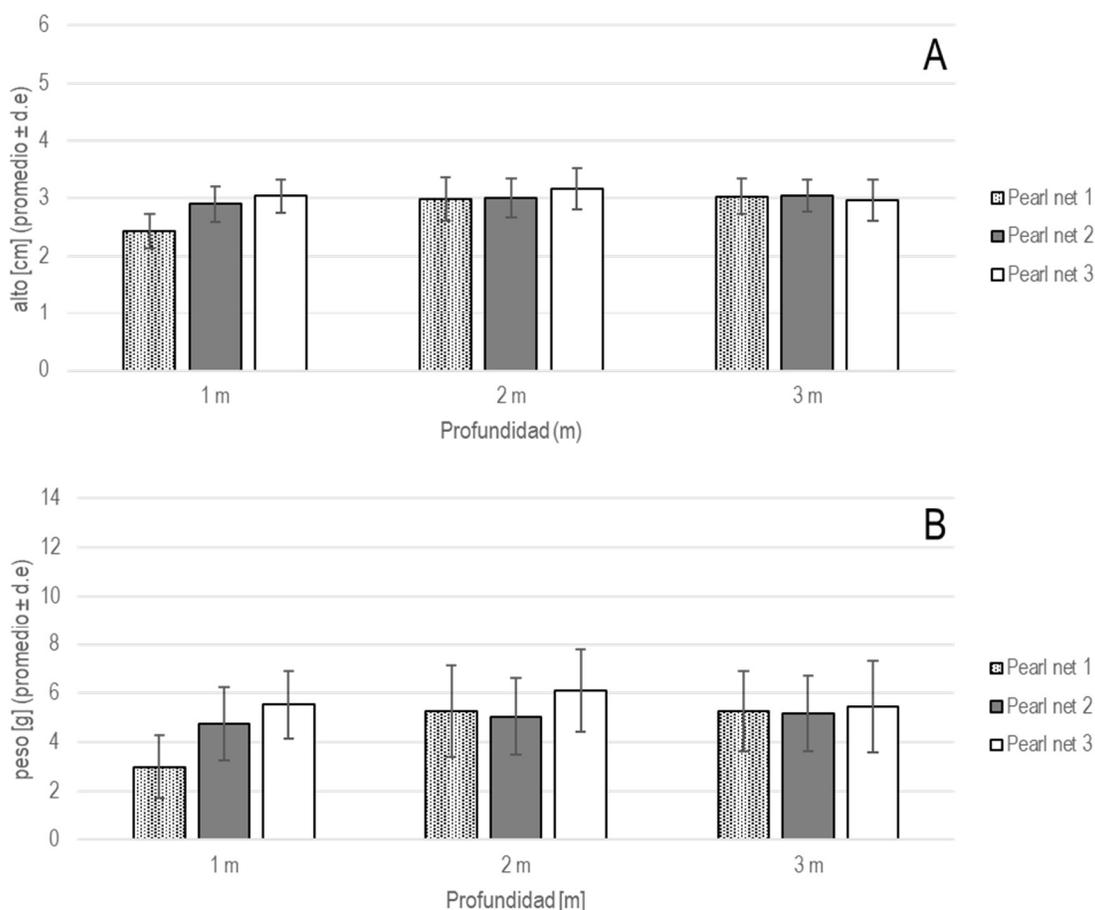
**Tabla 5.**

Condici3n inicial (talla + D.E.) de recursos en sistema portafolio al inicio del experimento.

Recurso	Condici3n inicial (rango, talla promedio, desviaci3n estandar)
Ostion del norte	Rango: 0,3 - 0,7 cm; Promedio: 0,50 cm alto; $\pm 0,10$ cm
Ostra japonesa	Rango: 0,6 - 1,4 cm; Promedio: 1,00 cm largo; $\pm 0,19$ cm
Chorito	Rango: 1,5 - 6,5 cm; Promedio: 2,83 cm largo; $\pm 0,61$ cm
Choro zapato	Rango: 1,5 - 4,2 cm; Promedio: 2,42 cm largo; $\pm 0,38$ cm

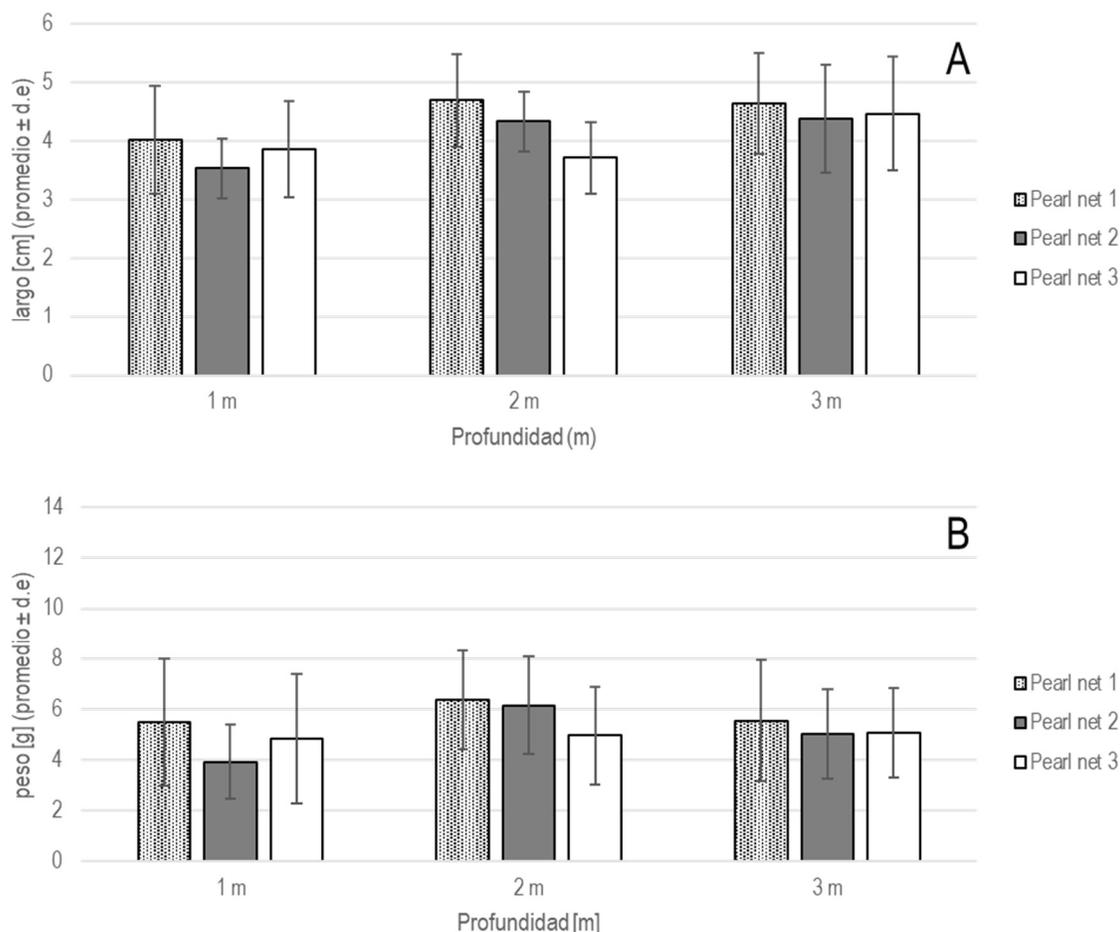
El primer control del experimento se realiz3 en enero de 2022. Para el control de los recursos ostion del norte y ostra japonesa, se extrajeron de cada pearl-net 20 individuos al azar por cada profundidad de cultivo (1, 2 y 3 m respectivamente), los cuales fueron medidos y pesados individualmente. Para el control de los recursos chorito y choro zapato se extrajeron al azar 20 individuos de cada cuelga en tres profundidades diferentes (1, 2 y 3 m). Para esta etapa no se dispone de datos asociados al control de pelillo, debido a que la biomasa inicial instalada en el experimento se perdi3 debido a desprendimiento por roce con otras estructuras de cultivo. Esta situaci3n ser3 remediada durante la puesta en marcha de la segunda fase de esta actividad.

Para el recurso ostion del norte, se observaron diferencias en la talla promedio (medida como alto de la concha) entre pearl-nets s3lo a un metro de profundidad, sin embargo, estas diferencias resultaron ser no significativas debido a la alta variabilidad de las tallas entre profundidades. Los ostiones del pearl-net 1 cultivados a un metro de profundidad registraron en promedio  $2,43 \pm 0,29$  cm de alto de concha, los del pearl-net 2 a la misma profundidad registraron  $2,90 \pm 0,30$  cm, y los del pearl net 3,  $3,04 \pm 0,28$  cm. En las otras profundidades de cultivo (2 y 3 m), las tallas promedio de los ostiones en los pearl-net variaron dentro de un rango muy estrecho, entre  $2,97 \pm 0,36$  y  $3,18 \pm 0,36$  cm (**Figura 9A**). En cuanto al peso promedio de los ostiones, s3lo se observaron diferencias entre diferentes pearl-nets a un metro de profundidad. Los ostiones del pearl-net 1 registraron un peso promedio de  $2,98 \pm 1,28$  g, los del pearl-net 2,  $4,77 \pm 1,49$  g, y los del pearl-net 3,  $5,53 \pm 1,39$  g. En las otras profundidades de cultivo (2 y 3 m) no se observ3 una variaci3n marcada del peso de los ostiones entre pearl-nets, los que fluctuaron entre  $5,04 \pm 1,57$  y  $6,10 \pm 1,68$  g en promedio por individuo (**Figura 9B**).



**Figura 9.** A. Talla promedio (alto [cm]; promedio  $\pm$  D.E) de osti3n del norte cultivados en pearl-nets (n=3) a diferentes profundidades. B. Peso promedio ([g]; promedio  $\pm$  D.E) de osti3n del norte cultivados en pearl-nets (n=3) a diferentes profundidades, luego de 90 d1as de cultivo.

Para el recurso ostra japonesa, no se observaron diferencias significativas en el tama1o promedio (largo total) de los individuos al comparar entre pearl-nets y entre las diferentes profundidades. Si se observ3 que el tama1o promedio de las ostras en los pearl-net a 1 m de profundidad es relativamente menor que el tama1o promedio en las otras profundidades de cultivo. Sin embargo, la alta variabilidad en el tama1o de los individuos dentro de cada grupo hace que estas diferencias no sean significativas (ANOVA F (4,171 = 4,59;  $p > 0,05$ ) (**Figura 10A**). En general, el tama1o promedio (largo total) de las ostras en el primer control vari3 entre  $3,53 \pm 0,50$  cm y  $4,70 \pm 0,79$  cm, con una media general de 4,18 cm. El peso de las ostras sigue una tendencia similar a la observada para el tama1o, es decir, los individuos de los pearl-nets cultivados a 1 m de profundidad tienden mostrar pesos menores que los cultivados a 2 o 3 m de profundidad, sin embargo, la alta variabilidad dentro de los grupos hace que estas diferencias no sean significativas. El peso promedio de las ostras vari3 entre  $3,92 \pm 1,45$  y  $6,36 \pm 1,94$  g en promedio por individuo (**Figura 10B**).

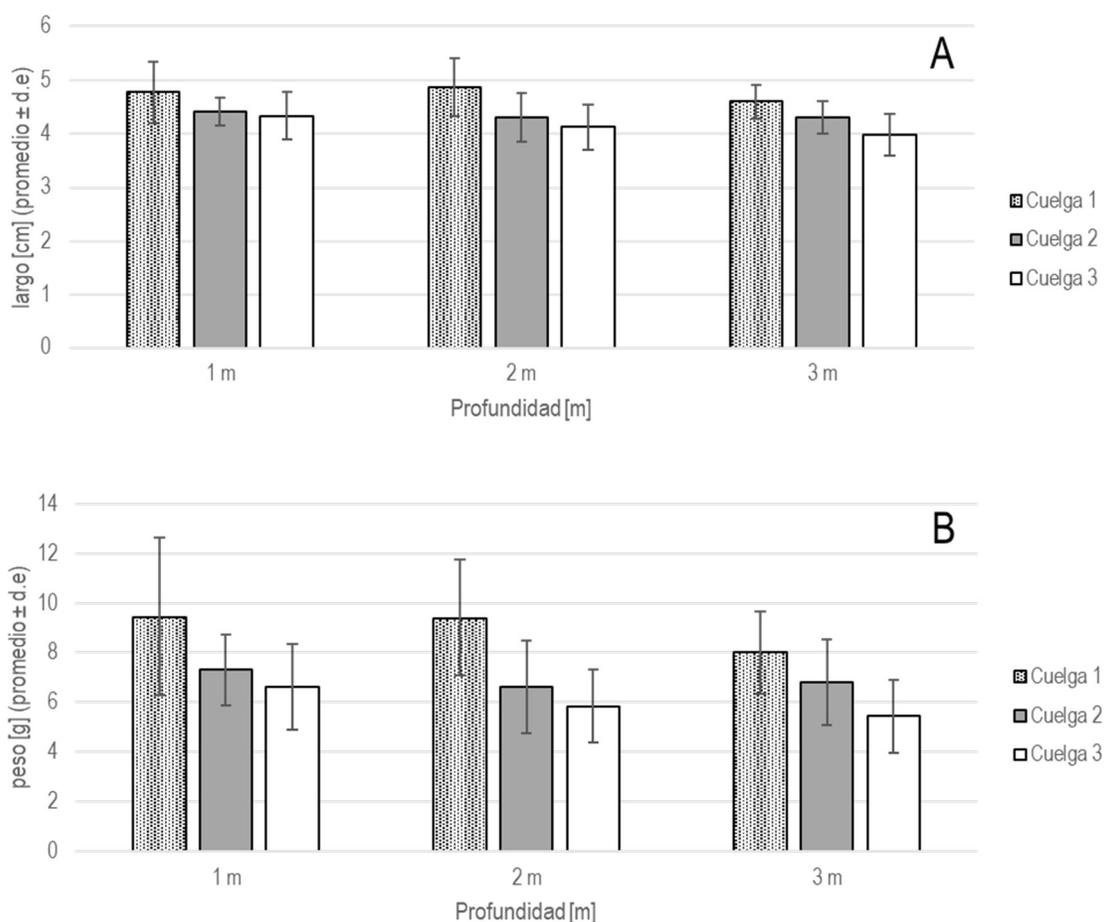


**Figura 10.** A. Talla promedio (alto [cm]; promedio  $\pm$  D.E) de ostra japonesa cultivados en pearl-nets (n=3) a diferentes profundidades. B. Peso promedio ([g]; promedio  $\pm$  D.E) de ostra japonesa cultivados en pearl-nets (n=3) a diferentes profundidades, luego de 90 d3as de cultivo.

Para el recurso chorito, se observaron leves diferencias en el tama1o promedio entre cuelgas en todas las profundidades de cultivo. En todas las profundidades analizadas, la cuelga 1 registr3 un tama1o mayor en comparaci3n a las otras cuelgas. Sin embargo, la alta variabilidad en el tama1o de los individuos dentro de cada grupo hace que estas diferencias no sean significativas ni entre cuelgas ni a las diferentes profundidades de cultivo (ANOVA F (4,171 = 2,42; p>0,05) (**Figura 11A**). En general, el tama1o promedio (largo total) de los choritos en el primer control vari3 entre  $3,98 \pm 0,39$  cm y  $4,86 \pm 0,54$  cm, con una media general de 4,41 cm. El peso promedio de los choritos sigue una tendencia similar a la observada para el tama1o, es decir, los choritos cultivados en la cuelga 1 registran pesos promedio mayores a los de las otras cuelgas en todas las profundidades de cultivo, sin embargo, la alta variabilidad dentro de los grupos hace que estas diferencias no sean significativas. En general, el

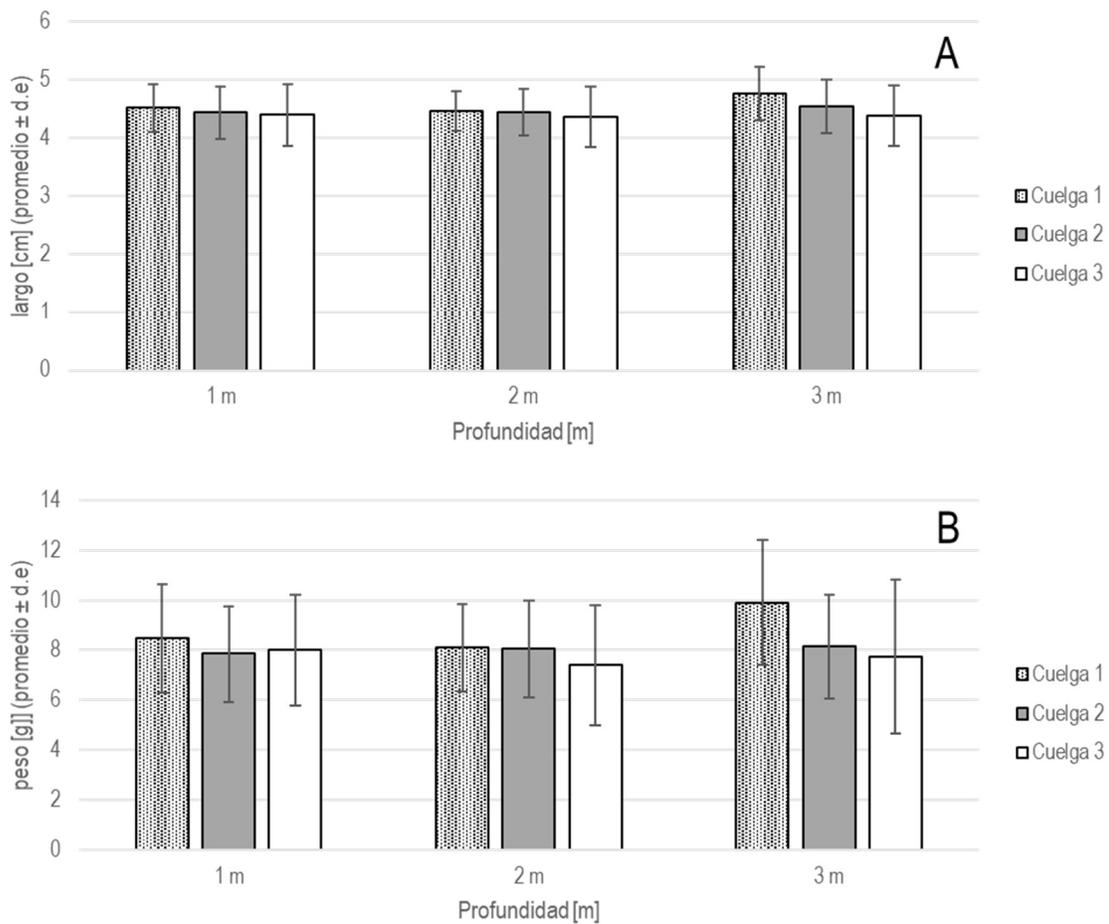


peso promedio de los choritos en el primer control varió entre  $5,44 \pm 1,47\text{g}$  y  $9,47 \pm 3,19\text{g}$  (**Figura 11B**).



**Figura 11.** A. Talla promedio (alto [cm]; promedio  $\pm$  D.E) de choritos cultivados en cuelgas (n=3) a diferentes profundidades. B. Peso promedio ([g]; promedio  $\pm$  D.E) de choritos cultivados en cuelgas (n=3) a diferentes profundidades, luego de 90 días de cultivo.

Finalmente, para el recurso choro zapato, no se observaron diferencias ni entre cuelgas ni entre profundidades, tanto en la talla promedio como en el peso promedio de los individuos. El tamaño promedio (largo total) en todas las profundidades de cultivo varió dentro de un rango muy estrecho, entre  $4,36 \pm 0,51\text{ cm}$  y  $4,76 \pm 0,45\text{ cm}$  (**Figura 12A**), con una media general de 4,48 cm. El peso promedio del recurso choro zapato sigue una tendencia similar a la observada para el tamaño, es decir, se registraron pesos promedio homogéneos independiente de la cuelga o profundidad a la cual se haya realizado el cultivo. En general, el peso promedio del choro zapato en el primer control varió entre  $7,40 \pm 2,43\text{ g}$  y  $9,94 \pm 2,52\text{ g}$ .



**Figura 12.** A. Talla promedio (alto [cm]; promedio  $\pm$  D.E) de choro zapato cultivados en cuelgas (n=3) a diferentes profundidades. B. Peso promedio ([g]; promedio  $\pm$  D.E) de choro zapato cultivados en cuelgas (n=3) a diferentes profundidades, luego de 90 d1as de cultivo.



**Objetivo específico 2:** *Desarrollar cultivos pilotos de pequeña escala en diferentes zonas geográficas del país.*

### **5.3. Obtención de semillas/plántulas de macroalgas e invertebrados para cultivos multi-especies**

Para la realización de los cultivos multi-especies en la región de Los Lagos, la obtención de material vegetativo de chicorea de mar, se realizó mediante compra al hatchery de Algas Chile Spa ubicado en el sector de Quillaipe, Puerto Montt. Para el caso de pelillo se obtuvieron, desde la empresa Algas Marinas SA ubicada en la ciudad de Ancud. Semillas de ostra japonesa y choro zapato fueron adquiridas en Cultivos Cholche, Hueihue, Chiloé. Para el caso del chorito, se obtuvieron semillas provenientes de captación natural del Estero Castro, Chiloé.

Para el cultivo en el sitio Chungungo, la obtención de semillas y plántulas se realizó mediante compra al hatchery del consorcio Aquapacífico.

### **5.4. Implementación y seguimiento de cultivos pilotos de macroalgas y multi-especies en el norte y sur de Chile**

#### 5.4.1. Configuración de co-cultivos y cultivos multi-especies

En la **Tabla 6** se presenta la configuración final de los cultivos implementados en la presente etapa.

**Tabla 6.**  
Configuraciones de co-cultivos y cultivos multi-especies según sitio de estudio.

Sitio Estudio	Tipo Cultivo	Macroalgas	Invertebrados
CCAA Hueihue	-Multi-especies suspendido en plansa	Chicorea, pelillo	
AMERB Chungungo	-Multi-especies suspendido en long-lines	Huiro	Ostión, ostra japonesa
	-Cultivo de fondo (repoblación)	Huiro palo	
CCAA río Pudeto	-Co-cultivo de fondo en camillas	Pelillo	Ostra japonesa, choro zapato
CCAA Quinchao	-Multi-especies suspendido en plansa	Chicorea, pelillo	



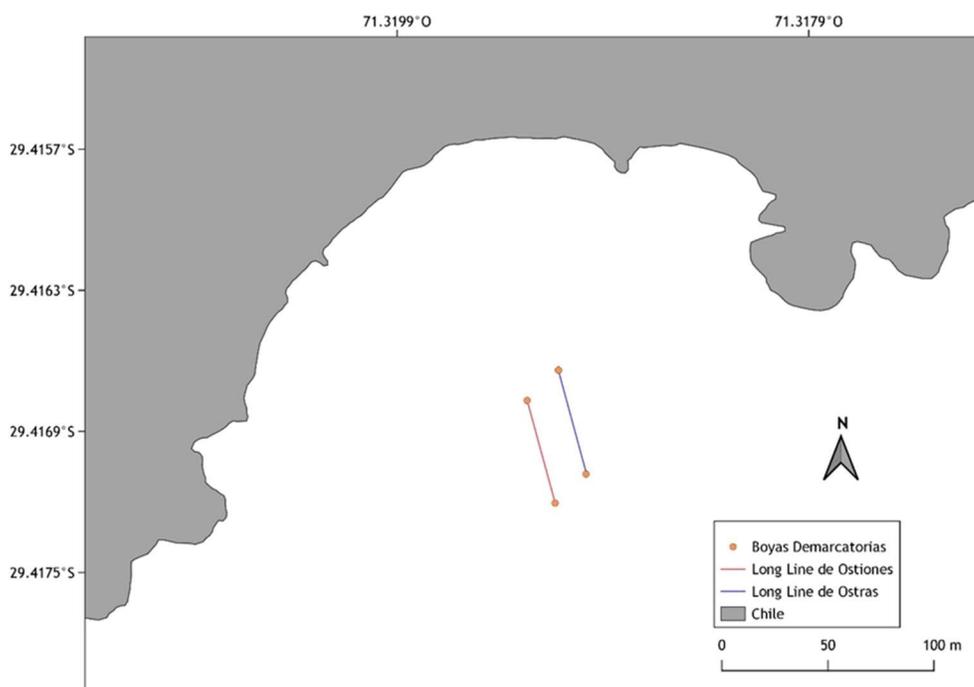
### 5.4.1.1. Sitio Chungungo

El cultivo consisti3 en 2 long-lines independientes de 50 m. Las l3neas se instalaron en el pol3gono identificado en la Etapa 2 del Programa y que se especifica en el permiso correspondiente (**Tabla 7, Figura 13**). En la primera l3nea se instalaron 22 linternas de cultivo de ostras y 18 con osti3n del norte. En la segunda, se instalaron 50 metros de cabo encordado con pl3ntulas de huiro (**Figura 14**). Esta actividad se realiz3 bajo el marco del permiso de ampliaci3n del AEAMERB otorgado en febrero del 2021 mediante Res Ex. 270/2021 (**Anexo 1**).

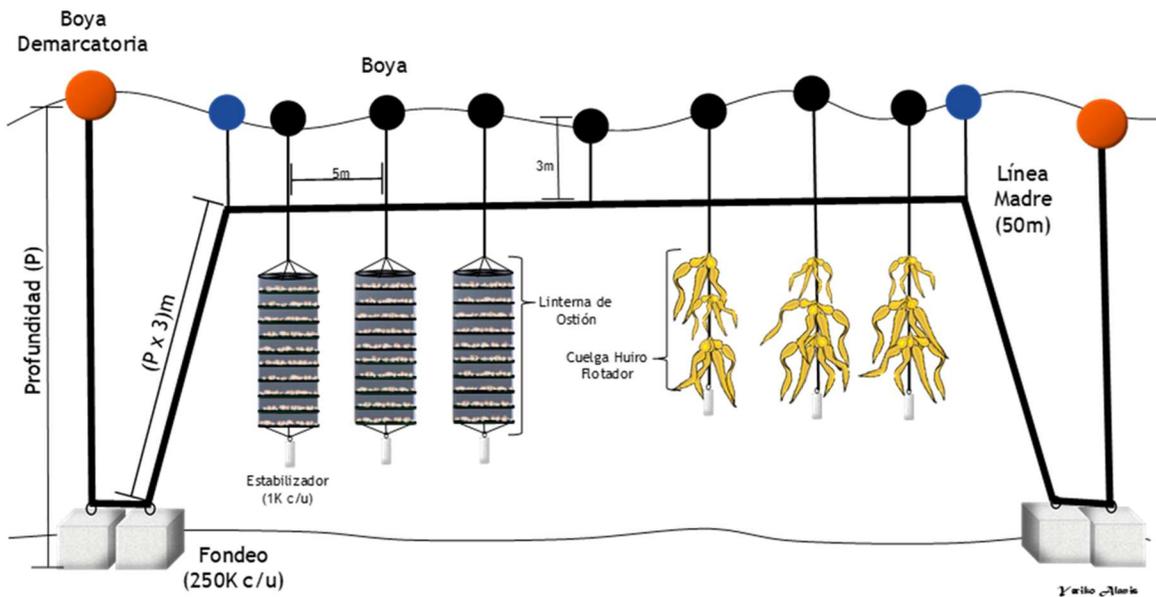
**Tabla 7.**

V3rtices en WGS-84 del pol3gono solicitado para realizar Acuicultura en AMERB Chungungo B.

V3rtice	Latitud S	Longitud W
A	29°25'00,259" S	071°19'11,903"
B	29°25'03,156" S	071°19'10,888"
C	29°25'02,509" S	071°19'07,036"
D	29°24'59,558" S	071°19'07,963"

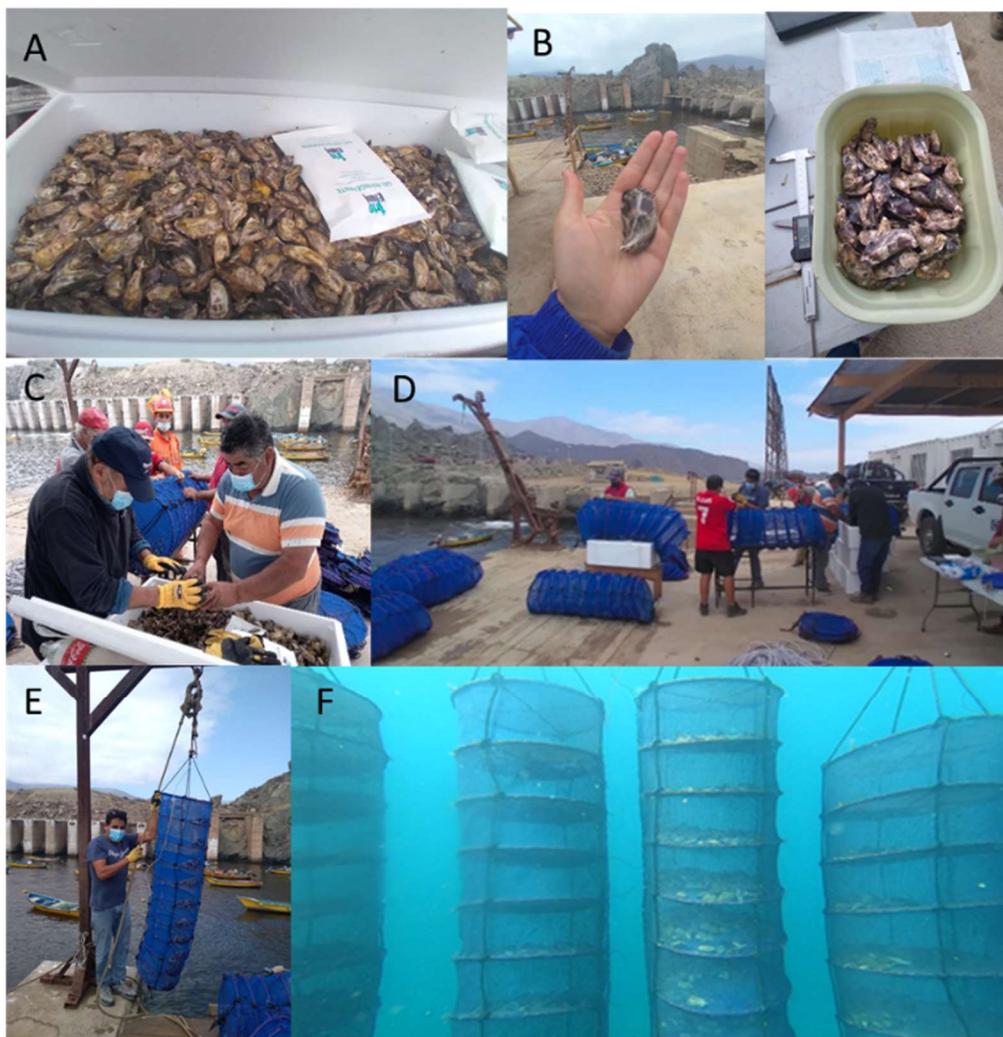


**Figura 13.** Ubicaci3n de la l3nea de cultivo instalada con linternas de ostras y ostiones en AMERB Chungungo B.



**Figura 14.** Representación gráfica de Long-lines de cultivo multi-especies, considerar que para efectos prácticos no se incluyeron la totalidad de reinales y linternas solicitadas. Línea con linternas de ostión y reinales con plántulas de huíro.

El día 01 de abril del 2021 se realizó la siembra de 24.000 semillas de ostras japonesas en 22 linternas de 10 pisos cada una con apertura de malla de 4,5 mm. Se sembró cada piso con una densidad de 100 individuos con un peso promedio de ~ 1 kg. Para el seguimiento de crecimiento, mortalidad y peso por piso, se identificaron 6 pisos que fueron marcados con patrón único de cuentas de plástico en amarracables. La longitud máxima de la valva fue medida en cada uno de los individuos sembrados en los pisos antes mencionados, además se pesaron la totalidad de los individuos por piso para obtener el peso total. La longitud promedio de los individuos sembrados fue de  $49,52 \pm 9,19$  mm. El peso total por piso fue de  $1,05 \pm 0,11$  kg. La preparación de las linternas fue realizada en la caleta de Chungungo y luego fueron llevadas al AMERB para la siembra (**Figura 15**).



**Figura 15.** Implementación de cultivo de ostra japonesa en AMERB Chungungo B. A) Ostras entregadas por el proveedor. B) Tamaño de ostras sembradas. C) y D) Socios OPA Organización comunitaria de Buzos mariscadores Los Castillo. E) Linternas de cultivo de 10 pisos. F) Linternas con ostras en el AMERB Chungungo B.

El 28 de mayo del 2021 se realizó la siembra de 18.000 semillas de ostiones. La densidad de siembra fue de 100 semillas de ostión por piso, en 18 linternas de 10 pisos cada una (**Figura 16**). Para estimar el crecimiento, la mortalidad y peso por piso, se seleccionaron al azar 6 pisos que fueron marcados para ser monitoreados. En cada piso seleccionado se pesaron la totalidad de las semillas y se midieron una muestra de 25 individuos por piso. El tamaño de siembra promedio fue de  $12,4 \pm 1,8$  mm y el peso fue de  $32,6 \pm 4,5$  g.



**Figura 16.** Implementaci3n de cultivo de osti3n del norte en AMERB Chungungo B. A) y B) Preparaci3n entrega de semillas (cortesía Aquapacífico). C) Semillas de osti3n. D) Semillas previo al llenado de linternas. E) F) y G) Linternas con semillas. H) embarcaci3n recibiendo linternas de cultivo.

El día 22 de octubre del 2021 se sembraron de forma experimental, 15 plántulas de huiro en forma de reinales, sin embargo, hubo una p3rdida de material producto del corte de la línnea de cultivo, sin embargo 84 días despu3s fue posible rescatar 2 individuos cuya biomasa promedio fue de 4,40 kg y con una longitud promedio de 206 cm (**Figura 17**). El 27 de diciembre del 2021 se sembraron 50 metros de cabo encordado con una densidad de 9 plántulas de huiro por metro lineal. Se seleccionaron 4 cabos de 2 metros que fueron marcados para realizar el monitoreo de mortalidad, longitud, número de estipes y biomasa. Originalmente se había propuesto el cultivo por reinales de cabo con plántulas encordadas, sin embargo, al momento de la siembra, producto de la disponibilidad de espacio en la estructura de cultivo se cultiv3 de forma paralela a la línnea madre.



**Figura 17.** Cultivo de *M. pyrifera* en sitio AMERB Chungungo B. A) Siembra experimental en reinales. B) Día 84 de cultivo

#### 5.4.1.2. Sitio Quinchao

En la CCAA administrada por la Corporación Municipal de Quinchao, se está ejecutando un segundo cultivo multi-especies de algas (chicorea y pelillo) en sistema de plansas. El sistema de cultivo base se encuentra instalado desde el año 2019. Durante el primer semestre del año 2021 se realizaron mantenciones respectivas (**Figura 18**) y durante julio, se sembraron las algas.

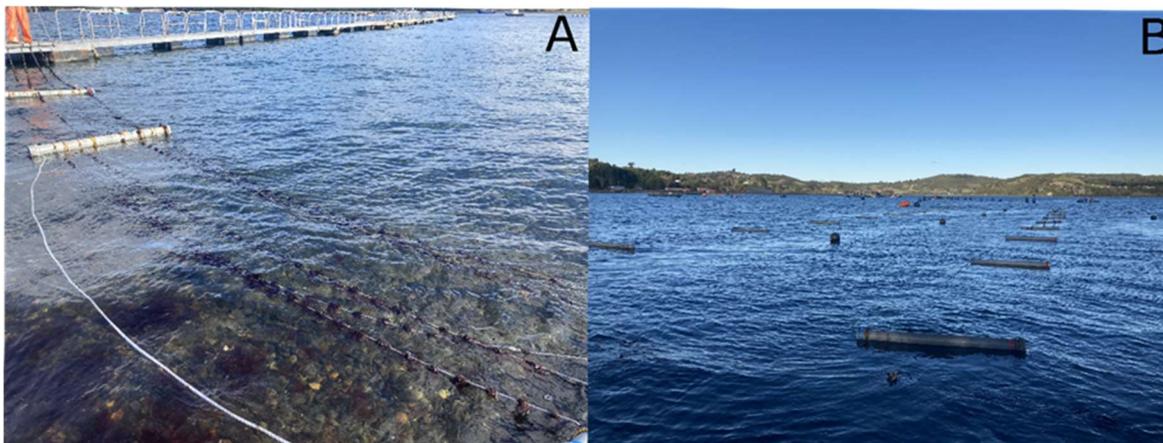


**Figura 18.** A) Revisión y mantención del sistema plansas y B) instalación de líneas con algas en el sistema de cultivo.

Para esta etapa, se dispuso un sistema de plansas donde se instalaron 150 metros de cuerdas inoculadas para cada especie y en distintas densidades (chicorea: densidad alta: 0.5 kg y baja: 0.25



kg; pelillo: densidad alta: 1 kg, y baja: 0.5 kg) (**Figura 19**). Para ambos casos se monitorearán mensualmente y se evaluará el desempeño luego de la realización de podas (2 meses desde el inicio del cultivo), durante el periodo de cultivo.



**Figura 19.** Sistema de cultivo en Quinchao. A) Unidad de plansa con algas, B) Vista del sistema de plansas instalado.

A fines de septiembre del 2021 se procedió a la realización de la poda en las unidades de plansa para ambos recursos (**Figura 20**), para evaluar el desempeño que puedan presentar al estar bajo una condición de poda, que eventualmente pudiera aumentar la biomasa de algas en crecimiento.



**Figura 20.** Sistema de cultivo en Quinchao. A) Algas previo a la poda, B) Algas luego del proceso de poda

#### 5.4.1.3. Sitio Pudeto

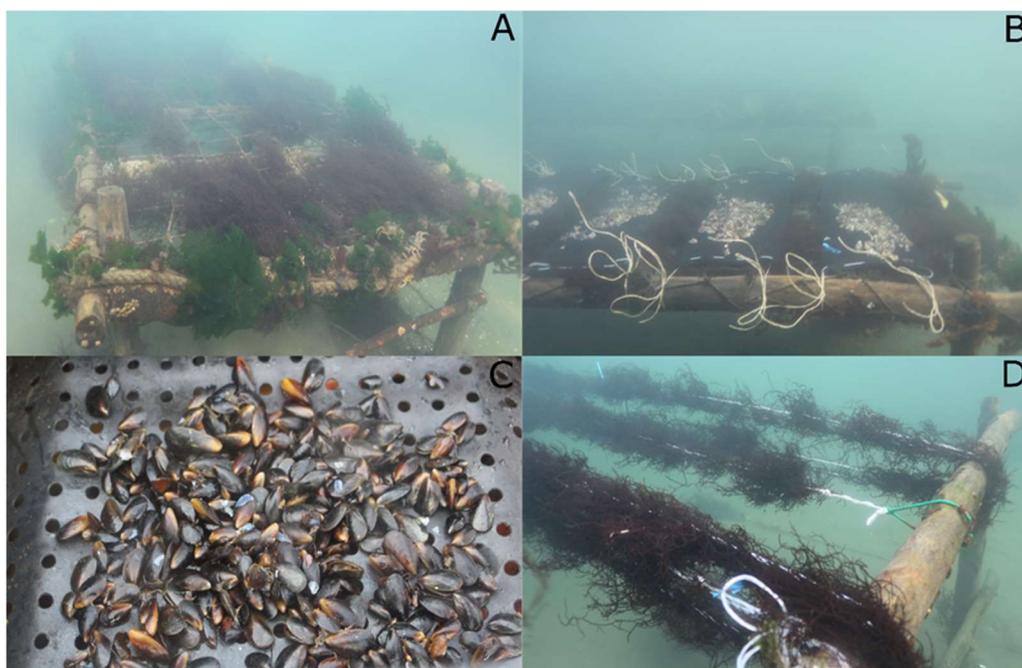
En la CCAA del río Pudeto, se implementaron co-cultivos de ostra japonesa - pelillo y choro zapato – pelillo, utilizando camillas como módulos de cultivo. Las camillas son de aproximadamente 1 m de alto,



1 m de ancho y 5 m de largo (**Figura 21A**). Para el caso de la ostra, sobre cada camilla se dispusieron 10 bolsas de malla plástica (apertura de malla de 1-1.5 cm) conteniendo aproximadamente 200 semillas de 3-4 cm de longitud (**Figura 21B**). Para choro zapato, se dispusieron 10 bolsas de malla plástica (apertura de malla de 1-1.5 cm) conteniendo aproximadamente 300 semillas de 2.5 - 3 cm de longitud. Para los co-cultivos, bajo las camillas se dispusieron 3 cuerdas inoculadas con pelillo por cada camilla. Se evaluaron los siguientes tratamientos, cada uno con 3 réplicas (camillas):

- Cultivo de choro zapato
- Cultivo de ostra
- Co-cultivo de choro zapato y pelillo
- Co-cultivo de ostra y pelillo

Se dispuso un cultivo control para pelillo en cuerdas (15 cuerdas) a 20-30 cm del fondo (**Figura 21D**). Durante el mes de julio 2021, se sembraron las algas y bivalvos en las estructuras de cultivo. Y posteriormente, durante el segundo semestre del 2021, se procedió a los respectivos monitoreos.



**Figura 21.** Sistema de cultivo en Pudeto. A) Camillas de cultivo, B) Mallas de ostra japonesa en camillas de co-cultivo, C) Semillas de Choro zapato en mallas de cultivo, D) Tratamiento control para cuerdas de pelillo.

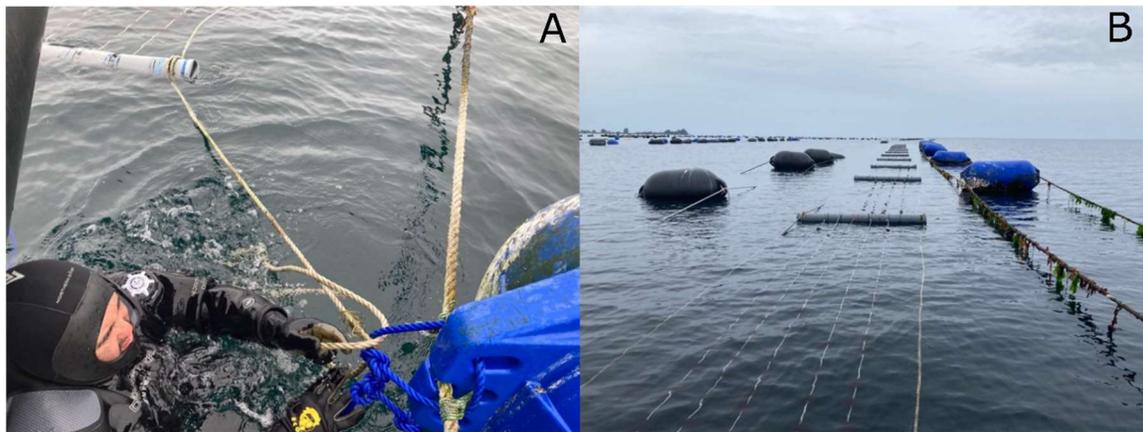
#### 5.4.1.4. Sitio Hueihue

En la CCAA de Cultivos Cholche se realizó el primer ciclo de cultivo multi-especies, correspondiendo a un cultivo de chicorea y pelillo en sistema de planzas dispuestos en un long-line (**Figura 22**). En el sistema de planzas se instalaron 150 metros de cuerdas inoculadas para cada especie y en distintas

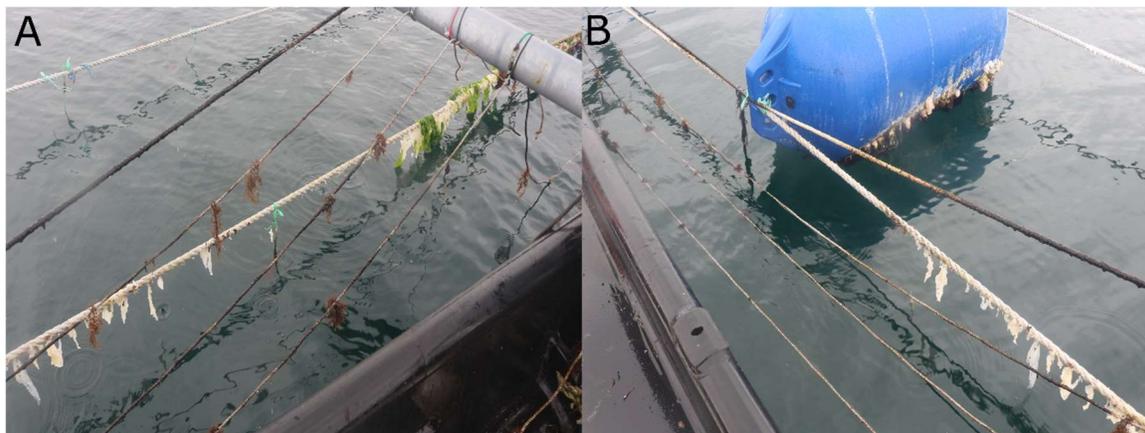


densidades (chicorea: densidad alta: 0.5 k, y baja: 0.25 kg; pelillo: densidad alta: 1 kg y baja: 0.5 kg). Mensualmente se monitore3 y evalu3 el desempe1o luego de la realizaci3n de poda (3 meses desde el inicio del cultivo).

La instalaci3n se realiz3 durante fines de agosto y principios de septiembre 2021, en disposici3n paralela a las l3neas de cultivo pertenecientes a cultivos Cholche. Durante los meses siguientes se observaron problemas asociados a la instalaci3n del sistema, principalmente generados por las condiciones clim3ticas del lugar (bah3a abierta al mar interior) y sumado a esto, problemas mec3nicos de la estructura (e.g., roce con boyas de cultivo y enredos con otras l3neas), lo que se tradujo en una disminuci3n y posterior p3rdida (parcial y total) de biomasa para la especie chicorea (**Figura 23**). En el caso de la especie pelillo, no se observ3 lo ocurrido con chicorea, pero el sistema present3 enredamiento entre las cuerdas y tambi3n con las l3neas de cultivo.



**Figura 22.** Sistema de cultivo en sitio Hueihue. A) instalaci3n del sistema planas y B) l3neas con algas en el sistema de cultivo.



**Figura 23.** Sistema de cultivo en sitio Hueihue. A) Disminuci3n de biomasa para las l3neas de cultivo de chicorea. B) L3neas con desprendimiento total de biomasa de chicorea.



## 5.4.2. Monitoreo del desempeño productivo

### 5.4.2.1. Sitio Chungungo

#### Ostra (*C. gigas*)

El 24 de agosto del 2021 se realizó un desdoble donde la totalidad de las ostras se traspasaron a 40 linternas con apertura de malla de 21.1 mm y una densidad de 32 individuos por piso. En los monitoreos realizados el 8 de junio y 24 de agosto se recolectaron al azar 20 individuos para el cálculo de los índices de condición e índice de rendimiento productivo. A mediados de septiembre se perdieron 23 linternas por corte de línea madre producto de marejadas. Actualmente el cultivo cuenta con 17 linternas de 10 pisos. Se estima una existencia de 4.000 ostras.

Hasta el momento se ha monitoreado hasta el día 287 de cultivo. El día 5 de mayo del 2021 se realizó la primera evaluación y mantenimiento de las linternas (**Figura 24**). El mantenimiento consistió en agitar las linternas y la evaluación visual de la presencia de fouling.

En cuanto al crecimiento en longitud, se observó un aumento promedio de 0.17 mm día<sup>-1</sup> llegando a 100,8 ± 41,7 mm promedio a los 287 días de cultivo. Respecto al peso húmedo, se registró un aumento diario promedio de 0.088 g d<sup>-1</sup> llegando hasta 5.3 kg piso<sup>-1</sup> el día 251 de cultivo. El día 287 se registró un descenso a 4,8 ± 0,7 kg piso<sup>-1</sup>, provocada probablemente por la mortalidad registrada en el último monitoreo. La mortalidad promedio llegó al 29 ± 5,6 % en relación a los individuos sembrados, registrándose la mayor mortalidad en el monitoreo del día 251 de cultivo con 22 ± 2,8% (**Tabla 8, Figura 25**). Esta mortalidad puede ser asociada a un aumento de asentamiento de cirripedios en las conchas y en la infraestructura de cultivo. Para el índice de condición (IC) e índice de rendimiento productivo (IRP) se observó un aumento al día 145 respecto al día 88 de cultivo, con un aumento del 15% y de 8,9%, respectivamente (**Tabla 9**).



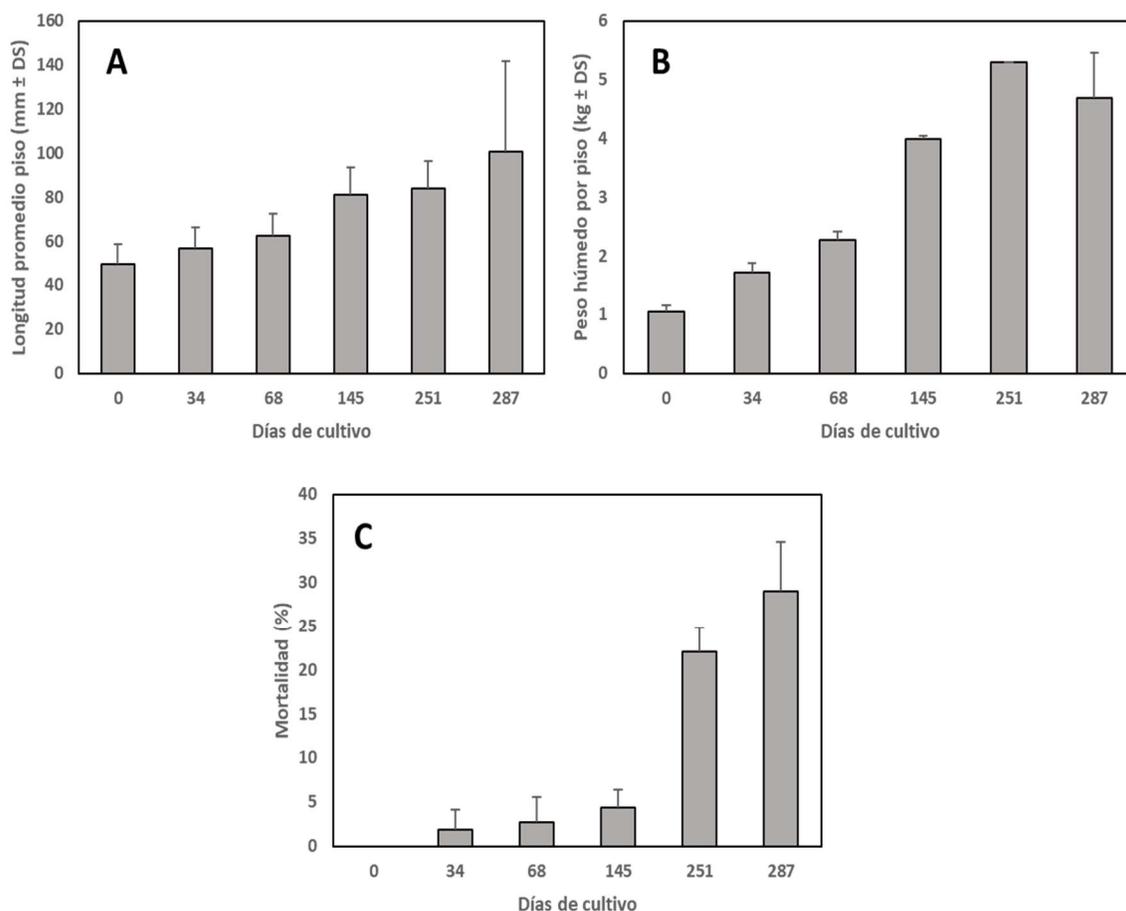
**Figura 24.** Primer monitoreo de linternas de cultivo de ostra japonesa en AMERB Chungungo B.



**Tabla 8.**

Longitud de la concha y peso húmedo promedio por piso de ostra *C. gigas*, sitio Chungungo B. DS = Desviación estándar, SGR = Tasa de crecimiento estándar relativa.

Fecha	Días de cultivo	Longitud concha (mm)		Peso Húmedo piso (kg)		
		Promedio	DS	Promedio	DS	SGR
01 de abril 2021	0	49,52	9,19	1,05	0,11	0,000
5 de mayo 2021	34	56,87	9,52	1,70	0,16	0,014
8 de junio 2021	68	62,28	10,15	2,26	0,14	0,008
24 de agosto 2021	145	81,21	12,51	3,98	0,05	0,007
8 de diciembre 2021	251	83,97	12,57	5,30	0,00	0,003
13 de enero 2022	287	100,85	41,07	4,68	0,77	-0,003



**Figura 25.** Resultados productivos del cultivo de *C. gigas* en sitio AMERB Chungungo B. A) Longitud promedio (mm ± DS). B) Peso húmedo promedio (kg ± DS) por piso, C) Mortalidad acumulada (% ± DS).



**Tabla 9.**

Rendimiento productivo para *C. gigas*, sitio AMERB Chungungo B. IC: Índice de condición, IRP: Índice de rendimiento productivo. DS = Desviación estándar.

Fecha	Días de cultivo	IC (%)		IRP (%)	
		Promedio	DS	Promedio	DS
8 de junio 2021	68	19,2	5,6	15,9	4,1
24 de agosto 2021	145	34,3	12,4	24,9	6,9

### Ostión del norte (*A. purpuratus*)

El 20 de octubre del 2021 se realizó el desdoble, que consistió en el cambio de linternas. Dada la alta mortalidad registrada en los primeros meses, el número de linternas se redujo a 7 con 10 pisos cada una y 21,1 mm de apertura de malla. La densidad se bajó a 25 individuos (**Figura 26**). Al día 230, durante la época estival, las valvas de ostiones presentaron mayor fragilidad y un aumento del fouling, lo que influyó en el registro del peso húmedo por piso (**Figura 27**).

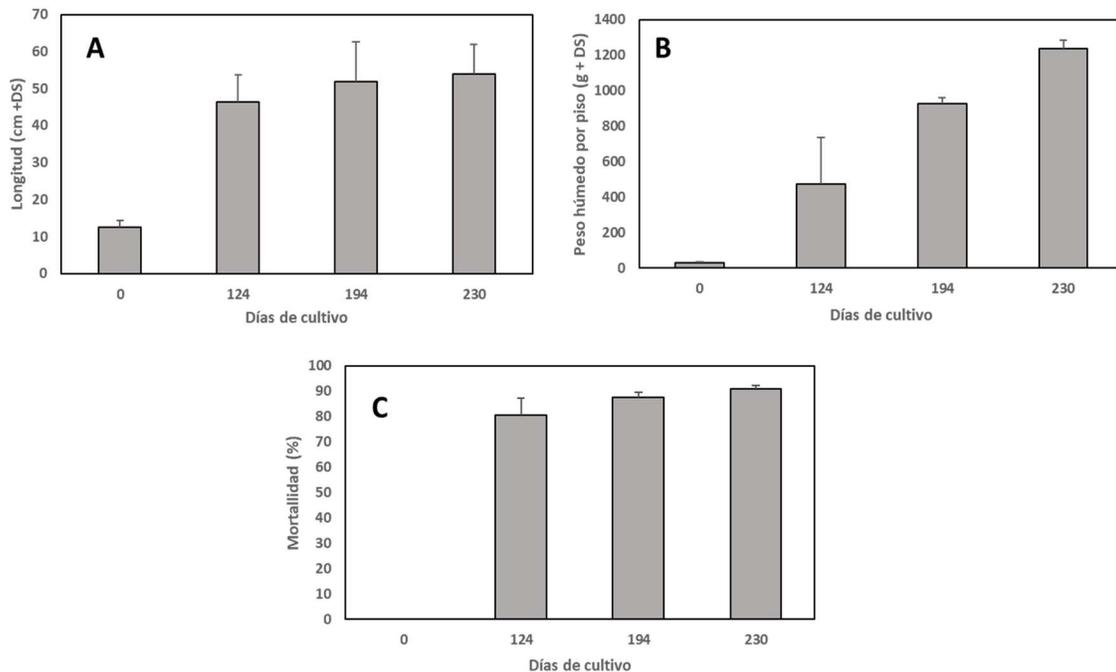
El crecimiento mostró un incremento sostenido al día 230 de cultivo llegando a los  $53,8 \pm 8,05$  mm. El mayor crecimiento se registró en los primeros 124 días de cultivo, correspondiente a la temporada otoño e invierno, con un promedio de crecimiento diario de  $0,27$  mm d<sup>-1</sup> y  $0,18$  g d<sup>-1</sup> por individuo. Sin embargo, durante este periodo se registró la mayor mortalidad en el cultivo con  $88 \pm 6,65$  % de los individuos sembrados (**Figura 28, Tabla 10**).



**Figura 26.** Desdoble al día 145 de cultivo de *A. purpuratus*. A) Socios de la OPA “Los Castillo”. B) Tamaño de individuos. C) Individuos en linternas de cultivo con 21,1mm de apertura de malla.



**Figura 27.** Cultivo de *A. purpuratus* al d1a 230. A) Mortalidad por fragilidad de las valvas. B) Ostiones en la linterna de cultivo. C) Vista externa de valva con fouling. D) Vista interna de osti3n de cultivo.



**Figura 28.** Resultados productivos del cultivo de *A. purpuratus* en sitio AMERB Chungungo B. A) Longitud promedio (mm  $\pm$  DS). B) Peso h1medo promedio (g  $\pm$  DS) por piso, C) Mortalidad acumulada (%  $\pm$  DS).



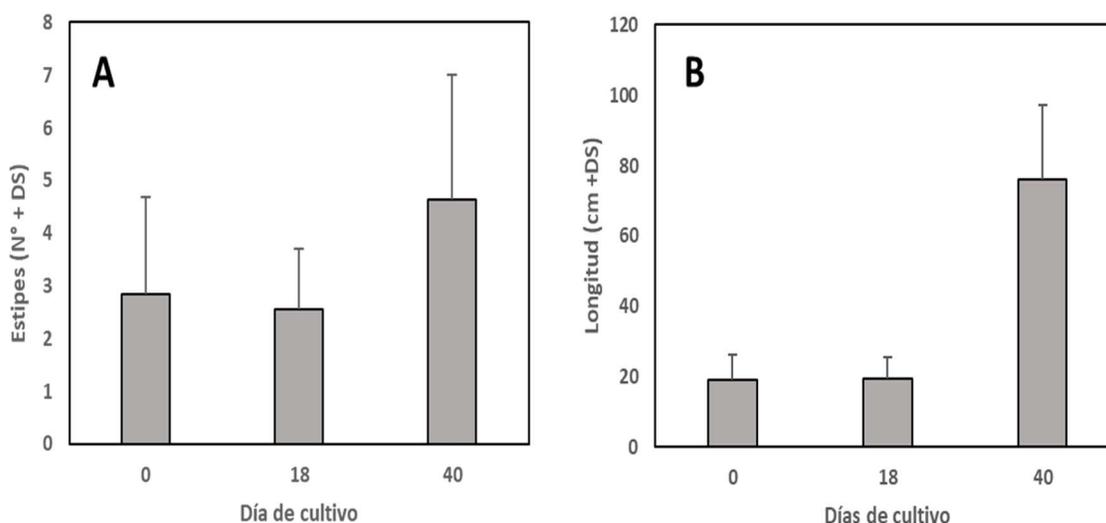
**Tabla 10.**

Longitud de la concha y peso hmedo promedio por piso de osti3n del norte *A. purpuratus*, sitio AMERB Chungungo B. DS = Desviaci3n estandar, SGR = Tasa de crecimiento estandar relativa.

Fecha	Días de cultivo	Longitud concha (mm)		Peso hmedo (g)		
		Promedio	DS	Promedio	DS	SGR
28 de mayo	0	12,43	1,85	32,61	4,96	0,000
29 de septiembre	124	46,26	7,35	475,00	262,99	0,022
8 de diciembre	194	51,87	10,77	925,00	35,35	0,010
13 de enero	230	53,85	8,05	1235,00	49,49	0,008

Huiro (*M. pyrifera*)

El monitoreo del cultivo mostr3 que la longitud registrada al d3a 40 de cultivo fue de  $76,1 \pm 20,9$  cm, lo que equivale a una tasa de crecimiento diario de  $1 \text{ cm d}^{-1}$ . Tambi3n se registr3 un aumento de estipes de 1,79 luego de 40 d3as de cultivo (**Figura 29, Tabla 11**). La mortalidad registrada al d3a 40 de cultivo fue de 6,6 % de las plántulas muestreadas. El d3a 18 de cultivo se registr3 una biomasa promedio de  $0,07 \pm 0,01$  g metro lineal<sup>-1</sup> En los pr3ximos monitoreos se seguir3 registrando este parámetro (**Figura 30**).



**Figura 29.** Crecimiento en cultivo de *M. pyrifera* en sitio AMERB Chungungo B. A) N3mero de estipes (N° ± DS). B) Longitud promedio plántulas (cm ± DS).



**Tabla 11.**

Longitud de fronda y n3mero de estipes promedio de cultivo de *M. pyrifera*, sitio AMERB Chungungo B. DS = Desviaci3n est3ndar.

Fecha	D3as de cultivo	Longitud (cm)		N3mero de estipes	
		Promedio	DS	Promedio	DS
27 de diciembre	0	19,02	7,20	2,85	1,822
13 de enero	18	19,32	6,26	2,55	1,142
22 de febrero	40	76,18	20,95	4,648	2,357



**Figura 30.** Cultivo de *M. pyrifera* en sitio AMERB Chungungo B. A) Siembra 27 de diciembre, longitud inicial pl3ntulas. B) y C) Monitoreo del 13 de enero, 18 d3as de cultivo.



#### 5.4.2.2. Sitio Quinchao

A continuación, se presentan los resultados productivos del tercer ciclo de cultivo realizado en el sitio Quinchao.

#### Chicorea (*C. chamissoi*)

El cultivo se mantuvo por 139 días. Mensualmente, dependiendo de la condición climática, se cuantificó el peso húmedo del alga y de los epibiontes presentes al momento de la extracción de las muestras desde las unidades de plansa (i.e., segmentos de 5 metros). En la **Tabla 12**, se presentan resultados de biomasa húmeda en 5 metros (alta y baja densidad) junto con los resultados de los controles en 5 metros (alta y baja densidad), y en la **Tabla 13**, el peso húmedo de los epibiontes (alta y baja densidad) junto con los epibiontes de los controles, respectivamente.

**Tabla 12.**

Peso húmedo promedio del alga *C. chamissoi* en unidades de plansa (N= 10 segmentos de 5 metros), alta y baja densidad, y controles (N= 5 segmentos de 5 metros), alta y baja densidad, en el sitio de cultivo Quinchao. AA = Peso húmedo alga alta densidad, AB = Peso húmedo alga baja densidad, CA = Peso húmedo control alta densidad, CB = Peso húmedo control baja densidad, DS = Desviación estándar, EE = Error estándar, SGR = Tasa de crecimiento estándar relativa.

Chicorea									
Peso húmedo alga									
	Fecha	AA (kg/5m)	DE	EE	SGR	AB (kg/5m)	DE	EE	SGR
Siembra	02-08-2021	0.50	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00
1° Monitoreo	02-09-2021	0.54	0.16	0.05	0.25	0.55	0.17	0.05	2.48
2° Monitoreo	28-09-2021	0.97	0.29	0.09	1.00	1.09	0.38	0.12	1.17
3° Monitoreo	26-10-2021	0.72	0.39	0.12	-0.33	0.82	0.41	0.13	-0.33
4° Monitoreo	25-11-2021	0.80	0.41	0.13	0.09	1.00	0.51	0.16	0.18
5° Monitoreo	15-12-2021	0.57	0.41	0.14	0.16	0.48	0.21	0.06	-0.53
Peso húmedo Controles									
	Fecha	CA (kg/5m)	DE	EE	SGR	CB (kg/5m)	DE	EE	SGR
Siembra	02-08-2021	0.50	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00
1° Monitoreo	02-09-2021	0.46	0.15	0.07	-0.27	0.44	0.14	0.06	-0.37
2° Monitoreo	28-09-2021	0.88	0.30	0.13	1.13	0.72	0.33	0.15	0.82
3° Monitoreo	26-10-2021	1.14	0.14	0.08	0.29	0.73	0.54	0.27	0.01
4° Monitoreo	25-11-2021	1.22	0.30	0.17	0.05	0.68	0.62	0.31	-0.05
5° Monitoreo	15-12-2021	0.45	0.14	0.08	-0.71	0.41	0.07	0.05	-0.36

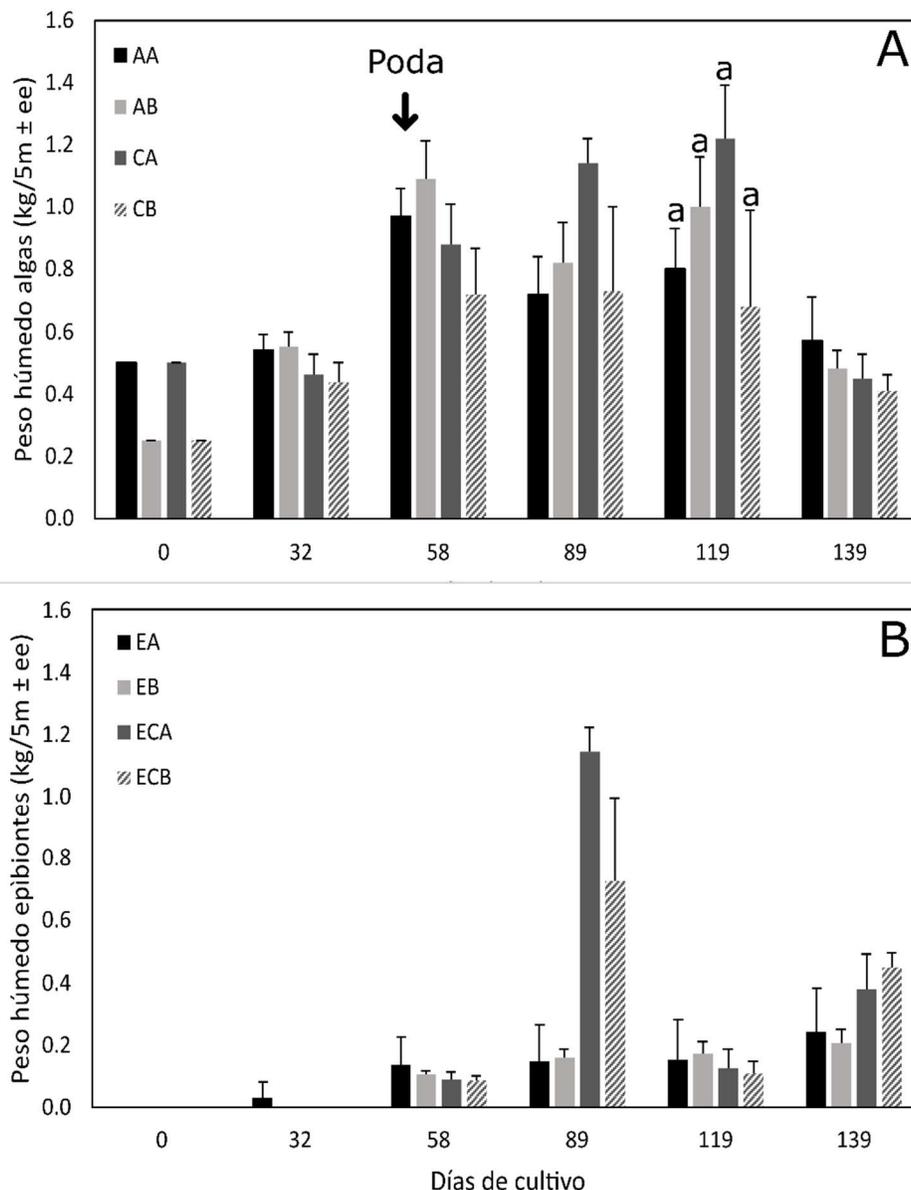


**Tabla 13.**

Peso húmedo promedio de los epibiontes en *C. chamissoi* en unidades de plansa (N= 10 segmentos de 5 metros), alta y baja densidad, y controles (N= 5 segmentos de 5 metros), alta y baja densidad, en el sitio de cultivo Quinchao. EA = Peso húmedo epibiontes alta densidad, EB = Peso húmedo epibiontes baja densidad, ECA = Peso húmedo epibiontes control alta densidad, ECB = Peso húmedo epibiontes control baja densidad, DS = Desviación estándar, EE = Error estándar.

Peso húmedo epibiontes							
	Fecha	EA (kg/5m)	DE	EE	EB (kg/5m)	DE	EE
Siembra	02-08-2021	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1° Monitoreo	02-09-2021	0.03	0.10	0.03	0.00	0.00	0.00
2° Monitoreo	28-09-2021	0.14	0.10	0.03	0.10	0.04	0.01
3° Monitoreo	26-10-2021	0.15	0.12	0.04	0.16	0.09	0.03
4° Monitoreo	25-11-2021	0.15	0.14	0.05	0.17	0.13	0.04
5° Monitoreo	15-12-2021	0.24	0.12	0.04	0.21	0.14	0.04
Peso húmedo epibiontes control							
	Fecha	ECA (kg/5m)	DE	EE	ECB (kg/5m)	DE	EE
Siembra	02-08-2021	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1° Monitoreo	02-09-2021	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2° Monitoreo	28-09-2021	0.09	0.06	0.03	0.08	0.04	0.02
3° Monitoreo	26-10-2021	1.14	0.14	0.08	0.73	0.54	0.27
4° Monitoreo	25-11-2021	0.12	0.11	0.06	0.11	0.07	0.04
5° Monitoreo	15-12-2021	0.38	0.19	0.11	0.45	0.08	0.05

La mayor acumulación de biomasa para las algas de alta y baja densidad se obtuvo luego de 58 días de cultivo, durante el mes de septiembre del 2021, alcanzando sobre los 0.97 Kg para el cultivo con alta densidad y sobre los 1.09 Kg para baja densidad. Para el caso de los controles de alta y baja densidad, la mayor acumulación de biomasa se registró durante el mes de noviembre para alta densidad y durante octubre para baja densidad (**Figura 31A**). El aumento de los epifitos se observó desde el día 32, alcanzando un máximo en el mes de octubre (día 89) en los controles del cultivo de alta y baja densidad, para luego disminuir (**Figura 31B**). Los valores de SGR para ambas densidades, muestran que luego del segundo monitoreo comienza a disminuir el crecimiento diario. Esto es explicado por la poda aplicada al segundo monitoreo (día 58 del cultivo), en la cual se obtuvo un total de 4.5 kg a partir de las 20 líneas podadas. Al comparar la biomasa máxima obtenida, usando los valores del día 119 como muestras independientes, no se observaron diferencias significativas entre ambas densidades y efecto de poda ( $F=1.006$ ;  $g.l.=3$ ;  $p=0.4$ ).



**Figura 31.** Crecimiento promedio en peso húmedo (kg / 5m ± EE) de cultivo de chicorea (*C. chamissoi*) en unidades de plansa (N= 10 segmentos de 5 metros en alta y baja densidad) y controles (N=5 segmentos de 5 metros en alta y baja densidad), en el sitio de cultivo Quinchao. A) Algas en alta y baja densidad y respectivos controles (AA = Peso húmedo alga alta densidad, AB = Peso húmedo alga baja densidad, CA = Peso húmedo control alta densidad, CB = Peso húmedo control baja densidad). B) Epibiontes en alta y baja densidad y respectivos controles (EA = Peso húmedo epibiontes alta densidad, EB = Peso húmedo epibiontes baja densidad, ECA = Peso húmedo epibiontes control alta densidad, ECB = Peso húmedo epibiontes control baja densidad).



Pelillo (*A. chilense*)

El cultivo se mantuvo por 139 días. Mensualmente, se cuantificó el peso húmedo del alga y de los epibiontes presentes al momento de la extracción de las muestras desde las unidades de plansa (i.e., segmentos de 5 metros). En la **Tabla 14** se presentan resultados de biomasa húmeda en 5 metros (alta y baja densidad) junto con los resultados de los controles (alta y baja densidad), y en la **Tabla 15**, el peso húmedo de los epibiontes en alta y baja densidad) y de los controles.

La mayor acumulación de biomasa para las algas de alta y baja densidad se obtuvo luego de 119 días de cultivo, durante el mes de noviembre del 2021, alcanzando sobre los 2.92 Kg para alta densidad y sobre 2.20 Kg para baja densidad. Para el caso de los controles de alta y baja densidad, la mayor acumulación de biomasa se registró también durante el mes de noviembre (día 119) (6.26 y 2.72 Kg, respectivamente) (**Figura 32A**). El aumento de los epifitos se observó desde el día 58, alcanzando un máximo en el mes de diciembre para alta y baja densidad (0.85 y 0.26 Kg, respectivamente) (**Figura 32B**). Los valores de SGR para ambas densidades, muestran que luego del segundo monitoreo comienza a disminuir el crecimiento diario, explicado por la poda aplicada (día 58), en la cual se obtuvo un peso total de 21 kg, a partir de las 20 líneas podadas. Al comparar la biomasa máxima obtenida al día 119, se observaron diferencias significativas principalmente dadas por el tratamiento control de alta densidad ( $F=12,663$ ;  $g.l.=3$ ;  $p<.001$ ).

**Tabla 14.**

Peso húmedo promedio del alga *A. chilense* en unidades de plansa (N= 10 segmentos de 5 metros), alta y baja densidad, y controles (N= 5 segmentos de 5 metros), alta y baja densidad, en el sitio de cultivo Quinchao. AA = Peso húmedo alga alta densidad, AB = Peso húmedo alga baja densidad, CA = Peso húmedo control alta densidad, CB = Peso húmedo control baja densidad, DS = Desviación estándar, EE = Error estándar, SGR = Tasa de crecimiento estándar relativa.

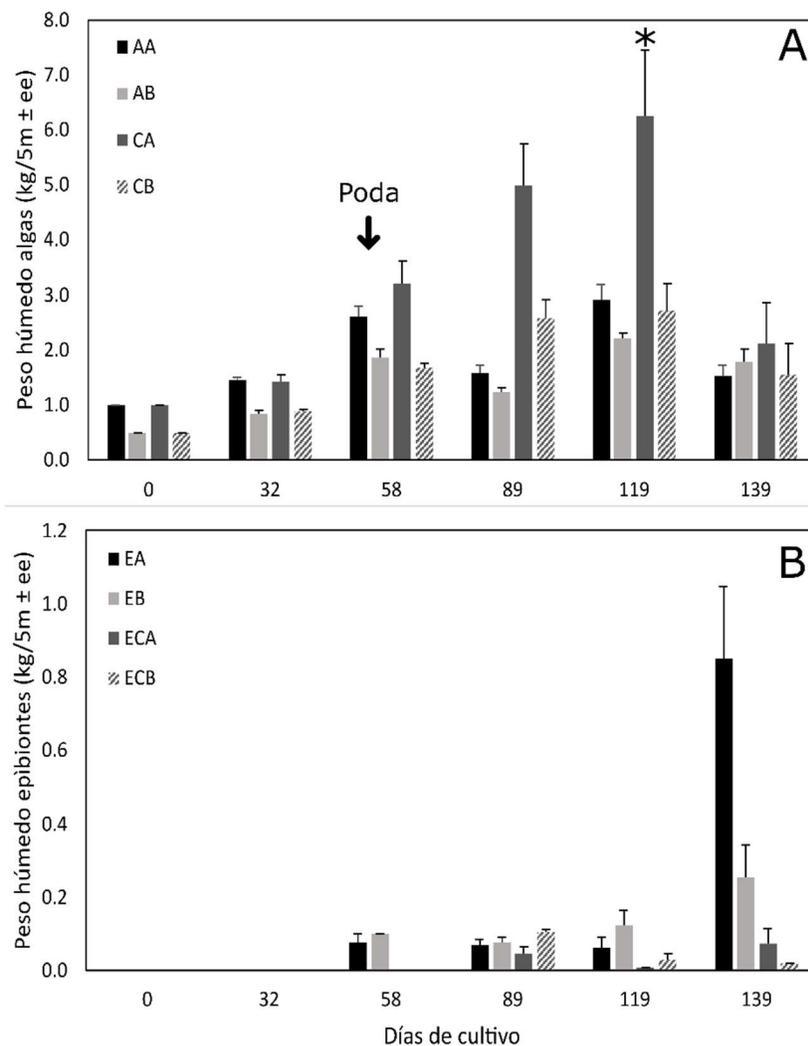
Pelillo									
Peso húmedo alga									
	Fecha	AA (kg/5m)	DE	EE	SGR	AB (kg/5m)	DE	EE	SGR
Siembra	02-08-2021	1.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00
1° Monitoreo	02-09-2021	1.44	0.19	0.06	1.14	0.85	0.16	0.05	1.67
2° Monitoreo	28-09-2021	2.60	0.64	0.20	1.02	1.86	0.48	0.15	1.35
3° Monitoreo	26-10-2021	1.58	0.45	0.14	-0.56	1.23	0.26	0.08	-0.46
4° Monitoreo	25-11-2021	2.92	0.85	0.27	0.52	2.20	0.35	0.11	0.49
5° Monitoreo	15-12-2021	1.53	0.65	0.20	-0.47	1.78	0.74	0.24	-0.15
Peso húmedo Controles									
	Fecha	CA (kg/5m)	DE	EE	SGR	CB (kg/5m)	DE	EE	SGR
Siembra	02-08-2021	1.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00
1° Monitoreo	02-09-2021	1.43	0.28	0.12	1.12	0.87	0.10	0.05	1.75
2° Monitoreo	28-09-2021	3.21	0.92	0.41	1.39	1.68	0.18	0.08	1.12
3° Monitoreo	26-10-2021	4.98	1.73	0.77	0.49	2.59	0.72	0.32	0.49
4° Monitoreo	25-11-2021	6.26	2.64	1.18	0.19	2.72	1.08	0.48	0.04
5° Monitoreo	15-12-2021	2.12	1.46	0.73	-0.78	1.55	0.98	0.56	-0.40



**Tabla 15.**

Peso húmedo promedio de los epibiontes en *A. chilense* en unidades de plansa (N= 10 segmentos de 5 metros), alta y baja densidad, y controles (N=5 segmentos de 5 metros), alta y baja densidad, en el sitio de cultivo Quinchao. EA = Peso húmedo epibiontes alta densidad, EB = Peso húmedo epibiontes baja densidad, ECA = Peso húmedo epibiontes control alta densidad, ECB = Peso húmedo epibiontes control baja densidad, DS = Desviación estándar, EE = Error estándar.

Peso húmedo epibiontes							
	Fecha	EA (kg/5m)	DE	EE	EB (kg/5m)	DE	EE
Siembra	02-08-2021	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1° Monitoreo	02-09-2021	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2° Monitoreo	28-09-2021	0.08	0.04	0.03	0.10	0.00	0.00
3° Monitoreo	26-10-2021	0.07	0.05	0.02	0.08	0.05	0.02
4° Monitoreo	25-11-2021	0.06	0.09	0.03	0.12	0.13	0.04
5° Monitoreo	15-12-2021	0.85	0.63	0.20	0.26	0.28	0.09
Peso húmedo epibiontes control							
	Fecha	ECA (kg/5m)	DE	EE	ECB (kg/5m)	DE	EE
Siembra	02-08-2021	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1° Monitoreo	02-09-2021	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2° Monitoreo	28-09-2021	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3° Monitoreo	26-10-2021	0.05	0.04	0.02	0.11	0.07	0.01
4° Monitoreo	25-11-2021	0.01	0.00	0.00	0.03	0.04	0.02
5° Monitoreo	15-12-2021	0.07	0.09	0.04	0.02	0.00	0.00



**Figura 32.** Crecimiento promedio en peso húmedo (kg / 5m  $\pm$  EE) de cultivo de pelillo (*A. chilense*) en unidades de plansa (N= 10 segmentos de 5 metros en alta y baja densidad) y controles (N=5 segmentos de 5 metros en alta y baja densidad), en el sitio de cultivo Quinchao. A) Algas en alta y baja densidad y respectivos controles (AA = Peso húmedo alga alta densidad, AB = Peso húmedo alga baja densidad, CA = Peso húmedo control alta densidad, CB = Peso húmedo control baja densidad). B) Epibiontes en alta y baja densidad y respectivos controles (EA = Peso húmedo epibiontes alta densidad, EB = Peso húmedo epibiontes baja densidad, ECA = Peso húmedo epibiontes control alta densidad, ECB = Peso húmedo epibiontes control baja densidad).



### 5.4.2.3. Sitio Pudeto

A continuación, se presentan los resultados productivos del tercer ciclo de co-cultivo realizado en el sitio Pudeto.

#### Pelillo (*A. chilense*)

El cultivo se mantuvo por 136 días. Mensualmente, se cuantificó el peso húmedo del alga para cada uno de los tratamientos y el peso de los epibiontes presentes al momento de la extracción de las muestras (i.e., segmentos de 5 metros) en las camillas de cultivo. En la **Tabla 16**, se presentan resultados de biomasa húmeda en 5 metros, para tratamiento solo algas, co-cultivo con ostras, y co-cultivo con choro zapato. No se observó la aparición de organismos epibiontes hasta el último monitoreo en el mes de diciembre del 2021.

**Tabla 16.**

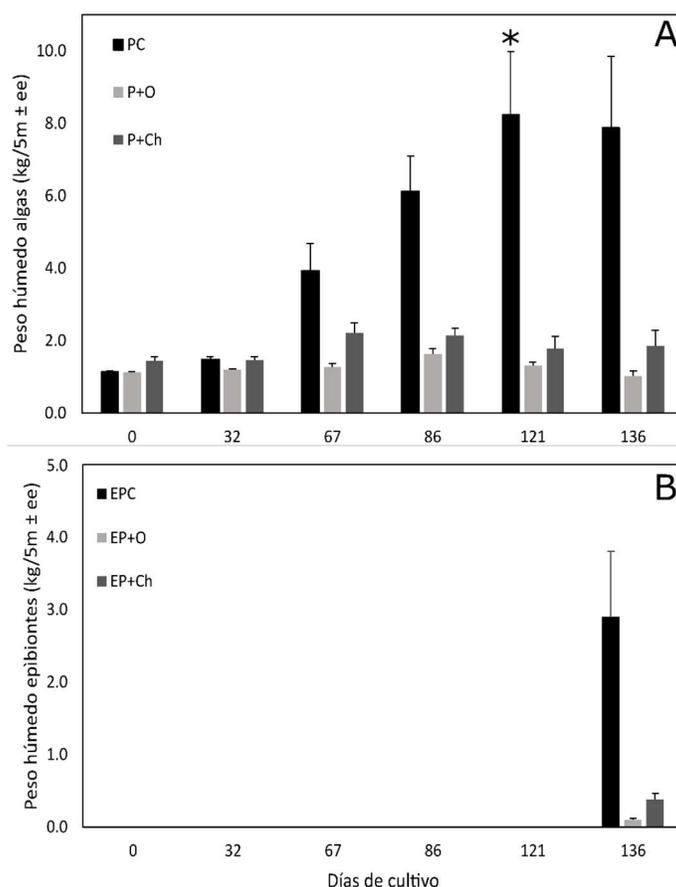
Peso húmedo promedio de *A. chilense* en 5 metros lineales (N= 6 segmentos), en camillas solo con algas, co-cultivo con ostras y co-cultivo con choro zapato, y peso húmedo promedio de epibiontes en 5 metros lineales para cada uno de los tratamientos, en el sitio de cultivo Pudeto. PC = solo algas (control), P+O = co-cultivo con ostras, P+Ch = co-cultivo con choro zapato, EPC = Epibiontes solo algas control, EP+O = Epibiontes co-cultivo con ostras, EP+Ch = Epibiontes co-cultivo con choro zapato, DS = Desviación estándar, EE = Error estándar, SGR = Tasa de crecimiento estándar relativa.

	Fecha	Solo Algas				Algas + Ostras				Algas + Choros			
		PC (kg / 5m)	DS	EE	SGR	P+O (kg / 5m)	DS	EE	SGR	P+Ch (kg / 5m)	DS	EE	SGR
Siembra	03-08-2021	1.14	0.07	0.04	1.14	1.13	0.08	0.03	0.00	1.45	0.25	0.10	0.00
1° Monitoreo	03-09-2021	1.48	0.17	0.08	1.48	1.20	0.07	0.03	0.19	1.46	0.25	0.10	0.02
2° Monitoreo	08-10-2021	3.92	1.53	0.76	3.92	1.28	0.22	0.09	0.19	2.21	0.66	0.27	1.18
3° Monitoreo	27-10-2021	6.13	1.95	0.97	6.13	1.64	0.36	0.15	1.30	2.14	0.47	0.19	-0.17
4° Monitoreo	01-12-2021	8.25	3.43	1.72	8.25	1.31	0.29	0.12	-0.65	1.77	0.89	0.36	-0.55
5° Monitoreo	16-12-2021	7.88	3.93	1.96	7.88	1.02	0.35	0.14	-1.67	1.87	1.07	0.43	0.35
	Fecha	EPC (kg / 5m)			EP+O (kg / 5m)			EP+Ch (kg / 5m)					
Siembra	03-08-2021	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1° Monitoreo	03-09-2021	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2° Monitoreo	08-10-2021	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3° Monitoreo	27-10-2021	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4° Monitoreo	01-12-2021	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5° Monitoreo	16-12-2021	2.90	1.82	0.91	0.10	0.04	0.01	0.37	0.21	0.09			

La acumulación mayor de biomasa en el tratamiento control (solo algas), se registró durante diciembre del 2021, alcanzando 8.25 Kg. Para el co-cultivo con ostras y choro zapato, la acumulación de mayor biomasa ocurrió durante octubre, alcanzando 1.64 Kg y 2.21 Kg, respectivamente (**Figura 33A**). Los valores de SGR para el tratamiento control comienzan a disminuir desde el cuarto monitoreo. Para las algas en co-cultivo con ostras y co-cultivo con choro zapato, comienzan a disminuir desde el tercer monitoreo y luego del segundo monitoreo, respectivamente.



Al comparar la biomasa m3xima, luego de los 121 d3as de cultivo, se observaron diferencias significativas entre tratamientos ( $F=22.216$ ;  $g.l.=2$ ;  $p<0.001$ ), principalmente por los valores observados en el tratamiento solo alga. Se observ3 la presencia de organismos epibiontes a los 136 d3as de cultivo (**Figura 33B**).



**Figura 33.** Crecimiento promedio en peso h3medo (kg / 5m  $\pm$  EE) en unidades de l3nea (N= 6 segmentos de 5 metros por tratamiento) de cultivo de pelillo (*A. chilense*), sitio Pudeto. A) Algas para cada uno de sus tratamientos. (PC = solo algas control, P+O = co-cultivo con ostras, P+Ch = co-cultivo con choro zapato). B) Epibiontes para cada uno de sus tratamientos. (EC = Epibiontes solo algas control, EP+O= Epibiontes co-cultivo con ostras, EP+Ch= Epibiontes co-cultivo con choro zapato).

### Ostras (*C. gigas*)

El cultivo se monitore3 por 104 d3as, pero continuar3 en crecimiento durante el a3o 2022 hasta alcanzar talla comercial. Indicar que las ostras cultivadas en el periodo 2020-2021, fueron comercializadas por los cultivadores de forma local y tambi3n a trav3s de cultivos Cholche, para su procesamiento y venta. Mensualmente, se cuantific3 el peso h3medo de las mallas de ostras. En la



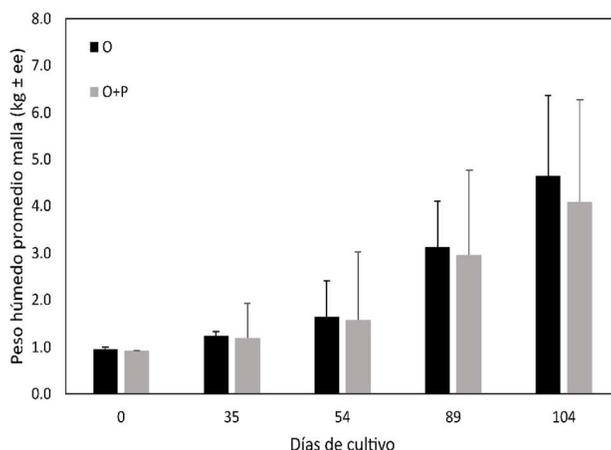
**Tabla 17**, se presentan resultados de biomasa húmeda para los tratamientos solo ostras y co-cultivo algas y ostras (N= 6 mallas para ambos tratamientos). La densidad inicial de siembra fue de 200 individuos por malla de cultivo (10 mallas por camilla de cultivo).

**Tabla 17.**

Peso húmedo promedio de las mallas de ostra *C. gigas*, sitio Pudeto. DS = Desviación estándar, EE = Error estándar, SGR = Tasa de crecimiento estándar relativa.

	Fecha	Solo Ostra				Ostras + Pelillo			
		Peso húmedo (kg)	DS	EE	SGR	Peso húmedo (kg)	DS	EE	SGR
siembra	03-09-2021	0.95	0.06	0.02	0	0.92	0.05	0.02	0
1° monitoreo	08-10-2021	1.25	0.10	0.04	0.76	1.19	0.05	0.02	0.75
2° monitoreo	27-10-2021	1.64	0.11	0.04	1.46	1.57	0.10	0.04	1.46
3° monitoreo	01-12-2021	3.14	0.25	0.10	1.84	2.96	0.25	0.10	1.81
4° monitoreo	16-12-2021	4.65	0.22	0.09	2.62	4.10	0.27	0.11	2.17

Ambos tratamientos mostraron un crecimiento sostenido durante el período de cultivo (**Figura 34**), obteniéndose los mayores incrementos en el mes de diciembre del 2021. Luego de 104 días de cultivo, el tratamiento solo ostra, obtuvo un valor mayor (4.65 kg) en comparación al tratamiento ostra + pelillo (4.10 kg). Esta diferencia fue estadísticamente significativa ( $t = 3.825$ ;  $p = <0.01$ ). Los valores de SGR muestran que las tasas de crecimiento se mantienen en aumento hasta el último monitoreo realizado. No se observó presencia significativa de los epifitos en las mallas durante todo el periodo de cultivo.



**Figura 34.** Crecimiento promedio en peso húmedo (kg ± EE) para ostra *C. gigas* cultivadas en mallas, sitio Pudeto (O= solo ostras, O+P= co-cultivo con pelillo).

### Índice de condición e índice de rendimiento productivo.

En la **Tabla 18**, se presentan los resultados de rendimiento productivo de *C. gigas* para los tratamientos solo ostras y ostra + alga. En la **Figura 35** se presentan el índice de condición (IC) y el



3ndice de rendimiento productivo (IRP) en ambos tratamientos. Ambos 3ndices est3n asociados a la reproducci3n y alimentaci3n de los organismos, permitiendo observar si estos se encuentran en una condici3n de alta o baja calidad.

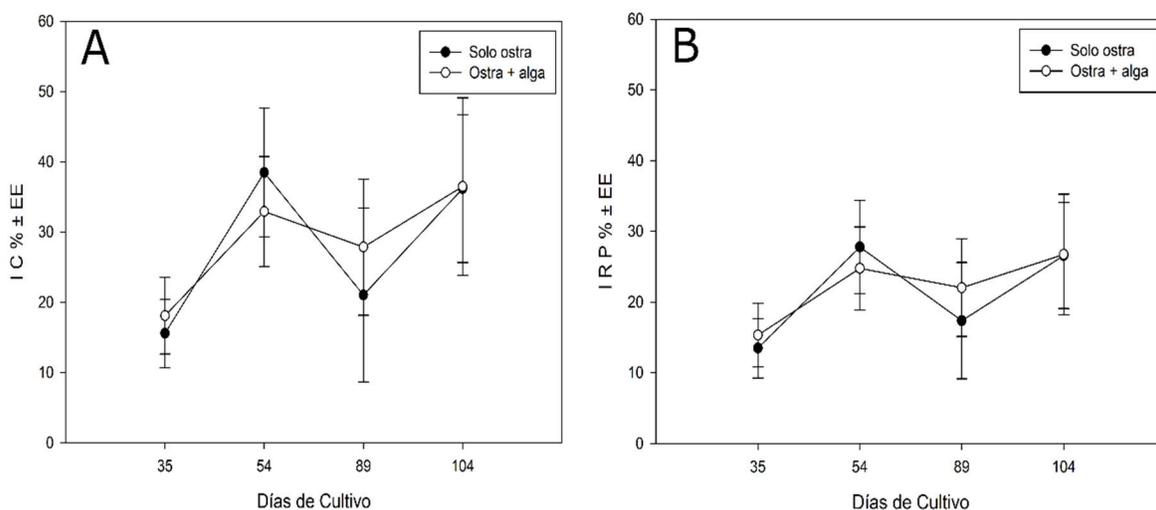
**Tabla 18.**

Rendimiento productivo para ostra *C. gigas* cultivadas en mallas, sitio Pudeto. IC = 3ndice de condici3n, IRP = 3ndice de rendimiento productivo; EE = error est3ndar.

	Fecha	Solo Ostra				Ostra + Alga			
		IC%	EE	IRP%	EE	IC%	EE	IRP%	EE
1° monitoreo	08-10-2021	15.58	4.87	13.48	4.21	18.10	5.45	15.33	4.49
2° monitoreo	27-10-2021	38.46	9.16	27.77	6.57	32.91	7.82	24.76	5.86
3° monitoreo	01-12-2021	21.03	12.36	17.37	8.22	27.84	9.69	22.02	6.89
4° monitoreo	16-12-2021	36.18	10.52	26.57	7.50	36.47	12.62	26.72	8.54

Se observaron valores similares en el IC para ambos tratamientos, presentando una tendencia parecida, alcanzando un m3ximo de 38.46 %, luego de los 54 d3as de cultivo para el tratamiento solo ostra y un 36.47% para el tratamiento ostra + alga luego de 104 d3as de cultivo. (**Figura 35A**). Para el IRP, la tendencia fue similar para ambos tratamientos, pero los valores del tratamiento solo alga present3 un aumento luego de los 54 d3as de cultivo (27.77%), para luego disminuir y volver a aumentar en los monitoreos posteriores. Se observ3 una baja en los valores para ambos tratamientos luego de 89 d3as de cultivo (**Figura 35B**).

Al comparar los pesos h3medos totales (N= 20 individuos) para cada tratamiento, al d3a 104 de cultivo, se observaron diferencias significativas entre tratamientos, siendo mayores, los valores obtenidos del tratamiento ostra + alga ( $t = -3.116$ ;  $p < 0.01$ ).



**Figura 35.** Rendimiento productivo promedio (% ± EE) para ostra *C. gigas* (N=20) cultivadas en mallas, sitio Pudeto. A) 3ndice de condici3n, B) 3ndice de rendimiento productivo.



### Choro zapato (*C. chorus*)

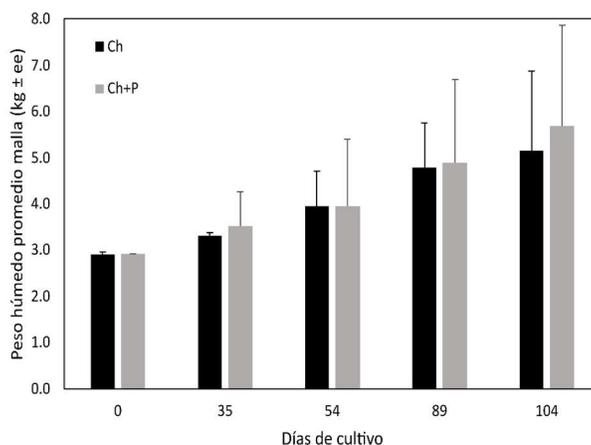
El cultivo se monitoreo por 104 días, pero continuará en crecimiento durante el año 2022. Mensualmente, se cuantificó el peso húmedo de las mallas de choro zapato. En la **Tabla 19**, se presentan resultados de biomasa húmeda para los tratamientos solo choro zapato y algas + choro zapato. La densidad inicial de siembra fue de 300 individuos por malla de cultivo (10 mallas por camilla de cultivo).

**Tabla 19.**

Peso húmedo promedio de choro zapato *C. chorus*, en mallas de cultivo, sitio Pudeto. DS = Desviación estándar, EE = Error estándar, SGR = Tasa de crecimiento estándar relativa.

	Fecha	Solo Choro zapato				Choro zapato + Algas			
		Peso húmedo (kg)	DS	EE	SGR	Peso húmedo (kg)	DS	EE	SGR
siembra	15-09-2021	2.91	0.17	0.07	0	2.91	0.21	0.08	0
1° monitoreo	08-10-2021	3.30	0.16	0.06	0.55	3.52	0.30	0.12	0.82
2° monitoreo	27-10-2021	3.94	0.15	0.06	0.93	3.94	0.30	0.12	0.59
3° monitoreo	01-12-2021	4.79	0.37	0.15	0.56	4.89	0.33	0.13	0.62
4° monitoreo	16-12-2021	5.16	0.33	0.14	0.50	5.69	0.70	0.28	1.01

Luego de 104 días de cultivo, el tratamiento choro zapato+ algas, obtuvo un valor mayor (5.69 kg) que el tratamiento solo choro zapato (5.16 kg) (**Figura 36**). Los valores de SGR muestran que las mayores tasas de crecimiento se obtienen a los 104 días de cultivo para el tratamiento choro zapato + alga (SGR= 1.01), y a los 35 días de cultivo para el tratamiento solo choro zapato (SGR= 0.93) No se observaron diferencias estadísticamente significativas al comparar los pesos finales obtenidos entre tratamientos ( $t = -1.689$   $p=0.122$ ). No se observó una presencia significativa de los epifitos en las mallas durante todo el periodo de cultivo.



**Figura 36.** Crecimiento promedio en peso húmedo (kg ± EE) para choro zapato *C. chorus* en mallas, sitio Pudeto (Ch= solo choro zapato, Ch+P= co-cultivo con pelillo).



Índice de condici3n e índice de rendimiento productivo.

En la **Tabla 20**, se presentan resultados de rendimiento productivo de *C. chorus* para los tratamientos solo choro y algas + choro. En la **Figura 37** se presentan, el índice de condici3n (IC) y el índice de rendimiento productivo (IRP) en ambos tratamientos.

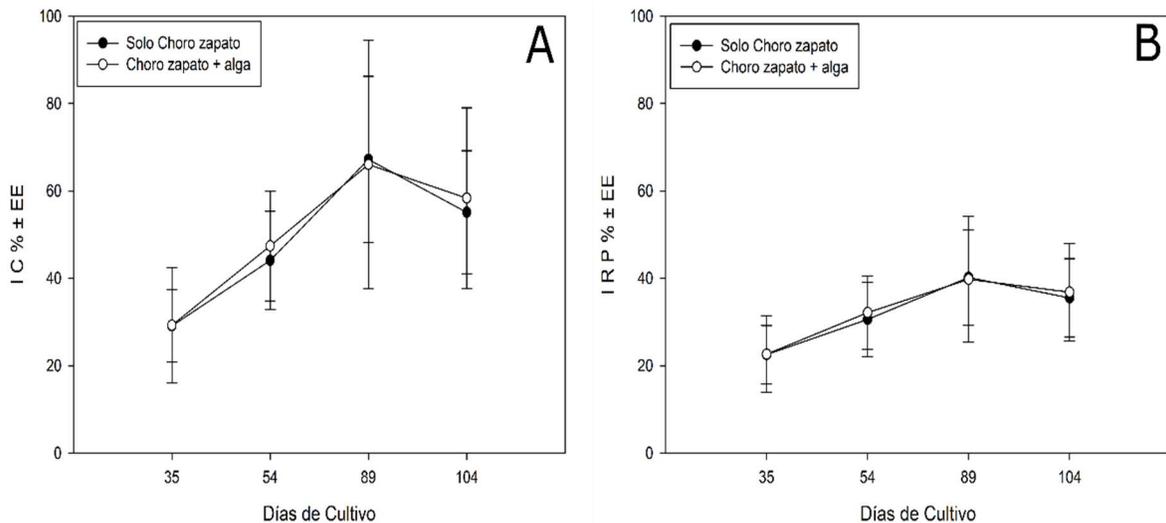
**Tabla 20.**

Rendimiento productivo para *C. chorus* cultivadas en mallas, sitio Pudeto. IC = índice de condici3n, IRP = índice de rendimiento productivo; EE = error estándar.

	Fecha	Solo Choro zapato				Algas + Choro zapato			
		IC%	EE	IRP%	EE	IC%	EE	IRP%	EE
1° monitoreo	08-10-2021	29.12	8.23	22.56	6.65	29.26	13.21	22.64	8.74
2° monitoreo	27-10-2021	44.10	11.21	30.60	8.45	47.43	12.55	32.17	8.35
3° monitoreo	01-12-2021	67.23	19.02	40.20	10.93	66.05	28.44	39.78	14.40
4° monitoreo	16-12-2021	55.11	14.09	35.53	8.97	58.35	20.66	36.85	11.16

Para el IC, ambos tratamientos alcanzaron un valor máximo luego de 89 días de cultivo (solo choro zapato 67.23 % y co-cultivo 66.05 %) (**Figura 37A**). Para el IRP, la tendencia fue similar para ambos tratamientos, con algunos valores menores en el segundo y cuarto monitoreo para el tratamiento solo choro zapato (**Figura 37B**).

Al comparar los pesos húmedos totales (N= 20 individuos) para cada tratamiento, al día 104 de cultivo, no se observaron diferencias significativas entre tratamientos ( $t = -0.908$ ;  $p=0.370$ ).



**Figura 37.** Rendimiento productivo promedio (% ± EE) para *C. chorus* (N=20) cultivados en mallas, sitio Pudeto. A) Índice de condici3n, B) Índice de rendimiento productivo.



#### 5.4.2.4. Sitio Hueihue

A continuación, se presentan los resultados productivos del primer ciclo de cultivo realizado en el sitio Hueihue.

#### Chicorea (*C. chamissoi*)

El cultivo se mantuvo por 85 días. Cercano a los 60 días de cultivo, la biomasa algal comenzó con problemas asociados al sistema de cultivo, como desprendimiento de las líneas amarradas, hundimiento de parte de la estructura de la planza y enredo con las líneas cercanas, los que produjeron la disminución e incluso pérdida total la biomasa. Mensualmente, se cuantificó el peso húmedo del alga y de los epibiontes presentes al momento de la extracción de las muestras desde las unidades de planza (i.e., segmentos de 5 metros). En la **Tabla 21**, se presentan resultados de biomasa húmeda en 5 metros (alta y baja densidad) junto con los resultados de los controles en 5 metros (alta y baja densidad), y en la **Tabla 22**, el peso húmedo de los epibiontes (alta y baja densidad) junto con los epibiontes de los controles, respectivamente.

**Tabla 21.**

Peso húmedo promedio del alga *C. chamissoi* en unidades de planza (N= 10 segmentos de 5 metros), alta y baja densidad, y controles (N=5 segmentos de 5 metros), alta y baja densidad, en el sitio de cultivo Hueihue. AA = Peso húmedo alga alta densidad, AB = Peso húmedo alga baja densidad, CA = Peso húmedo control alta densidad, CB = Peso húmedo control baja densidad, DS = Desviación estándar, EE = Error estándar, SGR = Tasa de crecimiento estándar relativa.

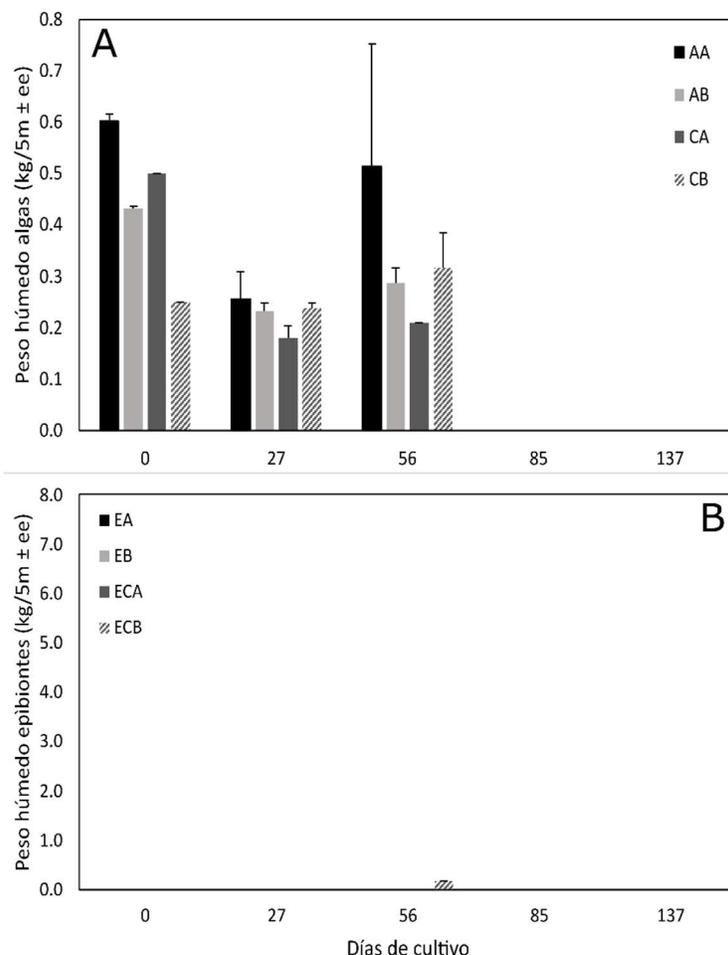
Chicorea									
Peso húmedo alga									
	Fecha	AA (kg/5m)	DE	EE	SGR	AB (kg/5m)	DE	EE	SGR
Siembra	03-09-2021	0.60	0.04	0.01	0.00	0.43	0.01	0.00	0.00
1°Monitoreo	29-09-2021	0.26	0.17	0.05	-3.15	0.23	0.05	0.02	-2.31
2°Monitoreo	28-10-2021	0.52	0.58	0.24	1.24	0.29	0.08	0.03	0.39
3°Monitoreo	26-11-2021	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4°Monitoreo	17-01-2022	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Peso húmedo Controles									
	Fecha	CA (kg/5m)	DE	EE	SGR	CB (kg/5m)	DE	EE	SGR
Siembra	03-09-2021	0.50	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00
1°Monitoreo	29-09-2021	0.18	0.05	0.02	-3.78	0.24	0.02	0.01	-0.18
2°Monitoreo	28-10-2021	0.21	0.00	0.00	0.28	0.32	0.10	0.07	0.51
3°Monitoreo	26-11-2021	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4°Monitoreo	17-01-2022	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

**Tabla 22.**

Peso húmedo promedio de los epibiontes en *C. chamissoi* en unidades de plansa (N= 10 segmentos de 5 metros), alta y baja densidad y controles (N=5 segmentos de 5 metros) alta y baja densidad, en el sitio de cultivo Hueihue. EA = Peso húmedo epibiontes alta densidad, EB = Peso húmedo epibiontes baja densidad, ECA = Peso húmedo epibiontes control alta densidad, ECB = Peso húmedo epibiontes control baja densidad, DS = Desviación estándar, EE = Error estándar.

Peso húmedo epibiontes							
	Fecha	EA (kg/5m)	DE	EE	EB (kg/5m)	DE	EE
Siembra	03-09-2021	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1° Monitoreo	29-09-2021	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2° Monitoreo	28-10-2021	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3° Monitoreo	26-11-2021	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4° Monitoreo	17-01-2022	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Peso húmedo epibiontes control							
	Fecha	ECA (kg/5m)	DE	EE	ECB (kg/5m)	DE	EE
Siembra	03-09-2021	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1° Monitoreo	29-09-2021	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2° Monitoreo	28-10-2021	0.00	0.00	0.00	0.18	0.00	0.00
3° Monitoreo	26-11-2021	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4° Monitoreo	17-01-2022	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

La mayor acumulación de biomasa para alta y baja densidad se obtuvo luego de 56 días de cultivo, durante el mes de octubre del 2021, alcanzando sobre los 0.52 Kg para el cultivo con alta densidad y sobre los 0.29 Kg para baja densidad. Para los controles de alta y baja densidad, la mayor acumulación se registró durante el mes de octubre, alcanzando sobre 0.21 Kg para alta densidad y 0.32 Kg para baja densidad (**Figura 38A**). Epifitos se observaron el día 56, los que fueron bastante bajos y solo en el tratamiento control de baja densidad (**Figura 38B**). Los valores de SGR para ambas densidades, muestran que luego de la siembra comienza a disminuir el crecimiento diario, y luego del segundo monitoreo vuelven a aumentar. Para chicorea no se realizó la poda correspondiente al tercer mes, debido a los problemas de disminución en biomasa indicados anteriormente. Al comparar la biomasa final obtenida al segundo monitoreo, no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre densidades ( $F=0.486$ ;  $g.l.=3$ ;  $p=0.698$ ).



**Figura 38.** Crecimiento promedio en peso húmedo (kg / 5m ± EE) de cultivo de chicorea (*C. chamissoi*) en unidades de plansa (N= 10 segmentos de 5 metros en alta y baja densidad) y controles (N= 5 segmentos de 5 metros en alta y baja densidad), en el sitio de cultivo Hueihue. A) Algas en alta y baja densidad y respectivos controles. (AA = Peso húmedo alga alta densidad, AB = Peso húmedo alga baja densidad, CA = Peso húmedo control alta densidad, CB = Peso húmedo control baja densidad). B) Epibiontes en alta y baja densidad y respectivos controles. (EA = Peso húmedo epibiontes alta densidad, EB = Peso húmedo epibiontes baja densidad, ECA = Peso húmedo epibiontes control alta densidad, ECB = Peso húmedo epibiontes control baja densidad).

### Pelillo (*A. chilense*)

El cultivo se mantuvo por 137 días. Mensualmente, se cuantificó el peso húmedo del alga y el peso de los epibiontes presentes al momento de la extracci3n de las muestras (i.e., segmentos de 5 metros). Durante el último monitoreo en enero del 2022, gran parte del sistema de cultivo se encontraba enredado, lo cual dificultó las mediciones de biomasa. En la **Tabla 23**, se presentan resultados de biomasa húmeda en 5 metros (alta y baja densidad) junto con los resultados de los controles, y en la **Tabla 24**, el peso húmedo de los epibiontes (alta y baja densidad) y sus respectivos controles.



**Tabla 23.**

Peso húmedo promedio del alga *A. chilense* en unidades de plansa (N= 10 segmentos de 5 metros), alta y baja densidad, y controles (N= 5 segmentos de 5 metros), alta y baja densidad, en el sitio de cultivo Hueihue. AA = Peso húmedo alga alta densidad, AB = Peso húmedo alga baja densidad, CA = Peso húmedo control alta densidad, CB = Peso húmedo control baja densidad, DS = Desviación estándar, EE = Error estándar, SGR = Tasa de crecimiento estándar relativa.

Pelillo									
Peso húmedo alga									
	Fecha	AA (kg/5m)	DE	EE	SGR	AB (kg/5m)	DE	EE	SGR
Siembra	03-09-2021	0.94	0.06	0.02	0.00	0.54	0.11	0.03	0.00
1° Monitoreo	29-09-2021	0.85	0.18	0.06	-0.40	0.68	0.12	0.04	0.85
2° Monitoreo	28-10-2021	2.83	0.60	0.19	2.16	2.33	0.35	0.11	2.19
3° Monitoreo	26-11-2021	6.21	1.86	0.62	0.92	5.57	1.48	0.49	1.03
4° Monitoreo	17-01-2022	1.43	0.46	0.21	-1.07	2.14	1.38	0.62	-0.70
Peso húmedo Controles									
	Fecha	CA (kg/5m)	DE	EE	SGR	CB (kg/5m)	DE	EE	SGR
Siembra	03-09-2021	1.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00
1° Monitoreo	29-09-2021	0.80	0.05	0.02	-0.81	1.17	0.23	0.10	3.14
2° Monitoreo	28-10-2021	2.46	0.63	0.28	2.00	3.50	0.63	0.28	1.96
3° Monitoreo	26-11-2021	3.16	1.46	0.65	0.30	5.06	0.48	0.22	0.44
4° Monitoreo	17-01-2022	5.01	2.22	1.11	0.34	5.05	2.59	1.29	0.00

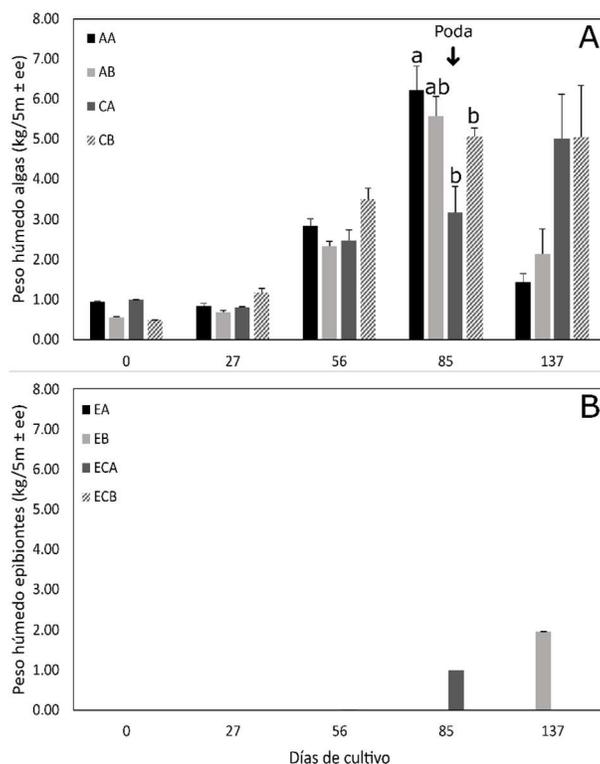
**Tabla 24.**

Peso húmedo promedio de los epibiontes en *A. chilense* en unidades de plansa (N= 10 segmentos de 5 metros), alta y baja densidad, y controles (N= 5 segmentos de 5 metros), alta y baja densidad, en el sitio de cultivo Hueihue. EA = Peso húmedo epibiontes alta densidad, EB = Peso húmedo epibiontes baja densidad, ECA = Peso húmedo epibiontes control alta densidad, ECB = Peso húmedo epibiontes control baja densidad, DS = Desviación estándar, EE = Error estándar.

Peso húmedo epibiontes							
	Fecha	EA (kg/5m)	DE	EE	EB (kg/5m)	DE	EE
Siembra	03-09-2021	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1° Monitoreo	29-09-2021	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2° Monitoreo	28-10-2021	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3° Monitoreo	26-11-2021	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4° Monitoreo	17-01-2022	0.00	0.00	0.00	1.95	0.00	0.00
Peso húmedo epibiontes control							
	Fecha	ECA (kg/5m)	DE	EE	ECB (kg/5m)	DE	EE
Siembra	03-09-2021	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1° Monitoreo	29-09-2021	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2° Monitoreo	28-10-2021	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3° Monitoreo	26-11-2021	0.99	0.67	0.39	0.00	0.00	0.00
4° Monitoreo	17-01-2022	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00



La mayor acumulación de biomasa en alta y baja densidad, se obtuvo luego de 85 días de cultivo, durante el mes de noviembre 2021, alcanzando sobre los 6.21 Kg para el cultivo con alta densidad y sobre los 5.57 Kg para baja densidad. Para los controles de alta y baja densidad, la mayor acumulación se registró durante diciembre, alcanzando sobre los 5.01 Kg para alta densidad, y durante noviembre, alcanzando sobre los 5.06 Kg para baja densidad, respectivamente (**Figura 39A**). Epifitos se observaron en el día 85, en el control de alta densidad, y el día 137 en el cultivo baja densidad (**Figura 39B**). Los valores máximos de SGR para ambas densidades, se obtuvieron luego del segundo monitoreo (SGR alta= 2.16; SGR baja= 2.19). En el caso de los controles de ambas densidades también se observan valores máximos durante el segundo y primer monitoreo, respectivamente (SGR control alta= 2.00; SGR control baja=3.14). La poda se realizó al tercer monitoreo (día 85), en la cual se obtuvo un peso total de 78.9 kg desde las 20 líneas podadas. Al comparar la biomasa máxima obtenida (día 85), se observaron diferencias significativas entre densidades y controles ( $F=4.362$ ;  $g.l.=3$ ;  $p=0.014$ ).



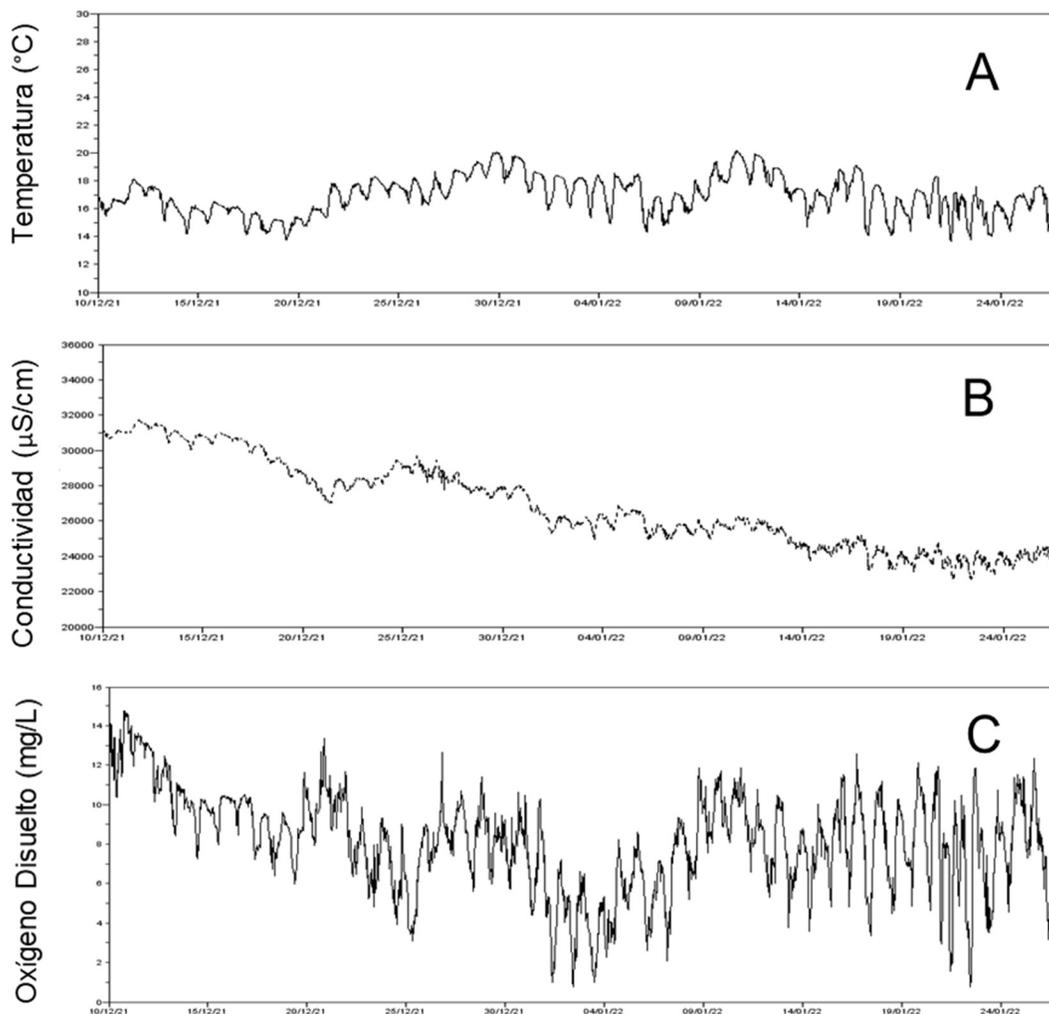
**Figura 39.** Crecimiento promedio en peso húmedo (kg / 5m ± EE) de cultivo de pelillo (*A. chilense*) en unidades de planza (N= 10 segmentos de 5 metros en alta y baja densidad) y controles (N= 5 segmentos de 5 metros en alta y baja densidad), en el sitio de cultivo Hueihue. A) Algas en alta y baja densidad y respectivos controles. (AA = Peso húmedo alga alta densidad, AB = Peso húmedo alga baja densidad, CA = Peso húmedo control alta densidad, CB = Peso húmedo control baja densidad). B) Epibiontes en alta y baja densidad y respectivos controles. (EA = Peso húmedo epibiontes alta densidad, EB = Peso húmedo epibiontes baja densidad, ECA = Peso húmedo epibiontes control alta densidad, ECB = Peso húmedo epibiontes control baja densidad).



### 5.4.3. Monitoreo ambiental. Variables f3sicas

#### 5.4.3.1. Sitio Chungungo

Para la variable temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) del agua de mar, se registr3 un rango entre  $12,5^{\circ}\text{C}$  a  $19,1^{\circ}\text{C}$  en el mes de enero del 2022. La temperatura promedio registrada fue de  $15,8^{\circ}\text{C}$ . La concentraci3n de ox3geno disuelto, muestra una fluctuaci3n durante el periodo registrado, con un promedio de  $8,19$  ( $\text{mg/L}$ ), un valor m3ximo de  $15,9$  ( $\text{mg/L}$ ) y un m3nimo de  $0,7$  registrado en enero. En tanto, la conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ ) muestra en general una tendencia a la baja, con un promedio registrado de  $26856,40$  ( $\mu\text{S/cm}$ ), con un rango registrado de  $22571,7 - 31711,5$   $\mu\text{S/cm}$  (**Figura 40**).



**Figura 40.** Gr3fico de A) Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), B) Conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ ) y C) Ox3geno disuelto ( $\text{mg/L}$ ) en sitio de cultivo Chungungo.



#### 5.4.3.2. Sitio Quinchao

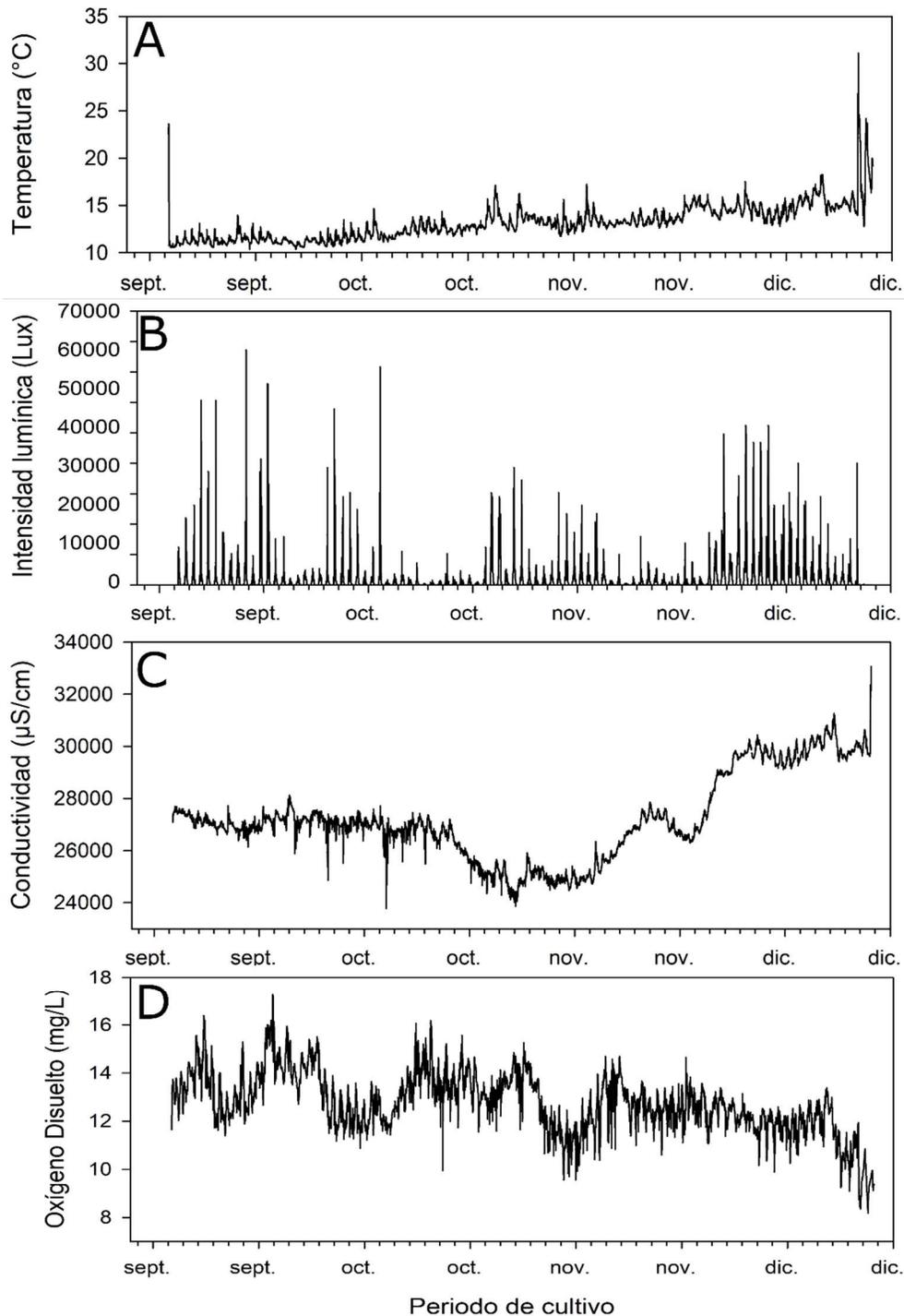
La variable temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) del agua de mar a 2.5 metros de profundidad, present3 una tendencia al aumento desde el inicio hasta el fin del periodo de cultivo. Se observan algunos aumentos marcados durante algunos meses del cultivo. Se observ3 la presencia de organismos epibiontes que podrían influenciar en la variaci3n de los datos. El rango de esta variable estuvo entre los 10 a los 22  $^{\circ}\text{C}$  (**Figura 41A**).

La intensidad lumínica (lux) muestra una tendencia a valores bajo los 30.000 lux, con algunas alzas sobre este valor durante los meses de septiembre, octubre y principios de diciembre del 2021. El rango de esta variable estuvo entre los 2.000 a los 82.000 lux (**Figura 41B**).

La conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) muestra una tendencia a la baja desde el inicio del cultivo hasta fines del mes de octubre, para luego volver a aumentar hasta el final del periodo de cultivo alcanzando valores mayores. El rango de esta variable estuvo entre los 23.000 a los 33.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (**Figura 41C**).

Para el oxígeno disuelto ( $\text{mg}/\text{l}$ ) la tendencia de esta variable se observ3 con bastante variabilidad desde el inicio del periodo de cultivo con una marcada tendencia a la baja en los valores observados desde el mes de noviembre 2021. El rango de esta variable estuvo entre los 8 a los 17.5  $\text{mg}/\text{l}$  (**Figura 41D**).

Las características inherentes a sitio de cultivo como la aparici3n de organismos epibiontes en los sensores de mediciones continuas podrían estar influenciando la variabilidad de los datos obtenidos en terreno.



**Figura 41.** Gráfico de A) Temperatura (°C), B) Intensidad lumínica (Lux), C) Conductividad (µS/cm) y D) Oxígeno disuelto (mg/L) en sitio de cultivo Quinchao.



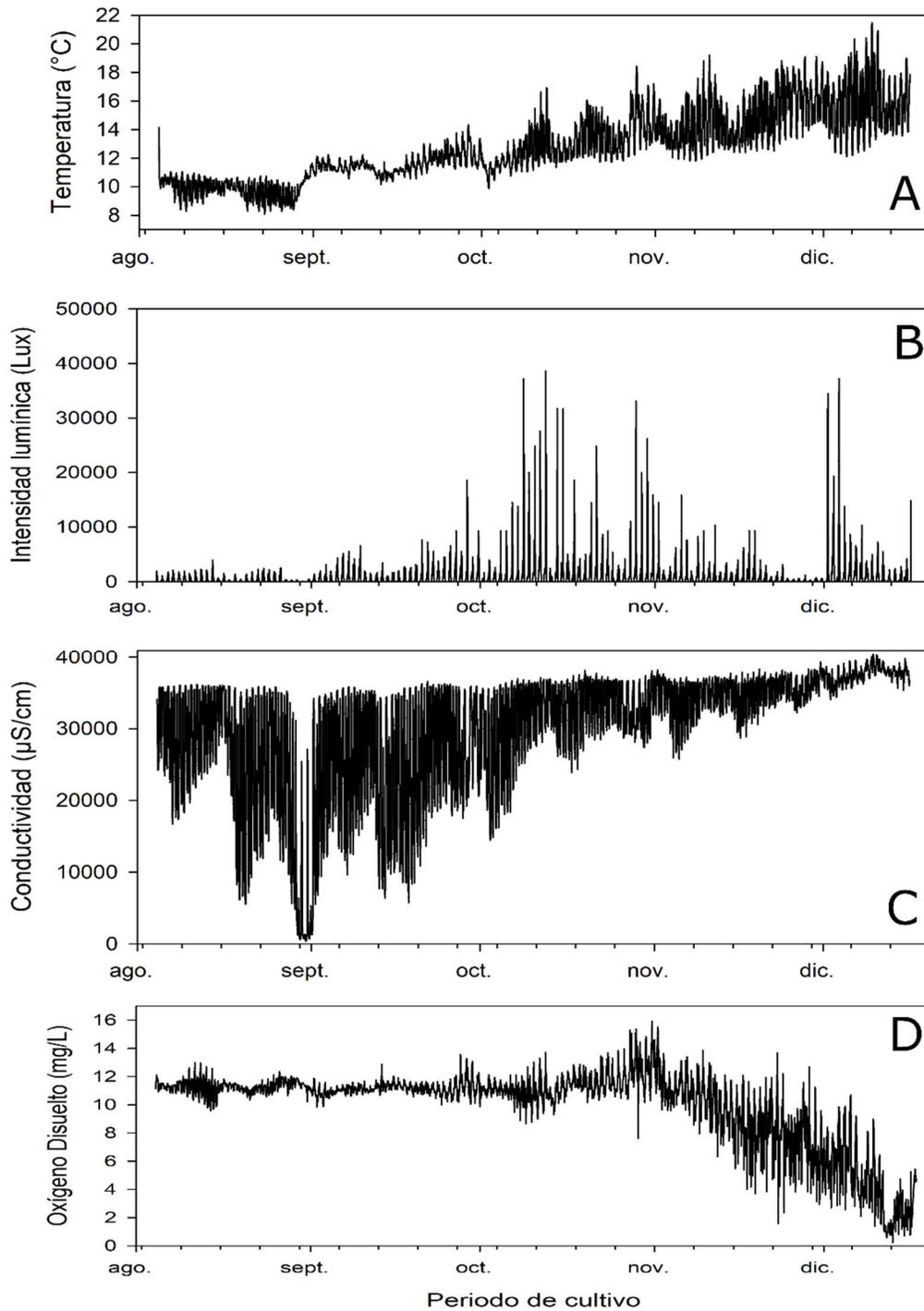
#### 5.4.3.3. Sitio Pudeto

La variable temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) del agua de mar a 2.5 metros de profundidad, tuvo un comportamiento estable durante el mes de agosto a septiembre del 2021, entre los 8 a los  $11^{\circ}\text{C}$ , para luego comenzar a aumentar sostenidamente hasta el final del periodo de cultivo. Desde el mes de octubre hasta el final del periodo se observan aumentos puntuales de temperatura. La variación en los datos observados se puede deber a la influencia de las mareas que se presentan en el lugar. El rango de esta variable estuvo entre los 8 a los  $22^{\circ}\text{C}$  (**Figura 42A**).

La intensidad lumínica (Lux), al inicio del cultivo (agosto, septiembre 2021) presentó valores bajos, menores a los 10.000 lux. Se observaron mediciones sobre los 10.000 lux, desde octubre hasta diciembre, alcanzando valores cercanos a los 40.000 lux. El rango de esta variable estuvo entre los 1.000 a los 40.000 Lux (**Figura 42B**).

La conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) presentó una tendencia variable desde el inicio de las mediciones hasta el mes de septiembre del 2021. Durante septiembre se observó una baja en los valores muy marcada, la que luego comienza a aumentar. Lo anterior, refleja las fluctuaciones mensuales del estuario por el cambio en las mareas. Desde mediados de octubre y hasta el final del ciclo de cultivo se observa una menor variabilidad en los datos (**Figura 42C**). El rango de esta variable estuvo entre los 5.000 a los 40.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

La tendencia del oxígeno disuelto ( $\text{mg}/\text{L}$ ) durante los primeros meses de cultivo se mantuvo estable hasta el mes de noviembre del 2021, sobre los 8  $\text{mg}/\text{L}$ . Desde noviembre, se observó un aumento en los valores, para luego presentar una disminución en la tendencia, llegando a valores bajo los 8  $\text{mg}/\text{L}$ . A finales del ciclo de cultivo los valores oscilaron drásticamente, esto puede estar influenciado por la presencia de epibiontes en los medidores de variables continuas, específicamente en el sensor de medición. El rango de esta variable estuvo entre los 2 a los 16  $\text{mg}/\text{l}$  (**Figura 42D**).



**Figura 42.** Gráfico de A) Temperatura (°C), B) Intensidad lumínica (Lux), C) Conductividad (µS/cm) y D) Oxígeno disuelto (mg/L), en sitio de cultivo Pudeto.



#### 5.4.3.4. Sitio Hueihue

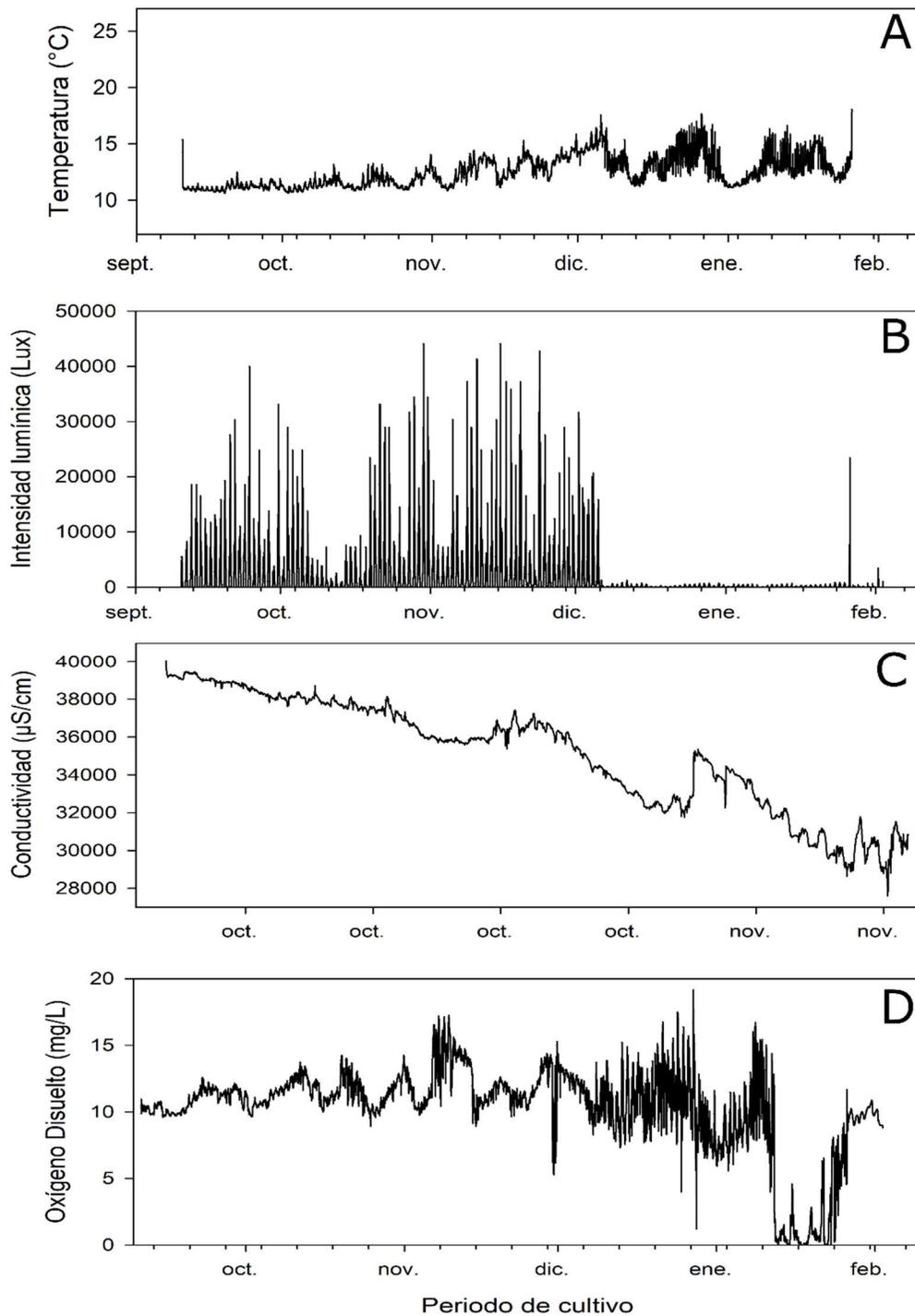
La variable temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) del agua de mar a 2.5 metros de profundidad, tuvo un comportamiento con tendencia al alza entre septiembre a diciembre del 2021. Se observó una perturbación desde el mes de diciembre en adelante asociada al desprendimiento de los medidores de variables continuas. El rango de esta variable estuvo entre los 9 a los 20  $^{\circ}\text{C}$  (**Figura 43A**).

La intensidad lumínica (Lux) presentó valores bajo los 10.000 Lux, con alzas marcadas durante los meses de septiembre a diciembre del 2021, la que luego, disminuyó drásticamente por el desprendimiento de los medidores continuos. El rango de esta variable estuvo entre los 2.000 a los 45.000 Lux (**Figura 43B**).

La conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) presentó una tendencia a la baja desde el mes de octubre hasta fines de noviembre del 2021. El medidor de esta variable presentó problemas en la obtención de datos, lo que se reflejó entre los meses de octubre y noviembre. El rango de esta variable estuvo entre los 27.000 a los 39.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (**Figura 43C**).

La tendencia del oxígeno disuelto ( $\text{mg}/\text{L}$ ) presentó valores variables con una tendencia al alza, hasta inicios de diciembre 2021, luego de esto, se observó una mayor variabilidad de los datos, influenciada por el desprendimiento de los medidores de variables continuas. Se observó desde diciembre en adelante, la perturbación generada por el desprendimiento, en donde los valores bajan hasta valores cercanos a 1  $\text{mg}/\text{L}$ . El rango de esta variable estuvo entre los 1 a los 17  $\text{mg}/\text{l}$  (**Figura 43D**).

El patrón de fluctuaciones desde el mes de diciembre del 2021, en la mayoría de las variables físicas del sitio Hueihue, se puede asociar a problemas asociados con las estructuras de cultivo. Los medidores sufrieron problemas, desprendiéndose de la línea de cultivo en donde se encontraban, y cayendo al fondo. Estos fueron recuperados durante el último monitoreo mediante buceo autónomo.

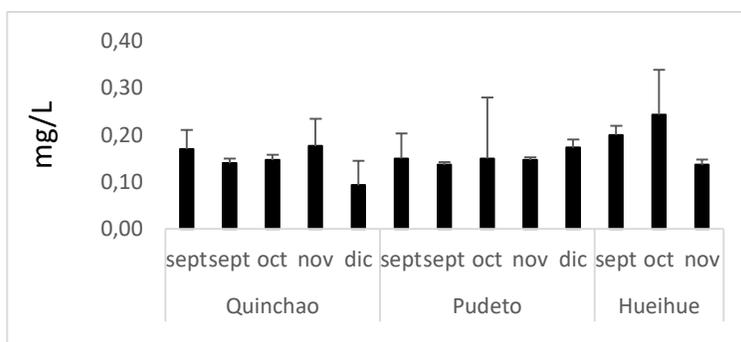


**Figura 43.** Gráfico de A) Temperatura (°C), B) Intensidad lumínica (Lux), C) Conductividad (µS/cm) y D) Oxígeno disuelto (mg/L), en sitio de cultivo Hueihue.



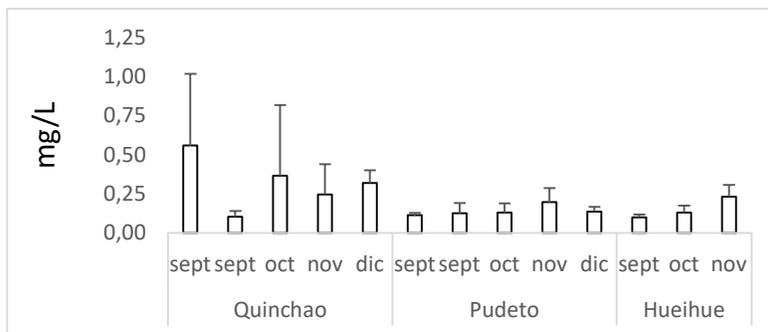
#### 5.4.4. Monitoreo ambiental. Nutrientes

La concentraci3n promedio de nitratos totales ( $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$ ) no super3 los  $0.25 \text{ mg L}^{-1}$  en los sitios de cultivo (**Figura 44**). Para Quinchao y Pudeto, los valores se mantuvieron con una tendencia similar, con valores entre  $0.09$  y  $0.18 \text{ mg L}^{-1}$ , exceptuando las concentraciones registradas en diciembre 2021 para ambos lugares, en las cuales, Quinchao present3 un promedio de  $0.09 \text{ mg L}^{-1}$  y en Pudeto, el promedio aumento a  $0.17 \text{ mg L}^{-1}$ . En Hueihue, la tendencia fue similar, que lo observado en los otros sitios, con valores promedio mayores en los meses de septiembre y octubre. En el mes de noviembre, se observ3 una disminuci3n en el promedio de nitratos para esta localidad ( $0.14 \text{ mg L}^{-1}$ ). No se observaron diferencias estadisticamente significativas entre los sitios ( $F= 0.12$ ;  $gl= 2$ ;  $p= 0.88$ ).



**Figura 44.** Concentraci3n de nitratos totales ( $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$ ) (Media  $\pm$  DS) en el agua durante el per3odo de cultivo para cada sitio de estudio.

La concentraci3n promedio de fosfatos ( $\text{PO}_4^-$ ) oscil3 entre  $0.10$  y  $0.56 \text{ mg L}^{-1}$  en el sitio Quinchao. Se observaron valores m3ximos, durante septiembre ( $0.56 \text{ mg L}^{-1}$ ) y octubre ( $0.37 \text{ mg L}^{-1}$ ). Para los sitios Pudeto y Hueihue, los promedios oscilaron entre  $0.10$  a  $0.23 \text{ mg L}^{-1}$ , no observ3ndose incrementos significativos. En noviembre en el sitio Pudeto y Hueihue, se observ3 una peque1a alza en el valor promedio,  $0.20 \text{ mg L}^{-1}$  y  $0.23 \text{ mg L}^{-1}$ , respectivamente (**Figura 45**). No se observaron diferencias estadisticamente significativas entre los sitios ( $F=2.29$ ;  $gl=2$ ;  $p= 0.16$ ).

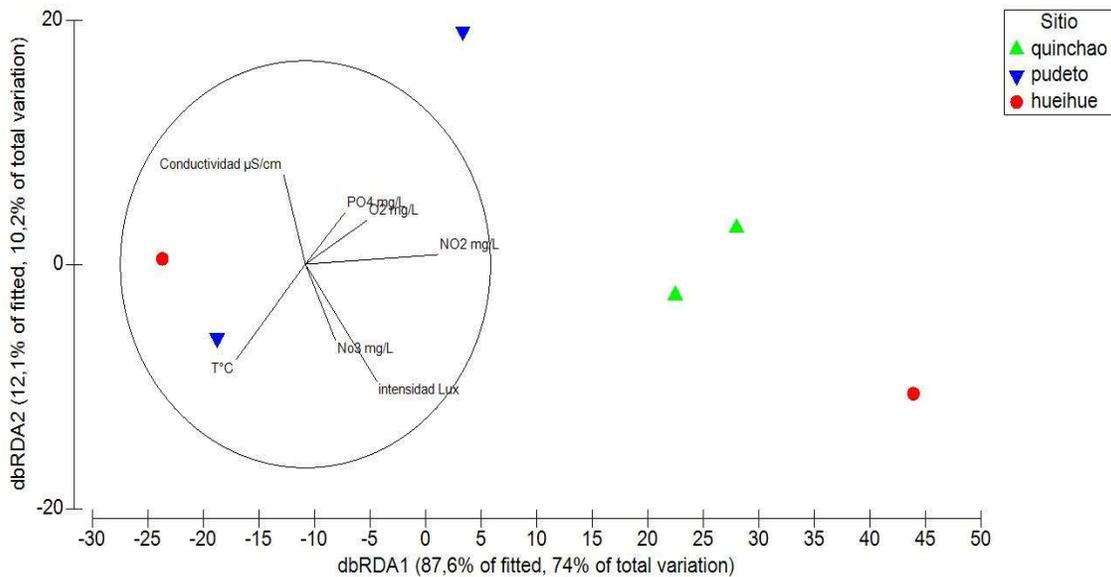


**Figura 45.** Concentraci3n de fosfato total ( $\text{PO}_4^-$ ) (Media  $\pm$  DS) en el agua durante el per3odo de cultivo para cada sitio de estudio.



### 5.4.5. Análisis multivariado

Se realizó un análisis de redundancia basado en distancia multivariada (dbRDA, **Figura 46**), con las variables ambientales registradas temperatura, conductividad, oxígeno, intensidad lumínica, fosfato, nitrito y nitrato, junto con los promedios máximos para biomasa y epifitos. El análisis mostró que la distribución de biomasa en los cultivos de Quinchao se correlaciona mejor con oxígeno, fosfato y nitrito (Pearsons,  $p= 0.7$ ). Tanto las biomases de Pudeto como las de Hueihue muestran alta variabilidad. El test de variables explicativas muestra que intensidad lumínica ( $p= 0.045$ ) y nitrito ( $p= 0.036$ ) son las variables ambientales que influyen más en la distribución de los datos (variación explicada= 24.9% y 21.1% respectivamente). El modelo explica un porcentaje importante de la variación de los datos alcanzando un 97% de la variación total.



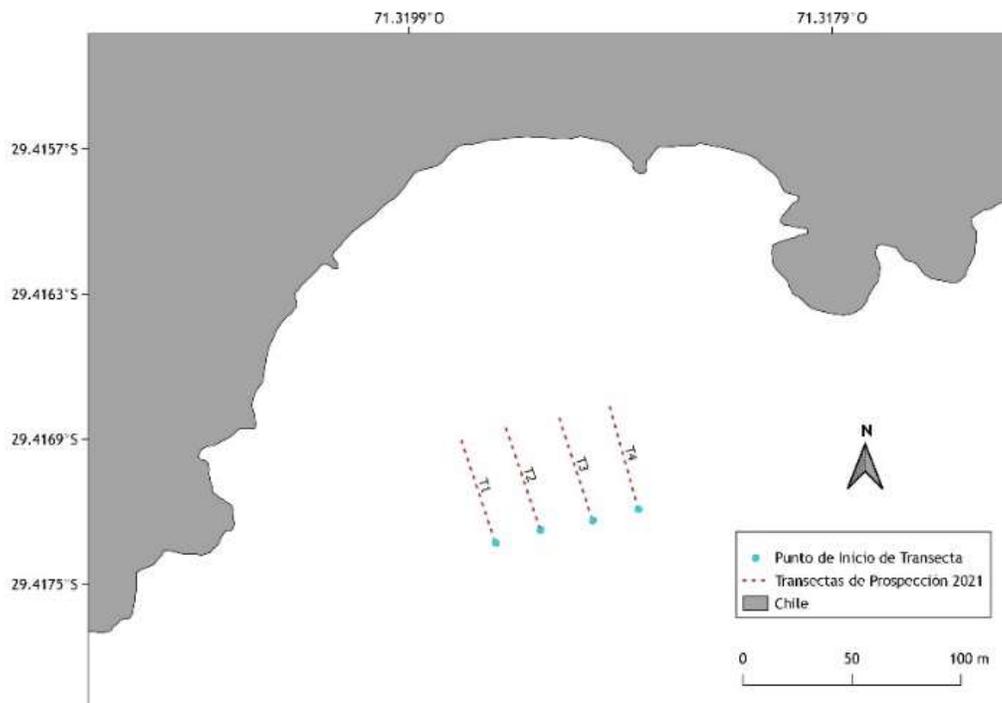
**Figura 46.** Análisis de redundancia basado en distancias (dbRDA) para biomasa máxima por período de muestreo y variables ambientales de los sitios de cultivo en Chiloé.



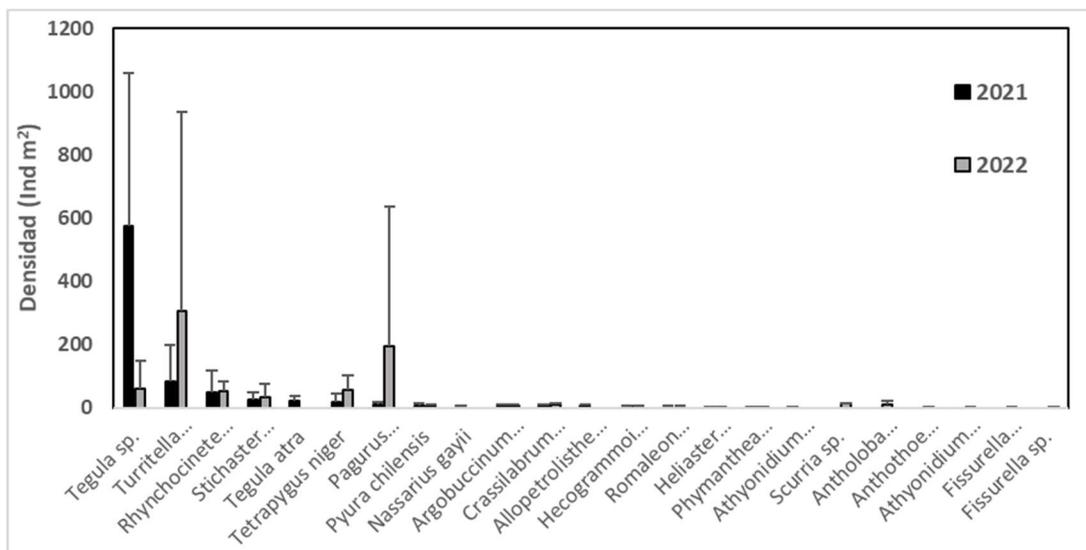
#### 5.4.6. Monitoreo de cultivo de fondo de algas pardas

Se realizó un análisis de comunidades previo a la adhesión de plántulas en abril del 2021 y luego en febrero de 2022, con el objeto de conocer los cambios en el ensamble comunitario. La evaluación de comunidades, consistió en 4 transectas de 50 metros perpendiculares a la costa, con 6 estaciones de muestreo cada una (**Figura 47**). En cada estación se realizaron 2 fotocuadrantes de 0.25 m<sup>2</sup> con 100 puntos de intersección. En cada lance se identificó y contaron los invertebrados móviles o semi-sésiles y la cobertura de los invertebrados sésiles y algas conspicuas.

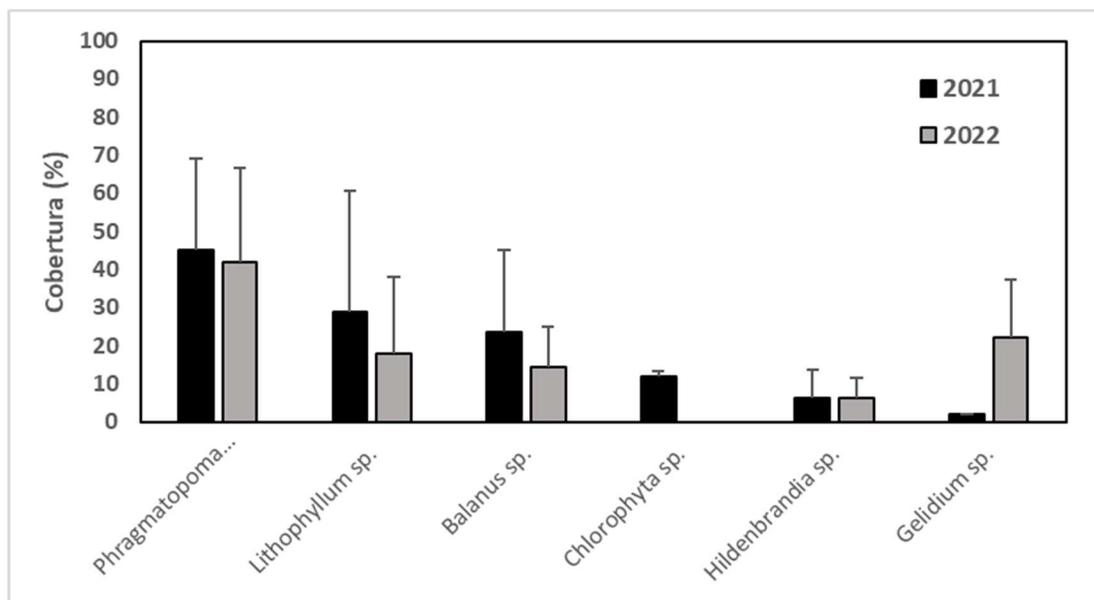
En abril de 2021, el área evaluada presentó una comunidad típica de fondos blanqueados. Las mayores densidades de organismos móviles correspondieron a *Tegula sp.*, *Turritela cingulata* y *Rhynchonictes typus*. En febrero del 2022, las mayores densidades fueron *T. cingulata* y *Pagurus edwardsii* (**Figura 48**). En cuanto a los organismos sésiles, en ambas evaluaciones dominó *Phragmatopoma sp.* (**Figura 49**). Con los resultados de la primera evaluación, se identificaron sitios para la adhesión de plántulas, que contarán con sustrato rocoso y menor densidad de herbívoros.



**Figura 47.** Mapa con las transectas utilizadas en la evaluación de comunidades en AMERB Chungungo B.



**Figura 48.** Abundancia (ind m<sup>-2</sup>) (Media ± DS) de especies móviles en sitio AMERB Chungungo B,

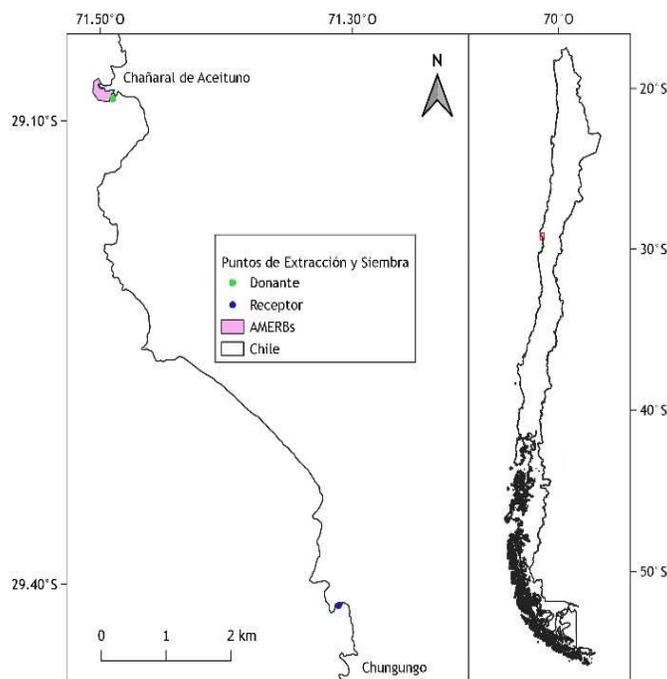


**Figura 49.** Cobertura (%) (Media ± DS) de especies sésiles en sitio AMERB Chungungo B,

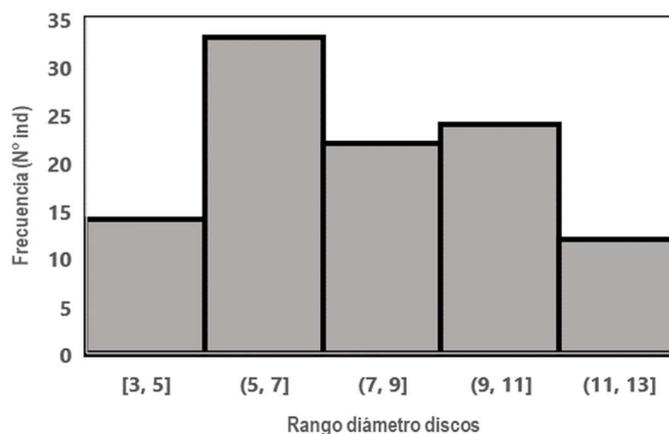
El día 30 de abril del 2021 se realizó la extracción de 105 plántulas en el AMERB Chañaral de Aceituno, las que fueron trasladadas para ser adheridas en AMERB Chungungo B (**Figura 50**). Esta actividad se desarrolló una vez obtenido el permiso de repoblación de *L. trabeculata* otorgado el 3 de diciembre del 2020 (Res ex. 2651 2020, **Anexo 1**) Se seleccionaron plántulas desde 3 a 13 cm de diámetro de disco con una mayor frecuencia de 5 a 7 cm (**Figura 51**). La extracción fue realizada por socios de la AMERB Chañaral de Aceituno y por personal IFOP con ayuda de cuchillos, intentando en lo posible



no da1ar el disco (**Figura 52**). Las pl1ntulas fueron trasladadas en cajas t1rmicas con agua de mar y gel packs para mantener la temperatura. El mismo d1a se procedi3 al traslado a la localidad de Chungungo, marcado y adhesi3n de pl1ntulas en los sitios seleccionados.



**Figura 50.** Ubicaci3n de las 1reas de extracci3n de pl1ntulas (AMERB Cha1aral de aceituno) y repoblaci3n (AMERB Chungungo B).



**Figura 51.** Histograma de frecuencia (N° ind) de di1metro de disco (cm) de las pl1ntulas extra1das en AMERB Cha1aral de Aceituno.



**Figura 52.** Fotografías de la extracci3n de plántulas de *L. trabeculata* para traslocaci3n en AMERB Chañaral de Aceituno. A y B) Fotografías de la condici3n de la pradera de *L. trabeculata*. C) y D) Buzos extrayendo las plántulas. E), F) y G) Plántulas extraídas de *L. trabeculata*.

Las plántulas fueron llevadas a un sector con sombra, en donde fueron clasificadas por tamaño de disco. Se formaron grupos de 5 algas de diversos tamaños (N total= 105, distribuidos en 4 sitios con 4 grupos de 5 plántulas, y un sitio con 5 grupos de 5 plántulas) (**Figura 55**). Cada grupo fue identificado con un número particular que posteriormente fue adherido con masilla epóxica al sustrato en cada sitio. Cada alga del grupo fue marcada con amarracales de colores y mostacillas para diferenciarlos entre sí. Una vez marcadas las algas se pusieron nuevamente en las cajas térmicas para ser transportadas al AMERB. Cada sitio fue marcado por GPS (**Figura 53**). Previamente se limpi3 la superficie con cepillos metálicos para eliminar la mayor cantidad de individuos de especies sésiles y sedimentos, posteriormente, cada alga fue adherida con cianoacrilato (Blue Reef) (**Figura 54**). Cinco días después se monitoreo la presencia de las plántulas en los sectores de adhesi3n con una persistencia del 57%. Para el monitoreo del día 39, hubo una sobrevivencia del 11,4%, principalmente en los sitios 1 y 3 (**Figura 55**). En los monitoreos realizados no hubo evidencia de aumento de longitud, inclusive hubo una p3rdida foliar en plántulas del sitio 3 (**Figura 56**). En el monitoreo posterior del día 60 ya no se encontraban plántulas adheridas. Probablemente producto de las marejadas de los días anteriores al monitoreo.

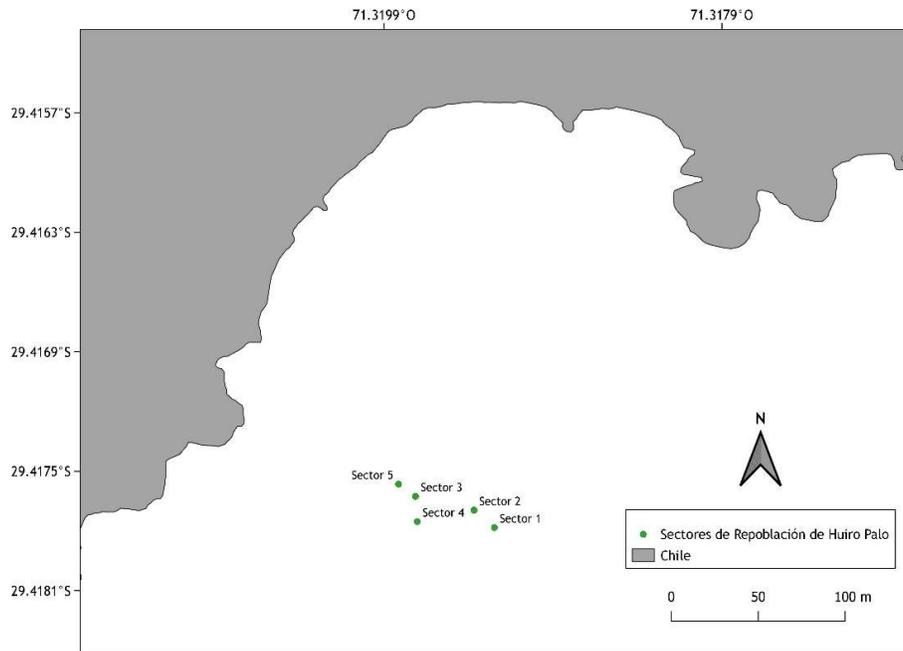


Figura 53. Ubicaci3n de los sitios de adhesi3n de pl3ntulas de *L. trabeculata* en AMERB Chungungo B.

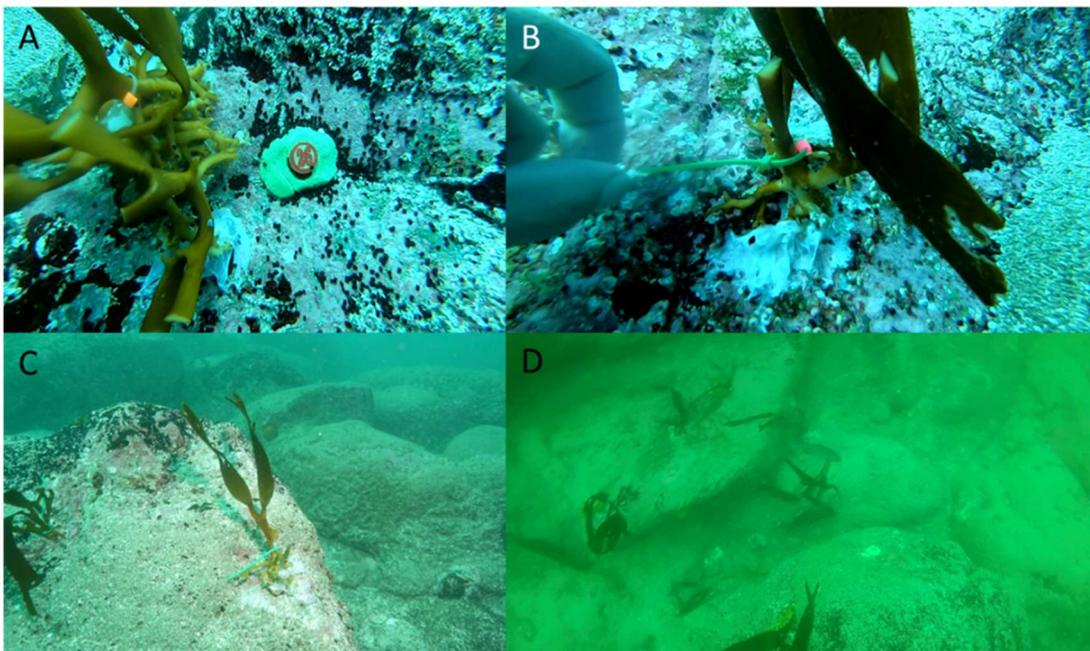
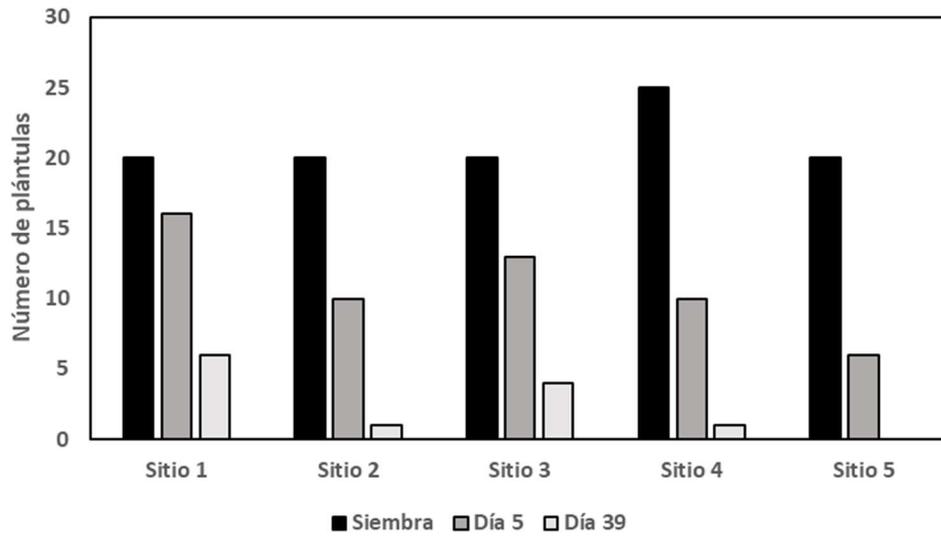
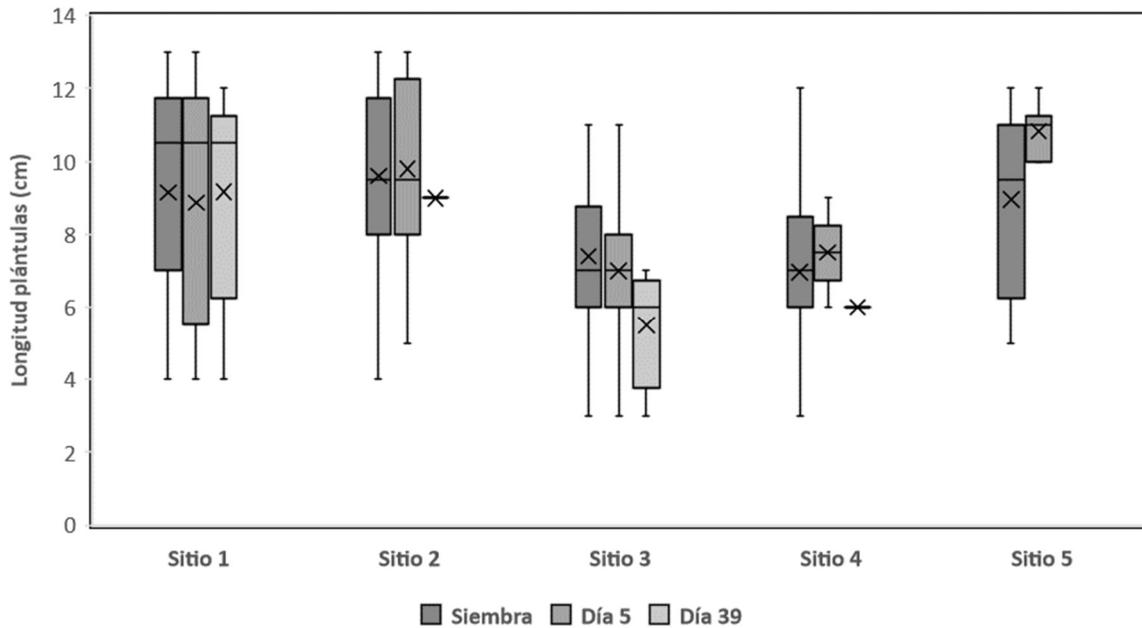


Figura 54. Adhesi3n de pl3ntulas de *L. trabeculata* en AMERB Chungungo B. A) y B) Pl3ntulas adheridas con sus respectivas marcas de identificaci3n de grupo e individuales. C) Pl3ntula ubicada en sitio de adhesi3n. D) Imagen general de un sitio de adhesi3n.



**Figura 55.** Número de las plántulas de *L. trabeculata* al momento de la siembra, al día 5 y 39 desde la adhesión en los distintos sitios seleccionados en AMERB Chungungo B.



**Figura 56.** Diámetro de disco (cm) (Media  $\pm$  DS) de las plántulas de *L. trabeculata* al momento de la siembra, al día 5 y 39 desde la adhesión en los distintos sitios seleccionados en AMERB Chungungo B.



**Objetivo específico 3:** *Evaluar el efecto del origen y condiciones de cultivo sobre el desempeño fisiológico-productivo de especies claves para el desarrollo de APE.*

### **5.5. Evaluación del desempeño fisiológico-productivo de macroalgas y bivalvos co-cultivados (Fase 3)**

El objetivo de este estudio fue determinar el efecto de diferentes combinaciones de biomasa inicial de co-cultivo sobre el crecimiento de *A. chilense* y *M. chilensis*, y *C. chamissoi* y *M. chilensis*. La hipótesis de investigación fue que las dos especies en co-cultivo tendrán un mayor crecimiento que en monocultivos.

#### **5.5.1. Configuración experimental co-cultivos**

Los individuos de *A. chilense* y *C. chamissoi* fueron recolectados desde Manao (41,88° S; 73,51° O) durante marea baja entre junio-julio de 2021, respectivamente. Individuos de *M. chilensis* fueron obtenidos del centro de cultivo “Cultivos Cholche”, durante junio de 2021. Muestras de cada especie fueron transportadas al laboratorio dentro de una caja refrigerada por no más de una hora. Las muestras fueron limpiadas usando un pincel y agua de mar filtrada para eliminar epibiontes visibles. Luego, fueron aclimatadas por 4-8 días bajo condiciones estándar de cultivo (15 °C, 100  $\mu\text{mol fotón m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , 34 ‰).

Luego del periodo de aclimatación, se realizaron dos experimentos de co-cultivo usando cinco diferentes proporciones iniciales de biomasa (1:0, 2:1, 1:1, 1:2 y 0:1) dentro de estanques de acrílico de 3 L, con flujo continuo de agua de mar (34 ‰). El peso utilizado en cada experimento está detallado en la **Tabla 25**. Los co-cultivos fueron mantenidos en una sala de temperatura controlada a 15 °C, y la intensidad de luz (120  $\mu\text{mol fotón m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) fue prevista por tubos LED (T8, 18 W, luz blanca, TEJIE Ltd. San Antonio, Chile) y medida usando un sensor cuántico conectado a un medidor (LP471 PAR y foto-radiómetro HD 2302.0, Delta OHM S.r.l., Italia). Los individuos *M. chilensis* fueron alimentados dos veces por día con *Isochrysis galbana* a una concentración final de 400.000 células  $\text{mL}^{-1}$ .

El peso fresco y seco de los individuos de cada especie fueron determinados en el día 1 y 30 (experimento 1) y 28 (experimento 2). El exceso de agua en el tejido de cada individuo fue removido con papel absorbente antes de pesar. Las tasas de crecimiento fueron calculadas de acuerdo a Yong et al. (2013) y Riisgård et al. (2012) para macroalgas y bivalvos, respectivamente.

El rendimiento cuántico máximo ( $F_v/F_m$ ) del fotosistema II es un indicador de la eficiencia fotosintética máxima en algas (Figueroa et al. 2013), y fue medido usando un fluorómetro de amplitud modulada (Junior-PAM, Walz, Alemania) al día 0, 1, y 30 (experimento 1) y 28 (experimento 2). Las muestras de tejidos de las macroalgas fueron adaptadas a la oscuridad por 15 min (Schreiber et al. 1995) antes de ser expuestas al Junior-PAM.

La tasa de respiración en *M. chilensis* fue determinada de acuerdo a Gosling (2015) al día 1, y 30 (experimento 1) y 28 (experimento 2). Los individuos de cada tratamiento fueron incubados en frascos sellados de vidrio (1 L) con agua de mar filtrada (1  $\mu\text{m}$ ). Estos fueron mantenidos a 15°C por 60 min. Los cambios en la concentración de  $\text{O}_2$  fueron medidos usando un sensor conectado a un medidor de



O<sub>2</sub> (HI-2004 Edge® Dissolved Oxygen Meter, Hanna instruments, EEUU). Un frasco adicional con agua de mar filtrada sin bivalvos fue usado como blanco.

El rendimiento relativo para la macroalga (RRM) y bivalvo (RRB) fue calculado cuatro veces para cada experimento, usando el peso fresco de cada especie, en la proporción inicial de co-cultivo correspondiente, con las siguientes ecuaciones (De Wit 1960, Leal et al. 2020):

$$RRMP = \frac{W_{MB}}{W_M} \quad or \quad RRMC = \frac{W_{BM}}{W_B}$$

Donde  $W_{MB}$  es el peso fresco final (g) de la macroalga en co-cultivo con el bivalvo,  $W_M$  es el peso fresco final de la macroalga en mono-cultivos, mientras  $W_{BM}$  es el peso fresco final del bivalvo en co-cultivo con la macroalga y  $W_B$  es el peso fresco final del bivalvo en mono-cultivos.

El rendimiento relativo total (RRT) fue calculado usando la ecuación  $RRT = RRM + RRB$  (De Wit 1960, Leal et al. 2020), para cada experimento.

Valores de  $RRT = 1,0$  implican competencia entre especies por el mismo recurso limitante,  $RRT > 1,0$  indica sinergia entre especies, y  $RRT < 1,0$  indica mutuo antagonismo entre las especies (Bi & Turvey 1994).

Cuando los datos no cumplieron con los supuestos de normalidad (prueba de Kolgomorov-Smirnow) y homocedasticidad de varianzas (prueba de Levene) para ANOVA, fueron transformados a rangos (Potvin & Roff 1993): rendimiento relativo, para el experimento 1;  $F_v/F_m$ , respiración de *M. chilensis* y rendimiento relativo, para el experimento 2. Las diferencias estadísticas en tasa de crecimiento,  $F_v/F_m$ , tasa de respiración y concentración de nitrato fueron evaluadas a través de ANOVA de una vía, mientras que los resultados del análisis de rendimiento relativo, usando ANOVA de dos vías. Análisis estadísticos entre especies no fueron realizados debido a que sus parámetros fisiológicos no son comparables (Leal et al. 2020).

### 5.5.2. Experimento 1. Co-cultivo entre *A. chilense*: *M. chilensis*

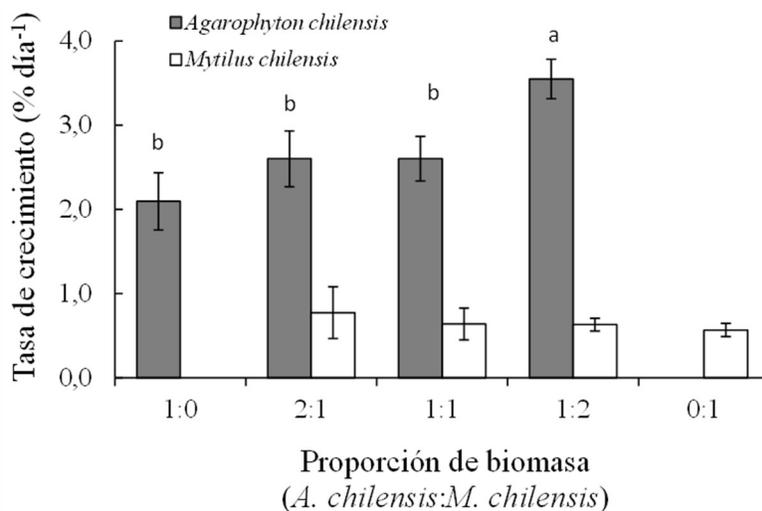
Luego de 30 días, la tasa de crecimiento de *A. chilense* varió entre 2,10 y 3,55 % día<sup>-1</sup> (**Figura 57**), con la mayor tasa observada en la proporción de co-cultivo 1:2 (**Tabla 26**). Para *M. chilensis*, la tasa de crecimiento varió entre 0,57 y 0,77 % día<sup>-1</sup>, pero no se observaron diferencias significativas entre proporciones de co-cultivo (**Tabla 26**). Los valores de  $F_v/F_m$  en *A. chilense* variaron entre 0,567 (día 0) y entre 0,562 y 0,597 durante el experimento (**Figura 58**), pero no se observaron diferencias significativas entre proporciones de co-cultivo (**Tabla 26**). La tasa de respiración de *M. chilensis* varió entre 1,27 y 3,01 % O<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> (**Figura 59**), pero no se observaron diferencias significativas entre proporciones de co-cultivo (**Tabla 26**).

En general, en los cuatro días (6, 16, 20 y 30) de determinaciones de rendimiento relativo De Wit, RRT fue significativamente mayor en co-cultivos que en mono-cultivos (**Tabla 26**), con valores de  $RRT > 1,0$  en las proporciones 2:1, 1:1 y 1:2, indicando una relación sinérgica entre las especies co-cultivadas. RRMC y RRAC no mostraron grandes diferencias entre proporciones iniciales de cultivo. (**Figura 60**). RRT varió entre 1,00 y 1,68, con la tendencia de ser mayor en la proporción 2:1. RRMC varió entre 0 y 0,96 con valores significativamente menores al respectivo mono-cultivo (0:1) en los días

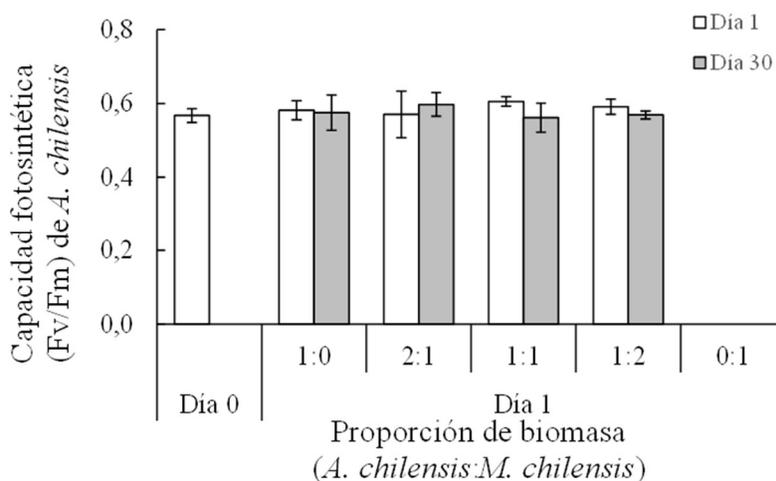


6, 20 y 30 (**Figura 60**). RRAC vari3 entre 0 y 0,77 con valores significativamente menores al respectivo mono-cultivo (1:0) durante los cuatro d3as de medici3n (**Figura 60**).

La concentraci3n acumulada de nitrato vari3 entre 97 y 223,7  $\mu\text{M}$  y la de fosfato entre 144,5 y 186,2  $\mu\text{M}$ , pero no se observaron diferencias significativas en la concentraci3n de ambos nutrientes entre proporciones iniciales de cultivo (**Figura 61; Tabla 26**).



**Figura 57.** Tasa de crecimiento de *A. chilense* y *M. chilensis* despu3s de 30 d3as de co-cultivo en cinco proporciones iniciales de biomasa. Barras representan promedio  $\pm$  DS (n = 4). Subgrupos estad3sticamente diferentes son agrupados por letras min3sculas (a > b) para *A. chilense* (Tukey,  $P < 0,05$ ).



**Figura 58.** Capacidad fotosint3tica (d3a 0, 1 y 34) de *A. chilense* en co-cultivo a cinco diferentes proporciones iniciales de biomasa. Barras representan promedio  $\pm$  DS (n = 4).



**Tabla 25.**

Biomasa inicial y final de las macroalgas y bivalvo en los dos experimentos de co-cultivo realizados. Los datos corresponden al promedio  $\pm$  DS (n = 4).

Experimento	Proporción de co-cultivo	Biomasa real co-cultivada (g)								
		Inicial			Final					
		Macroalga	Bivalvo	Biomasa total en 3 L	Macroalga	Bivalvo	Biomasa total en 3 L	Macroalga	Bivalvo	Biomasa total en 3 L
1) <i>A. chilensis</i> : <i>M. chilensis</i>	1:0	20.09 $\pm$ 0.09	—	20.09	36.01 $\pm$ 0.67	—	36.01			
	2:1	13.52 $\pm$ 0.02	0.54 $\pm$ 0.08	14.06	27.82 $\pm$ 0.70	0.67 $\pm$ 0.10	28.49			
	1:1	10.08 $\pm$ 0.06	0.59 $\pm$ 0.01	10.67	20.75 $\pm$ 0.68	0.70 $\pm$ 0.02	21.45			
	1:2	6.52 $\pm$ 0.00	0.57 $\pm$ 0.13	7.09	17.33 $\pm$ 0.75	0.68 $\pm$ 0.14	18.01			
	0:1	—	0.64 $\pm$ 0.05	0.64	—	0.75 $\pm$ 0.07	0.75			
2) <i>C. chamissoi</i> : <i>M. chilensis</i>	1:0	20.09 $\pm$ 0.07	—	20.09	33.79 $\pm$ 1.55	—	33.79			
	2:1	13.52 $\pm$ 0.04	1.24 $\pm$ 0.10	14.83	29.39 $\pm$ 1.52	1.55 $\pm$ 0.13	30.93			
	1:1	10.31 $\pm$ 0.16	1.24 $\pm$ 0.01	11.55	17.62 $\pm$ 1.61	1.52 $\pm$ 0.06	19.15			
	1:2	6.50 $\pm$ 0.07	1.35 $\pm$ 0.10	7.85	13.36 $\pm$ 1.51	1.61 $\pm$ 0.12	14.98			
	0:1	—	1.27 $\pm$ 0.04	1.27	—	1.51 $\pm$ 0.10	1.51			



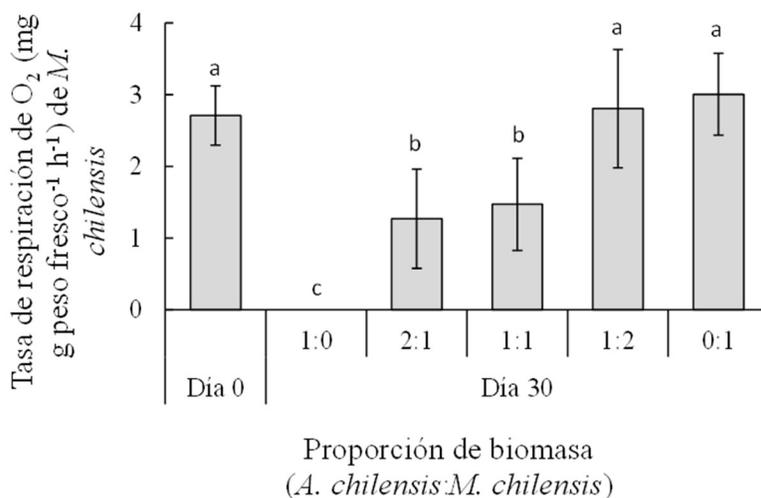
**Tabla 26.**

Resultados de significancia de ANOVA para los efectos de co-cultivo sobre distintas variables fisiológicas de *A. chilense* y *M. chilensis* (experimento 1).

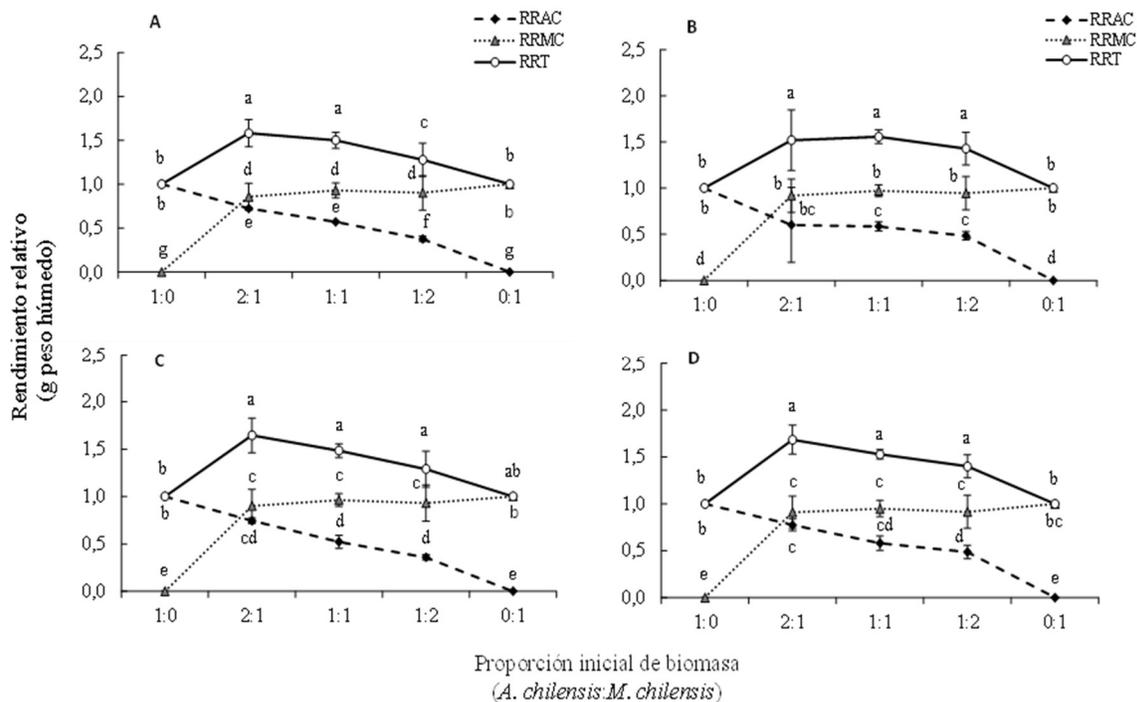
Variable	Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	P
Tasa de crecimiento de <i>A. chilense</i>	Proporción de co-cultivo	4	27,943	6,986	99,723	< 0,001
	Residual	15	1,051	0,0701		
	Total	19	28,994			
Tasa de crecimiento de <i>M. chilensis</i>	Proporción de co-cultivo	4	1,453	0,363	12,757	< 0,001
	Residual	15	0,427	0,0285		
	Total	19	1,880			
Fv/Fm de <i>A. chilense</i>	Tiempo	1	0,00113	0,00113	1,014	0,323
	Proporción de co-cultivo	3	0,000179	0,0000597	0,054	0,983
	Tiempo x Proporción de co-cultivo	3	0,00544	0,00181	1,631	0,205
	Residual	28	0,0312	0,00111		
	Total	35	0,0383	0,00109		
Tasa de respiración de <i>M. chilensis</i>	Proporción de co-cultivo	5	27,551	5,510	15,977	< 0,001
	Residual	18	6,208	0,345		
	Total	23	33,758			
Rendimiento relativo en co-cultivo Día 6	Rendimiento relativo	2	9564,400	4782,200	144,042	< 0,001
	Proporción de co-cultivo	4	784,667	196,167	5,909	< 0,001
	Rendimiento relativo x Proporción de co-cultivo	8	5769,933	721,242	21,724	< 0,001
	Residual	45	1494,000	33,200		
	Total	59	17613,000	298,525		
Rendimiento relativo en co-cultivo	Rendimiento relativo	2	9582,300	4791,150	145,82	< 0,001



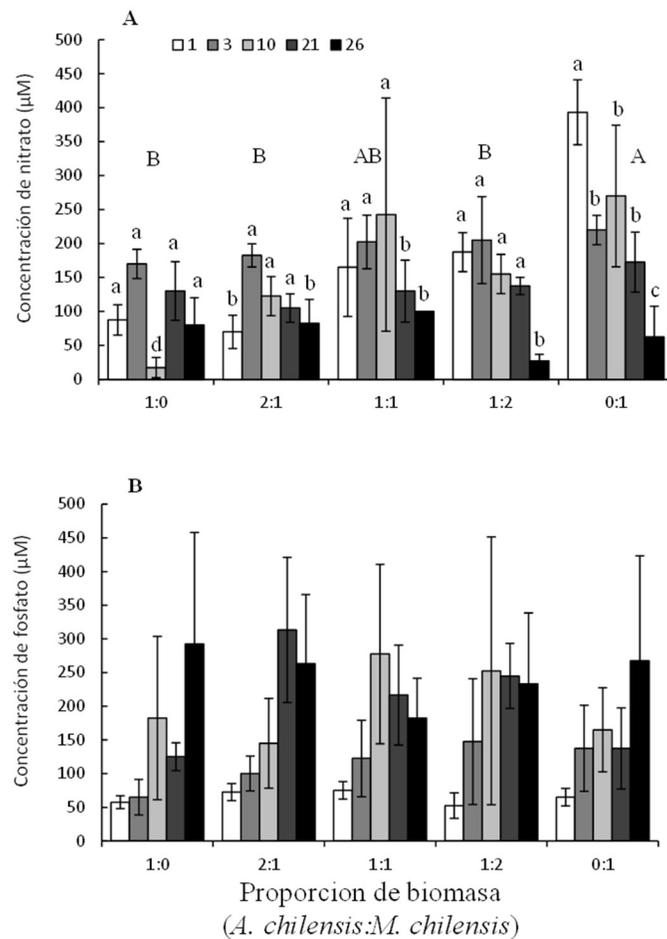
Día 16	Proporción de co-cultivo	4	812,667	203,167	6,184	< 0,001
	Rendimiento relativo x Proporción de co-cultivo	8	5739,533	717,442	21,836	< 0,001
	Residual	45	1478,500	32,856		
	Total	59	17613,000	298,525		
<hr/>						
Rendimiento relativo en co-cultivo	Rendimiento relativo	2	9346,675	4673,338	108,92	< 0,001
Día 20	Proporción de co-cultivo	4	888,167	222,042	5,175	0,002
	Rendimiento relativo x Proporción de co-cultivo	8	5429,033	678,629	15,818	< 0,001
	Residual	45	1930,625	42,903		
	Total	59	17594,500	298,212		
<hr/>						
Rendimiento relativo en co-cultivo	Rendimiento relativo	2	9369,700	4684,850	131,065	< 0,001
Día 30	Proporción de co-cultivo	4	1153,167	288,292	8,065	< 0,001
	Rendimiento relativo x Proporción de co-cultivo	8	5481,633	685,204	19,170	< 0,001
	Residual	45	1608,500	35,744		
	Total	59	17613,000	298,525		
<hr/>						
Concentración de nitrato	Rendimiento relativo	4	194518,444	48629,611	17,370	< 0,001
	Proporción de co-cultivo	4	200285,111	50071,278	17,885	< 0,001
	Rendimiento relativo x Proporción de co-cultivo	16	255780,444	15986,278	5,710	< 0,001
	Residual	75	209966,667	2799,556		
	Total	99	860550,667	8692,431		
<hr/>						
Concentración de fosfato	Rendimiento relativo	4	456801,778	114200,444	14,363	< 0,001
	Proporción de co-cultivo	4	24566,222	6141,556	0,772	0,547
	Rendimiento relativo x Proporción de co-cultivo	16	173136,000	10821,000	1,361	0,185
	Residual	75	596341,667	7951,222		
	Total	99	1250845,667	12634,805		



**Figura 59.** Tasa de respiración de *M. chilensis* al día 0 y 34 en co-cultivos a cinco diferentes proporciones iniciales de biomasa. Barras representan promedio  $\pm$  DS (n = 4).



**Figura 60.** Rendimiento relativo de *A. chilense* y *M. chilensis* en los días 6 (A), 16 (B), 20 (C) y 30 (D) en co-cultivo a cinco proporciones iniciales de biomasa. RRAC, rendimiento relativo de *A. chilense*; RRMC, rendimiento relativo de *M. chilensis*; y RRT, rendimiento relativo total. Puntos representan promedio  $\pm$  DS (n = 4). Subgrupos estadísticamente diferentes son agrupados por letras minúsculas como a > b > c > d > e > f < g (Tukey, P < 0.05).



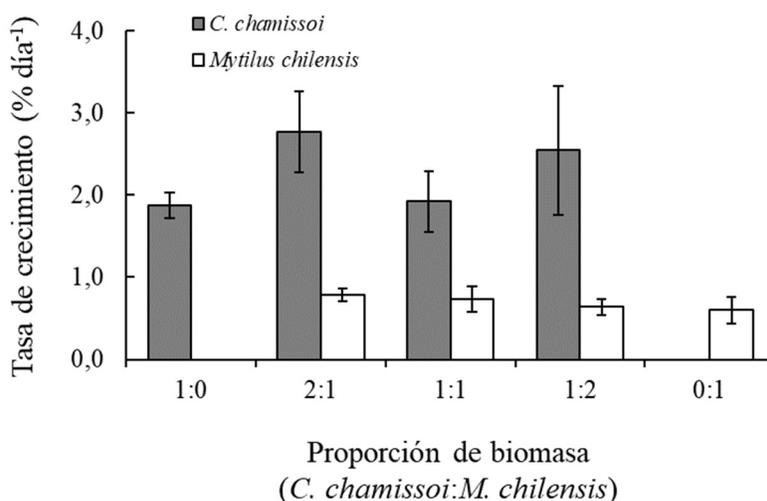
**Figura 61.** Concentraci3n de nitrato y fosfato en agua de mar en las cinco proporci3nes de biomasa correspondiente. Barras representan promedio  $\pm$  DS ( $n = 4$ ). Subgrupos estadisticamente diferentes fueron agrupados por letras minúsculas ( $a > b > c > d$ ) y mayúsculas ( $A > B$ ) para diferencias dentro de cada proporci3n y para diferencias entre proporci3n, respectivamente (Tukey,  $P < 0.05$ ).

### 5.5.3. Experimento 2. Co-cultivo entre *C. chamissoi*: *M. chilensis*

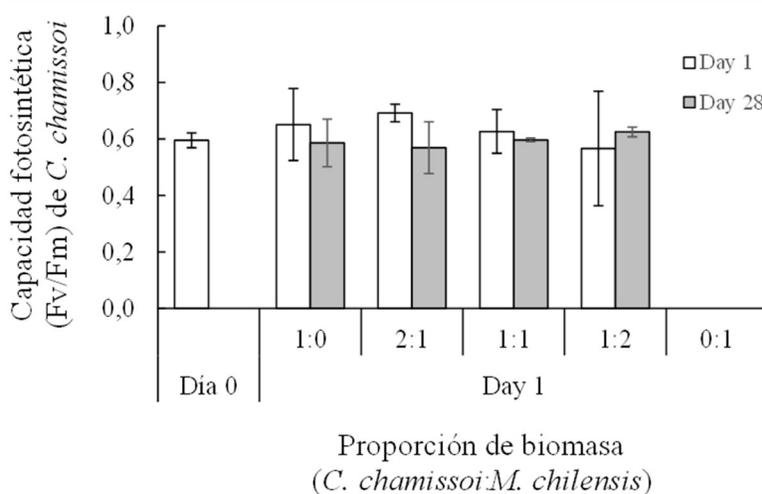
Luego de 28 días, la tasa de crecimiento de *C. chamissoi* vari3 entre 1,87 y 2,77 %  $\text{día}^{-1}$  (**Figura 62**), mientras que, para *M. chilensis*, la tasa de crecimiento vari3 entre 0,60 y 0,78 %  $\text{día}^{-1}$ , pero no se observaron diferencias significativas entre proporci3nes de co-cultivo en ambas especies (**Tabla 27**). Los valores de  $F_v/F_m$  en *C. chamissoi* variaron entre 0,596 (día 0) y entre 0,566 y 0,692 durante el experimento (**Figura 63**), pero no se observaron diferencias significativas entre proporci3nes de co-cultivo (**Tabla 27**). La tasa de respiraci3n de *M. chilensis* vari3 entre 0,71 y 1,91 %  $\text{O}_2 \text{ g}^{-1} \text{ h}^{-1}$  (**Figura 64**), pero no se observaron diferencias significativas entre proporci3nes de co-cultivo (**Tabla 27**).



En general, en los cuatro d1as (6, 16, 20 y 28) de determinaciones de rendimiento relativo De Wit, RRT fue significativamente mayor en co-cultivos que en mono-cultivos (**Tabla 27**), con valores de RRT > 1,0 en las proporciones 2:1, 1:1 y 1:2, indicando una relaci3n sin3rgica entre las especies co-cultivadas. RRMC y RRCC no mostraron grandes diferencias entre proporciones iniciales de cultivo. (**Figura 65**). RRT vari3 entre 1,00 y 1,91, con la tendencia de ser mayor en la proporci3n 2:1. RRMC vari3 entre 0 y 1,21 con valores significativamente menores al respectivo mono-cultivo (0:1) en los d1as 6 y 20 (Fig. 9). RRCC vari3 entre 0 y 0,87 con valores significativamente menores al respectivo mono-cultivo (1:0) durante los cuatro d1as de medici3n (**Figura 65**).



**Figura 62.** Tasa de crecimiento de *C. chamissoi* y *M. chilensis* despu3s de 28 d1as de co-cultivo en cinco proporciones iniciales de biomasa.



**Figura 63.** Capacidad fotosint3tica de *C. chamissoi* 0 y 28 en co-cultivos a cinco diferentes proporciones iniciales de biomasa. Barras representan promedio  $\pm$  DS (n = 4).



**Tabla 27.**

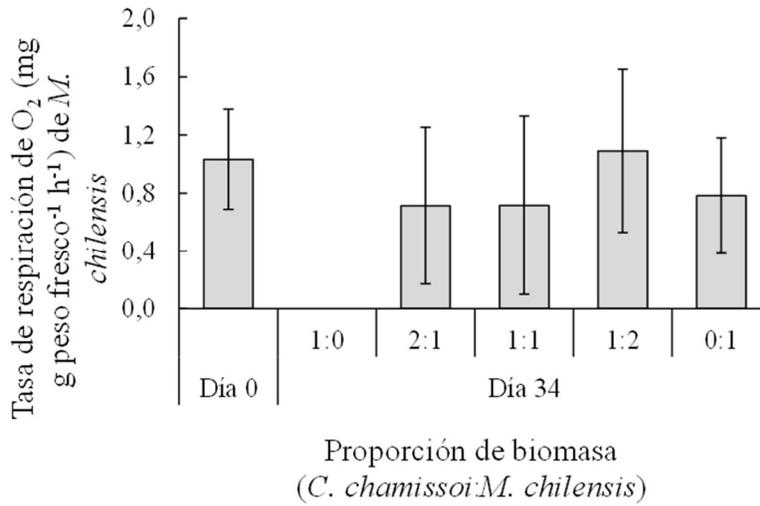
Resultados de significancia de ANOVA para los efectos de co-cultivo sobre distintas variables fisiológicas de *C. chamissoi* y *M. chilensis* (experimento 2).

Variable	Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	P
Tasa de crecimiento de <i>C. chamissoi</i>	Proporción de co-cultivo	4	19,012	4,753	23,201	< 0,001
	Residual	15	3,073	0,205		
	Total	19	22,085			
Tasa de crecimiento de <i>M. chilensis</i>	Proporción de co-cultivo	4	1,603	0,401	30,300	< 0,001
	Residual	15	0,198	0,0132		
	Total	19	1,801			
Fv/Fm de <i>C. chamissoi</i>	Tiempo	1	338	338	3,885	0,06
	Proporción de co-cultivo	3	58,75	19,583	0,225	0,878
	Tiempo x Proporción de co-cultivo	3	243,25	81,083	0,932	0,44
	Residual	24	2088	87		
	Total	31	2728	88		
Tasa de respiración de <i>M. chilensis</i>	Proporción de co-cultivo	5	536,000	107,200	3,168	0,032
	Residual	18	609,000	33,833		
	Total	23	1145,000			
Rendimiento relativo en co-cultivo Día 6	Rendimiento relativo	2	9323,200	4661,600	208,832	< 0,001
	Proporción de co-cultivo	4	1338,500	334,625	14,991	< 0,001
	Rendimiento relativo x Proporción de co-cultivo	8	5946,800	743,350	33,301	< 0,001
	Residual	45	1004,500	22,322		
	Total	59	17613,000	298,525		
Rendimiento relativo en co-cultivo	Rendimiento relativo	2	8585,200	4292,600	145,512	< 0,001

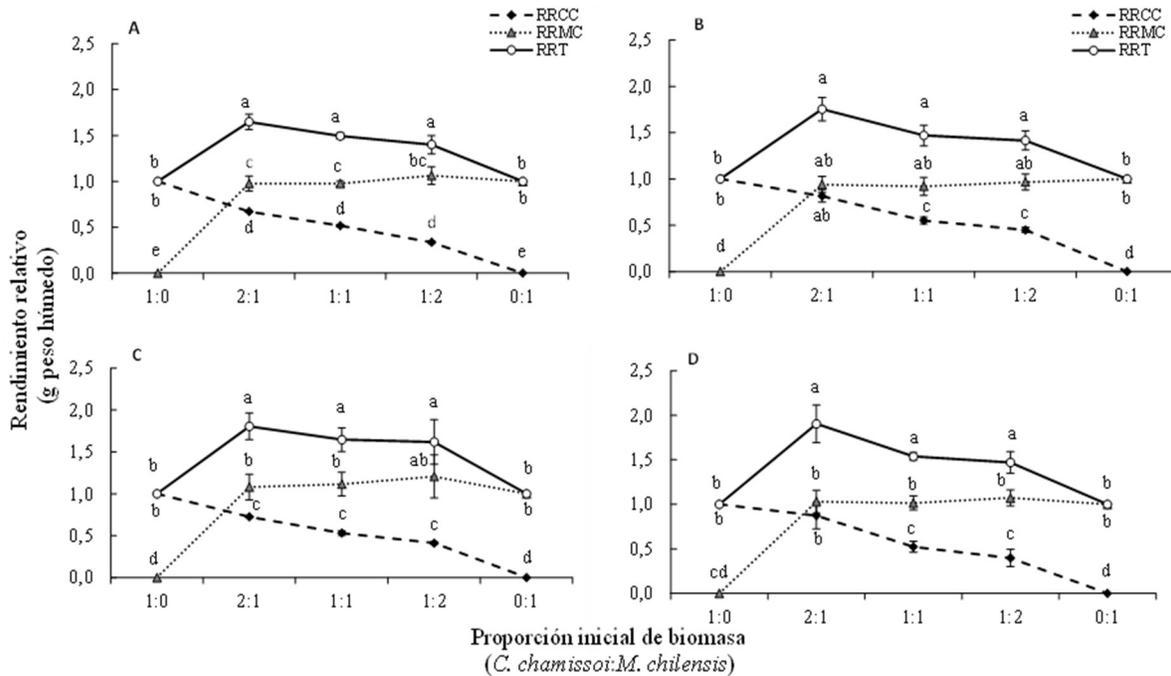


INSTITUTO DE FOMENTO PESQUERO / DIVISI3N DE INVESTIGACI3N EN ACUICULTURA

Día 16	Proporci3n de co-cultivo	4	2614,167	653,542	22,154	< 0,001
	Rendimiento relativo x Proporci3n de co-cultivo	8	5086,133	635,767	21,551	< 0,001
	Residual	45	1327,500	29,500		
	Total	59	17613,000	298,525		
Rendimiento relativo en co-cultivo	Rendimiento relativo	2	9685,200	4842,600	164,964	< 0,001
Día 20	Proporci3n de co-cultivo	4	788,667	197,167	6,717	0,002
	Rendimiento relativo x Proporci3n de co-cultivo	8	5818,133	727,267	24,774	< 0,001
	Residual	45	1321,000	29,356		
	Total	59	17613,000	298,525		
Rendimiento relativo en co-cultivo	Rendimiento relativo	2	8185,600	4092,800	91,539	< 0,001
Día 28	Proporci3n de co-cultivo	4	2378,500	594,625	13,299	< 0,001
	Rendimiento relativo x Proporci3n de co-cultivo	8	5036,900	629,613	14,082	< 0,001
	Residual	45	2012,000	44,711		
	Total	59	17613,000	298,525		



**Figura 64.** Tasa de respiraci3n de *M. chilensis* al día 0 y 28 en co-cultivos a cinco diferentes proporciones iniciales de biomasa. Barras representan promedio  $\pm$  DS (n = 4).



**Figura 65.** Rendimiento relativo *C. chamissoi* y *M. chilensis* en los días 6 (A), 16 (B), 20 (C) y 28 (D) en co-cultivo a cinco proporciones iniciales de biomasa. RRCC, rendimiento relativo de *C. chamissoi*; RRMC, rendimiento relativo de *M. chilensis*; y RRT, rendimiento relativo total. Puntos representan promedio  $\pm$  DS (n = 4). Subgrupos estadísticamente diferentes son agrupados por letras minúsculas como a > b > c > d > e (Tukey, P < 0.05).



## 5.6. Determinación del efecto del origen sobre la calidad de la macroalga (Fase 2)

### 5.6.1. Determinación del efecto de origen en la concentración de fenoles en *D. incurvata*

Los individuos de *D. incurvata* fueron obtenidos desde dos sitios distintos, Mar Brava Ancud (41,90° S; 73,99° O) y Guabún (41,80° S; 74,03° O) durante marea baja en febrero de 2021. En el sitio de muestreo, las muestras de 10 individuos adultos fueron limpiadas usando un pincel y agua de mar filtrada para eliminar epibiontes. Posteriormente, fueron puestas en frascos de plástico de 100 ml con silica gel, para secar el tejido. En el laboratorio se realizó el recambio de la silica gel, y cuando el indicador de humedad se hizo visible, se repitió el proceso hasta no observar humedad en las muestras.

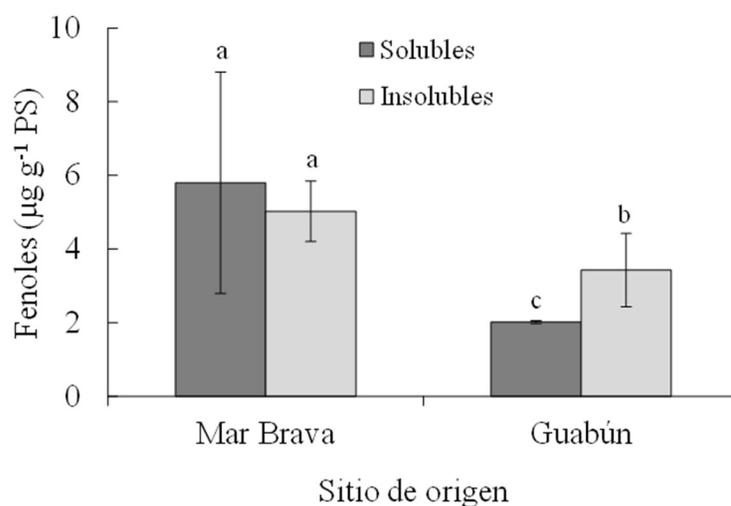
Para la determinación de florotaninos solubles se utilizó el método de Folin-Ciocalteu (Koivikko et al. 2005, Huovinen et al. 2010), donde se pesó 0,1 g de tejido seco de cada muestra en una balanza analítica digital (FA 2104C, FA SERIES ANALYTICAL BALANCE, d = 0,1 mg). Luego, la muestra se pulverizó en un mortero de porcelana hasta obtener partículas finas. El material molido se trasladó a tubos cónicos de 50 ml donde se adicionó 10 ml de acetona al 70%, y se mantuvo en agitación constante durante la noche a temperatura ambiente. Posteriormente, las muestras se centrifugaron por 10 min a 3500 rpm. Una alícuota de 500 µL del sobrenadante el que se mezcló con 2,5 mL de agua destilada, 2 mL de NaCO<sub>3</sub> al 20% y 1 mL de reactivo Folin-Ciocalteu 2N. Esta solución se mantuvo en oscuridad por 45 min a temperatura ambiente, y se centrifugaron a 1900 g durante 3 min. Finalmente, la absorbancia fue determinada a 730 nm en un espectrofotómetro (Aquamate UV-Vis, Thermo Fisher Scientific, USA).

Para cuantificar florotaninos insolubles se usó una modificación del método alcalino (Koivikko et al. 2005, Huovinen et al. 2010). El precipitado formado en la extracción de florotaninos solubles fue sometido a un lavado en serie usando 5 mL de los siguientes solventes: metanol, agua destilada, acetona y dietiléter. Luego, el precipitado de residuos insolubles fue secado a 60 °C por 1 y suspendido en 8 mL de NaOH 1 M y agitado por 2,5 a temperatura ambiente. Las muestras fueron centrifugadas a 3800 rpm por 5 min y una alícuota de 1 mL fue neutralizada usando 100 µL de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>.

Debido a que los datos obtenidos no cumplieron con los supuestos de normalidad (prueba de Kolgomorov-Smirnow) y homocedasticidad de varianzas (prueba de Levene) para ANOVA de dos vías, fueron transformados a rangos (Potvin & Roff 1993).

### 5.6.2. Fenoles solubles e insolubles en *D. incurvata*

La concentración de fenoles fue diferente entre individuos de *D. incurvata* de cada localidad (**Figura 66**). Para Mar Brava, la concentración de fenoles solubles (5,80 µg g<sup>-1</sup> PS) no fue estadísticamente diferente a la de fenoles insolubles (5,02 µg g<sup>-1</sup> PS). Para Guabún, la concentración de fenoles solubles (2,01 µg g<sup>-1</sup> PS) fue significativamente menor a la de fenoles insolubles (3,42 µg g<sup>-1</sup> PS). Además, la concentración de fenoles de *D. incurvata* de Mar Brava fue significativamente mayor a la cuantificada en individuos provenientes de Guabún (**Tabla 28**).



**Figura 66.** Fenoles solubles e insolubles en *D. incurvata* de diferentes sitios. Barras representan promedio  $\pm$  DS (n = 4). Subgrupos estadísticamente diferentes son agrupados por letras minúsculas como a > b > c > (Tukey, P < 0.05).

**Tabla 28.**

Resultados de significancia de ANOVA para los efectos de la localidad de origen sobre la concentraci3n de fenoles solubles e insolubles en *D. incurvata*.

Variable	Fuente de variaci3n	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	P
Concentraci3n de fenoles	Localidad	1	2822,4	2822,4	55,173	< 0,001
	Tipo de fenol	1	435,6	435,6	8,515	0,006
	Localidad x Tipo de fenol	1	230,4	230,4	4,504	0,041
	Residual	36	1841,6	51,156		
	Total	39	5330	136,667		



**Objetivo específico 4:** *Evaluar interacciones ambientales de la acuicultura de pequeña escala.*

## **5.7. Validación de modelos tróficos para evaluar impactos ecosistémicos de acuicultura de macroalgas e invertebrados**

### 5.7.1. Métodos de modelación

El loop análisis o análisis del modelamiento cualitativo o semicuantitativo de redes (Qualitative Modelling Network Analysis) es una representación gráfica de una matriz comunitaria de Jacob-Levins que describe las interacciones entre organismos y variables abióticas simplificando el análisis de la enorme complejidad y mediciones del ambiente (Puccia & Levins 1991). Estos modelos proveen un marco de referencia para la formulación de relaciones entre variables dentro de un sistema particular. Es posible estimar propiedades de estabilidad local del sistema (sustentabilidad) y determinar efectos de la relación entre estas variables. Los modelos son cualitativos cuando sólo los signos de la interacción entre variables son conocidos, no su magnitud, a pesar de si el nivel de las variables es en sí mismas cuantificable. La relación (+,-) indica interacciones de depredador-presa, parásito-huésped o recurso-consumidor, la relación (-,-) representa competencia entre especies, y las relaciones (+,+), (+,0) y (-,0) representan mutualismo, comensalismo y amensalismo, respectivamente. Cada variable se representa por un nodo (círculo) y líneas que representan dirección y tipo de interacción. Una flecha indica un efecto positivo, un círculo sólido muestra un efecto negativo. La falta de uno de estos símbolos representa un efecto nulo. Estos modelos están basados en la correspondencia entre sistemas de ecuaciones diferenciales en equilibrio, matrices comunitarias de Jacob-Levins y diagramas llamados dígrafos. Por lo tanto, en el sistema, el elemento  $a_{ij}$  de la matriz y el dígrafo representan el efecto de la variable  $j$  sobre el crecimiento de la variable  $i$  con la ecuación:

$$dX_i/dt = f_i(X_1; X_2; X_3; \dots; X_n; C_1; C_2; C_3; \dots; C_n)$$

Donde la tasa de cambio de la variable  $X_i$ , es una función de  $f_i$  de las otras variables interconectadas  $X_n$  y parámetros  $C_n$  y es resuelta en el equilibrio ( $X^*$ ). La conexión de  $X_j$  a  $X_i$  es similar a la de  $a_{ij}$ , como sigue:

$$a_{ij} \delta(dX_i/dt) / \delta X_j$$

Donde  $X_i$  es evaluado como un equilibrio móvil para el sistema. El elemento del gráfico que representa la conexión desde  $j$  a  $i$  es signado ( $a_{ij}$ ) –si es que es positivo, negativo, o cero - donde la función signo ( $X$ ) es 1 cuando  $X > 0$ , 0 cuando  $X = 0$ , and -1 cuando  $X < 0$ . La estabilidad local, es determinada por el criterio de Routh-Hurwitz, que se traduce en términos del análisis como condición 1, cuando  $F_k < 0$  para todos los  $k$ ; i.e.,  $F_k$  corresponde a las auto retroacciones negativas en cada nivel de complejidad ( $k$ ), las cuales deben exceder las auto retroacciones positivas. La condición 2 examina las relaciones entre auto-retroacciones a diferentes niveles de  $k$ , usando las desigualdades de Routh-Hurwitz. Este criterio indica que un equilibrio móvil puede ser asintótico o negativo oscilatorio estable, o contrario divergente o no negativo oscilatorio inestable (Levins 1998).



Las auto-retroacciones de cada nivel pueden ser también calculadas estimando el polinomio característico relacionado a la matriz de interacciones de Jacob-Levins, en la cual el polinomio puede ahora ser escrito en términos de notación de auto-retroacciones como:

$$F_0 \lambda^n + F_1 \lambda^{n-1} + F_2 \lambda^{n-2} + \dots + F_{n-1} \lambda + F_n = 0$$

Donde  $F_0 = -1$  y  $F_n$  es la auto-retroacción del sistema completo ( $n$  = número total de variables del sistema). El criterio de estabilidad de Levins asume que el sistema es localmente estable cuando  $F_n$  es negativo. Si las auto-retroacciones negativas se vuelven más dominantes ( $F_n$ ), existirá mayor resistencia dentro del sistema para soportar disturbios o cambios externos (Levins 1998). Basado en este criterio de estabilidad local, es posible estimar el grado de resistencia a perturbaciones como medida de sustentabilidad del sistema, simultáneamente, para explorar estrategias para incrementar esta resistencia. De la misma manera, este análisis permite indicar qué debe ser medido al identificar las auto-dinámicas e interacciones que cambian la estabilidad local.

#### 5.7.2. Modelos y desarrollo de escenarios de estabilidad/ inestabilidad

A continuación, se presenta la construcción y supuestos de 3 modelos que representan los casos de estudio.

##### 5.7.2.1. Caso 1. Cultivo de macroalgas

Los modelos representan las relaciones de distintas etapas del cultivo del alga comercial chicorea de mar (*C. chamissoi*) sobre el ecosistema. La construcción de éstos se basa en las experiencias de cultivo en sistemas de cultivo tipo suspendido (long-lines). Se identificaron 7 variables que caracterizan al cultivo: Acuicultor, manejo (limpieza), macroalgas, epifitos, nutrientes, fitoplancton y detritus.

Se realizaron cinco modelos representando seis etapas del cultivo de esta alga: siembra, pre-cosecha, cosecha única, cosecha 1, cosecha 2 y post cosecha.

De acuerdo a los escenarios de estabilidad, se determinó que las etapas: cosecha única y cosecha 1 corresponden a un solo modelo, principalmente porque se asume que la variable macroalgas se encuentra en su máximo potencial de biomasa y la acción de colecta o cosecha se realizan en el mismo periodo de tiempo.

Las estimaciones de estabilidad/inestabilidad de los modelos y escenarios fueron determinados desde matrices comunitarias (Jacob-Levins) construidas para cada uno de ellos (**Tablas 29, 30, 31, 32 y 33**) y computadas con el programa online *Loop Stability* (Cortesía: <https://josue.shinyapps.io/loop/>).

#### **MODELO 1, SIEMBRA**

Incluye 7 variables: acuicultor (A), manejo (ML), cultivo de macroalgas (M), epifitos (EPI), nutrientes (N), fitoplancton (F) y detritus (D). Las relaciones entre las variables de este modelo se representan gráficamente en el dígrafo A (**Figura 67**).

Este modelo presentó 243 escenarios de estabilidad/inestabilidad. Sin escenarios que cumplieran con los tres criterios (3C) de estabilidad local o condición de equilibrio del sistema ( $RH1 = Routh-Hurwitz$  1,



RH2= Routh-Hurtwitz 2 o equilibrio no oscilatorio y Levins). Sin embargo, se obtuvo 4 escenarios (1,7% del total) en los cuales se cumplieron dos (RH1 y Levins (2C)) de los tres criterios. Las principales relaciones ecológicas entre las variables de este sistema, durante el periodo de siembra son las siguientes:

### **Comensalismo (+,0)**

La relación entre el acuicultor y el cultivo de macroalgas presenta un efecto positivo ya que el acuicultor entrega las semillas (siembra) para el crecimiento de las macroalgas (Chung et al. 2013) hasta completar un ciclo productivo. Esta actividad se realiza al inicio del cultivo, durante los meses de otoño para obtener la biomasa cosechable durante primavera hasta completar el ciclo. El acuicultor mediante el manejo, que básicamente consiste en una permanente limpieza del sistema de cultivo (cabos, sistema de flotación y anclaje), logra controlar a los epifitos consiguiendo un efecto positivo sobre el cultivo de macroalgas y evitando la disminución de sus ingresos (Buschmann et al. 1995, 2001; Candia 2010). Los epifitos tienen un efecto negativo sobre las macroalgas, su presencia reduce la energía lumínica disminuyendo su actividad fotosintética (Dixon et al. 1981, Hurd et al. 2000). Por otro lado, el detritus se ve favorecido (efecto directo positivo sobre él) por las variables macroalgas y epifitos que son un aporte de materia orgánica vegetal y animal al ambiente (Rodríguez 2000).

### **Amensalismo (-,0)**

La relación entre el manejo, realizado por el acuicultor sobre los epifitos, tiene un efecto negativo; lo cual es beneficioso para el acuicultor, ya que al eliminar los epifitos logra biomasa de calidad evitando así perjudicar sus ingresos económicos (Sievers et al. 2019).

### **Consumidor-recurso (+, -)**

Las macroalgas mantienen una relación tipo consumidor-recurso con los nutrientes, positiva desde el punto de vista de las macroalgas, ya que los nutrientes son asimilados (Harrison & Hurd 2001, Chopin et al. 2008, 2011, Buschmann, Varela, et al. 2008), y negativos por parte de los nutrientes, porque la concentración de éstos se ve afectada. Los epifitos presentan un efecto negativo sobre el cultivo de macroalgas, ya que afectan a las estructuras flotantes como también la calidad de las macroalgas. Por otro lado, las macroalgas se relacionan positivamente con esta variable porque le otorga sustrato y alimentación (parasitismo) (Heijs 1987, Arrontes 1990, Reyes & Afonso-Carrillo 1995, Kanamori et al. 2004). Los nutrientes presentan un tipo de relación recurso-consumidor tanto con el cultivo de macroalgas como con el fitoplancton; en ambos casos, los nutrientes son incorporados (Diehl et al. 2002, Chopin et al. 2011). Respecto al detritus, posee un efecto negativo por competencia.

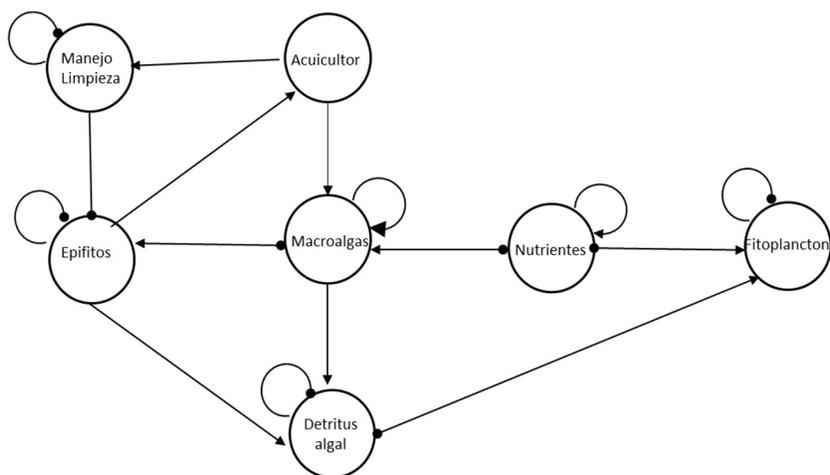
Este modelo presenta cuatro auto-retroacciones negativas en las variables manejo, epifitos, fitoplancton y detritus, lo que significa que la abundancia para cada una de estas variables se encuentra en las cercanías de su máximo potencial. Esto se traduce en que el manejo, es decir, la limpieza de las líneas de cultivo, que realiza el acuicultor, es determinante para mantener el sistema libre de epifitos (Delgadillo-Garzón & Newmarck 2008), al momento de comenzar con el cultivo (siembra de semillas). En este modelo, la dinámica para el fitoplancton y detritus se detiene, es decir, se encuentra limitada por el cultivo.

Por el contrario, las variables macroalgas y nutrientes presentan auto retroacciones positivas, es decir, su abundancia actual se encuentra muy por debajo de su abundancia potencial máxima o capacidad



de carga. Lo cual es lógico, ya que el cultivo recién se instala. El acuicultor no posee auto-retroacción, es decir, su abundancia se encuentra entre ambas situaciones extremas expuestas previamente. Las auto-retroacciones son tasas de cambio, por lo tanto, dependerán de la abundancia de una variable en particular en un momento determinado.

La matriz de interacción muestra el escenario con los dos criterios (2C) de estabilidad de Hurtwitz y Levins para el modelo de siembra (Tabla 29). Las incógnitas presentes en la matriz muestran diferentes escenarios que permiten examinar los criterios de mayor estabilidad sostenible. La Figura 68 representa la frecuencia absoluta de los 4 escenarios de mayor estabilidad (2C) obtenidos para el modelo 1 (siembra). Se observa que la variable limitante (auto-retroacción negativa) para el modelo de siembra son los epifitos. Las auto-retroacciones negativas representan la dependencia de la variable más sensible del modelo en estudio. Por otro lado, los nutrientes indican la condición no limitante (auto-retracción positiva), al menos para esta etapa del cultivo.

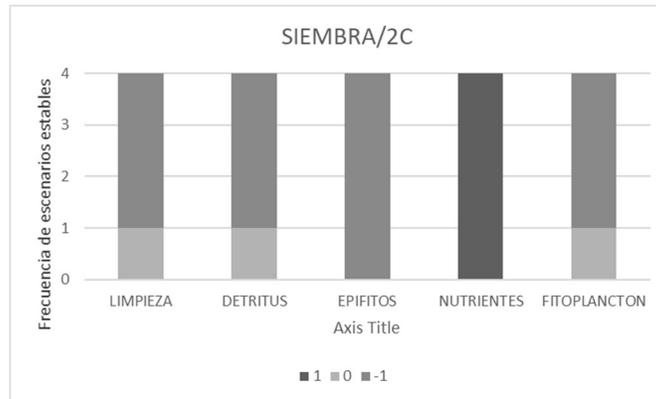


**Figura 67.** Dígrafo A. Modelo 1. Representación gráfica de la siembra de *Chondracanthus chamissoii* (chicorea de mar). Las flechas indican interacciones que son positivas (→), los círculos sólidos (—●) indican un efecto negativo. Auto-retroacción (flecha curva sobre la variable) negativa (—●) y Auto-retroacción positiva (→).

**Tabla 29.**

Matriz de interacciones (Jacob-Levins); Modelo 1, siembra de chicorea de mar. Casillas coloreadas indican auto-retroacciones incógnitas.

Modelo 1	A	M	ML	D	EPI	N	F
A	0	0	0	0	1	0	0
M	1	1	0	0	-1	1	0
ML	1	0	?	0	0	0	0
D	0	1	0	?	1	0	-1
EPI	0	1	-1	0	?	0	0
N	0	-1	0	0	0	?	-1
F	0	0	0	1	0	1	?



**Figura 68.** Frecuencia absoluta de los 4 escenarios de estabilidad (2C) obtenidos para el modelo de siembra. Se presentan los tres tipos de auto-retroacci3n (dinámica de crecimiento o abundancia relativa). En negro, auto-retroacciones positivas (+1) donde las abundancias oscilan en magnitudes inferiores a  $k/2$ ; en gris oscuro auto-retroacciones negativas (-1) la abundancia oscila entre capacidad de carga  $k$  y  $k/2$  y en gris claro sin auto-retroacciones (0) corresponde a abundancia en  $k/2$ .

## **MODELO 2, PRECOSECHA**

Este modelo incluye 7 variables: acuicultor (A), manejo (ML), cultivo de macroalgas (M), epifitos (EPI), nutrientes (N), fitoplancton (F) y detritus (D). Las relaciones entre las variables de este modelo se representan gráficamente en el dígrafo B (**Figura 69**).

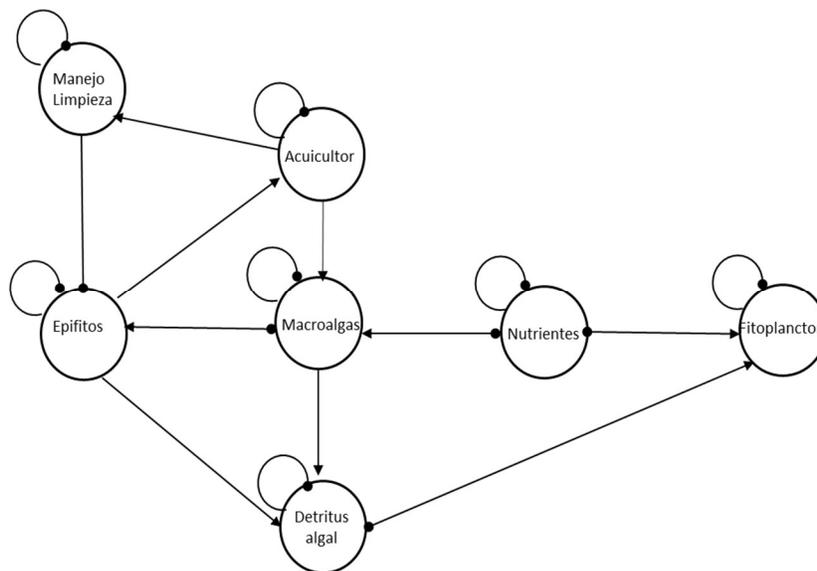
Se obtuvo 243 escenarios de estabilidad/inestabilidad, con 56 escenarios (23% del total) de equilibrio holísticamente sostenible de acuerdo a los tres criterios (3C) de estabilidad (RH1, RH2 y Levins) del sistema.

La estabilidad de este sistema mantiene las mismas relaciones ecológicas entre las variables que durante el periodo de siembra, sin embargo, durante esta fase del cultivo, todas las variables poseen auto-retracciones negativas. Durante la pre-cosecha todas las variables se encuentran en las cercanías de su máximo potencial; las macroalgas ya han alcanzado una biomasa adecuada para ser cosechadas. El acuicultor mediante el manejo constante, durante todo el proceso de cultivo, ha logrado mantener el sistema libre de epifitos; situaci3n que lo ha beneficiado produciendo biomasa de mejor calidad. Los nutrientes han estado disponibles durante todo el periodo de crecimiento del alga en cultivo. Los epifitos y macroalgas se relacionan positivamente con el detritus, son un aporte al medio; en el caso de las macroalgas el aporte es producto de la descomposici3n de la materia orgánica de tipo vegetal (Krumhansl 2012).

La matriz de interacci3n muestra el escenario con los tres criterios (3C) de estabilidad de Hurtwitz y Levins para el modelo de pre-cosecha (**Tabla 30**). Las inc3gnitas presentes en la matriz muestran diferentes escenarios que permiten examinar los criterios de mayor estabilidad sostenible. La **Figura 70** representa la frecuencia absoluta de los 56 escenarios de estabilidad (3C) para el modelo 2 (pre-cosecha). Se observa que la variable limitante para el modelo de pre-cosecha es la limpieza de las líneas de cultivo (manejo); en este caso, se mantienen auto-retroacciones negativas en el 50% de los casos, es decir, crecimiento estable o crecimiento oscilatorio entre  $k$  y  $k/2$ . En el otro 50% de los casos,



la variable limpieza (manejo del cultivo) permite que las abundancias del cultivo se mantengan cercanas al equilibrio dinámico (capacidad de carga) o auto-retroacciones iguales a cero.

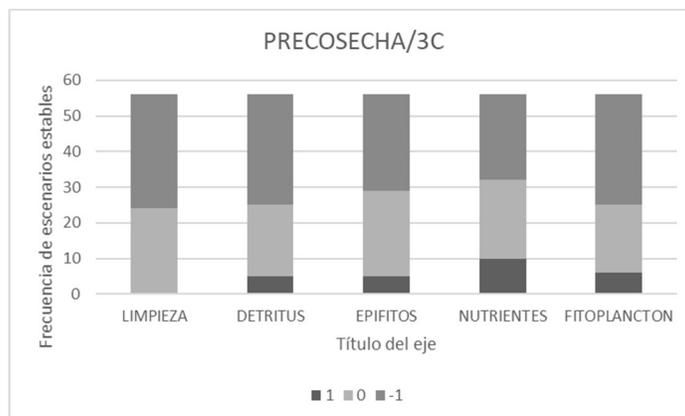


**Figura 69.** Digrafo B. Modelo 2. Representación gráfica de la pre-cosecha de *Chondracanthus chamissoi* (chicorea de mar). Las flechas indican interacciones que son positivas ( $\longrightarrow$ ), los círculos sólidos ( $\bullet$ ) indican un efecto negativo. Auto-retroacción (flecha curva sobre la variable) negativa ( $\bullet$ ) y Auto-retroacción positiva ( $\rightarrow$ ).

**Tabla 30.**

Matriz de interacciones (Jacob-Levins) Modelo 2, pre-cosecha de chicorea de mar. Casillas coloreadas indican auto-retroacciones incógnitas.

Modelo 2	A	M	ML	D	EPI	N	F
A	-1	0	0	0	1	0	0
ML	1	-1	0	0	-1	1	0
ML	1	0	?	0	0	0	0
D	0	1	0	?	1	0	-1
EPI	0	1	-1	0	?	0	0
N	0	-1	0	0	0	?	-1
F	0	0	0	1	0	1	?



**Figura 70.** Frecuencia absoluta de los 56 escenarios de estabilidad (3C) obtenidos para el modelo de pre-cosecha. Se presentan los tres tipos de auto-retroacci3n (dinámica de crecimiento o abundancia relativa). En negro, auto-retroacciones positivas (+1) donde las abundancias oscilan en magnitudes inferiores a  $k/2$ ; en gris oscuro auto-retroacciones negativas (-1) la abundancia oscila entre capacidad de carga  $k$  y  $k/2$  y en gris claro sin auto-retroacciones (0) corresponde a abundancia en  $k/2$ .

### **MODELO 3, COSECHA UNICA Y/O COSECHA 1**

Incluye 7 variables: acuicultor (A), manejo (ML), cultivo de macroalgas (M), epifitos (EPI), nutrientes (N), fitoplancton (F) y detritus (D). Las relaciones entre las variables de este modelo se representan gráficamente en el dígrafo C (**Figura 71**).

El modelo 3 obtuvo 243 escenarios de estabilidad/inestabilidad, con 5 escenarios (2,1% del total) de estabilidad de acuerdo a los tres criterios (3C) o condici3n de equilibrio del sistema.

Este modelo es representativo de la cosecha si se realiza en forma total (cosecha única) al final del periodo productivo, o bien en forma parcial (cosecha 1) si se prefiere fraccionar la producci3n. En este caso, se asume que tanto en la cosecha única como en la cosecha 1, la variable macroalgas se encuentran cercana a su máximo potencial de biomasa y la acci3n de colecta se realiza en el mismo periodo de tiempo.

El sistema, en este modelo, mantiene las relaciones ecológicas expuestas en los modelos anteriores, pero se modifica la relaci3n entre el acuicultor y el cultivo de macroalgas. Durante la cosecha existe una relaci3n tipo depredador-presa (+, -) entre ambas variables, situaci3n que asegura empleo e ingresos (Buchholz et al. 2012).

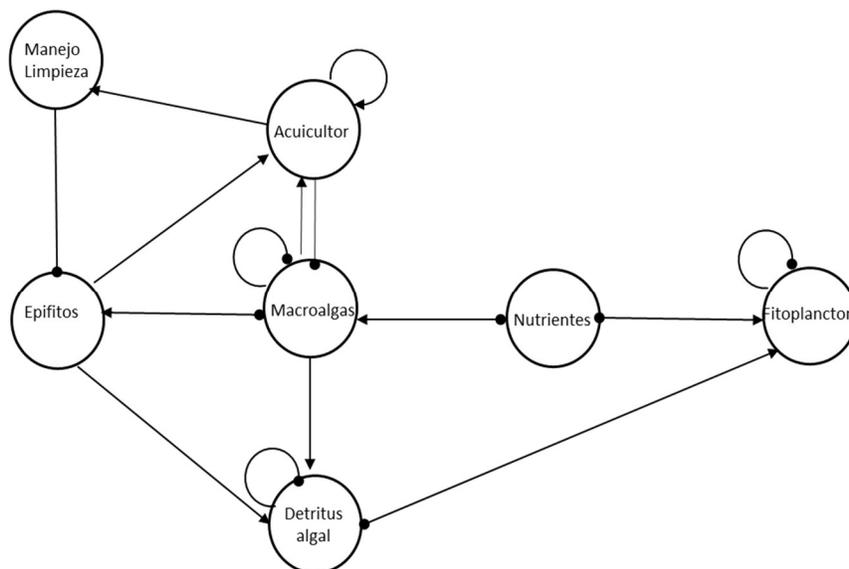
En cuanto a las auto-retracciones negativas, se mantienen en las variables macroalgas, fitoplancton y detritus. Durante la cosecha única y/o cosecha 1, el cultivo de macroalgas es removido total o parcialmente respectivamente ya que ha alcanzado el máximo nivel de abundancia, este nivel se relaciona con la mayor abundancia de detritus presente en el ambiente producto del desprendimiento de macroalgas desde el cultivo durante el proceso de cosecha. El fitoplancton durante este periodo se encuentra en su máximo potencial.

La auto-retroacci3n positiva del acuicultor representa la posibilidad que este tiene de seguir cultivando, siempre y cuando se mantenga el manejo o limpieza del sistema de cultivo. Las variables con auto-



retracci3n cero se encuentran en una situaci3n intermedia de abundancia, los epifitos han sido controlados por el manejo durante el periodo de cultivo, mientras que la concentraci3n de nutrientes es reducida por las macroalgas (Chopin 2006).

La matriz de interacci3n muestra el escenario con los tres criterios (3C) de estabilidad de Hurtwitz y Levins para el modelo de cosecha 3nica y/o cosecha 1 (Tabla 31). Las inc3gnitas presentes en la matriz muestran diferentes escenarios que permiten examinar los criterios de mayor estabilidad sostenible. Para este modelo las 5 variables son sensibles (presentan auto-retroacciones negativas y de valor cero) sobre el crecimiento y la productividad del cultivo de chicorea de mar. Dentro de las principales variables se encuentran el detritus y el fitoplancton con valores de abundancia entre  $k$  y  $k/2$  (auto-retroacciones negativas) y los nutrientes, la limpieza (manejo) de los sistemas de cultivo y los epifitos con ambas auto-retroacciones negativas (entre  $k$  y  $k/2$ ) e iguales a cero ( $k/2$ ) que permiten que las poblaciones se mantengan con un crecimiento estable que permite obtener una 3ptima biomasa e incluso continuar con el cultivo y obtener una segunda cosecha en otro periodo de tiempo (Figura 72).



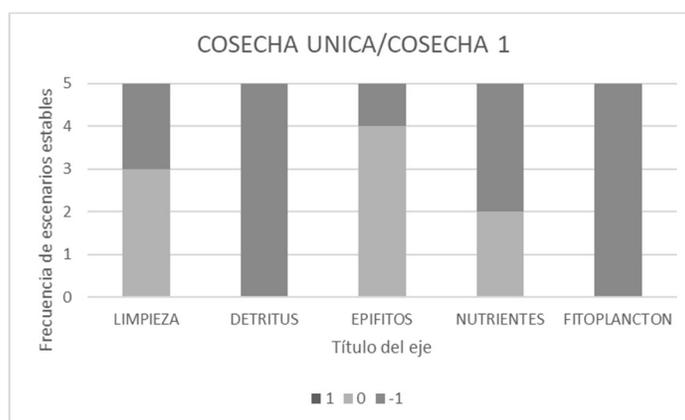
**Figura 71.** Digrafo C. Modelo 3. Representaci3n gr3fica de la cosecha 3nica o primera cosecha de *Chondracanthus chamissoi* (chicorea de mar). Las flechas indican interacciones que son positivas ( $\longrightarrow$ ), los c3rculos s3lidos ( $\longrightarrow\bullet$ ) indican un efecto negativo. Auto-retroacci3n (flecha curva sobre la variable) negativa ( $\longrightarrow\bullet$ ) y Auto-retroacci3n positiva ( $\longrightarrow$ ).



**Tabla 31.**

Matriz de interacciones (Jacob-Levins) Modelo 3, cosecha 3nica y primera cosecha de chicorea de mar. Casillas coloreadas indican auto-retroacciones inc3gnitas.

Modelo 3	H	SA	ML	SD	EPI	N	P
H	1	1	0	0	1	0	0
SA	-1	-1	0	0	-1	1	0
ML	1	0	?	0	0	0	0
SD	0	1	0	?	1	0	-1
EPI	0	1	-1	0	?	0	0
N	0	-1	0	0	0	?	-1
P	0	0	0	1	0	1	?



**Figura 72.** Frecuencia absoluta de los 5 escenarios de estabilidad (3C) obtenidos para el modelo de cosecha 3nica o primera cosecha. Se presentan los tres tipos de auto-retroacci3n (dinámica de crecimiento o abundancia relativa). En negro, auto-retroacciones positivas (+1) donde las abundancias oscilan en magnitudes inferiores a  $k/2$ ; en gris oscuro auto-retroacciones negativas (-1) la abundancia oscila entre capacidad de carga  $k$  y  $k/2$  y en gris claro sin auto-retroacciones (0) corresponde a abundancia en  $k/2$ .

## **MODELO 4, COSECHA 2**

Incluye 7 variables: acuicultor (A), manejo (ML), cultivo de macroalgas (M), epifitos (EPI), nutrientes (N), fitoplancton (F) y detritus (D). Las relaciones entre las variables de este modelo se representan gráficamente en el dígrafo D (**Figura 73**).

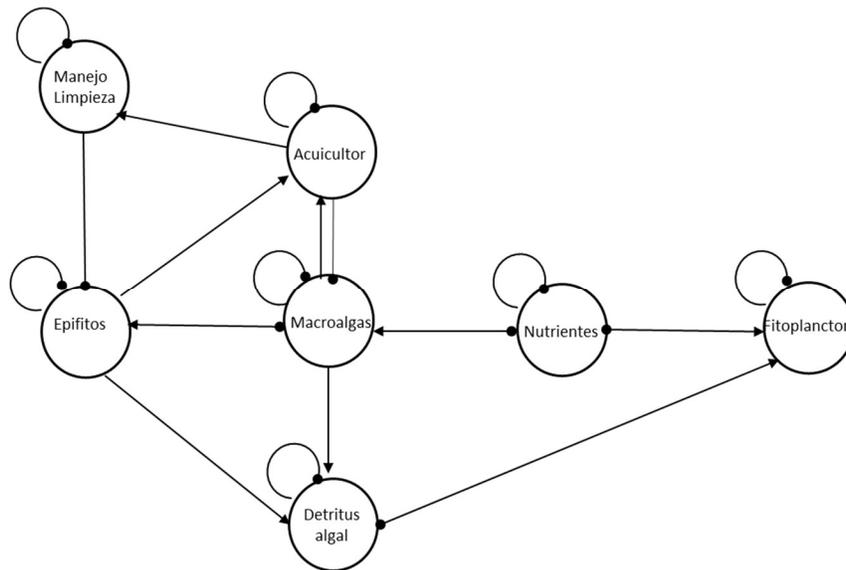
Este modelo presentó 2187 escenarios dinámicos de los cuales 151 escenarios (6,9% del total) cumplieron los tres criterios (3C) de estabilidad.

Este modelo representa la opci3n del acuicultor cuando elige fraccionar la producci3n. Es decir, realizar dos cosechas por periodo productivo. En este modelo el sistema posee el mismo comportamiento que el modelo 3. Se mantienen las relaciones ecol3gicas, incluida la relaci3n depredador-presa entre acuicultor y cultivo de macroalgas. La diferencia con el modelo 3 radica en las



auto-retroacciones; en este modelo, todas las variables presentan auto-retroacciones negativas pues han alcanzado su m3ximo potencial, razonable si pensamos que se est3 cerrando el ciclo productivo.

La matriz de interacci3n muestra el escenario con los tres criterios (3C) de estabilidad de Hurtwitz y Levins para el modelo de cosecha 2 (**Tabla 32**). Las inc3gnitas presentes en la matriz muestran diferentes escenarios que permiten examinar los criterios de mayor estabilidad sostenible. La **Figura 74** representa la frecuencia absoluta de los 151 escenarios de estabilidad (3C) para el modelo 4 (cosecha 2). En esta etapa del cultivo la variable limitante (auto-retroacci3n negativa) es la limpieza (manejo). Esta acci3n permite el crecimiento y mayor producci3n del cultivo de chicorea de mar, adem3s de la eliminaci3n de los epifitos que permiten una mejor calidad de la biomasa al final del ciclo productivo. Esta etapa es el resultado de la elecci3n del acuicultor por mantener un cultivo (APE) por m3s tiempo (dos cosechas) permitiendo mayores ingresos.



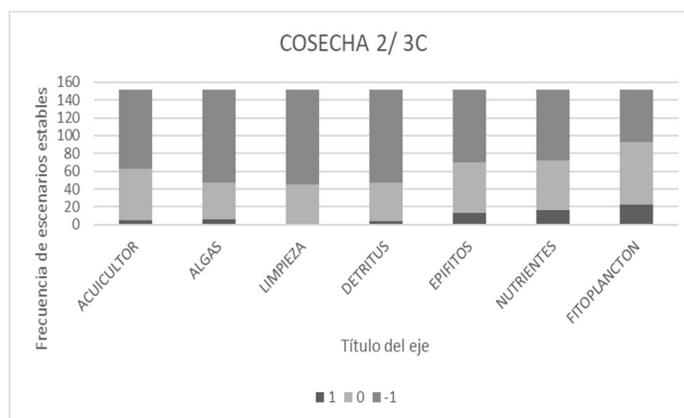
**Figura 73.** D3grafo D. Modelo 4. Representaci3n gr3fica de la segunda cosecha o cosecha 2 de *Chondracanthus chamissoi* (chicorea de mar) en un ciclo productivo parcializado. Las flechas indican interacciones que son positivas ( $\longrightarrow$ ), los c3rculos s3lidos ( $\longrightarrow\bullet$ ) indican un efecto negativo. Autor-retroacci3n (flecha curva sobre la variable) negativa ( $\longrightarrow\bullet$ ) y Auto-retroacci3n positiva ( $\longrightarrow$ ).



**Tabla 32.**

Matriz de interacciones (Jacob-Levins) Modelo 4, segunda cosecha o cosecha 2 de chicorea de mar en un ciclo productivo parcializado. Casillas coloreadas indican auto-retroacciones incógnitas.

Modelo 4	A	M	ML	D	EPI	N	F
A	?	1	0	0	1	0	0
M	-1	?	0	0	-1	1	0
ML	1	0	?	0	0	0	0
D	0	1	0	?	1	0	-1
EPI	0	1	-1	0	?	0	0
N	0	-1	0	0	0	?	-1
F	0	0	0	1	0	1	?



**Figura 74.** Frecuencia absoluta de los 151 escenarios de estabilidad (3C) obtenidos para el modelo de cosecha 2. Se presentan los tres tipos de auto-retroacción (dinámica de crecimiento o abundancia relativa). En negro, auto-retroacciones positivas (+1) donde las abundancias oscilan en magnitudes inferiores a  $k/2$ ; en gris oscuro auto-retroacciones negativas (-1) la abundancia oscila entre capacidad de carga  $k$  y  $k/2$  y en gris claro sin auto-retroacciones (0) corresponde a abundancia en  $k/2$ .

### **MODELO 5, POST-COSECHA**

Incluye 7 variables: acuicultor (A), manejo (ML), cultivo de macroalgas (M), epifitos (EPI), nutrientes (N), fitoplancton (F) y detritus (D). Las relaciones entre las variables de este modelo se representan gráficamente en el dígrafo E (**Figura 75**).

En este modelo se obtuvo 243 escenarios de estabilidad/inestabilidad, de los cuales 13 escenarios (5,35% del total) cumplieron con los tres criterios (3C).

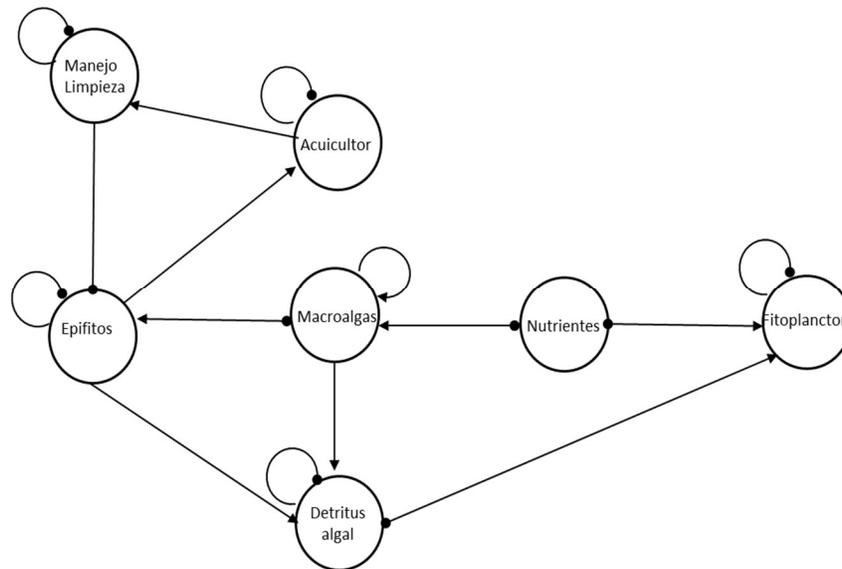
El modelo de post-cosecha mantiene las relaciones de estabilidad entre las 7 variables, exceptuando la relación acuicultor- macroalgas que ya no está presente, pues la biomasa ha sido cosechada y solamente queda en el sistema de cultivo la infraestructura de soporte de éste, la cual debe seguir



siendo mantenido (limpieza de cabos, sistema de flotación y fondeos) por el acuicultor para la siguiente temporada de producción.

En cuanto a las auto-retroacciones, las variables acuicultor, manejo, epifitos, fitoplancton y detritus se encuentran en su máximo potencial; la variable macroalgas presenta auto-retracción positiva porque ya no se encuentra en el medio, y la variable nutriente con auto-retroacción cero, se encuentra en una condición de abundancia intermedia o cercana al equilibrio.

La matriz de interacción muestra el escenario con los tres criterios (3C) de estabilidad de Hurtwitz y Levins para el modelo de post-cosecha (**Tabla 33**). Las incógnitas presentes en la matriz muestran diferentes escenarios que permiten examinar los criterios de mayor estabilidad sostenible. La **Figura 76** representa la frecuencia absoluta de los 13 escenarios de estabilidad (3C) obtenidos para este modelo. Se observa que en esta etapa del cultivo, la principal limitante es la variable limpieza o manejo del sistema de cultivo (auto-retroacción negativa), luego los nutrientes y el detritus; ambas variables exhiben dos tipos de auto-retroacción: negativa y cero, las que permitirían hacer factible, desde el punto de vista de la sostenibilidad, el cultivo de chicorea de mar en una siguiente temporada de producción.



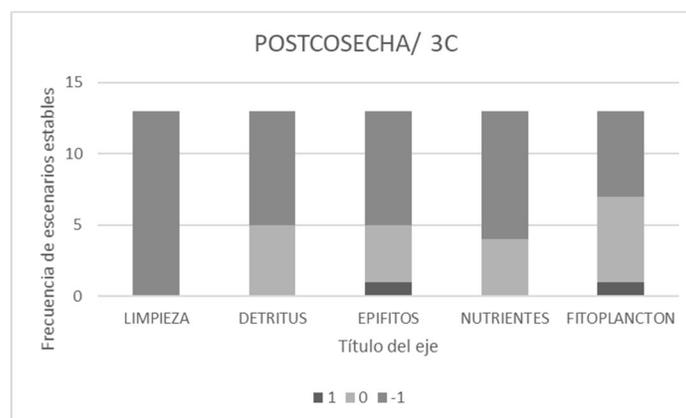
**Figura 75.** Dígrafo E. Modelo 5. Representación gráfica de la post-cosecha de *Chondracanthus chamissoi* (chicorea de mar). Las flechas indican interacciones que son positivas (→), los círculos sólidos (—●) indican un efecto negativo. Auto-retroacción (flecha curva sobre la variable) negativa (—●) y Auto-retroacción positiva (→).



**Tabla 33.**

Matriz de interacciones (Jacob-Levins) Modelo 5, post-cosecha de chicorea de mar. Casillas coloreadas indican auto-retroacciones incógnitas.

Modelo 5	A	M	ML	D	EPI	N	F
A	-1	0	0	0	1	0	0
M	0	1	0	0	-1	1	0
ML	1	0	?	0	0	0	0
D	0	1	0	?	1	0	-1
EPI	0	1	-1	0	?	0	0
N	0	-1	0	0	0	?	-1
F	0	0	0	1	0	1	?



**Figura 76.** Frecuencia absoluta de los 13 escenarios de estabilidad (3C) obtenidos para el modelo de post-cosecha. Se presentan los tres tipos de auto-retroacción (dinámica de crecimiento o abundancia relativa). En negro, auto-retroacciones positivas (+1) donde las abundancias oscilan en magnitudes inferiores a  $k/2$ ; en gris oscuro auto-retroacciones negativas (-1) la abundancia oscila entre capacidad de carga  $k$  y  $k/2$  y en gris claro sin auto-retroacciones (0) corresponde a abundancia en  $k/2$ .

### 5.7.2.2. Caso 2. Co-cultivo mitílicos-macroalgas

#### Caso de estudio, selección de límites, estructura y supuestos del modelo

La acuicultura de mitílicos en el sur de Chile se realiza mediante sistemas de cultivo suspendido cuyos extremos son anclados al fondo. Trenes de boyas superficiales sostienen líneas madre desde donde se unen mangas de entre 4 - 8 m de largo, espaciadas ~50 cm. Estas contienen alta densidad de juveniles (~ 3 mm de longitud) que comienzan a crecer adheridos por biso a las mangas. Debido a que la legislación chilena prohíbe las prácticas de acuicultura sobre bancos o poblaciones naturales, los cultivos se realizan generalmente en márgenes costeros someros, canales y estuarios (Gonzalez-Poblete et al. 2018) dominados por sustratos blandos (Jara & Céspedes 1994). Este ambiente parece



facilitar la colonización de especies de estructuradores primarios como los mitílidos (Gutiérrez et al. 2003).

El modelo conceptual de interacción acuicultura-ambiente fue construido para estudiar la dinámica de un ciclo de producción que abarca la siembra y crecimiento, escenario 1 (Pre-cosecha), escenario 2 (Período de cosecha), y el escenario 3 (Post-cosecha), que involucra la explotación del hábitat bentónico (principalmente mitílidos), causando una interacción de depredador-presa (+/-) sobre la comunidad generada por el cultivo. Todos los escenarios asumen condiciones ambientales de equilibrio dinámico oscilatorio sobre nutrientes (excluido) y detritus (incluido).

La información de línea de base fue recopilada en campañas consecutivas de muestreo (2018 -2021) durante la ejecución del presente estudio. La caracterización comunitaria y el establecimiento de la abundancia e identidad trófica de la megafauna epibentónica bajo cultivos fue obtenida *in situ* desde seis mitiliculturas de diferente escala productiva (*sensu* González-Poblete et al. 2018) y tiempos de operación > 13 años. En seis sitios de cultivo (y sus respectivos sitios de referencia) buzos científicos tomaron foto-cuadrantes sistemáticamente (0,25 m<sup>2</sup> – 100 puntos de contacto aleatorio) cada 5 m a lo largo de seis transectos de 30 m en sitios de cultivo y sitios ubicados ~ 200 m (Referenciales). Con aplicaciones fotográficas (ImagePro) se estimó el porcentaje de cobertura de la composición del fondo (e.g., roca, conchilla, arena, sedimento), sustrato biogénico (i.e., agregaciones de bivalvos), sustrato biogénico secundario (e.g. Macroalgas, Cirripedios, Ascidias, Briozoos, Poríferos, etc.) y abundancia de la epifauna bentónica no colonial o agregada (conteo 0,25 m<sup>-2</sup>/ especie).

Inicialmente, se determinaron las especies más conspicuas presentes bajo los cultivos. Para esto, se integró la información comunitaria en una matriz multivariada usando como variable respuesta la abundancia relativa por especie en cada cuadrante y los factores, “Condición” (i.e., sitios de cultivo o referencia) y “Escala” de cultivo (i.e., micro, meso o macro escala) como factor anidado dentro del factor primario Condición. Computando la rutina SIMPER con el software PRIMER-E 6.0 (Clarke 1993) sobre la matriz, se obtuvo la contribución promedio de cada especie a la abundancia total de sitios de cultivo y referencia (**Tabla 34**). Las especies observadas fueron clasificadas de forma mecanicista según sus diferentes estrategias de alimentación y función ecológica. La función de cada especie fue determinada usando literatura específica sobre hábitos alimenticios y contenido estomacal de invertebrados bentónicas de Chile. Ante falta de referencias directas, se obtuvieron referencias por grupo taxonómico de especies de latitud y actividad acuícola similar (e.g, Canadá, Nueva Zelanda, Tasmania) o zonas biogeográficamente equivalentes o que mantengan las mismas especies, como, Patagonia Argentina (ver **Tabla 35**, y referencias allí). Con esta información se establecieron las relaciones tróficas entre grupos funcionales, construyendo tres dígrafos que describen su interacción y procesos asociados a un ciclo de cultivo (Precosecha, Cosecha y Postcosecha).



**Tabla 34.**

Análisis del porcentaje de contribución a la similaridad (SIMPER) de la megafauna epibentónica entre sitios de cultivo y referencia.

	Especies	Phyllum	Contribución a la similaridad dentro de grupos (%)	Media total ( $\pm$ SD) abundance (0.25 m <sup>-2</sup> )
<b>Cultivo</b>	<i>Munida gregaria</i>	Crustacea	51.6	6.13 ( $\pm$ 5.4)
	<i>Pseudechinus magellanicus</i>	Echinodermata	23.2	17.6 ( $\pm$ 22)
	<i>Arbacia dufresnii</i>	Echinodermata	13.2	5.78 ( $\pm$ 9)
	<i>Loxechinus albus</i>	Echinodermata	5.5	2.75 ( $\pm$ 5.3)
	<i>Anthothoe chilensis</i>	Cnidaria	2.2	0.6 ( $\pm$ 1.4)
	<i>Fissurella sp.</i>	Mollusca	1.9	0.5 ( $\pm$ 1.37)
	<i>Metacarcinus edwardsii</i>	Arthropoda	1	0.17 ( $\pm$ 0.46)
	<i>Nassarius gayii</i>	Mollusca	0.1	0.17 ( $\pm$ 0.56)
<b>Referencia</b>	<i>Chaetopterus pedicellatus</i>	Annelida	36.5	2.7( $\pm$ 6.2)
	<i>Arbacia dufresnii</i>	Echinodermata	27.7	0.25( $\pm$ 0.57)
	<i>Munida subrugosa</i>	Crustacea	15.1	0.5 ( $\pm$ 1.4)
	<i>Ganeria falklandica</i>	Echinodermata	12.8	0.2( $\pm$ 0.6)
	<i>Anthothoe Chilensis</i>	Cnidaria	4.8	0.2( $\pm$ 0.7)
	<i>Cancer setosus</i>	Crustacea	1.2	0.07( $\pm$ 0.2)
	<i>Nassarius gayii</i>	Mollusca	0.7	0.1( $\pm$ 0.4)
<b>Cultivo</b>	<i>Macrocystis pyrifera</i>	Heterokontophyta	31.7	10( $\pm$ 20.6)
	<i>Halichondria prostata</i>	Porifera	26.2	4.7( $\pm$ 8.7)
	<i>Ulva spp.</i>	Chlorophyta	16.1	5.18( $\pm$ 11.7)
	<i>Leucatis nuda</i>	Porifera	10.6	2.1( $\pm$ 4.2)
	<i>Crepidatella sp.</i>	Mollusca	5.4	0.1( $\pm$ 0.3)
<b>Referencia</b>	<i>Ulva spp.</i>	Chlorophyta	26.1	0.78( $\pm$ 1.9)
	<i>Leftofauchea chiloensis</i>	Rhodophyta	23.5	2.15( $\pm$ 4.7)
	<i>Halichondria prostata</i>	Porifera	20.9	4.4( $\pm$ 10.4)
	<i>Macrocystis pyrifera</i>	Heterokontophyta	9.1	2.4( $\pm$ 6.7)
	<i>Didemnum studeri</i>	Chordata	7.9	2.7( $\pm$ 8.8)
	<i>Leucatis nuda</i>	Porifera	6.1	1( $\pm$ 3.6)

**Tabla 35.**

Grupos funcionales tróficos de comunidades de invertebrados bentónicos asociados a acuicultura de mitilidos en el sur de Chile.

Especies	Grupo trófico por dieta o contenido estomacal reportado	Referencias
<i>Arbacia dufresnii</i>	Omnívoro, tendencia a la carnivoría	Vásquez, 1984; Penchaszadeh & Lawrence, 1999; Epherra et al., 2017; Galván et al., 2009
<i>Loxechinus albus</i>	Herbívoro	Vásquez, 1984; Castilla 1985; Valenzuela et al., 2019
<i>Pseudechinus magellanicus</i>	Omnívora, tendencia a la carnivoría	Vásquez 1984
<i>Metacarcinus edwardsii</i>	Carnívoro generalista	León y Stotz, 2004
<i>Peltarion spinulosum</i>	Carnívoro generalista	León y Stotz, 2004
<i>Munida gregaria</i>	Omnívoro, tendencia a la carnivoría	Varisco & Vinuesa (007) Vinuesa & Varisco 2007; Pérez-Barros et al., 2010



<i>Pisoides edwardsii</i>	Omnívoro/ carroñero, tendencia a la carnivoría	Tapia et al., 2008
<i>Anasterias antarctica</i>	Carnívoro	Valenzuela et al., 2019
<i>Comasterias lurida</i>	Carnívoro generalista	Castilla 1985; Vásquez y Castilla, 1984; Fraysse et al., 2018; Garrido et al., 2021
<i>Meyenaster gelatinosus</i>	Carnívoro especialista facultativo	Ortiz et al., 2003
<i>Anthothoe chilensis</i>	Carnívoro suspensívoro, polífago oportunista	Shick 1991; Acuña y Genzano, 2001; Häussermann & Försterra 2009
<i>Nemertea</i>	Carnívoro y carroñero	Mc Dermott y Roe 1985; Salazar y Gonzáles, 1986
<i>Nereidae</i>	Omnívora tendencia a la Carnivoría	Fauchald y Jumars 1979; Salarzadeh 2007
<i>Anisodoris fontaini</i>	Carnívoro	Scrödl y Grau 2006
<i>Nassarius gayii</i>	Carnívoro/ carroñero	Letelier et al., 2005
<i>Enteroctopus megalocyathus</i>	Depredador Carnívoro	Guerra, 1978; Ambrose & Nelson, 1983; Summers, 1983; Rodhouse y Nigmatullin, 1996; Ibáñez & Chong 2007
<i>Heterocucumis godeffroyi</i>	Suspensívoro/ detritívoro	Solis-Marín et al., 2012
<i>Crepidatella</i> sp.	Herbívoro ramoneador, tendencia a la carnivoría	Henríquez et al. 2011; Chaparro et al., 2018
<i>Fisurella</i> spp.	Herbívoro, tendencia a la omnivoría	Osorio et al., 1983; Oliva y Castilla, 1986; Moreno y Jaramillo 1986; Santelices et al., 1986; Osorio et al., 1988; Vega 1998; González et al., 1995
<i>Tegula atra</i>	Herbívoro ramoneador	Buschmann et al. (1997); Veliz & Vásquez, 2000; Pinochet et al. 2018
<i>Chiton</i> sp.	Herbívoro	Ruppert & Barnes, 1996; Latyshev et al. 2004; Siqueiros-Beltrones & Argumedo-Hernández 2012
<i>Leptonotus blainvillleanus</i>	Omnívoro selectivo, tendencia a la carnivoría	Landaeta et al. 2019
<i>Hypsoblennius sordidus</i>	Carnívoro – Isópodos y algas verdes	Valenzuela et al., 1995; Cáceres et al. 2000; Quijada & Cáceres 2000
<i>Aulacomya atra</i>	Filtrador/ Suspensívoro	Reid et al. 2010; Montero et al. 2021
<i>Mytilus chilensis</i>	Filtrador/ Suspensívoro	Jana, 1978
<i>Chorus giganteus</i>	Filtrador/ Suspensívoro, tendencia a la carnivoría	Navarro et al. 2002
<i>Crassostrea gigas</i>	Filtrador/ Suspensívoro	Gerdes, 1983; Ramos et al., 2018; Kheder et al., 2010; Dutertre et al., 2007
<i>Halichondria prostata</i>	Suspensívoro	Ribes et al., 1999
<i>Leucatis nuda</i>	Suspensívoro	Ribes et al., 1999

### Modelo conceptual de escenarios de modelación

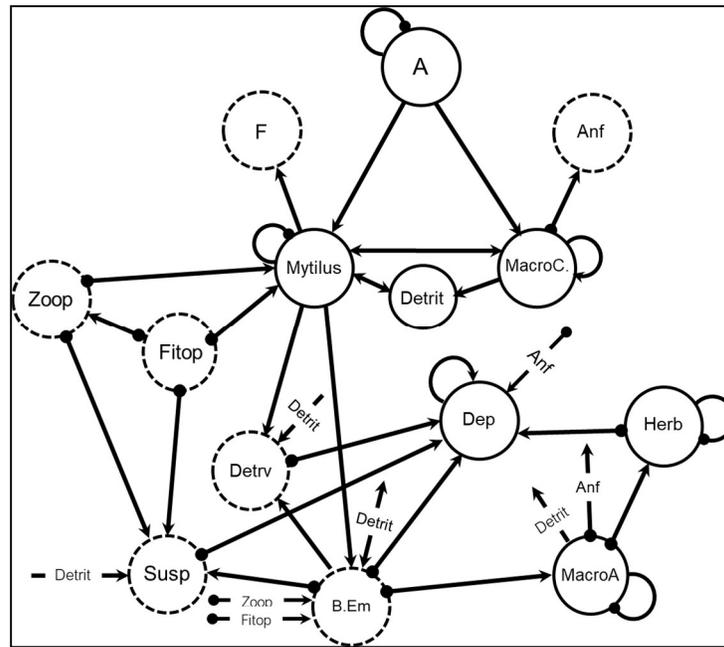
Los modelos para los escenarios de interacción acuicultura-ambiente (**Figuras 77, 78 y 79**) fueron diseñados con el editor de dígrafos PowerPlay© V. 2.0 (2002). Todos los escenarios incluyeron el rol del acuicultor (círculo “A” en dígrafos). En el modelo para el escenario 1, éste aparece con capacidad de crecimiento limitado (i.e., auto-retroacción negativa) lo que significa que el esfuerzo de cultivo, es controlado, por la inversión económica que éste ha hecho para implementarlo. Por esto, su interacción con los organismos del cultivo es positiva, pero, unidireccional (0/+). Esta interacción es opuesta en el escenario II de cosecha. En el modelo para el escenario 2 (cosecha) el acuicultor fue incluido con auto-retroacción positiva, lo que significa que los retornos económicos que genera la comercialización de la biomasa del cultivo le otorgan capacidad de crecimiento, disminuyendo la presión de factores



intraespecíficos. En el modelo 3 (Postcosecha) que incluye la explotación del banco emergente por el acuicultor, éste permanece con la misma interacción que en el escenario 1 hacia el cultivo, pero su auto-retroacción es incógnita.

Debido a la importancia para la función del ecosistema costero, los tres escenarios presentan al fitoplancton, zooplancton, anfipodos, suspensívoros, detritívoros, el biofouling y el banco emergente como variables incógnitas centrales. De acuerdo a esto, el escenario 1 representa una intervención inicial al sistema a través de la introducción de nutrientes disueltos y detritus orgánico animal y algal. En cambio, los escenarios 2 y 3 representan una de intrusión abrupta dentro del sistema generada por un excedente y una extracción, respectivamente. En los escenarios 1 (Precosecha) y 3 (Postcosecha), se incluyó el efecto del cultivo hacia el banco de mitílidos como interacción unidireccional positiva (0/+) debido a que la creación del banco depende en gran medida del ingreso de conoespecíficos y detritus orgánico permanentemente desde el cultivo. En el escenario 2 (Cosecha) esta interacción es bidireccional y positiva (+/+), lo cual significa un excedente local de nutrientes, detritus, alimento, estructuración biogénica y propágulos para la columna de agua y el fondo. Ya que el modelo asume condiciones estabilidad móvil en la concentración de nutrientes, el excedente microparticulado y disuelto puede estimular la fotosíntesis y el pastoreo por resuspensión hacia la columna de agua (Dunn et al. 2017).

La relación entre herbívoros y macroalgas también se mantiene constante en todos los escenarios. Además, todos los escenarios incluyen relaciones depredador-presa (+/-) desde el grupo de Depredadores epibentónicos sobre los grupos funcionales, ya que existieron depredadores misceláneos de variada dieta sobre los bancos (**Tabla 35**). En el modelo 2 se agrega esta interacción sobre el biofouling (F), el cual se desprende masivamente durante la cosecha. Los detritívoros y suspensívoros y el banco emergente, corresponden mayoritariamente a invertebrados sésiles que por lo tanto son receptores de mayor número de interacciones, en particular el banco emergente. En el análisis del escenario 3 de Postcosecha y aprovechamiento, las variables incógnitas que complementan el análisis de las variables centrales, son el acuicultor y los depredadores bentónicos. El objetivo central fue determinar qué respuesta poblacional multiespecífica de las variables en cada escenario es necesaria para establecer un equilibrio dinámico entre el cultivo y el ambiente.

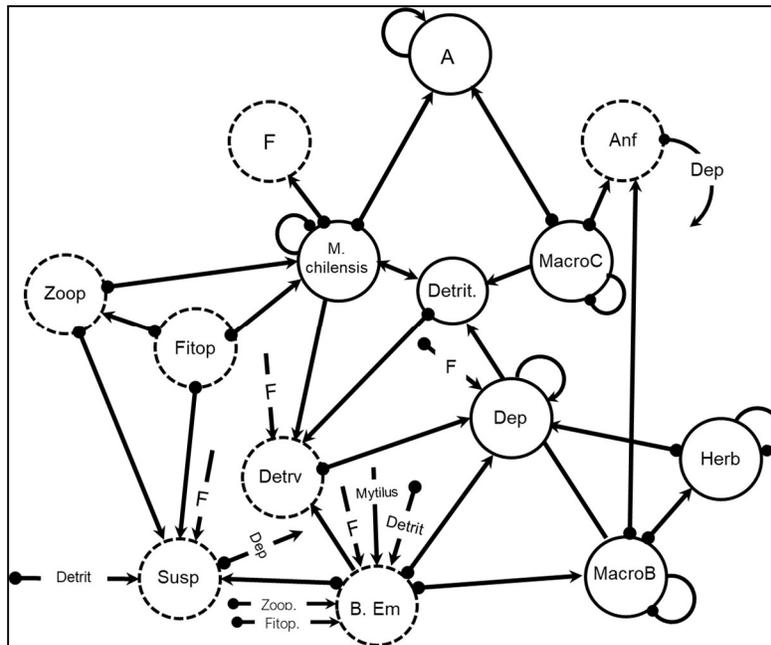


*j*

	A	F	Anf	Mytilus	MacroC	Detrit	Zoop	Fitop	Dep	Susp	B.Em	MacroB	Herb
A	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F	0	?	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Anf	0	0	?	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
Mytilus	1	0	0	-1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
MacroC	1	0	-1	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
Detrit	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0
Zoop	0	0	0	-1	0	0	?	1	0	-1	-1	0	0
Fitop	0	0	0	-1	0	0	-1	?	0	-1	-1	0	0
Dep	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1
Susp	0	0	0	0	0	1	1	1	-1	?	1	0	0
B.Em	0	0	0	1	0	1	1	1	-1	-1	?	-1	0
MacroB	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	-1
Herb	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	1	-1
Detrv	0	0	0	1	0	1	0	0	-1	0	1	0	0

*i*

**Figura 77.** Modelo ecol3gico de un sistema acuicultura-ambiente que representa interacciones en el periodo de crecimiento y precosecha (Escenario 1). C3rculos de l3neas discontinuas indican variables inc3gnitas. Se muestra la matriz tr3fica con el efecto de variables *j* sobre variables *i*. A = Acuicultor, F = Biofouling, Anf = Anf3podos herb3voros, M. chilensis = Mitilidos de cultivo, MacroC = Macroalgas de cultivo, Detrit = Detritus ambiental, Zoop = Zooplancton, Fitop = Fitoplancton, Dep = depredadores bent3nicos, Detrv = Detrit3voros, Herb = Herb3voros bent3nicos, Susp = Suspensivos, MacroB = Macroalgas bent3nicas, B.Em = Banco emergente. Las flechas indican interacciones que son positivas (→), los c3rculos s3lidos (—●) indican un efecto negativo. Auto-retroacci3n (flecha curva sobre la variable) negativa (—●) y Auto-retroacci3n positiva (→).

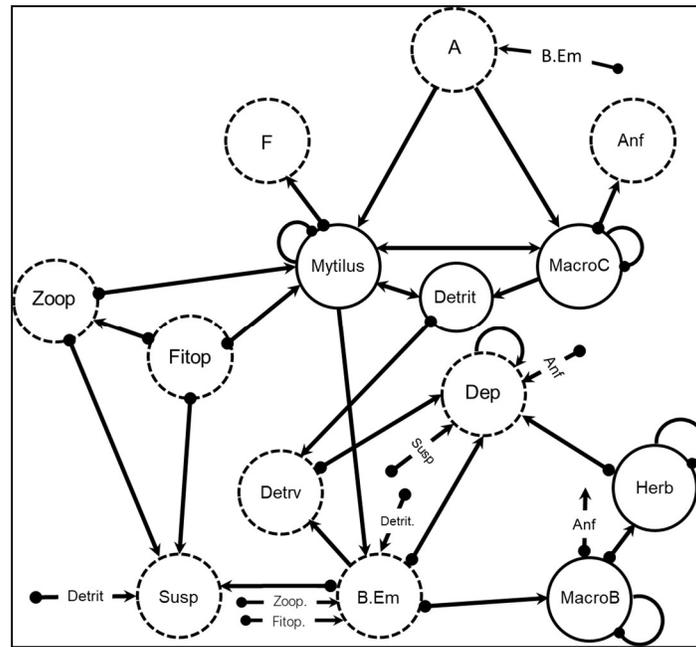


*j*

	A	F	Anf	Mytilus	MacroC	Detrit.	Zoop	Fitop	Dep	Susp	B.Em	MacroB	Herb	Detrv
A	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F	0	?	0	1	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0
Anf	0	0	?	0	1	0	0	0	-1	0	0	1	0	0
Mytilus	-1	-1	0	-1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
MacroC	-1	0	-1	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Detrit.	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	-1	1	0	-1
Zoop	0	0	0	-1	0	0	?	1	0	-1	-1	0	0	0
Fitop	0	0	0	-1	0	0	-1	?	0	-1	-1	0	0	0
Dep	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1
Susp	0	1	0	0	0	1	1	1	-1	?	1	0	0	0
B.Em	0	1	0	1	0	1	1	1	-1	-1	?	-1	0	0
MacroB	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	-1	0
Herb	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	1	-1	0
Detrv	0	1	0	1	0	1	0	0	-1	0	1	0	0	?

*i*

**Figura 78.** Modelo ecológico de un sistema acuicultura-ambiente que representa interacciones en el período de cosecha (Escenario 2). Círculos de líneas discontinuas indican variables incógnitas. Se muestra la matriz trófica con el efecto de variables *j* sobre variables *i*. A = Acuicultor, F = Biofouling, Anf = Anfípodos herbívoros, M. chilensis = Mitílidos de cultivo, MacroC = Macroalgas de cultivo, Detrit. = Detritus ambiental, Zoop = Zooplancton, Fitop = Fitoplancton, Dep = depredadores bentónicos, Detrv = Detritívoros, Herb = Herbívoros bentónicos, Susp = Suspensívoros, MacroB = Macroalgas bentónicas, B.Em = Banco emergente. Las flechas indican interacciones que son positivas (→), los círculos sólidos (—●) indican un efecto negativo. Auto-retroacción (flecha curva sobre la variable) negativa (—●) y Auto-retroacción positiva (→).



*j*

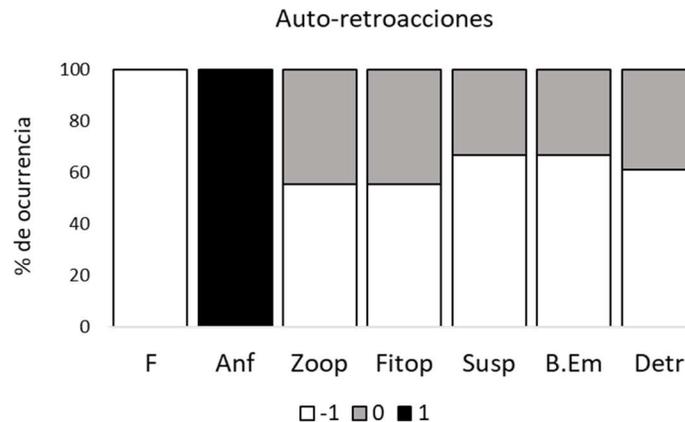
	A	F	Anf	Mytilus	MacroC	Detrit	Zoop	Fitop	Dep	Susp	B.Em	MacroB	Herb	I
<b>A</b>	?	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>F</b>	0	?	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Anf</b>	0	0	?	0	1	0	0	0	-1	0	0	1	0	0
<b>Mytilus</b>	1	-1	0	-1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
<b>MacroC</b>	1	0	-1	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Detrit</b>	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0
<b>Zoop</b>	0	0	0	-1	0	0	?	1	0	-1	-1	0	0	0
<b>Fitop</b>	0	0	0	-1	0	0	-1	?	0	-1	-1	0	0	0
<b>Dep</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	?	1	1	0	1	0
<b>Susp</b>	0	0	0	0	0	1	1	1	-1	?	1	0	0	0
<b>B.Em</b>	1	0	0	1	0	1	1	1	-1	-1	?	-1	0	0
<b>MacroB</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	-1	0
<b>Herb</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	1	-1	0
<b>Detrv</b>	0	0	0	0	0	1	0	0	-1	0	1	0	0	0

*i*

**Figura 79.** Modelo ecológico de un sistema acuicultura-ambiente que representa interacciones en el periodo de postcosecha y aprovechamiento (Escenario 3). Círculos de líneas discontinuas indican variables incógnitas. Se muestra la matriz con el efecto de variables *j* sobre variables *i*. A = Acuicultor, F = Biofouling, Anf = Anfípodos herbívoros, M. chilensis = Mitílidos de cultivo, MacroC = Macroalgas de cultivo, Detrit = Detritus ambiental, Zoop = Zooplancton, Fitop = Fitoplancton, Dep = depredadores bentónicos, Detrv = Detritívoros, Herb = Herbívoros bentónicos, Susp = Suspensivos, MacroB = Macroalgas bentónicas, B.Em = Banco emergente. Las flechas indican interacciones que son positivas (—→), los círculos sólidos (—●) indican un efecto negativo. Auto-retroacción (flecha curva sobre la variable) negativa (—●) y Auto-retroacción positiva (—→).



El escenario de Pre-cosecha (**Figura 80**) muestra que el sistema de cultivo puede permanecer estable en este per3odo, s3lo si, grupos clave del sistema como el Fitoplancton y el Zooplancton, los suspens3voros, detrit3voros y el banco emergente, muestran abundancias que fluct3en entre su capacidad de carga ( $K$ ) y  $K/2$  (auto-retroacci3n negativa) o bien en  $K/2$  (sin auto-retroacci3n). Adem3s, los criterios I y II de estabilidad de Routh-Hurwitz y de Levins exigen que la abundancia de organismos del biofouling persista 3nicamente entre su capacidad de carga ( $K$ ) y  $K/2$  (auto-retroacci3n negativa). Esto significa que las poblaciones deben presentar auto-control (e.g., efectos denso-dependientes, mortalidad por depredaci3n, competencia por sustrato). Mientras que la comunidad de anf3podos herb3voros, usualmente fomentada por el cultivo de algas deber3a mantenerse con abundancias bajo  $K/2$  (auto-retroacci3n positiva o din3mica denso-independiente) con amplia capacidad de crecimiento. Estas variables biol3gicas fomentadas en el cultivo intensivo corresponden a las variables m3s sensibles a perturbaciones ex3genas durante el ciclo de producci3n.



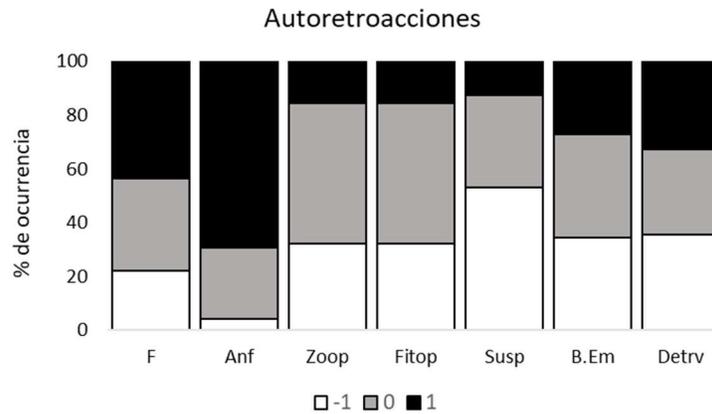
**Figura 80.** Resultados del escenario de Pre-cosecha como frecuencia porcentual de auto-retroacciones (din3mica de crecimiento o abundancia relativa). El valor (-1) corresponde a una auto-retroacci3n negativa, esto es, la abundancia oscila entre capacidad de carga  $K$  y  $K/2$ , (0) corresponde a abundancia en  $K/2$ , y (1) representa una auto-retroacci3n positiva (abundancia oscila en magnitudes inferiores a  $K/2$ ).

El escenario de Cosecha (**Figura 81**) muestra que el disturbio causado por el input de materia org3nica y prop3gulos sobre el sistema, permite al resto de sus componentes exhibir los tres niveles de din3mica de crecimiento poblacional posible.

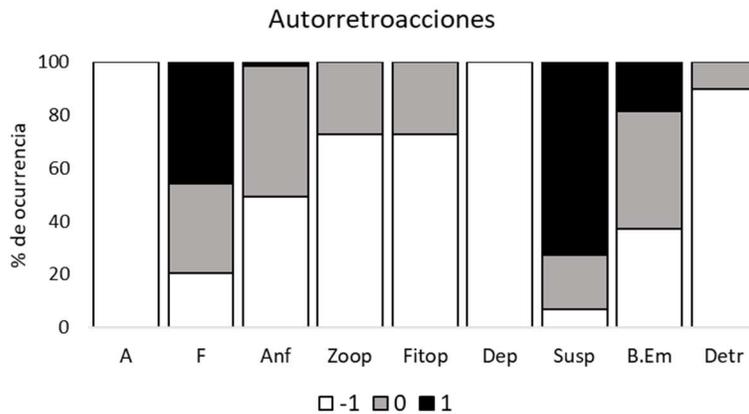
La estabilidad del sistema de Post-cosecha o de explotaci3n de un banco emergente (**Figura 82**) indica que tanto la comunidad del biofouling, los anf3podos herb3voros, suspens3voros y el banco emergente podr3an exhibir cualquier estado din3mico de abundancia. Esto indica que la extracci3n de individuos del banco emergente mantendr3a al sistema en estabilidad oscilatoria. Lo anterior depender3a de que el fitoplancton, zooplancton y el grupo de detrit3voros exhiban una auto-retroacci3n negativa o su abundancia fluct3e entre su capacidad de carga y  $K/2$  o en  $K/2$ , esto es sin auto-retroacci3n. Finalmente, el acuicultor y depredadores del sistema s3lo deber3an exhibir auto-retroacci3n negativa



o abundancias entre  $K$  y  $K/2$ . En el caso particular de la variable acuicultor, esta auto-retroacci3n negativa debe ser entendida como un autocontrol de sus actividades. Para los depredadores bent3nicos, la auto-retroacci3n negativa implica que su abundancia debe mantenerse entre la capacidad de carga ( $K - K/2$ ). Estas dos variables son las m1s sensibles a disturbios externos, ya que exhiben s3lo una opci3n en su din1mica de abundancia para alcanzar la estabilidad local del sistema.



**Figura 81.** Resultados del escenario de Cosecha como frecuencia porcentual de auto-retroacciones (din1mica de crecimiento o abundancia relativa). El valor (-1) corresponde a una auto-retroacci3n negativa, esto es, la abundancia oscila entre capacidad de carga  $K$  y  $K/2$ , (0) corresponde a abundancia en  $K/2$ , y (1) representa una auto-retroacci3n positiva (abundancia oscila en magnitudes inferiores a  $K/2$ ).



**Figura 82.** Resultados del escenario de Post-cosecha como frecuencia porcentual de auto-retroacciones (din1mica de crecimiento o abundancia relativa). El valor (-1) corresponde a una auto-retroacci3n negativa, esto es, la abundancia oscila entre capacidad de carga  $K$  y  $K/2$ , (0) corresponde a abundancia en  $K/2$ , y (1) representa una auto-retroacci3n positiva (abundancia oscila en magnitudes inferiores a  $K/2$ ).



### 5.7.2.3. Caso 3. Repoblación de huero palo

En los sistemas costeros marinos, los fondos blanqueados se caracterizan por un predominio de algas calcáreas incrustantes y por una alta densidad de erizos de mar, y se consideran un estado estable alternativo de sistemas colapsados debido al sobrepastoreo de erizos de mar que originalmente estaban dominados por macroalgas formadoras de dosel (Petraitis & Dudgeon 2004, Filbee-Dexter & Scheibling 2014, Piazzini & Ceccherelli 2019). La aparición y la persistencia de estos sistemas representan un fenómeno de expansión en muchas partes del mundo (Feehan et al. 2012, Filbee-Dexter & Scheibling 2014, Perreault et al. 2014). Este fenómeno puede ser una consecuencia de las fluctuaciones naturales del reclutamiento de erizos de mar, pero puede estar relacionado con otras causas como el calentamiento global (Johnson et al. 2009) o la sobrepesca de depredadores naturales de erizos de mar, que pueden alterar los mecanismos reguladores naturales del mar (Shears & Babcock 2003).

La AMERB Chungungo B presentaba en su ESBA, una pradera de *L. trabeculata*, que luego de presiones antrópicas fue degradado al punto de desaparecer, dando paso a un ecosistema de fondos blanqueados. Para determinar cuáles acciones de manejo, desde el punto de vista teórico, son pertinentes para desestabilizar el sistema de fondos blanqueados y permitir una recuperación de esta pradera se realizó el modelamiento semi-cuantitativo *Loop analysis*, considerando datos obtenidos en la evaluación de comunidades y censo de peces realizadas en febrero del 2022 (**Sección 5.4.6**). Para el modelamiento se estableció como incógnita todas las auto-retroacciones excepto la variable *L. trabeculata*, con el objetivo de determinar la condición ideal de las variables en los distintos escenarios de manejo establecidos.

Para construir el modelo conceptual inicial se consideraron las especies identificadas en el área de estudio. Luego se determinaron grupos funcionales que constituyeron, finalmente, las variables. La definición de grupos funcionales se basa en biología y taxonomía similares (e.g., estrellas, rodófitas) o roles ecológicos que desempeñaron (e.g., peces carnívoros) y nivel trófico. También se incluyen grupos funcionales constituidos por 1 especie, debido a la importancia ecológica en el objetivo del modelamiento como *L. trabeculata*, *T. niger* y *Lithophyllum* spp. (**Tabla 36**). Una vez establecidos los grupos funcionales se identificaron las interacciones entre las variables. Los escenarios de manejo utilizados en la modelación constituyen acciones de manejo factibles de realizar por los socios de la OPA. Debido a que esta modelación busca la inestabilidad del sistema de fondos blanqueados, para el análisis se utilizaron los 10 resultados más inestables y oscilatorios, es decir, no estables (según RH1), altamente oscilatorios (RH2) y no holísticamente estables (Levins). Estos resultados nos muestran las condiciones ideales de cada variable al momento de la ejecución de las acciones de manejo establecidas en cada escenario.

Los resultados de las auto-retroacciones responden a factores de denso-dependencia de las variables estudiadas. El signo de las auto-retroacciones tiene relación con la capacidad de carga de las variables en el área estudiada, por ello las auto-retroacciones negativas corresponden a una capacidad de carga entre  $k/2$  y  $K$ , en tanto las auto-retroacciones positivas corresponden a capacidad de carga entre  $0$  y  $k/2$ . Por lo tanto, podemos relacionar estos resultados con las abundancias de las variables en el ambiente y con las condiciones ecológicas que llevarían a una inestabilidad del sistema de fondos blanqueados bajo las acciones de manejo seleccionadas en este estudio.



**Tabla 36.**

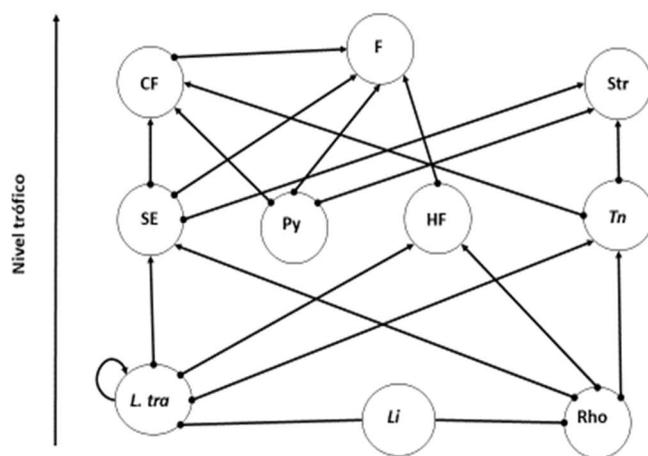
Variables incluidas en el modelo inicial. Modelamiento de repoblación de *L. trabeculata* sobre fondos blanqueados, AMERB Chungungo B.

Grupos funcionales	Abreviatura	Especies
<i>Lessonia trabeculata</i>	L. tra	<i>Lessonia trabeculata</i>
Rodófitas	Rho	<i>Gelidium spp</i> <i>Hildenbrandia spp</i>
<i>Lithophyllum spp.</i>	Litho	<i>Lithophyllum spp.</i> <i>Fissurella spp.</i> <i>Turritella cingulata</i> <i>Alia unifasciata</i> <i>Nassarius gayii</i> <i>Argobuccinum pustulosum</i> <i>Crassilabrum crassilabrum</i> <i>Tegula sp.</i> <i>Fissurella spp.</i> <i>Scurria spp.</i> <i>Pagurus edwardsi</i> <i>Antholoba achates</i> <i>Anthothoe chilensis</i>
Small Epifauna	SE	<i>Athyonidium chilensis</i> <i>Fissurella latimarginata</i> <i>Hecogrammoides chilensis</i> <i>Tegula atra</i> <i>Phragmatopoma sp.</i> <i>Athyonidium chilensis</i> <i>Phymanthea pluvia</i> <i>Allopetrolisthes spinifrons</i> <i>Romaleon setosum</i> <i>Pyura chilensis</i> <i>Rhynchocinetes typu</i> <i>Athyonidium chilensis</i> <i>Balanus sp.</i>
Peces herbívoros	HF	<i>Aplodactylus punctatus</i>
<i>Tetrapygus niger</i>	TN	<i>Tetrapigus niger</i>
Peces carnívoros	CF	<i>Pinguipes chilensis</i> <i>Cheilodactylus variegatus</i>
Estrellas	Str	<i>Heliaster helihantus</i> <i>Stichaster striatus</i>
Pesquería	F	Pescadores

Se consideraron 3 variables pertenecientes a productores primarios: 1) *L. trabeculata*: A pesar de ser una especie sésil, el modelo describe la repoblación de esta especie sobre fondos blanqueados, se asume que presenta inicialmente, una densidad baja, y por lo tanto posee una auto-retroacción positiva, esta es la única auto-retroacción que se considerará al momento de modelar. Es consumido



por peces herbívoros, *T. niger* y especies presentes en el grupo de Small Epifauna. 2) *Lithophyllum* spp. Principalmente establece interacciones de amensalismo con otros productores primarios como Rhodophyta y *L. trabeculata*, esto es por el efecto alelopático sobre el asentamiento de esporas de otras algas. 3) Rhodophyta: Agrupa a especies de rodófitas registradas en la evaluación de comunidades. Son principalmente consumidos por *T. niger*, Small epifauna y peces herbívoros. Cuatro variables de consumidores primarios fueron incluidas en el modelo. 1) *T. niger*: Especie muy abundante en el área, herbívoro y móvil. Consume las variables que constituyen los productores primarios del sistema: Rhodophyta y *L. trabeculata*. A su vez es presa de *Heliaster helianthus*. 2) Small epifauna: Agrupa a 25 especies, entre ellas a *Fissurella* spp. que tiene valor comercial y por lo tanto es potencialmente explotado. También se incluye a herbívoros, por lo tanto, el grupo depreda sobre Rhodophyta y *L. trabeculata*. Además, son presas de peces carnívoros y de las estrellas *H. helianthus* y *M. gelatinosus*. 3) Peces herbívoros: Constituido por *Aplodactylus punctatus* (Jergilla). Depreda sobre productores primarios y es capturado por pescadores. 4) *Pyura chilensis*: En el área de manejo se instaló un cultivo de piure por captación natural. En la EVACOM se detectó el asentamiento de esta especie en el fondo. Debido a que es una especie de interés por parte de los pescadores del área, se incluyó como una variable. Las 3 variables de consumidores secundarias incluidas fueron: 1) Peces carnívoros: constituidos por dos especies de peces de roca, se incluye como variable ya que existe una pesquería sobre ellos por parte de buzos deportivos. 2) Estrellas: constituida por tres especies de estrellas que depredan sobre *T. niger*, Small epifauna y *P. chilensis*. Y finalmente 3) Fishers: Pescadores artesanales, incluidos los pertenecientes a la OPA que explotan recursos bentónicos como algunas especies incluidas en el grupo Small epifauna y eventuales cazadores de pesca deportiva que capturan peces herbívoros y carnívoros. Con esta información se construyó el dígrafo (Figura 83) y la matriz Jacobiana (Tabla 37) iniciales.



**Figura 83.** Modelo cualitativo de redes sistema de AMERB Chungungo B que representa las variables en círculos y las interacciones entre ellas. Las flechas indican interacciones que son positivas, mientras que círculos sólidos (—●) indican un efecto negativo. Depredación (●—→), Amensalismo (—●) y Auto-retroacción positiva (—→). Las variables están dispuestas según el nivel trófico.



**Tabla 37.**

Matriz de interacciones (Jacob-Levins) de modelo inicial de sistema de AMERB Chungungo B. Incógnitas: auto-retroacciones de las variables.

	<i>L. tra</i>	Li	Rho	<i>Tn</i>	SE	Py	HF	CF	Str	F
<i>L. tra</i>	1	-1	0	-1	-1	0	-1	0	0	0
Li	0	?	0	0	0	0	0	0	0	0
Rho	0	-1	?	-1	-1	0	-1	0	0	0
<i>Tn</i>	1	0	1	?	0	0	0	-1	-1	0
SE	1	0	1	0	?	0	0	-1	-1	-1
Py	0	0	0	0	0	?	0	-1	-1	-1
HF	1	0	1	0	0	0	?	0	0	-1
CF	0	0	0	1	1	1	0	?	0	-1
Str	0	0	0	1	1	1	0	0	?	0
F	0	0	0	0	1	1	1	1	0	?

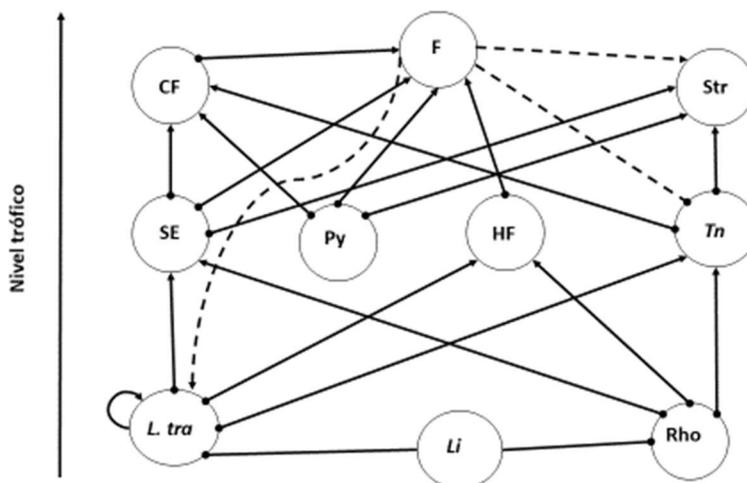
Escenarios de manejo

Se seleccionaron 3 acciones de manejo posible de realizar por los socios de la OPA del AMERB, y la combinatoria de ellos (**Tabla 38**). Además, se estableció como se representa la acción de manejo en el modelamiento (**Figura 84**) y los cambios respectivos en la matriz Jacobiana (**Tabla 39**).

**Tabla 38.**

Escenarios establecidos dependiendo de las acciones de manejo descritas y el modelamiento.

Escenarios	Descripción manejo	Modelamiento
<b>1</b>	Repoblación de <i>L. trabeculata</i>	Fisher (neutro) a <i>L. tra</i> (positivo)
<b>2</b>	Aumento de estrellas por traslado a área de repoblación	Fisher (neutro) a Star (positivo)
<b>3</b>	Disminuir densidad de <i>Tetrapygus niger</i>	Fisher (neutro) a <i>Tn</i> (negativo)
<b>1 + 2</b>	Repoblación de <i>L. trabeculata</i> y aumento de estrellas por traslado a área de repoblación	Fisher (neutro) a <i>L. tra</i> (positivo) y Fisher (neutro) a star (positivo)
<b>2 + 3</b>	Aumento de estrellas por traslado a área de repoblación y Disminuir densidad de <i>T. niger</i>	Fisher (neutro) a Star (positivo) y Fisher (neutro) a <i>Tn</i> (negativo)
<b>1 + 3</b>	Repoblación de <i>L. trabeculata</i> y Disminuir densidad de <i>T. niger</i>	Fisher (neutro) a <i>L. tra</i> (positivo) y Fisher (neutro) a <i>Tn</i> (negativo)
<b>1 + 2 + 3</b>	Repoblación de <i>L. trabeculata</i> y aumento de estrellas por traslado a área de repoblación y Disminuir densidad de <i>T. niger</i>	Fisher (neutro) a <i>L. tra</i> (positivo), Fisher (neutro) a star (positivo) e interacción Fisher (neutro) a <i>Tn</i> (negativo)



**Figura 84.** Modelo cualitativo de redes que representa las acciones de manejo modeladas en el análisis (líneas punteadas).

**Tabla 39.**

Matriz de interacciones (Jacob-Levins), en negrita, cambios en el modelamiento según los escenarios propuestos.

	<i>L. tra</i>	Li	Rho	<i>Tn</i>	SE	Py	HF	CF	Str	F
<i>L. tra</i>	1	-1	0	-1	-1	0	-1	0	0	<b>0/1</b>
Li	0	?	0	0	0	0	0	0	0	0
Rho	0	-1	?	-1	-1	0	-1	0	0	0
<i>Tn</i>	1	0	1	?	0	0	0	-1	-1	<b>0/-1</b>
SE	1	0	1	0	?	0	0	-1	-1	-1
Py	0	0	0	0	0	?	0	-1	-1	-1
HF	1	0	1	0	0	0	?	0	0	-1
CF	0	0	0	1	1	1	0	?	0	-1
Str	0	0	0	1	1	1	0	0	?	<b>0/1</b>
F	0	0	0	0	1	1	1	1	0	?

Para el número de auto-retroacciones inc3gnitas del modelo propuesto, el resultado del modelamiento arroja 19.683 resultados. Este número representa la combinatoria de escenarios con auto-retroacciones positivas, cero y negativas por inc3gnita. La distribuci3n de resultados que cumplen con los criterios de estabilidad y oscilaci3n, son los presentados en la **Tabla 40**. El escenario que arroj3 una mayor cantidad de resultados no estables, oscilantes y no holísticamente estable fue la representada por la repoblaci3n de *L. trabeculata*. El escenario que presenta mayor número de escenarios estables, no oscilatorios y holísticamente estable fue el escenario representado por el aumento de estrellas y disminuci3n de erizos.



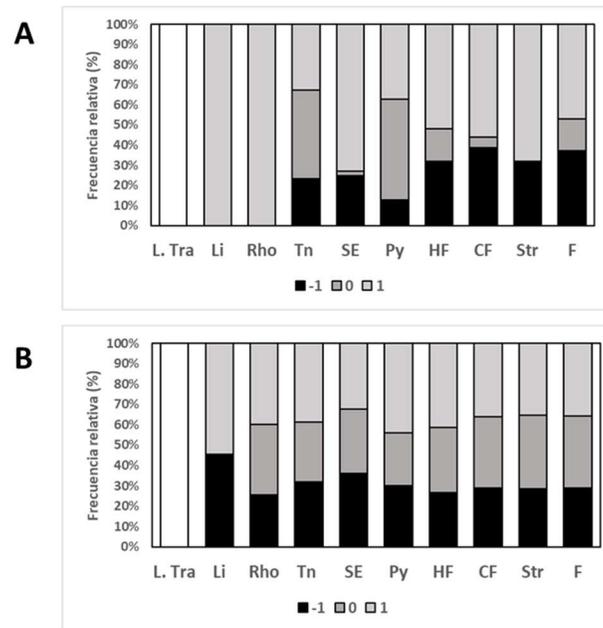
**Tabla 40.**

Resultados del modelamiento del modelo inicial y escenarios propuestos. Se indica la frecuencia absoluta y relativa de los resultados segun los criterios RH1, RH2 y Levins. Est.=Estable, No Est.=No estable. No Osc=No oscilante, Osc.= Oscilante. Holist. Est.= Holisticamente estable. Marg.= Marginalmente estable y No Holist. Est.= No holisticamente estable.

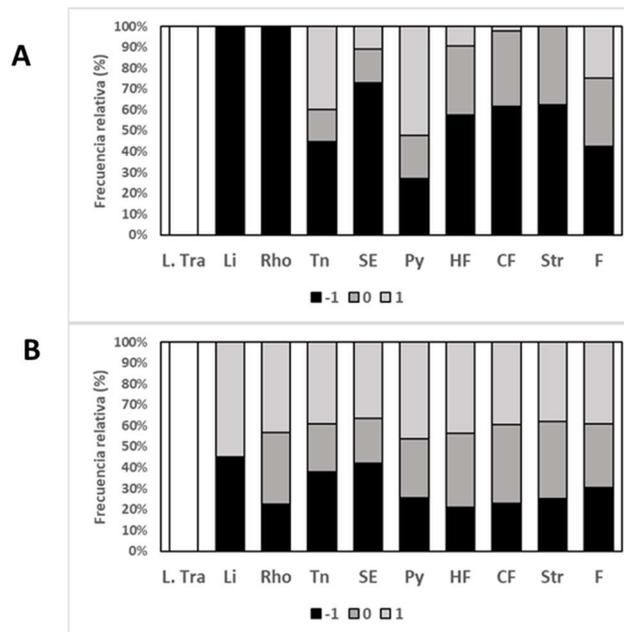
Criterios RH			Escenarios de modelamiento							
Criterio 1	Criterio 2	Levins	Matriz Inicial	1	2	3	1 + 2	1 + 3	2 + 3	1 + 2 + 3
<b>Est.</b>	No Osc.	Holist. Est.	154	136	136	93	104	95	168	150
	Osc.	Holist. Est.	87	96	64	94	65	90	73	90
<b>No Est.</b>	No Osc.	Holist. Est.	1819	1702	1707	1634	1740	1625	2315	2116
		Marg.	4171	3796	4866	3947	4267	3891	5866	5650
		No Holist. Est.	1925	1801	1868	1750	1895	1791	2501	2353
	Osc.	Holist. Est.	2852	2927	2546	2750	2687	2806	2090	2251
		Marg.	5688	6165	5923	6594	6224	6560	4525	4819
		No Holist. Est.	2987	3060	2579	2821	2701	2825	2145	2254

Para la identificaci3n de variables sensibles en cada escenario propuesto, se graficaron las frecuencias relativas (%) de las auto-retroacciones por variable de los resultados m3s estables, no oscilantes y holisticamente estables y por otra parte, los resultados no estables, oscilantes y no holisticamente estables. Si bien la investigaci3n busca desestabilizar el sistema, los resultados no estables, oscilantes y no holisticamente estable, no permiten identificar claramente las variables sensibles del sistema, en cambio al graficar los resultados estables, no oscilante y holisticamente estables, se identifican claramente cu3les son las variables sensibles al momento de ejecutar acciones de manejo en el 3rea.

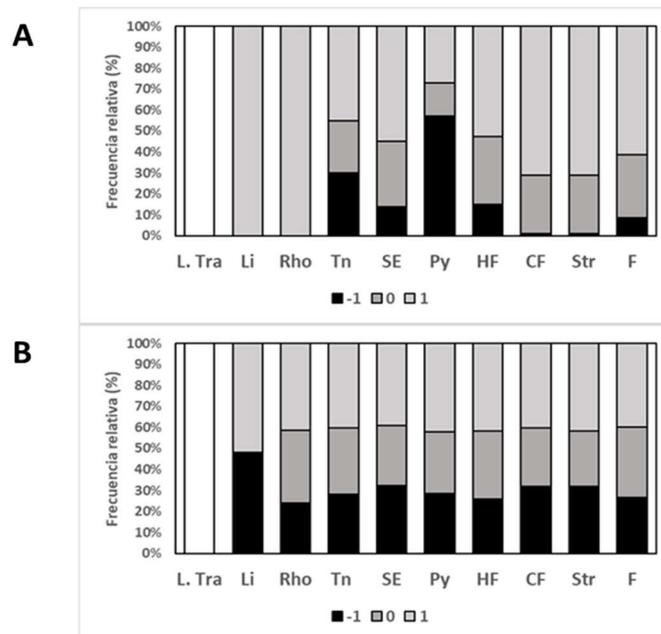
En el escenario 1 que representa la repoblaci3n activa de pl3ntulas de *L. trabeculata* por parte de los pescadores, las variables sensibles identificadas en los resultados estables y no oscilantes, fueron *Lithophyllum* spp. (Li), rod3fitas (Rho), small epifauna (SE) y estrellas (Str). En los escenarios no estables muestran una distribuci3n homog3nea de las auto-retroacciones, a excepci3n de Li que no muestra resultados con auto-retroacci3n cero (**Figura 85**). En el escenario 2 que representa un aumento de abundancia de estrellas, las variables sensibles en los resultados m3s estables son, nuevamente, Li, Rho y SE, que presentan un mayor porcentaje de resultados con auto-retroacci3n negativas, es decir que estas variables deben encontrarse con abundancias que se encuentren entre  $k/2$  y  $k$  (capacidad de carga del ambiente) (**Figura 86**). La modelaci3n del escenario 3, representado por la disminuci3n de erizos, arroj3 mayor frecuencia relativa en resultados de auto-retroacciones positivas en las variables *Lithophyllum* spp. (Li), rod3fitas (Rho), peces carnivoros (CF) y estrellas (Str). Esto se3ala que estas variables deben presentar bajas abundancias en relaci3n a la capacidad de carga del ambiente para mantener la estabilidad del sistema (**Figura 87**).



**Figura 85.** Resultados de auto-retroacciones en las variables del modelo propuesto en el escenario de repoblaci3n de *L. trabeculata*. A) resultados estables y no oscilantes. B) resultados No estables y oscilantes.



**Figura 86.** Resultados de auto-retroacciones en las variables del modelo propuesto en el escenario de aumento de estrellas. A) resultados estables y no oscilantes. B) resultados No estables y oscilantes.

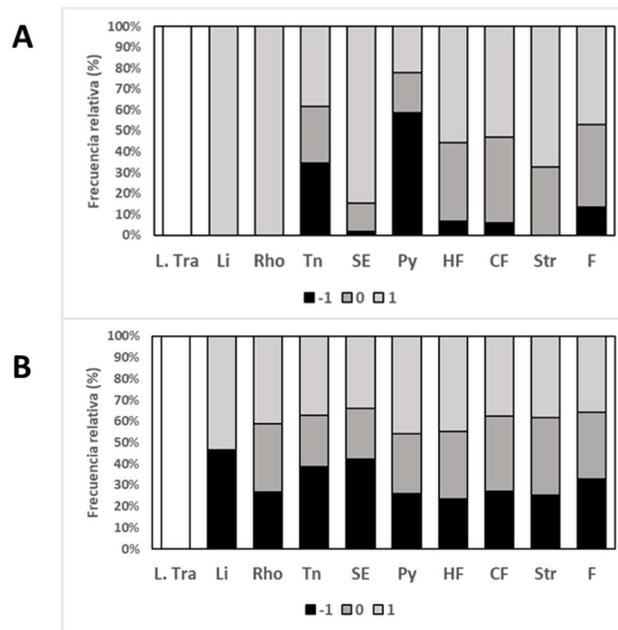


**Figura 87.** Resultados de auto-retroacciones en las variables del modelo propuesto en el escenario de disminuci3n de *T. niger*. A) resultados estables y no oscilantes. B) resultados No estables y oscilantes.

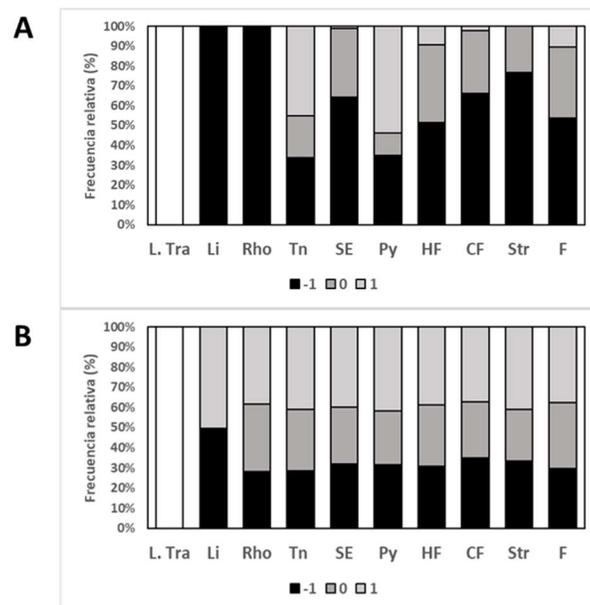
En la modelaci3n de las acciones de manejos combinadas, los resultados fueron los siguientes. En el escenario que combina la acci3n de repoblaci3n de *L. trabeculata* con el aumento de estrellas, las variables sensibles fueron *Lithophyllum* spp. (Li), rod3fitas (Rho), small epifauna (SE) y estrellas (Str). Las cuales deben presentar bajas abundancias con respecto a la capacidad de carga para mantener la estabilidad del sistema (**Figura 88**).

En la acci3n combinada de la repoblaci3n de *L. trabeculata* y disminuci3n de *T. niger*. Las variables sensibles en los resultados m1s estables son, *Lithophyllum* spp. (Li), rod3fitas (Rho) y small epifauna (SE). Para mantener el sistema estable estas variables deben mantenerse en baja abundancia respecto a la capacidad de carga (**Figura 89**). Estos resultados son similares a los resultados de la acci3n combinada del aumento de estrellas y disminuci3n de *T. niger* (**Figura 90**).

En la modelaci3n que incluye las tres acciones de manejo incluidas en este estudio, muestran resultados similares al escenario 2, es decir que el manejo de estrellas es m1s relevante al momento de combinar las acciones de manejo. Siendo las variables m1s sensibles *Lithophyllum* spp. (Li), rod3fitas (Rho) y small epifauna (SE), que debiesen encontrarse en baja abundancia en relaci3n con la capacidad de carga (**Figura 91**).



**Figura 88.** Resultados de auto-retroacciones en las variables del modelo propuesto en el escenario de repoblaci3n de *L. trabeculata* y aumento de estrellas. A) resultados estables y no oscilantes. B) resultados No estables y oscilantes.



**Figura 89.** Resultados de autorretroacciones en las variables del modelo propuesto en el escenario de repoblaci3n de *L. trabeculata* y disminuci3n de *T. niger*. A) resultados estables y no oscilantes. B) resultados No estables y oscilantes.

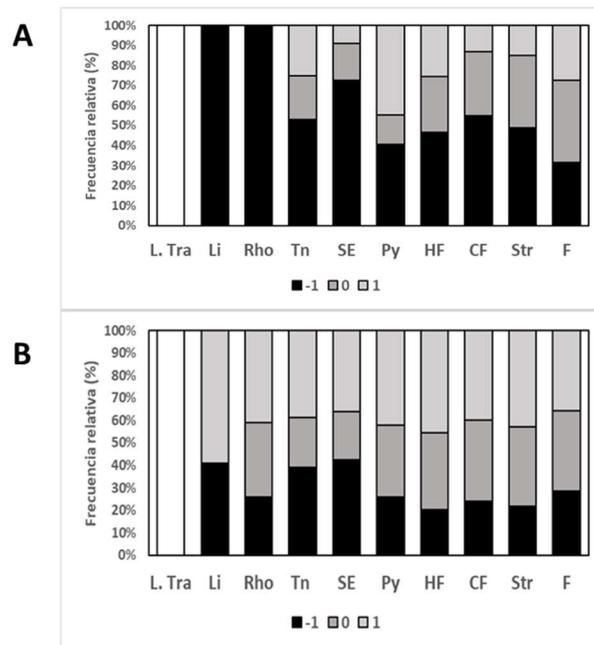


Figura 90. Resultados de auto-retroacciones en las variables del modelo propuesto en el escenario de aumento de estrellas y disminuci3n de *T. niger*. A) resultados estables y no oscilantes. B) resultados No estables y oscilantes.

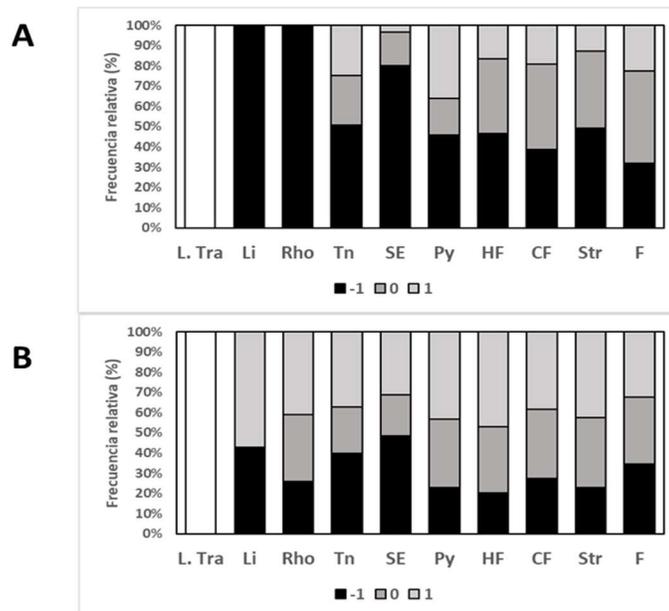


Figura 91. Resultados de auto-retroacciones en las variables del modelo propuesto en el escenario de repoblaci3n de *L. trabeculata*, aumento de estrellas y disminuci3n de *T. niger*. A) resultados estables y no oscilantes. B) resultados No estables y oscilantes.



Luego del an3lisis podemos resumir los resultados de la siguiente manera (**Tabla 41**).

**Tabla 41**

Resultados del modelamiento del modelo inicial. Se indica la frecuencia absoluta y relativa de los resultados segun los criterios RH1, RH2 y Levins.

Escenarios	Descripci3n manejo	Variables sensibles
1	Repoblaci3n de <i>L. trabeculata</i>	Algas (Li y Rho), SE, Str. Auto-retroacciones positivas
2	Aumento de estrellas	Algas (Li y Rho), SE. Auto-retroacciones negativas
3	Disminuir densidad de <i>T. niger</i>	Algas (Li y Rho), SE, Str y CF Auto-retroacciones positivas
1 + 2	Repoblaci3n de <i>L. trabeculata</i> y aumento de estrellas	Algas (Li y Rho), SE, Str y CF Auto-retroacciones positivas
2 + 3	Aumento de estrellas y disminuir densidad de <i>T. niger</i>	Algas (Li y Rho), SE. Auto-retroacciones negativas
1 + 3	Repoblaci3n de <i>L. trabeculata</i> y disminuir densidad de <i>T. niger</i>	Algas (Li y Rho), SE, Cf y Str Auto-retroacciones negativas
1 + 2 + 3	Repoblaci3n de <i>L. trabeculata</i> , aumento de estrellas y disminuir densidad de <i>T. niger</i>	Algas (Li y Rho), SE. Auto-retroacciones negativas

### 5.7.3. Desarrollo de balance tr3fico de modelos propuestos

Se ha avanzado en el desarrollo de dos modelos tr3ficos, que a continuaci3n se describen.

#### 5.7.3.1. Caso 2. Co-cultivo mit3lidos-macroalgas con banco emergente

##### Ajuste metodol3gico para obtenci3n de datos de entrada

La bah3a de Hueihue fue seleccionada como sitio para validar el modelo tr3fico propuesto para un cultivo APE con un banco o h3bitat emergente asociado. Hueihue se ubica al noreste de la Isla de Chilo3 (41.8784 S; 73.5249 W) en el sector de Manao. Las fuerzas hidrodin3micas predominantes generan fuertes fluctuaciones mareales (~5 m) moduladas por la entrada de agua oce3nica a trav3s del canal de Chacao. El viento es otra fuerza preponderante capaz de generar reg3menes de oleaje de intensidad variable. La bah3a posee un tiempo residencia de ~ 4 d3as y una velocidad media de corrientes que alcanza 6.2 cm s<sup>-1</sup>, con valores m3ximos de 21 cm s<sup>-1</sup> durante las mareas vivas.

La CCAA usada en este estudio registra una producci3n no mayor a 200 ton a3o<sup>-1</sup> abarcando un 3rea de 3 – 4 h3 de superficie, perteneciente a un solo acuicultor. Segun Gonz3lez-Poblete et al. (2018), esta concesi3n se puede categorizar como un cultivo de bivalvos (*M. chilensis*) de micro-escala. El ambiente bent3nico de la bah3a est3 caracterizado por una dominancia de fondos blandos donde habitan especies m3viles como dec3podos, pulpos, poliquetos errantes, el camar3n de los canales (*M. gregaria*) y tres especies de erizos (Ver **Secci3n 5.8. Monitoreo del efecto de la APE sobre comunidades bent3nicas**).



La recolección de especies epibentónicas para el cálculo de biomasa ( $\text{g}$  peso húmedo  $\text{m}^{-2}$ ) se llevó a cabo durante el verano del 2021 a una profundidad de entre 12 - 20 m (Bajo el cultivo) y entre 9 - 5 m (Sitio de referencia). En ambos sitios se dispuso de tres transectos de 30 m demarcados con huincha métrica. Buzos científicos recolectaron toda la megafauna bentónica móvil ( $> 1 \text{ cm}$ ) a una distancia de 1 m a cada lado del transecto (varilla de 1m dispuesta desde la huincha métrica). Cada uno de los seis “bloques” de 30  $\text{m}^2$  fueron combinados como submuestras para el análisis. La megafauna incluyó principalmente erizos (*L. albus*, *A. dufresnii* y *P. magellanicus*), crustáceos decápodos, nudibranchios, moluscos y estrellas de mar.

Adicionalmente, usando cuadrantes de 0.0625  $\text{m}^2$  dispuestos cada 10 m a lo largo de cada transecto (N total = 9) se removieron organismos epibentónicos sésiles, estos incluyeron: anémonas (e.g., *A. chilense*), holoturias (e.g., *H. godeffroyi*), macroalgas, además de todos los bivalvos presentes dentro del cuadrante. El muestreo también incluyó, ocasionalmente, peces cripticos asociados al cultivo y el banco emergente (e.g., *L. blainvillanus*, *Helcogrammoides cunninghami*).

Los organismos colectados fueron pesados con una balanza digital (0.01 g de sensibilidad) registrando su peso húmedo ( $\text{g}$ ) y luego su longitud con un pie de metro. La mayoría de los organismos fueron clasificados en grupos funcionales tróficos, mientras que, especies altamente dominantes (e.g., erizos, bivalvos y decápodos) fueron dejados como componentes independientes para la construcción, tanto para los diagramas de flujo de la estructura trófica y del modelo trófico del sitio de estudio. Para el análisis del contenido gastrointestinal entre 3-5 individuos de cada especie (dependiente de abundancia comunitaria local) fueron congelados.

Inicialmente, se determinó una matriz de dietas y grupos funcionales con los organismos identificados en terreno, a través de una revisión de literatura de especies o grupos afines. El primer criterio de selección entre estudios fue el análisis de contenido estomacal de la especie en cuestión. Posteriormente, se procederá al análisis de los contenidos gastrointestinales que determinarán la matriz final. Para la obtención de registros dietarios entre 3-5 ejemplares de cada especie (Prado et al. 2010), del fondo o la columna de agua (e.g., choritos de cultivo) serán disectados para extraer el contenido gastrointestinal en laboratorio. El tracto intestinal completo de todos los consumidores será cuidadosamente removido, puesto en placas Petri para observar y separar su contenido usando una lupa (Olympus De Plapo, 1,25x, Japan). Los componentes de alimento observados serán expresados como % total de la biomasa ( $\text{g}$  peso seco o peso húmedo) ingerida por cada individuo.

Para el análisis se determinará la frecuencia de ocurrencia (FO) numérica ( $\text{FN} = n$ ) y/o volumétrica ( $\text{FV} = \text{g} / \text{peso seco/ húmedo}$ ). Tales parámetros han sido utilizados para construir índices de importancia relativa (IIR) de acuerdo a lo postulado por Hyslop (1980). La selección de grupos tróficos funcionales o grupos de organismos que poseen dietas similares (e.g., detritívoros, depredadores, generalistas) será adoptada para facilitar la interpretación y manejo de resultados, esto dependerá del número de especies observadas por grupo funcional o bien por sólo una especie que cumpla un rol funcional específico (e.g., *M. chilensis* = Filtrador de suspensión/ingeniero ecosistémico) en cuyo caso, se utilizará el nombre específico del organismo. Además, sobre los transectos aleatorios de 30 m (i.e., 3 estaciones en cada sitio de estudio), se medirá, *in situ*, la abundancia en peso húmedo de los todos organismos presentes en cuadrantes o cores circulares de 0,625  $\text{m}^2$ . Además, la determinación de biomasa en  $\text{m}^2$  de macroalgas como productores primarios será medida en cuadrantes de 0,25  $\text{m}^2$  sobre las mismas estaciones. Tanto los análisis de contenido gastrointestinal como los datos de



abundancia relativa de especies serán utilizados en la construcción de modelos y simulaciones con la herramienta de modelamiento trófico y balance de masas Ecopath con Ecosim (Pauly et al. 2000, Christensen & Walters 2004, Ortiz 2008).

### Resultados iniciales

La biomasa del fitoplancton fue calculada con estimaciones de detección remota de Clorofila  $\alpha$  superficial ( $\text{mg Chl } \alpha \text{ m}^{-3}$ ). Las imágenes de Clorofila  $\alpha$  son derivadas del radiómetro MODIS sobre la plataforma satelital AQUA, con una resolución espacial de  $\sim 4$  km. Los datos corresponden a medias mensuales de MODIS Aqua Level 3 Mapped,  $11\mu$  (canal 31 de MODIS) en fases diurnas desde enero 2010 hasta diciembre 2018. Las estimaciones mostraron que durante este período la biomasa de fitoplancton alcanzó entre  $4 - 8 \text{ mg Chl } \alpha \text{ m}^{-3}$  en el área de estudio. Mientras que la biomasa de zooplancton en el área de estudio alcanzó los  $0.8 \text{ mg m}^{-3}$  ( $80 \text{ mg } 100\text{m}^{-3}$ ) (Díaz-Astudillo et al. 2017). La biomasa de detritus fue establecida como  $1 \text{ Ton km}^{-2}$  de acuerdo a Kluger et al. (2016) y Taylor et al. (2008), basado en estimaciones para la bahía de Sechura, Perú.

La matriz de dieta para describir la estructura trófica de la bahía fue construida utilizando literatura especializada para invertebrados de la provincia biogeográfica de la Patagonia y para cada una de las especies en cada grupo funcional (**Tabla 42**).

Se determinaron 10 grupos funcionales al clasificar 30 especies de megafauna epibentónica, incluyendo algunas especies de infauna (e.g., *V. antiqua*). Los grupos funcionales tróficos por especie y su biomasa promedio en bahía Hueihue aparecen en la **Tabla 43**. El hábitat bajo el cultivo estuvo ampliamente dominado por bivalvos filtradores principalmente de la familia Mytilidae (*A. atra*, *M. chilensis*, *C. chorus*) con alrededor de  $20 \text{ kg m}^{-2}$ , seguido por erizos (Echinoidea) con  $218 \text{ g m}^{-2}$  y jaibas depredadoras como *M. edwardsii* y *M. gregaria* ( $\sim 20 \text{ g m}^{-2}$ ). Similarmente, el hábitat de referencia mostró dominancia de bivalvos filtradores (*A. atra* y *V. antiqua*), pero, con valores promedio significativamente menores a lo observado en el cultivo ( $1.5 \text{ kg m}^{-2}$ ), los erizos alcanzaron sólo  $\sim 14 \text{ g m}^{-2}$ . También se observaron carnívoros misceláneos ( $5.3 \text{ g m}^{-2}$ ), jaibas depredadoras ( $1.33 \text{ g m}^{-2}$ ), detritívoros ( $0.6 \text{ g m}^{-2}$ ) y ocasionalmente cefalópodos juveniles ( $0.11 \text{ g m}^{-2}$ ). Las macroalgas estuvieron representadas casi exclusivamente por parches de *Ulva* spp. alcanzando una biomasa de  $15,2 \text{ kg m}^{-2}$  (**Figuras 92 y 93**).

El modelo trófico de la bahía de Hueihue se construirá con el software Ecopath with Ecosim (EwE) (Christensen & Walters 2004) basado en la estructura comunitaria y biomasa observada *in situ* como valores de ingreso (**Figura 94A y B**). El modelo simulará el balance trófico de la bahía Hueihue en condiciones de cultivo y de referencia enfatizando posibles efectos de los bivalvos del cultivo y aquellos que forman un banco emergente, sobre los otros grupos funcionales del fondo, la columna de agua (Fitoplancton) y la capacidad de carga ecológica de este ecosistema (ECC).

Una serie de indicadores de propiedades macroscópicas del sistema ecológico sometido a acuicultura que serán analizadas son:

<i>Total System throughput</i> (TST):	Suma de todos los flujos del ecosistema, que representa una medida del tamaño del sistema (Ulanowicz 1986).
<i>Capacity</i> :	El producto del TST y la entropía, que representa el límite superior de Ascendency (Heymans et al. 2007).



<i>Ascendency:</i>	El producto del crecimiento (TST) y el desarrollo (AMI) del sistema (Ulanowicz 1986, 2004).
<i>Average Mutual Information (AMI):</i>	Como está organizado el intercambio entre componentes del sistema (Mageau et al. 1998).
<i>Entropy:</i>	El número y diversidad de flujos dentro del sistema, representa una medida de la incertidumbre total de una configuración de flujos (Mageau et al. 1998).
<i>Kempton's Q:</i>	Índice relativo de diversidad de la biomasa, incluyendo especies y grupos funcionales con niveles tróficos > 3 (Kempton & Taylor 1976, Christensen & Walters 2004), expresando tanto la riqueza de especies, como la equitatividad (Ainsworth & Pitcher 2006).
<i>Finn's cycling index:</i>	Porcentaje de "throughput" del ecosistema que fue reciclado, es un indicador de stress y diferencias estructurales (Finn 1976).
<i>Transfer Efficiency (TE):</i>	Para un nivel trófico dado, es la proporción entre las exportaciones y los flujos transferidos al siguiente nivel trófico y el "throughput" del nivel trófico (Christensen & Walters 2004), en este contexto, se usa la TE promedio para niveles tróficos > 2.

**Tabla 42.**  
Matriz trófica comunidad de invertebrados bentónicos de la Bahía Hueihue.

Especies	Grupo trófico por dieta o contenido estomacal reportado	Referencias
<i>Arbacia dufresnii</i>	Omnívora tendencia a la carnivoría, herbivoría y detritivoría	Vásquez, 1984; Penchaszadeh & Lawrence, 1999; Epherra et al., 2017; Galván et al., 2009
<i>Loxechinus albus</i>	Herbívoro	Vásquez, 1984; Castilla 1985; Valenzuela et al., 2019
<i>Pseudechinus magellanicus</i>	Omnívora tendencia a la carnivoría	Vásquez 1984
<i>Metacarcinus edwardsii</i>	Carnívoro generalista	León y Stotz, 2004
<i>Peltarion spinulosum</i>	Carnívoro generalista	León y Stotz, 2004
<i>Munida gregaria</i>	Omnívoro con tendencia a la carnivoría	Varisco & Vinuesa (007) Vinuesa & Varisco 2007; Pérez-Barros et al., 2010
<i>Pisoides edwardsii</i>	Omnívoro/ carroñero con tendencia a la carnivoría	Tapia et al., 2008
<i>Anasterias antarctica</i>	Carnívoro	Valenzuela et al., 2019
<i>Comasterias lurida</i>	Carnívoro generalista	Castilla 1985; Vásquez y Castilla, 1984; Fraysse et al., 2018; Garrido et al., 2021
<i>Meyenaster gelatinosus</i>	Carnívoro especialista facultativo	Ortiz et al., 2003
<i>Anthothoe chilensis</i>	Carnívoro suspensívoro, polífago oportunista	Shick 1991; Acuña y Genzano, 2001; Häussermann & Försterra 2009
<i>Nemertea</i>	Carnívoro y carroñero	Mc Dermott y Roe 1985; Salazar y Gonzáles, 1986
<i>Nereidae</i>	Omnívora tendencia a la Carnivoría	Fauchald y Jumars 1979; Salarzadeh 2007
<i>Anisodoris fontaini</i>	Carnívoro	Scrödl y Grau 2006
<i>Nassarius gayii</i>	Carnívoro/ carroñero	Letelier et al., 2005
<i>Enteroctopus megalocyathus</i>	Depredador Carnívoro	Guerra, 1978; Ambrose & Nelson, 1983; Summers, 1983; Rodhouse y Nigmatullin, 1996; Ibáñez & Chong 2007
<i>Heterocucumis godeffroyi</i>	Suspensívoro/ detritívoro	Solis-Marín et al., 2012
<i>Crepipatella sp.</i>	Herbívoro ramoneador, tendencia a la carnivoría	Henríquez et al. 2011; Chaparro et al., 2018
<i>Fisurella spp.</i>	Herbívoro, tendencia a la omnivoría	Osorio et al., 1983; Oliva y Castilla, 1986; Moreno y Jaramillo 1986; Santelices et al., 1986; Osorio et al., 1988; Vega 1998; González et al., 1995



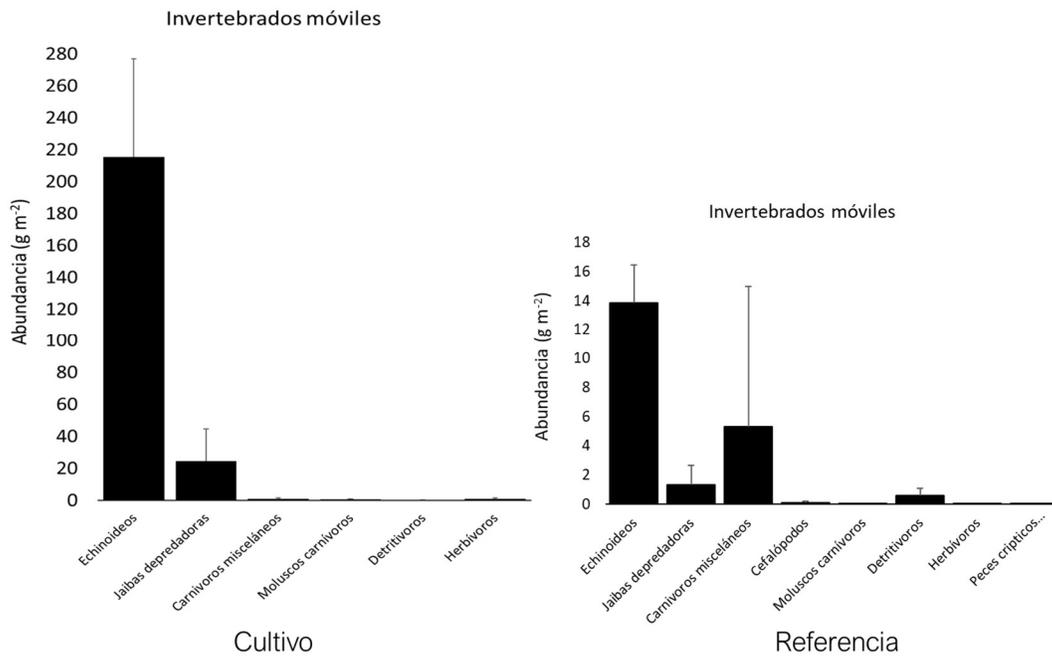
<i>Tegula atra</i>	Herbívoro ramoneador	Buschmann et al. (1997); Veliz & Vásquez, 2000; Pinochet et al. 2018
<i>Chiton</i> sp	Herbívoro	Ruppert & Barnes, 1996; Latyshev et al. 2004; Siqueiros-Beltrones & Argumedo-Hernández 2012
<i>Leptonotus blainvillleanus</i>	Omnívoro selectivo, tendencia a la carnivoría	Landaeta et al. 2019
<i>Hypsoblennius sordidus</i>	Carnívoro – Isópodos y algas verdes	Valenzuela et al., 1995; Cáceres et al. 2000; Quijada & Cáceres 2000
<i>Aulacomya atra</i>	Filtrador/ Suspensívoro	Reid et al. 2010; Montero et al. 2021
<i>Mytilus chilensis</i>	Filtrador/ Suspensívoro	Jana, 1978
<i>Chorus giganteus</i>	Filtrador/ Suspensívoro, tendencia a la carnivoría	Navarro et al. 2002
<i>Crassostrea gigas</i>	Filtrador/ Suspensívoro	Gerdes, 1983; Ramos et al., 2018; Kheder et al., 2010; Dutertre et al., 2007
Porífera	Suspensívoro	Ribes et al., 1999

**Tabla 43.**

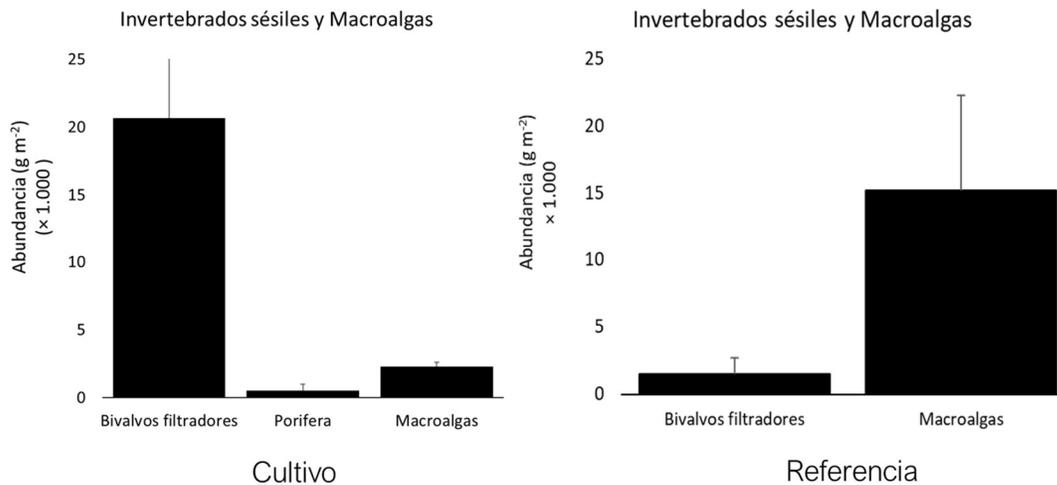
Especies y su biomasa por m<sup>2</sup> incluidas en los diferentes compartimientos del modelo de estado estable de Bahía Hueihue bajo un sistema de cultivo de mitílidos a pequeña escala (Cultivo) y sitios de referencia (Referencia).

CULTIVO	Grupo funcional	Especies	Biomasa g m <sup>-2</sup>
Móviles	Echinoidea	<i>Arbacia dufresnii</i> , <i>Loxechinus albus</i> , <i>Pseudechinus magellanicus</i>	215,52
	Jaibas depredadoras	<i>Metacarcinus edwardsii</i> , <i>Peltarion spinulosum</i> , <i>Munida gregaria</i>	24,39
	Carnívoros misceláneos	<i>Anasterias antarctica</i> , <i>Comasterias lurida</i> , <i>Meyenaster gelatinosus</i> , <i>Anthothoe chilensis</i> , <i>Nereidae</i> , <i>Nemertea</i>	1,12
	Moluscos carnívoros	<i>Anisodoris fontaini</i> , <i>Nassarius gayii</i>	0,728
	Detritívoros	<i>Heterocucumis godeffroyi</i>	0,249
	Herbívoros	<i>Crepidatella</i> sp., <i>Fisurella</i> spp., <i>Tegula atra</i> , <i>Chiton</i> sp.	1,1
	Peces crípticos pequeños	<i>Leptonotus blainvillleanus</i> , <i>Hypsoblennius sordidus</i>	0,04
Sésiles	Bivalvos filtradores	<i>Aulacomya atra</i> , <i>Mytilus chilensis</i> , <i>Chorus giganteus</i> , <i>Crassostrea gigas</i>	20.656,18
	Porífera	N/I	495,47
	Macroalgas	<i>Ulva</i> spp., <i>Macrocystis pyrifera</i> , <i>Rhodophyta</i>	2.301,23
	Bivalvos de Cultivo	<i>Mytilus Chilensis</i> , <i>Aulacomya atra</i>	5.445 (m <sup>-1</sup> ) *
REFERENCIA	Grupo funcional	Especies	Biomasa g m <sup>-2</sup>
Móviles	Echinoidea	<i>Arbacia dufresnii</i> , <i>Loxechinus albus</i> , <i>Pseudechinus magellanicus</i>	13,8
	Jaibas depredadoras	<i>Metacarcinus edwardsii</i> , <i>Munida gregaria</i> , <i>Pisoides edwardsii</i>	1,33
	Carnívoros misceláneos	<i>Meyenaster gelatinosus</i> , <i>Anasterias antarctica</i> , <i>Nereidae</i>	9,44
	Moluscos carnívoros	<i>Nassarius gayii</i>	0,01
	Cefalópodos	<i>Enteroctopus megalocyathus</i>	0,11
	Detritívoros	<i>Urechis chilensis</i>	0,6
	Peces crípticos pequeños	<i>Leptonotus blainvillleanus</i>	0,01
	Herbívoros	<i>Fisurella</i> sp.	1033,0
Sésiles	Bivalvos filtradores	<i>Aulacomya atra</i> , <i>Venus antiqua</i>	1.535,47
	Macroalgas	<i>Ulva</i> spp.	15.200,3

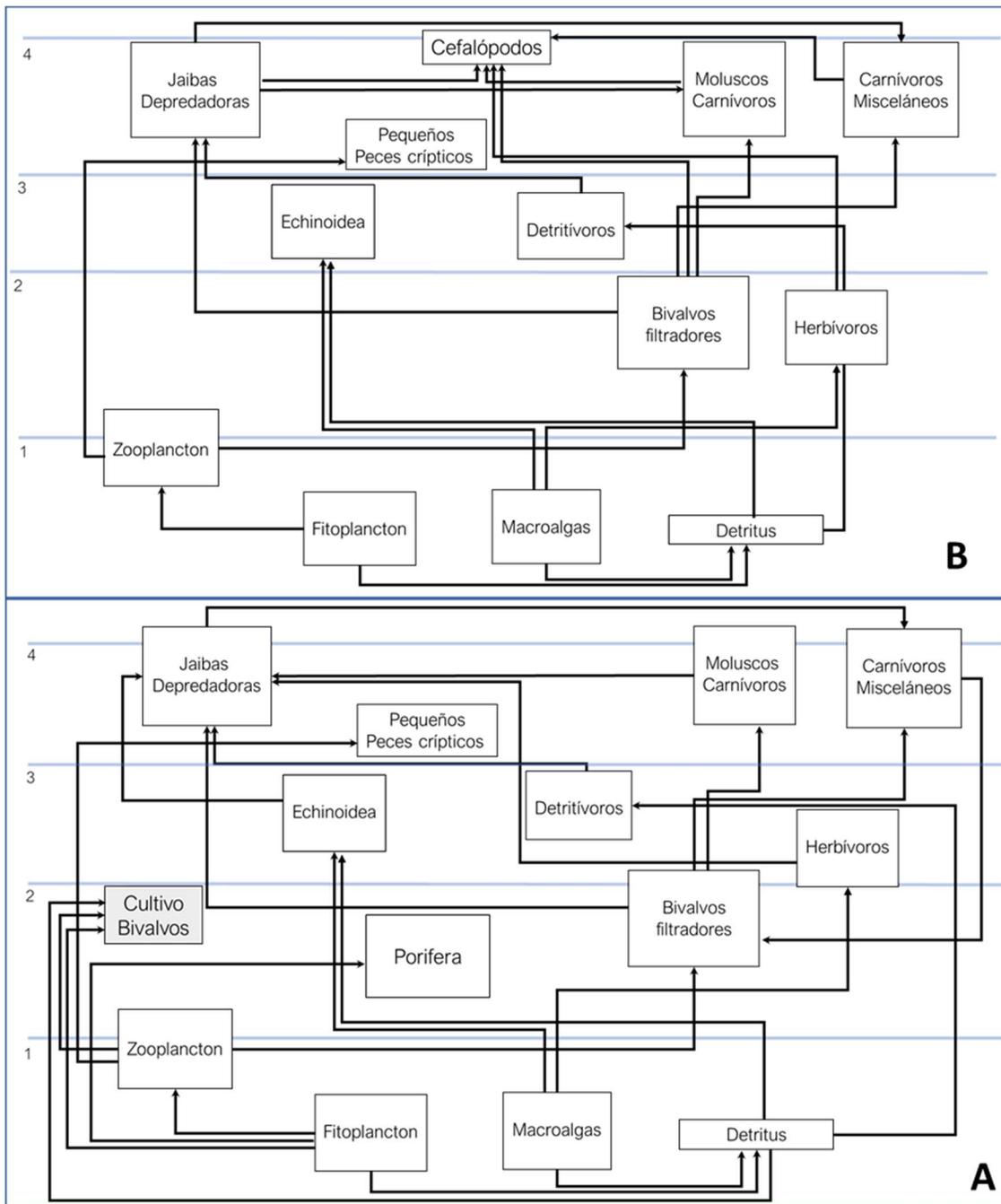
\*Metro lineal



**Figura 92.** Biomasa promedio (g m<sup>-2</sup> ± EE) de invertebrados bent3nicos m3viles en la Bahía de Hueihue bajo un cultivo de bivalvos a pequeña escala y sitios de referencia.



**Figura 93.** Biomasa promedio (g m<sup>-2</sup> ± EE) de invertebrados bent3nicos s3siles en la Bahía de Hueihue bajo un cultivo de bivalvos a pequeña escala y sitios de referencia



**Figura 94.** Diagrama de flujo de la estructura trófica del hábitat bentónico bajo el cultivo (A) y en sitios de referencia (B) de la Bahía Hueihue para el modelo de estado estable inicial. Cada caja representa un grupo funcional. En el eje Y se muestra el nivel trófico de cada grupo funcional.



### 5.7.3.2. Caso 3. Repoblaci3n de huiro palo en fondos blanqueados

En esta etapa se construy3 el modelo tr3fico de fondos blanqueados de AMERB Chungungo B, con la cual se realizar3 la posterior modelaci3n. La construcci3n del modelo de balance tr3fico, se elabor3 en base a la evaluaci3n de comunidades y censo de peces realizadas en febrero del 2022. La evaluaci3n de comunidades bent3nicas fue descrita en el cultivo de fondo de *L. trabeculata* en AMERB Chungungo B (**Secci3n 5.4.6**). El censo de peces tiene como objetivo caracterizar la comunidad 3tica del sector. Se utiliz3 la metodolog3a descrita por P3rez-Matus et al. (2012). Se realizaron 2 transectas de 100 m, las cuales fueron recorridas por un buzo semiaut3nomo que fue identificando y cuantificando los peces en un t3nel virtual de 4 metros de di3metro.

Las especies identificadas en la evaluaci3n de comunidades y censo de peces fueron clasificadas seg3n su nivel tr3fico en base a bibliogr3fica (**Tabla 44, 45 y 46**). Posteriormente se establecieron los grupos funcionales que son parte del modelo y se determin3 la abundancia por grupo (**Tabla 47**). Para determinar la abundancia de organismos s3siles (cobertura %), organismos m3viles ( $\text{ind m}^{-2}$ ) y peces ( $\text{ind m}^{-2}$ ), se promediaron las abundancias de las especies que componen el grupo funcional, obteniendo la abundancia promedio por grupo (**Figuras 95, 96 y 97**).

Con esta informaci3n se construy3 el modelo conceptual que ser3 modelado en la siguiente etapa del programa. El modelo conceptual cuenta con 15 compartimientos, dos de ellos corresponden a las especies *L. trabeculata* y *T. niger*. En Hermosillo et al. (2018), se se3ala que la inclusi3n de compartimientos de una sola especie se justifica cuando son especies representativas de un sistema ecol3gico, tienen importancia pesquera o hay una alta abundancia en el sistema. En este caso, a pesar que no se encuentra *L. trabeculata* en el 3rea, el modelamiento de la repoblaci3n se basa en el aumento de biomasa en el 3rea, lo que justificari3 su inclusi3n. Por otro lado, la variable small epifauna fue subdividida en tres compartimientos herb3voros, carn3voros, omn3voros y suspens3voros, al igual que los peces. Se agregaron las variables fitoplancton, zooplancton y detritus (**Figura 98**).

**Tabla 44.**

Matriz tr3fica de la comunidad de invertebrados bent3nicos m3viles de AMERB Chungungo B.

Especies	Nivel tr3fico	Alimentaci3n	Referencia
<i>Pagurus edwardsii</i>	Carn3voro	Carro3eros, crust3ceos gusanos	(Williams & McDermott 2004)
<i>Stichaster striatus</i>	Carn3voro	Lapas, crust3ceos y piures	(Matus 1994, Duarte et al. 1996)
<i>Antholoba achates</i>	Carn3voro	Depredadores oportunistas	(Acuna & Zamponi 1995)
<i>Crassilabrum crassilabrum</i>	Carn3voro	Cirripedos y <i>Tegusla atra</i>	(Padilla 1980)
<i>Argobuccinum pustulosum</i>	Carn3voro	Crust3ceos y erizos	(Smith 1970)
<i>Romaleon setosum</i>	Carn3voro	Can3bales, bivalvos, picorocos y crust3ceos	(Wolff & Soto 1992)
<i>Heliaster helianthus</i>	Carn3voro	Peces peque3os, crust3ceos y moluscos	(Uribe et al. 2013)
<i>Anthothoe chilensis</i>	Carn3voro	Depredadores oportunistas	(Acuna & Zamponi)
<i>Turritella cingulata</i>	Herb3voro	Algas	(Aldana et al. 2016, Hermosillo-N3ñez et al. 2018)
<i>Tegula sp.</i>	Herb3voro	Ramoneador de huiro	(V3squez & Buschmann 1997)
<i>Tetrapygos niger</i>	Herb3voro	Ramoneador	(Uribe et al. 2013)
<i>Rhynchocinetes typus</i>	Herb3voro	Herb3voro bent3nico	(Caillaux & Stotz 2003)



<i>Scurria sp.</i>	Herbívoro	<i>Lessonia nigrescens</i>	(Cardoza 1992)
<i>Fissurella latimarginata</i>	Herbívoro	Algas	(Uribe et al. 2013)
<i>Fissurella sp.</i>	Herbívoro	Algas	(Uribe et al. 2013)
<i>Phymanthea pluvia</i>	Omnívoro	Algas y crustáceos	(Uribe et al. 2013)
<i>Athyonidium chilensis</i>	Omnívoro	macroalgas e invertebrados	(Ruiz et al. 2007)
<i>Pyura chilensis</i>	Suspensívoro	Plancton y partículas suspendidas	(Lorenzen et al. 1979)

**Tabla 45.**

Matriz trófica de la comunidad de organismos sésiles de AMERB Chungungo B.

Especies	Nivel trófico	Alimentación	Referencia
<i>Lithophyllum sp.</i>	Productor primario	Autótrofo	(Arismendi et al. 2014)
<i>Hildenbrandia sp.</i>	Productor primario	Autótrofo	(Jiménez et al. 2002)
<i>Gelidium sp.</i>	Productor primario	Autótrofo	(Buschmann, Correa, et al. 2001)
<i>Phragmatopoma sp.</i>	Suspensívoro	suspensívoros	(Sepúlveda et al. 2003)
<i>Balanus sp.</i>	Suspensívoro	suspensívoros	(Stotz et al. 1991)

**Tabla 46.**

Matriz trófica de la comunidad de peces en AMERB Chungungo B.

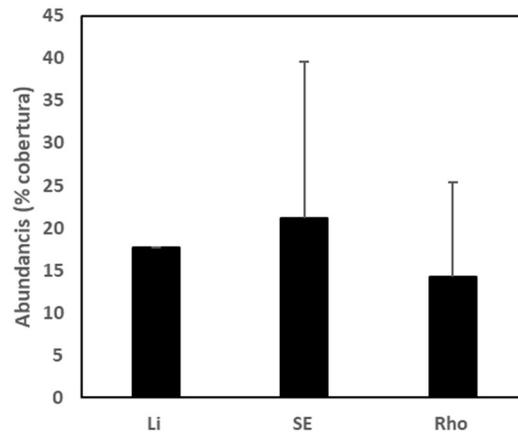
Especies	Nivel trófico	Alimentación	Referencia
<i>Pinguipes chilensis</i>	Carnívoro	Moluscos y crustáceos	(Medina et al. 2004, Pérez-Matus et al. 2012)
<i>Trachurus murphyi</i>	Carnívoro	Crustáceos, peces y moluscos	(Orrego & Mendo 2015)
<i>Cheilodactylus variegatus</i>	Carnívoro	Moluscos y crustáceos	(Medina et al. 2004, Pérez-Matus et al. 2012)
<i>Helcogrammoides cunninghami</i>	Carnívoro	Anfipodos e isópodos	(Irigoyen et al. 2018)
<i>Paralichthys adspersus</i>	Carnívoro	Peces y crustáceos bentónicos	(Zúñiga 1988, Kong et al. 1995)
<i>Prolatilus jugularis</i>	Carnívoro	Crustáceos, poliquetos y peces pequeños	(Medina et al. 2004)
<i>Paralabrax humeralis</i>	Carnívoro	Crustáceos y peces	(Medina et al. 2004, Pérez-Matus et al. 2012)
<i>Aplodactylus punctatus</i>	Herbívoro	Algas pardas y rojas	(Pérez-Matus et al. 2012, Ruz et al. 2018)
<i>Scartichthys viridis</i>	Herbívoro	Herbívoro	(Muñoz & Ojeda 1998)
<i>Isacia conceptionis</i>	Omnívoro	Crustáceos, gusanos y algas	(Angel & Ojeda 2001, Pérez-Matus et al. 2012)
<i>Girella Laevifrons</i>	Omnívoro	Algas verdes y artrópodos	(Fariña et al. 2000, Pérez-Matus et al. 2012)
<i>Chromis crusma</i>	Planctónico	Planctónico	(Angel & Ojeda 2001)



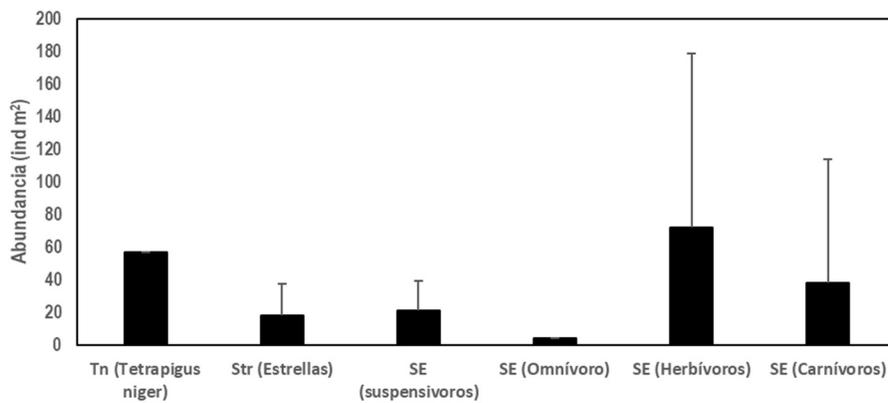
**Tabla 47.**

Especies de los diferentes compartimientos del modelo incluidos en el modelo conceptual.

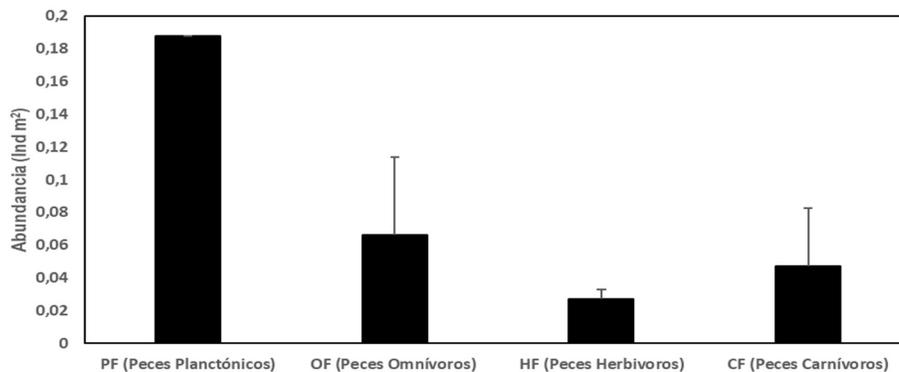
Grupo funcional	Especies
L. tra ( <i>L. trabeculata</i> )	<i>Lessonia trabeculata</i>
Rho (Rodófitas)	<i>Hildenbrandia</i> sp. <i>Gelidium</i> sp.
Tn ( <i>Tetrapigus niger</i> )	<i>Tetrapigus niger</i>
HF (Peces Herbívoros)	<i>Aplodactylus punctatus</i> <i>Scartichthys viridis</i> <i>Pinguipes chilensis</i> <i>Trachurus murphyi</i> <i>Cheilodactylus variegatus</i>
CF (Peces Carnívoros)	<i>Helcogrammoides cunninghami</i> <i>Paralichthys adspersus</i> <i>Prolatilus jugularis</i> <i>Paralabrax humeralis</i>
OF (Peces Omnívoros)	<i>Isacia conceptionis</i> <i>Girella laevis</i>
PF (Peces Planctónicos)	<i>Chromis crasma</i> <i>Pagurus edwardsii</i> <i>Antholoba achates</i>
SE (Carnívoros)	<i>Crassilabrum crassilabrum</i> <i>Argobuccinum pustulosum</i> <i>Romaleon setosum</i> <i>Anthothoe chilensis</i> <i>Turritella cingulata</i> <i>Tegula</i> sp. <i>Tetrapigus niger</i>
SE (Herbívoros)	<i>Rhynchocinetes typus</i> <i>Scurria</i> sp. <i>Fissurella latimarginata</i> <i>Fissurella</i> sp.
SE (Omnívoro)	<i>Phymanthea pluvia</i> <i>Athyonidium chilensis</i> <i>Pyura chilensis</i>
SE (suspensívoros)	<i>Phragmatopoma</i> sp. <i>Balanus</i> sp.
Str (Estrellas)	<i>Stichaster striatus</i> <i>Heliaster helianthus</i>



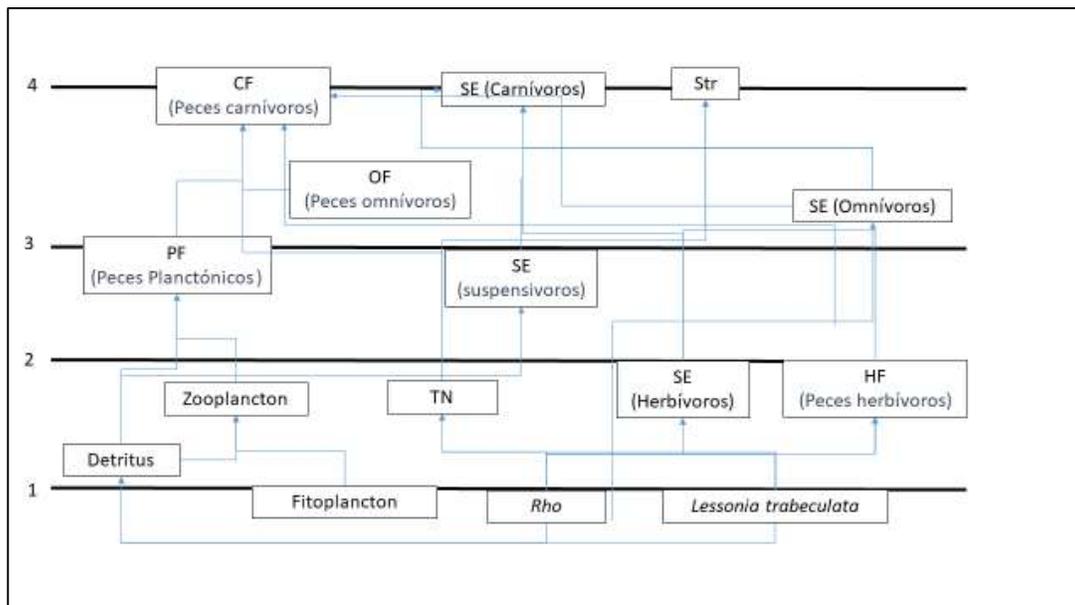
**Figura 95.** Abundancia en cobertura (%  $\pm$  DS) de grupos funcionales correspondientes a organismos s3siles den AMERB Chungungo B.



**Figura 96.** Abundancia (ind m<sup>-2</sup>  $\pm$  DS) de grupos funcionales correspondientes a organismos bent3nicos m3viles de AMERB Chungungo B.



**Figura 97.** Abundancia (ind m<sup>-2</sup>  $\pm$  DS) de grupos funcionales correspondientes a organismos peces de AMERB Chungungo B.



**Figura 98.** Diagrama de flujo de la estructura tr3fica del AMERB Chungungo B. Cada caja representa un grupo funcional. En el eje Y se muestra el nivel tr3fico de cada grupo funcional.

## 5.8. Monitoreo del efecto de la APE sobre comunidades bent3nicas

### 5.8.1. Sitios y escalas de cultivo

El estudio se realiz3 en seis concesiones de cultivo de *M. chilensis* en el mar interior de Chilo3, Regi3n de Los Lagos (**Figura 99**). Las fuerzas hidrodin3micas predominantes en cada sitio corresponden a fuertes fluctuaciones mareales y olas de viento (Castillo et al. 2008, H3ussermann & F3rsterra 2009). La topograf3a y morfolog3a costera est3 determinada por la presencia de gran n3mero de islas, canales estrechos, fiordos y bah3as de profundidad variable con diferentes grados de exposici3n. Esto da origen a una compleja hidrodin3mica macromareal (~ 6 m de amplitud) con una salinidad que fluct3a entre 29-33 PSU (Sievers & Silva 2006). Esta amplia variabilidad en el transporte de agua tiene un fuerte efecto en el tipo y estructura de las comunidades bent3nicas. Las evaluaciones comunitarias entre sitios de cultivo y referencia se llevaron a cabo en tres per3odos: Primavera 2020, oto3o 2021 y primavera del 2021.

El rango de escalas de cultivo fue definido siguiendo la caracterizaci3n de Gonz3lez-Poblete et al. (2018) como sigue:

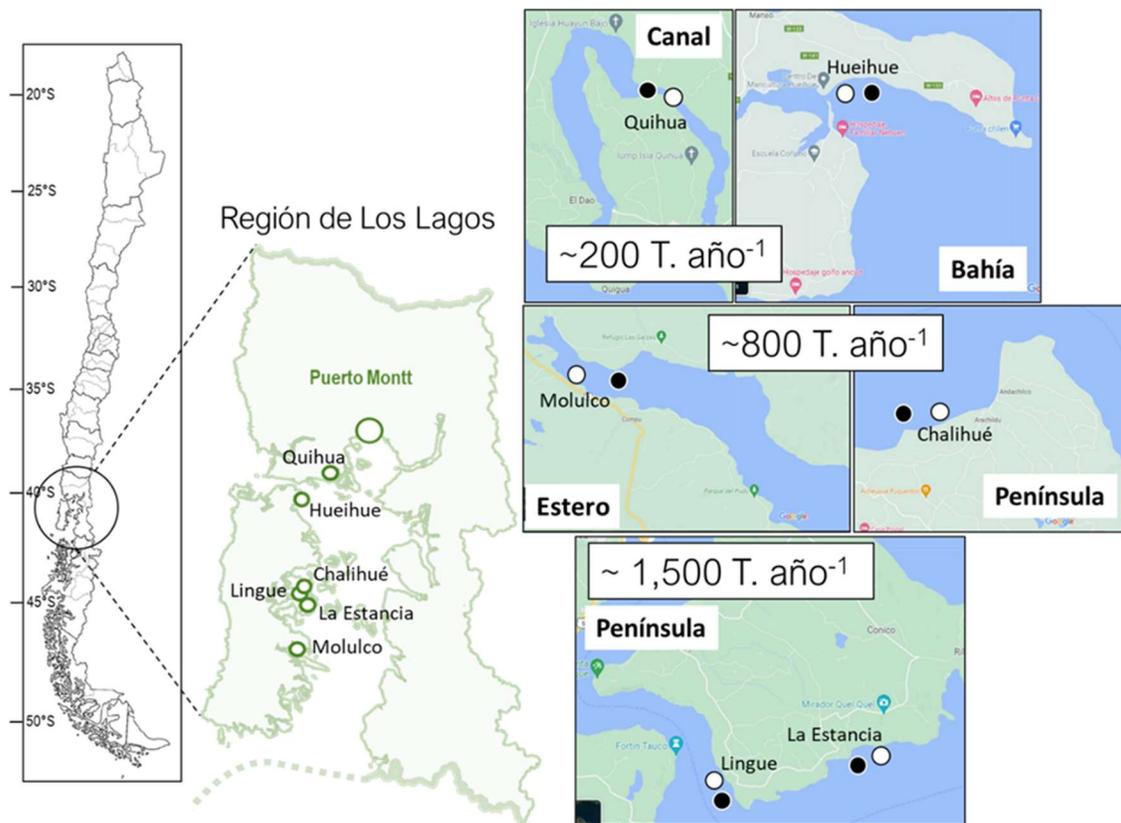
- Micro-escala: producciones que alcanzan alrededor de 200 toneladas a3o<sup>-1</sup> e ingresos ~ 100.000 USD a3o<sup>-1</sup>, con un 3rea de conces3n de menos de cuatro h3a de cultivo administrada por un solo acuicultor.



- Meso-escala: ~ 370 – 500 toneladas año<sup>-1</sup> e ingresos entre 1.000.000 – 4.200.000 USD año<sup>-1</sup>, un área entre 8 y 30 há., administrada por uno o más acuicultores.
- Macro-escala: 1.000 - 2.000 toneladas año<sup>-1</sup> e ingresos >>4.200.000 USD año<sup>-1</sup> y un área > 30 há de cultivo, en la mayoría de los casos, administrada por una compañía.

A continuación, se describe los sitios de estudio:

1. Micro-escala: (1) Canal Quihua (-41.738707; -73.20487199), archipiélago de Calbuco, (2) Bahía Hueihue (-41.89594396; -73.50698101), noreste de la isla de Chiloé.
2. Meso-escala: (3) Molulco (-42.85916504; -73.72114803), estero Compu en Chiloé central, (4) Chalihué (-42.57602904; -73.58587098), norte de isla Lemuy.
3. Macro-escala: (5) Lingue (-42.55090504; 73.73632296), (6) La Estancia (-42.56876403; -73.71210102), ambos en el sector de Rilán, Chiloé central. Todos los centros de cultivo tienen tiempos de funcionamiento de más de 13 años (**Figura 99**).



**Figura 99.** Ubicación de concesiones de cultivo de micro, meso y macro-escala (Círculos blancos) y sitios de referencia (Círculos negros). Los recuadros en cada sitio muestran la producción anual promedio en cada concesión (Toneladas año<sup>-1</sup>) y la característica geográfica predominante de su ubicación.



### 5.8.2. Detalle del diseño de muestreo

El efecto del cultivo sobre la fauna bentónica se midió dentro de cada CCAA y en “sitios de referencia” ubicados, al menos, > 200 m de la concesión (**Figura 99**). Esta distancia mínima entre sitios de cultivo y de referencia fue establecida en base a la “huella” de cultivos de mitílidos en ambientes bentónicos indicada en otros estudios (Inglis & Gust 2003, Hartstein & Rowden 2004, D’Amours et al. 2008, Wong & O’Shea 2011). La profundidad de los sitios de estudio varió entre 12 y 26 m. Dentro de cada concesión y sus sitios de referencia, se muestrearon seis transectos aleatorios de 30 m utilizando una cinta métrica. Buzos científicos ubicaron cada cinco metros un cuadrante reticulado de 0,25 m<sup>2</sup> (100 puntos de contacto aleatorio) para determinar el porcentaje de cobertura del sustrato primario, invertebrados sésiles coloniales (i.e., bivalvos, esponjas, tunicados), invertebrados móviles y macroalgas. Las macroalgas foliosas fueron apartadas para contar la biota bentónica subyacente. Peces crípticos fueron incluidos cuando fueron detectados dentro del cuadrante.

Adicionalmente, se determinó la abundancia y distribución de los organismos de la infauna con 5 cores ( $\varnothing = 42 \text{ cm}^2$ ,  $V = 600 \text{ cm}^3$ ) tomados al azar a lo largo de cada transecto de 30 m. Estas muestras fueron tamizadas (500  $\mu\text{m}$  de abertura) y luego fijadas con alcohol al 70% para ser analizadas en el laboratorio con una lupa (Olympus De Plapo, 1,25x, Japan). Los invertebrados epibentónicos y la infauna fueron identificados, al menos, a nivel de género *in situ* y en laboratorio, respectivamente. Cuando la identificación no fue posible, se tomaron muestras y/o fotografías de alta resolución para complementar la identificación posterior.

El objetivo principal del estudio fue examinar posibles diferencias claves en la estructura comunitaria de sitios de cultivo vs sitios de referencia, pero, adicionalmente determinar efectos derivados de la escala de cultivo. Debido a que cada escala de cultivo (Micro – Meso y Macro), está definida por el hábitat bentónico de cada concesión, éste resulta diferente dentro de cada nivel del factor principal (Condición = Cultivo vs. Referencia). Por esto, cada nivel del factor “Escala” está anidado dentro del factor principal (i.e., Escala (Condición)). De acuerdo a esto, el factor fijo “Condición” posee dos niveles (Cultivo - Referencia) y el factor fijo “Escala”, tres (Micro–Meso–Macro). Dadas las amplias diferencias biofísicas del ambiente submareal de cada sitio de cultivo y de referencia este diseño anidado (Jerárquico) busca reducir variación no explicada por las variables respuesta (Quinn & Keough 2002).

### 5.8.3. Análisis multivariado

Los datos comunitarios de epifauna e infauna de cada período de muestreo fueron tratados por separado basándose en la disimilaridad de Bray-Curtis. Para el análisis multivariado los datos fueron transformados con raíz cuadrada para reducir el efecto de especies dominantes (Clarke 1993). La estructura comunitaria se analizó gráficamente utilizando escalamiento multidimensional no métrico (nMDS) y en casos de comprobar buenos niveles de linealidad, con ordenación de componentes principales (i.e., PCO). Mientras diferencias entre la comunidad bajo los cultivos y los sitios de referencia a distintas escalas fueron calculadas con un análisis permutacional basado en distancia (PERMANOVA) siguiendo el diseño anidado descrito anteriormente. Además, se realizó un análisis del porcentaje de similitud (SIMPER, Clarke 1993) para la determinación de la contribución relativa de cada especie o grupo de especies a la disimilitud promedio entre sitios de cultivo y de referencia. Los análisis multivariados se realizaron con el paquete Primer 6.0 (Clarke 1993).



#### 5.8.4. Análisis univariado

La riqueza y el número de individuos por especie entre sitios y de cada período de muestreo fue expresada como número de especies y equitatividad de Pielou (J'), respectivamente. La abundancia relativa de los grupos de invertebrados típicamente más abundantes (previamente determinada con la rutina SIMPER) tales como, erizos, decápodos, gastrópodos, estrellas marinas, bivalvos, macroalgas y esponjas, entre otros, fueron calculadas. Los supuestos de normalidad se probaron visualmente con un análisis gráfico de residuos. La homocedasticidad se evaluó mediante una prueba de Levene. Cuando los datos no cumplieron con estos supuestos, el análisis se llevó a cabo en datos transformados con raíz cuadrada para los conteos y con ArcoSin para porcentajes de cobertura.

Adicionalmente, se realizó una clasificación mecanicista sobre la estrategia de alimentación y la función ecológica de las especies más conspicuas basada en características del ciclo de vida descritas en la literatura disponible para analizar diferencias entre grupos funcionales. Según su estrategia de alimentación y/o función los grupos fueron: Autótrofos (A), Carnívoros (C), Crustáceos Carnívoros-Generalistas (CG), Herbívoro-Ramoneador (H), Detritívoro-Carroñero (DF) y Formadores de hábitat (HF), éstos últimos como Filter-feeders (e.g., mitilidos) o Autótrofos (e.g., macroalgas).

Finalmente, se agruparon todas las muestras replicadas ( $n = 2$ ) bajo sitios de cultivo de cada escala y sus respectivos sitios de referencia y fueron tratados como muestra independiente (factor fijo Sitio  $\times$  Escala;  $g.l = 6$ ) para observar diferencias sitio-específicas en la abundancia por grupo de especie/función con un PERMNOVA y ANOVA de una vía (Modelo Lineal Generalizado). Estas diferencias fueron determinadas con un test de distancia promedio entre/dentro de grupos en análisis multivariados y un test *a posteriori* de Tukey en el análisis univariado.

#### 5.8.5. Parámetros hidrodinámicos

Se determinaron parámetros hidrodinámicos sitio-específicos (e.g., velocidad promedio de corrientes) durante los días muestreo con ayuda del sistema de información oceanográfica CHONOS del IFOP ([www.chonos.ifop.cl](http://www.chonos.ifop.cl)). Esta variable ha demostrado influir significativamente en la biodeposición sobre el ambiente bentónico (Gutiérrez et al. 2003, Keeley et al. 2009, 2013).

#### 5.8.6. Resultados

##### 5.8.6.1. Hidrodinámica

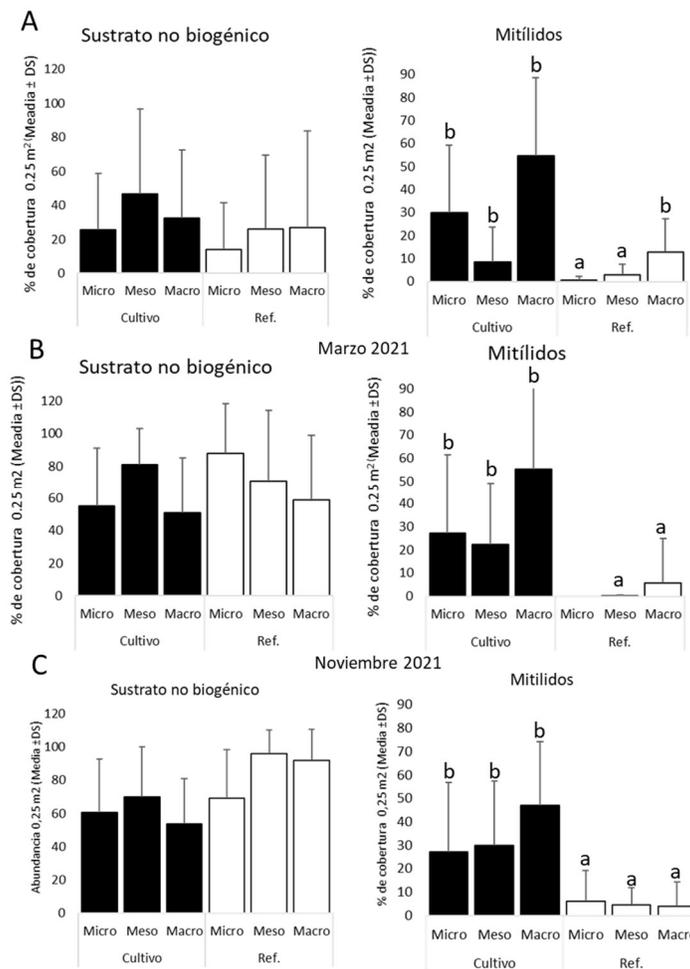
El Canal Quihua mostró valores de velocidad de corriente promedio de  $22.2 \text{ cm s}^{-1}$ , mientras que en Hueihue la velocidad promedio alcanzó  $6.2 \text{ cm s}^{-1}$ . El sitio de Chalihué (Isla Lemuy) mostró una velocidad promedio entre  $5 - 6 \text{ cm s}^{-1}$ , mientras que Molulco (Estero Compu),  $\sim 5 \text{ cm s}^{-1}$ . Lingue y La estancia (Sector de Rilán) mostraron una velocidad promedio entre  $4 - 5 \text{ cm s}^{-1}$ .

##### 5.8.6.2. Sustratos

En términos generales, el sustrato biogénico bajo los cultivos estuvo casi exclusivamente compuesto por *M. chilensis*, *A. atra* y *C. chorus*. En las tres campañas, el sustrato biogénico mostró una cobertura



similar entre sitios, evidenciando, por un lado, el marcado efecto del desprendimiento de individuos desde el cultivo, y por otro, las diferencias estructurales del habitat bent3nico entre sitios (**Figura 100**). Estos h3bitats estuvieron compuestos por bivalvos formando parches de tama1o variable (decenas de metros), o bien, conglomerados de menor tama1o (cm) dominados mayoritariamente por *A. atra* y *M. chilensis*. Los bancos emergentes con mayor cobertura de mitilidos fueron siempre observados en los sitios de macro-escala, mientras que la menor cobertura en sitios de meso-escala. Otros sustratos biog3nicos de menor relevancia fueron *O. chilensis* y la lapa *Crepipatella* sp. A su vez, alrededor del 68 % del sustrato no biog3nico considerando la variabilidad de todos los sitios bajo cultivos estuvo compuesto por fondo blando (an3lisis SIMPER). En sitios de referencia, el fondo blando contribuy3 en promedio con un 71% mientras que ~ 22% fue sustrato mixto (i.e., restos de bivalvos, gastr3podos, guijarros y arena) a la totalidad de sitios de referencia.



**Figura 100.** Porcentaje de cobertura del sustrato no biog3nico y biog3nico (Mitilidos), bajo cultivos y sitios de referencia. A) noviembre 2020; B) marzo 2021; y C) noviembre 2021. Letras muestran diferencias en la cobertura promedio de mitilidos entre sitios (HSD Tukey).



### 5.8.6.3. Análisis multivariados. Estructura comunitaria

#### Invertebrados móviles

El análisis de estructura comunitaria de invertebrados móviles/individuales entre los cultivos y sitios de referencia se presentan en la **Tabla 48**. La estructura comunitaria bajo la condición de cultivo en noviembre del 2020 y marzo del 2021, no mostró diferencias significativas con sitios de referencia. Pero, ésta si fue diferente en noviembre del 2021. En general, las diferencias estuvieron dadas por la escala de cultivo en cada sitio y estas diferencias fueron consistentes durante las tres campañas (**Tabla 1**). El test de similaridad multivariada promedio para el factor Condición x Escala mostró que comunidades bajo cultivos de macro-escala se diferenciaron de manera permanente con aquellas bajo cultivos a micro y meso-escala. Además, existieron diferencias entre sitios de referencia (**Figura 101 A, B y C**). Las especies que dominaron las comunidades bajo sitios de cultivo (Análisis SIMPER, **Tabla 49**) fueron detritívoros generalistas con tendencia a la carnivoría como *M. gregaria* y *A. dufresnii*, contribuyendo entre un 60 - 87 %, a la abundancia total durante las campañas de muestreo. Ocasionalmente (e.g., noviembre 2020), *Metridium* sp. (Suspensívoro carnívoro) contribuyó hasta un 37% a la abundancia bajo cultivos. Otras especies relevantes fueron, *P. magellanicus*, *L. albus* (Herbívoro/omnívoro), *M. edwardsii* (Jaiba depredadora). De manera similar, los sitios de referencia, estuvieron dominados por *A. dufresnii* y *M. gregaria* particularmente en noviembre del 2020 y marzo del 2021. Sin embargo, una mayor variedad de especies, tales como, *Fisurrella* spp. (Herbívoro/Omnívoro), el Nemertino *Baseodiscus aureus* (Carnívoro con tendencia a la omnivoría), *Trophon plicatus* (Carnívoro) *Tegula atra* (Herbívoro ramoneador), *H. godefroyii* (Suspensívoro/detritívoro), *Ganeria falklandica* (carnívoro), *Meyenaster striatus* (Carnívoro), contribuyeron con porcentajes variables menores al 15 % a la abundancia total (**Tabla 49**). En el análisis gráfico para noviembre del 2020, una correlación de Spearman ( $r = 0,5$ ) mostró que *A. dufresnii* estuvo mayormente asociado a la totalidad de la estructura comunitaria de sitios de micro-escala, mientras que *Metridium* sp. y *M. gregaria*, aparecen más asociados a cultivos en comunidades de meso y macro-escala (**Figura 101A**). En marzo del 2021, *A. dufresnii*, *H. godefroyii* y los erizos *L. albus* y *P. magellanicus* mostraron mayor asociación con sitios de macro-escala (Spearman,  $r = 0,25$ ). *M. gregaria* mostró mayor asociación con la comunidad bajo cultivos de micro-escala y la comunidad de referencia para sitios de meso y micro-escala (**Figura 101B**).

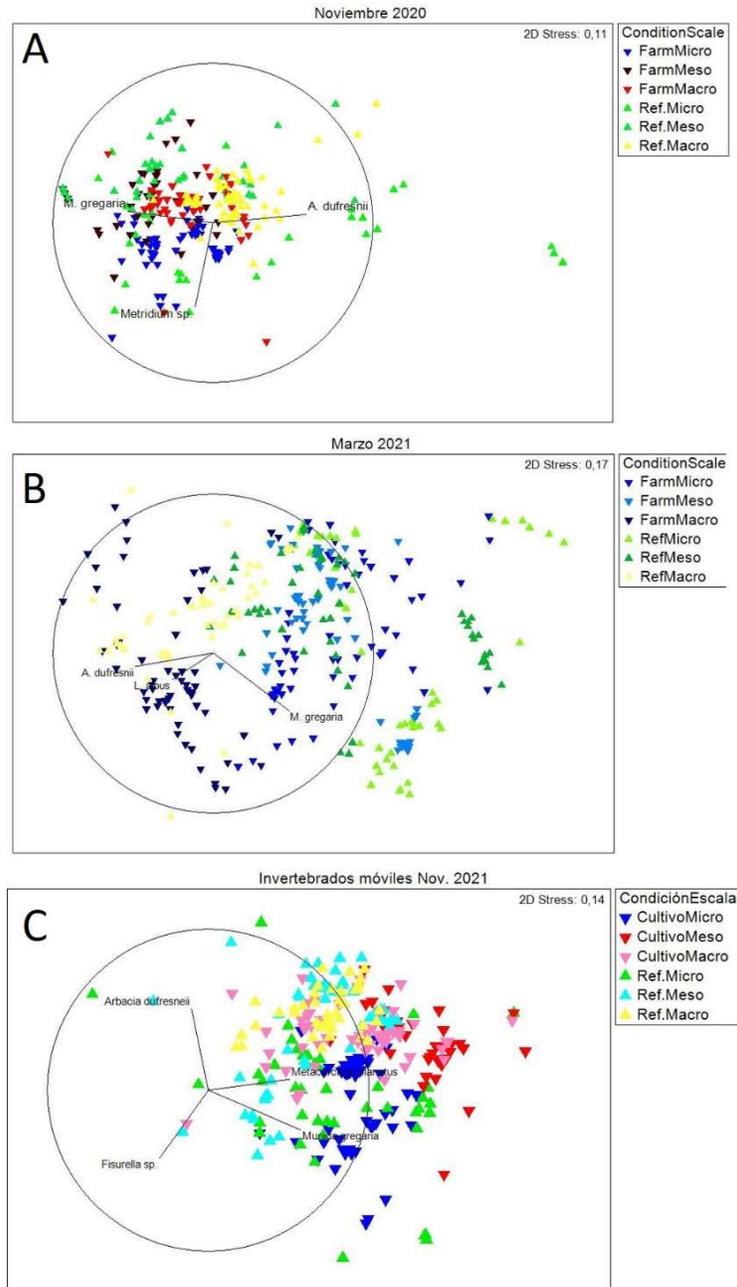
**Tabla 48.**

Resumen análisis de ANOVA permutacional de las comunidades de cultivo y sus sitios de referencia bajo tres escalas de cultivo.

	Fuente de variación	Móviles			Sésiles		
		g.l.	F	p	g.l.	F	p
Nov. 2020	Condición	1	1,49	0,13	1	15,9	<0.01
	Escala (Condición)	4	14,6	<0.01	4	9,92	<0.01
Marzo 2021	Condición	1	0,57	0,47	1	0,64	0,57
	Escala (Condición)	4	30,88	<0.01	4	8,45	<0.01
Nov. 2021	Condición	1	25,31	<0.01	1	3,56	<0.01
	Escala (Condición)	4	14,23	<0.01	4	7,71	<0.01



### Móviles/ Individuales



**Figura 101.** Ordenación de Escalamiento Multidimensional (nMDS) de la comunidad de invertebrados móviles/individuales bajo cultivos de micro, meso y macro-escala y sus respectivos sitios de referencia. A) noviembre 2020, B) marzo 2021, y C) noviembre 2021. Vectores indican correlaciones de Spearman ( $r = 0,5$ ) con las especies que explican mejor la ordenación de las estructuras comunitarias. El círculo indica una correlación  $r = 1$ .



**Tabla 49.**

Abundancia promedio (ind. 0,25 m<sup>-2</sup>) y contribución a la similaridad por grupo de las especies más conspicuas (i.e. especies que alcanzan >90% de la similaridad dentro de grupos para cada grupo, distinguibles >5% entre la similaridad total de cada comunidad).

	Grupo	Especies	Abundancia promedio	Similaridad promedio	Sim/SD	Contribución (%)	Acumulado (%)
Nov. 2020	Cultivo	M. gregaria	1,23	15,65	0,72	66,82	66,82
		A. dufresnii	0,61	3,70	0,38	15,82	82,64
		Metridium sp.	0,45	1,31	0,20	5,58	88,22
		L. albus	0,65	0,84	0,17	3,59	91,81
	Ref.	A. dufresnii	0,84	6,72	0,39	67,39	67,39
		M. gregaria	0,44	1,36	0,19	13,63	81,01
		A. Chilense	0,11	0,22	0,07	2,18	83,19
		N. gayii	0,17	0,21	0,08	2,09	85,27
		M. gelatinosus	0,13	0,20	0,07	2,01	87,29
		B. aureus	0,06	0,20	0,05	1,98	89,26
		Fissurella sp.	0,13	0,18	0,09	1,79	91,05
Nov. 2021	Cultivo	M. gregaria	1,36	10,57	0,62	47,79	47,79
		A. dufresnii	0,93	6,17	0,51	27,92	75,71
		P. magellanicus	1,07	1,80	0,25	8,14	83,85
		M. edwardsii	0,25	1,34	0,19	6,08	89,92
		L. albus	0,32	0,61	0,19	2,74	92,67
	Ref.	Metridium sp.	0,39	0,58	0,14	2,62	95,29
		A. dufresnii	0,97	12,21	0,59	72,60	72,60
		Fissurella sp.	0,24	0,95	0,19	5,63	78,23
		L. albus	0,29	0,82	0,15	4,90	83,13
		M. gregaria	0,22	0,59	0,15	3,50	86,63
		P. magellanicus	0,30	0,47	0,13	2,79	89,42
		T. atra	0,18	0,44	0,11	2,61	92,03
		H. godeffroyi	0,22	0,43	0,13	2,55	94,58
		G. flaklandica	0,13	0,31	0,09	1,83	96,41
Marzo 2021	Cultivo	M. gregaria	1,59	14,36	0,63	59,91	59,91
		A. dufresnii	0,86	6,70	0,44	27,95	87,86
		P. magellanicus	1,12	1,47	0,21	6,12	93,98
	Ref.	A. dufresnii	0,96	7,79	0,42	50,20	50,20
		M. gregaria	0,93	6,61	0,39	42,63	92,83

### Invertebrados Sésiles/coloniales

La estructura comunitaria de invertebrados sésiles/coloniales mostró diferencias significativas durante todas las campañas de muestreo entre sitios cultivados y de referencia exceptuando marzo del 2021 (**Tabla 48**). Sin embargo, las diferencias fueron consistentes al comparar las escalas de cultivo y sus sitios de referencia ( $p(\text{PERM}) < 0,01$ , **Tabla 50**). El análisis *a posteriori* de similitudes promedio del factor Condición x Escala mostró que las diferencias estuvieron dadas por la comunidad sésil de sitios de cultivo de micro-escala y sitios de referencia de todas las escalas. Pero, la diferencia máxima se



observó entre los sitios de referencia de micro y meso-escala. El porcentaje de similitud entre grupos (Análisis SIMPER, **Tabla 50**) mostró que el alga verde *Ulva* spp. dominó en sitios de cultivo contribuyendo con entre un 60 – 80% de la abundancia total. Adicionalmente, especies como *M. pyrifer*, *Desmarestia* sp., esponjas marinas y algas crustosas rosadas (e.g. *Lithothamnion* spp.) fueron componentes relevantes bajo los cultivos siempre con porcentajes menores al 10%. Por otro lado, los sitios de referencia mostraron patrones similares en la abundancia de las mismas especies. Las especies mejor correlacionadas con la distribución total de datos comunitarios de todos los sitios se observa en la **Figura 102A, B y C**.

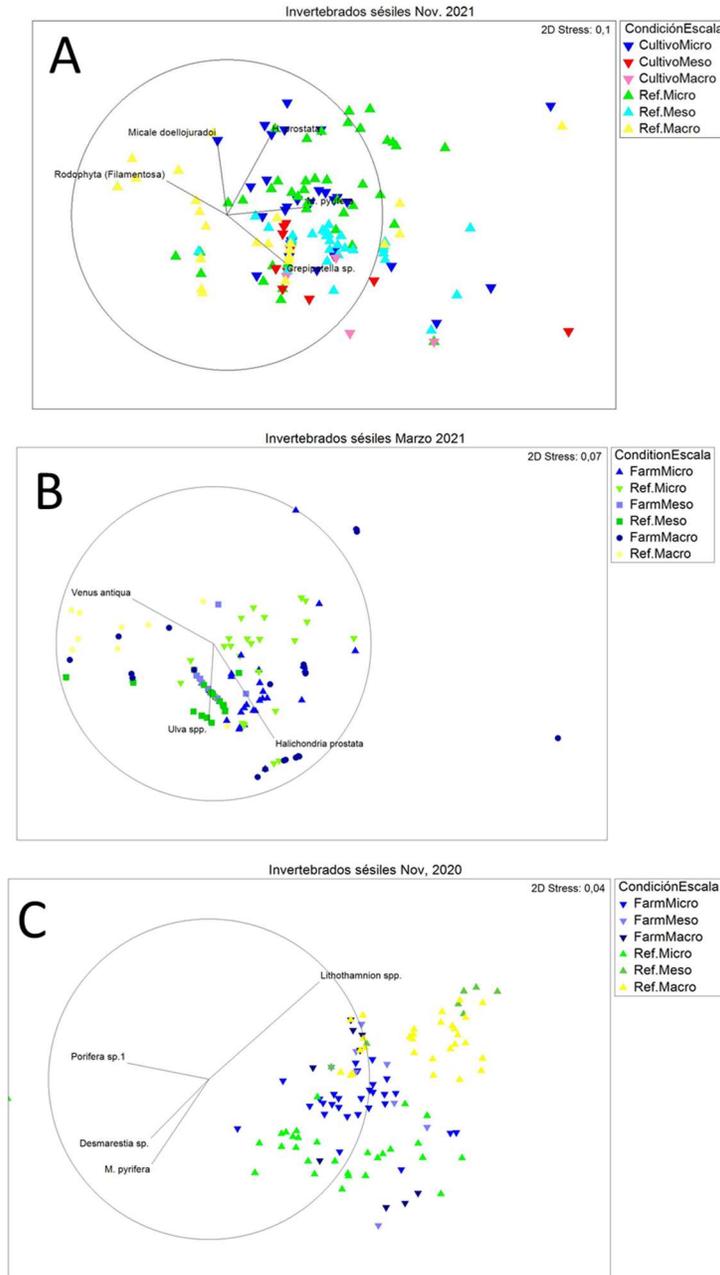
**Tabla 50.**

Abundancia promedio (indv. 0,25 m<sup>-2</sup>) y contribución a la similaridad por grupo de las especies más conspicuas (i.e. especies que alcanzan >90% de la similaridad dentro de grupos para cada grupo, distinguibles >5% entre la similaridad total de cada comunidad).

	Grupos	Especies	Abundancia promedio	Similaridad promedio	Sim/SD	Contribución (%)	Acumulado (%)
Nov. 2020	Cultivo	<i>Ulva</i> spp.	0,92	3,39	0,27	67,85	67,85
		Porifera sp.1	0,70	0,92	0,10	18,38	86,23
		<i>M. pyrifer</i>	0,32	0,30	0,09	5,92	92,14
	Ref.	<i>Lithothamnion</i> spp.	0,65	2,87	0,22	59,42	59,42
		<i>Ulva</i> spp.	0,38	0,73	0,12	15,12	74,54
		<i>M. pyrifer</i>	0,44	0,48	0,12	9,90	84,44
		<i>Desmarestia</i> sp.	0,32	0,28	0,08	5,77	90,20
Nov. 2021	Cultivo	<i>Ulva</i> spp.	0,75	3,41	0,26	79,98	79,98
		Micale doellojuradoi	0,33	0,40	0,10	9,45	89,42
		<i>M. pyrifer</i>	0,25	0,18	0,07	4,29	93,72
		<i>Crepidatella</i> sp.	0,05	0,10	0,04	2,23	95,95
	Ref.	<i>Ulva</i> spp.	1,25	5,22	0,35	63,83	63,83
		<i>M. pyrifer</i>	0,80	1,49	0,18	18,24	82,07
		<i>H. prostata</i>	0,45	0,47	0,12	5,76	87,83
		<i>Lithothamnion</i> spp.	0,36	0,46	0,10	5,60	93,43
		Rhodophyta (Filamentosa)	0,17	0,13	0,05	1,62	95,05
Marzo 2021	Cultivo	<i>Ulva</i> spp.	1,00	4,45	0,28	76,49	76,49
		<i>M. pyrifer</i>	0,37	0,58	0,10	9,90	86,39
		<i>H. prostata</i>	0,48	0,55	0,10	9,39	95,78
	Ref.	<i>Ulva</i> spp.	0,88	4,99	0,30	87,38	87,38
		Esponja sp.3	0,25	0,26	0,08	4,54	91,92



## Sésiles/ Coloniales



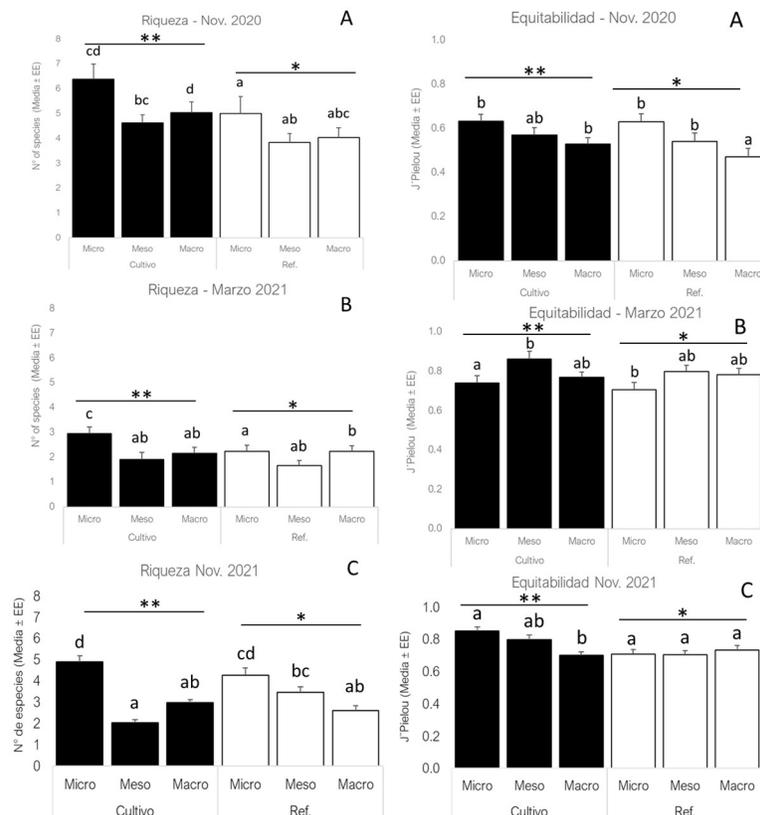
**Figura 102.** Ordenación de Escalamiento Multidimensional (MDS) de la comunidad de invertebrados sésiles/coloniales bajo cultivos de micro, meso y macro-escala y sus respectivos sitios de referencia. A) noviembre 2020, B) marzo 2021, y C) noviembre 2021. Vectores indican correlaciones de Spearman ( $r = 0,5$ ) con las especies que explican mejor la ordenación de las estructuras comunitarias. El círculo indica una correlación  $r = 1$ .



#### 5.8.6.4. Análisis univariados. Diversidad

Un resumen del análisis entre sitios de cultivo y referencia por escalas, se muestra en la **Tabla 51**. La riqueza y la equitatividad total de la megafauna epibentónica fue, generalmente, significativamente menor en hábitats de referencia en todas las campañas (**Figura 103**), pero mostrando, además, diferencias significativas entre escalas de cultivo (**Tabla 51**). El análisis *a posteriori* de los datos agrupados según Condición x Escala, reveló que la riqueza en sitios de micro-escala fue siempre mayor, mostrado en promedio una riqueza de ~ 1.5 especies/0,25 m<sup>2</sup> más que cultivos de mayor escala y sitios de referencia (**Figura 103A, B y C**, panel izquierdo). Este efecto fue más pronunciado en la campaña de noviembre del 2021 (> 2 especies).

En términos de equitatividad, la proporción de individuos de cada especie a lo largo de todas las muestras, mostró valores mínimos en sitios de referencia de micro-escala, particularmente, en marzo del 2021, así como, en sitios de cultivo de macro-escala (**Figura 103A y B**, panel derecho). Pero en general, la equitatividad de las comunidades estudiadas fue alta con valores > 0.6 (índice J' Pielou's) y no existió significancia entre cultivos y sitios de referencia sólo en marzo del 2021.



**Figura 103.** Riqueza (Panel Izquierdo) y Equitatividad (Panel Derecho) promedio (± EE) de especies de megafauna epibentónica (Mitílicos excluidos) en sitios de acuicultura de micro, meso y macro-escala. (\*) indican diferencias entre cultivo y referencia. Letras indican diferencias entre grupos de sitios en cada escala (HSD Tukey).



**Tabla 51.**

Resumen análisis de ANOVA anidado sobre la riqueza (N° de especies) y equitatividad (J' Pielou) entre comunidades bajo cultivos de mitílidos y sus sitios de referencia en tres escalas de cultivo.

	Fuente de variación	Riqueza			Equitatividad (J' Pielou's)		
		g.l.	F	p	g.l.	F	p
Nov. 2020	Condición	1	44,7	0,13	1	4,9	<b>0.02</b>
	Escala (Condición)	4	5	<b>&lt;0.01</b>	4	6,7	<b>&lt;0.01</b>
Marzo 2021	Condición	1	25,7	0,47	1	0,37	0,54
	Escala (Condición)	4	11,5	<b>&lt;0.01</b>	4	4,5	<b>&lt;0.01</b>
Nov. 2021	Condición	1	0,07	0,78	1	10,7	<b>&lt;0.01</b>
	Escala (Condición)	4	20,1	<b>&lt;0.01</b>	4	5,5	<b>&lt;0.01</b>

#### 5.8.6.5. Infauna

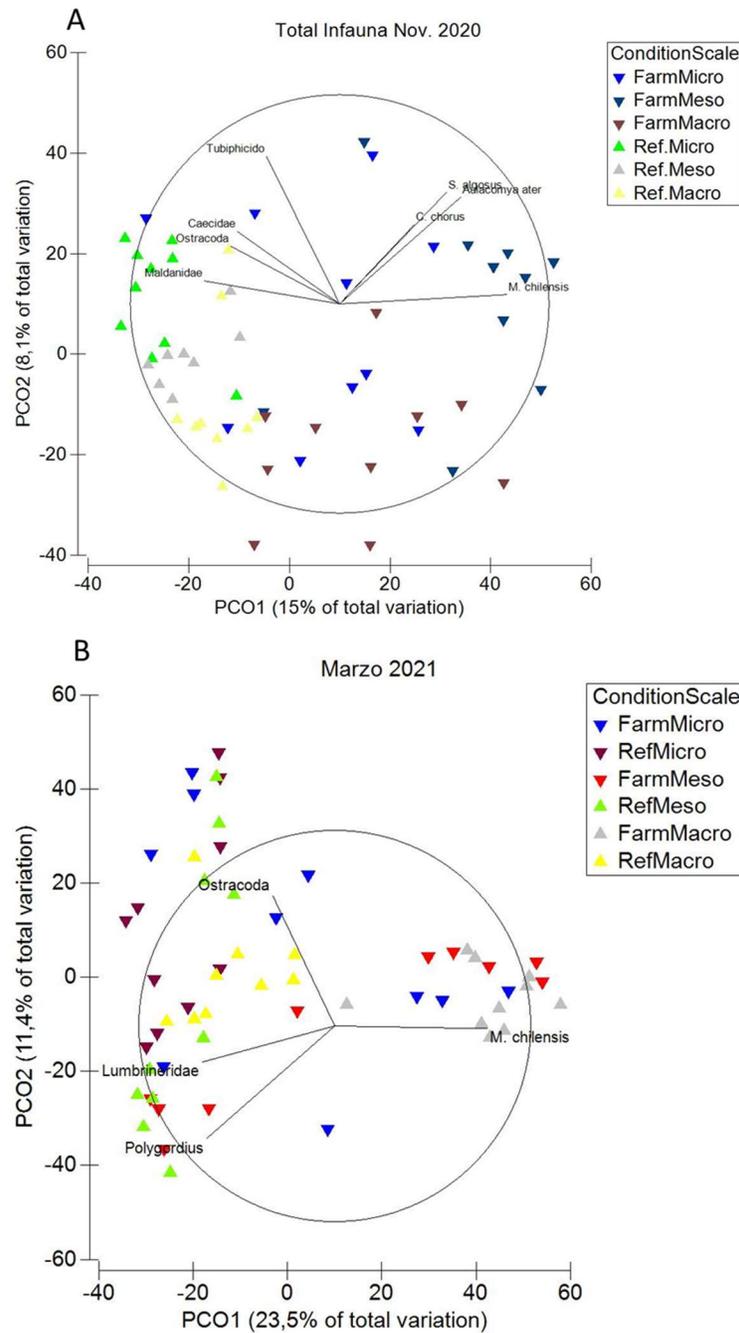
La estructura comunitaria de la Infauna mostró amplia variabilidad en ambas campañas (**Figura 104A y B**), lo cual se observó en los modelos de ordenación de componentes principales (PCO), los cuales, explicaron sólo entre 23% y 35 %, respectivamente. Sin embargo, tanto la condición y las escalas de cultivo mostraron diferencias significativas en ambas temporadas (**Tabla 52**). A su vez, el análisis de similaridad promedio, indicó que la estructura comunitaria de los sitios de micro y meso-escala fueron más similares entre sí que sitios de macro-escala.

Las especies que explicaron mejor la estructura de las comunidades muestreadas (Spearman,  $r = 0,7$ ), fueron oligoquetos de la familia Tubiphicidae asociados a sitios de micro y meso-escala, así como, juveniles ( $< 1\text{mm}$ ) de *Semimytilus algosus*, *A. atra* y *M. chilensis* (**Figura 104A**), principalmente en sitios de cultivo. La comunidad tampoco mostró una relación clara en marzo del 2021, pero juveniles de ( $< 1\text{mm}$ ) de *M. chilensis* aparecieron frecuentemente en las comunidades de sitios bajo los cultivos de meso y macro-escala, incluyendo el sitio de referencia de ésta última.

**Tabla 52.**

Resumen análisis de ANOVA permutacional de las comunidades de infauna bajo cultivos y sus sitios de referencia bajo tres escalas de cultivo.

	Fuente de variación	g.l.	F	p
Nov. 2020	Condición	1	7	<b>&lt;0.01</b>
	Escala (Condición)	4	2,76	<b>&lt;0.01</b>
Marzo 2021	Condición	1	8,5	<b>&lt;0.01</b>
	Escala (Condición)	4	2,9	<b>&lt;0.01</b>



**Figura 104.** Ordenaci3n de Escalamiento Multidimensional (MDS) de la comunidad de infauna en sitios de micro, meso y macro-escala de acuicultura de mitilidos. A) noviembre del 2020, B) marzo del 2021. Vectores indican una correlaci3n de Spearman ( $r = 0,7$ ) con las especies que explican mejor la ordenaci3n espacial de datos. El c3rculo indica una correlaci3n  $r = 1$ .

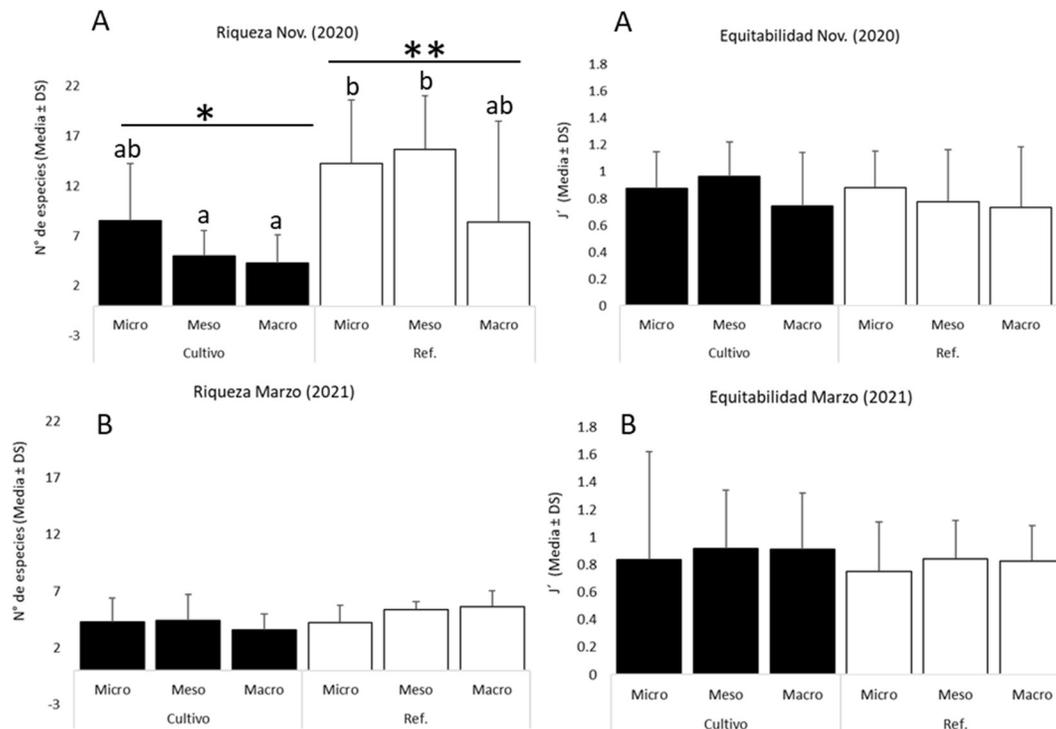


La riqueza de organismos de la infauna mostró diferencias estacionales, con mayor riqueza en noviembre del 2020, donde se evidenció, además, efectos significativos del cultivo y las escalas de cada sitio (**Tabla 53**). El número de especies fue significativamente menor en cultivos de macro y meso-escala (HDS Tukey, Factor Condición x Escala), con una riqueza ~40% menor (**Figura 105A**, panel izquierdo). No existieron efectos significativos en el resto de los parámetros. La equidad de especies (J Pielou's) en cada temporada, no mostró diferencias significativas (**Tabla 53**).

**Tabla 53.**

Resumen análisis de ANOVA anidado sobre la riqueza (N° de especies) y equitatividad (J Pielou's) entre comunidades de infauna en tres escalas de cultivo de mitilidos y sus respectivos sitios de referencia.

			Riqueza			Equitatividad (J' Pielou's)		
	Fuente de variación	g.l.	F	p	g.l.	F	p	
Nov. 2020	Condición	1	18,24	<0.01	1	0,01	0,9	
	Escala (Condición)	4	2,5	0,04	4	1,3	0,09	
Marzo 2021	Condición	1	2,7	0,07	1	2,5	0,1	
	Escala (Condición)	4	1,1	0,33	4	0,3	0,8	

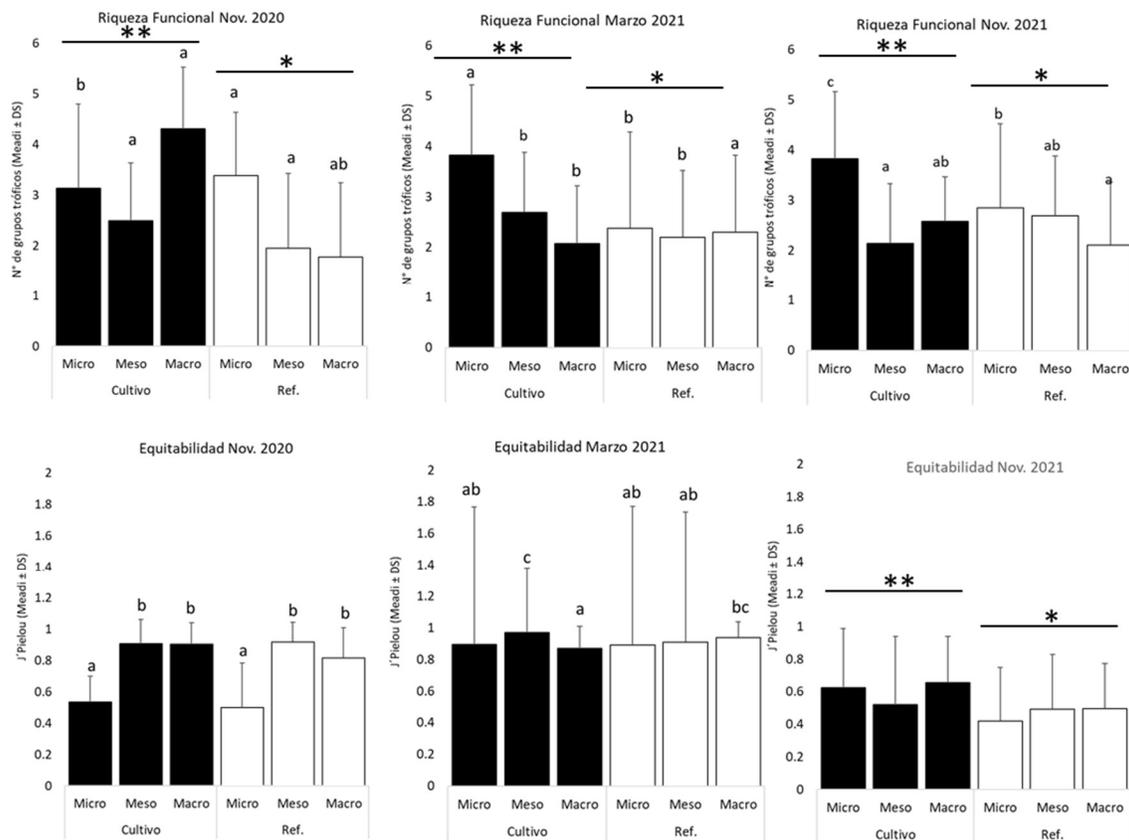


**Figura 105.** Riqueza y equitatividad en comunidades de infauna bajo mitiliculturas de micro, meso y macro-escala y sus respectivos sitios de referencia. (\*) indican efectos en la Riqueza (A y B izquierda) y Equitatividad (A y B Derecha) del cultivo. Letras minúsculas indican diferencias entre medias (HSD Tukey) de las escalas de cultivo en cada sitio de referencia.



### 5.8.6.6. Riqueza funcional megafauna epibent3nica

El n3mero de funciones particulares de cada especie en un sitio dado influyen como operan los ecosistemas a nivel local, este n3mero de funciones o riqueza funcional total (RF) mostr3 ser significativamente mayor en presencia de acuicultura en todas las campa1as de muestreo (**Figura 106**, panel superior). As3 mismo, el an3lisis *a posteriori*, evidenci3, que, excepto durante noviembre del 2020, las diferencias estuvieron dadas por una mayor RF bajo cultivos de micro-escala. En estos casos existieron ~2 funciones m3s en las comunidades bajo cultivos de peque1a escala comparado con cultivos mayores y sus sitios de referencia. De manera excepcional, existieron hasta ~3 funciones m3s en las comunidades bajo cultivos de macro-escala en noviembre del 2021. Sin embargo, en el resto de los casos el valor de RF fue similar a la de sitios de referencia. En t3rminos de equitatividad funcional las diferencias estuvieron dadas por variaciones locales dentro de cada sitio (**Figura 106**, panel inferior), mostrando valores similares en todas las campa1as de muestreo. Los valores de significancia de estos an3lisis aparecen en la **Tabla 54**.



**Figura 106.** Riqueza total promedio ( $\pm$  DS) de funciones tr3ficas bajo cultivos de micro, meso y macro-escala y respectivos sitios de referencia. (\*) indican efectos significativos del cultivo sobre la Riqueza (panel superior) y Equitatividad (panel inferior). Letras indican diferencias entre las medias (HSD Tukey) de cada sitio de cultivo y referencia.

**Tabla 54.**

Resumen análisis de ANOVA anidado (Escala (Condición)) del número de grupos funcionales (Función trófica) y equitatividad (J Pielou's) entre comunidades de megafauna epibentónica en tres escalas de cultivo de mitílidos y sus sitios de referencia.

	Fuente de variación	Riqueza Funcional			Equitatividad (J' Pielou's)		
		g.l.	F	$\rho$	g.l.	F	$\rho$
Nov. 2020	Condición	1	7,68	<0,01	1	3.157	0,07
	Escala (Condición)	4	5,56	<0,01	4	66.384	<0,01
Marzo 2021	Condición	1	16,17	<0,01	1	<0,006	0,94
	Escala (Condición)	4	8,26	<0,01	4	7.735	<0,01
Nov. 2021	Condición	1	4,98	0,02	1	10.552	<0,01
	Escala (Condición)	4	16,88	<0,01	4	1.428	0.22

La respuesta del número relativo de especies de cada grupo funcional ante la presencia de cultivos de mitílidos se muestra en las **Figuras 107, 108 y 109**. De un total de 103 especies identificadas, 8 grupos tróficos fueron determinados (para detalles de asociación trófica ver **Sección 5.7.3**). Las especies de mitílidos fueron omitidos del grupo de Suspensivos/filtradores para facilitar la interpretación del efecto del cultivo.

Los resultados muestran un efecto marcado del cultivo en grupos de especies clave para el ecosistema. Las comunidades bajo los cultivos presentan consistentemente una o más especies de cangrejos depredadores como: *M. edwardsii* (*Jaiba peluda*), *M. gregaria* (*Camarón de los canales*), *C. plebejus* (*Jaiba reina*), *Taliepus dentatus* (*Panchote*) *Eurypodius latreillei* (*Araña de mar*), *Peltarion spinulosum*, *Pagurus edwardsii* (*Cangrejo Ermitaño pequeño*), entre otros. Todas estas especies son depredadores omnívoros con tendencia a la carroña (especialmente *M. gregaria*), según análisis de contenido estomacal disponibles en la literatura (León & Stotz 2004).

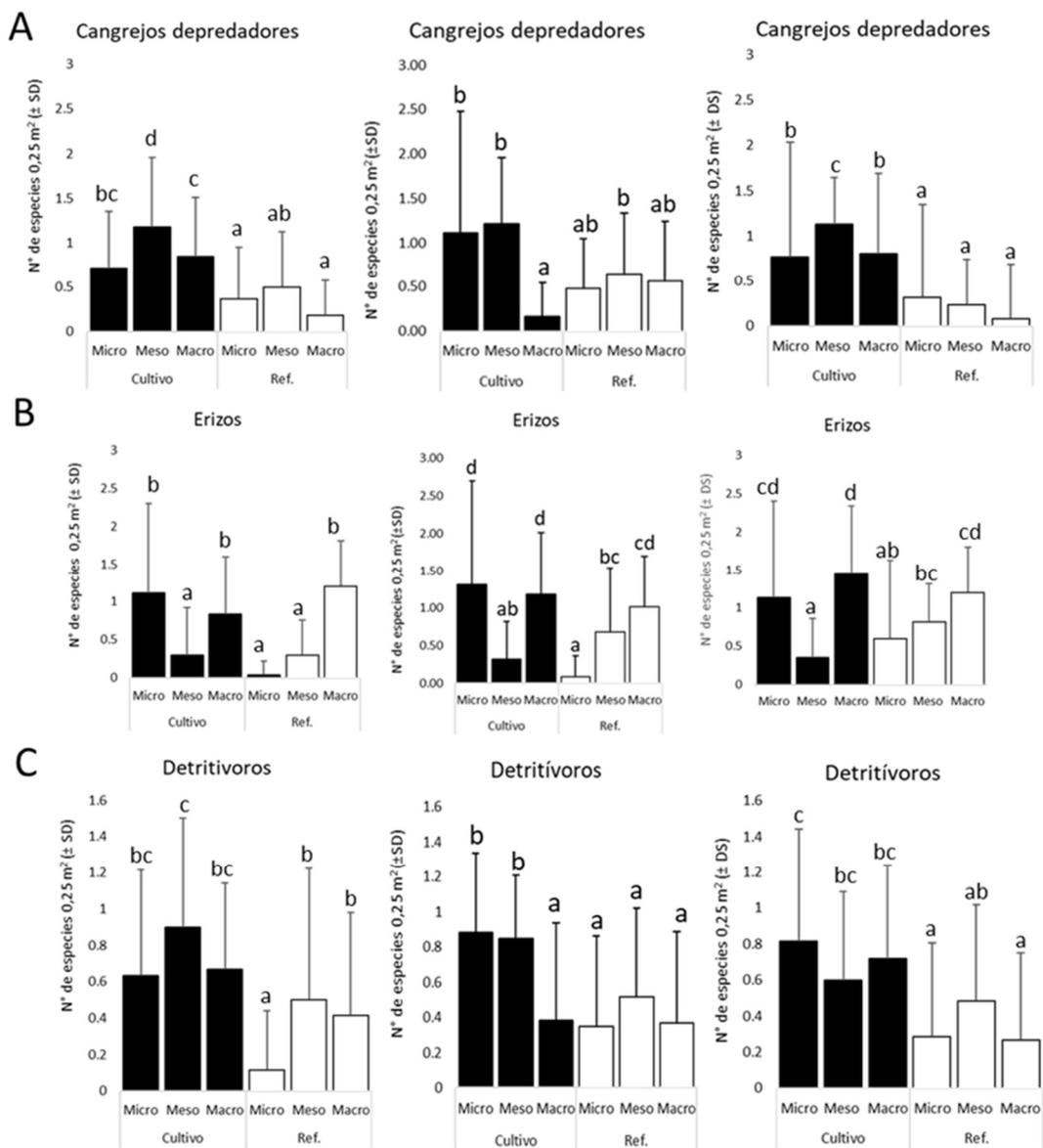
Similarmente, el grupo de erizos (*L. albus*, *A. dufresnii* y *P. magellanicus*) aparece consistentemente asociados a bancos emergentes bajo los cultivos, donde es posible observar a las 3 especies. Esto fue particularmente evidente en cultivos de micro y macro escala (**Figura 107B**). En hábitats de referencia el valor de RF para los erizos parece disminuir a la mitad de la observada bajo cultivos.

Los detritívoros como *H. godeffroyi*, *Nassarius gayii* y especies de briozoos también aumentaron su frecuencia bajo sitios de cultivo, donde existió al menos el doble de especies comparado con sitios de referencia (**Figura 107C**). Valores máximos de riqueza funcional fueron observados en sitios de microescala (**Figuras 107, 108 y 109**).

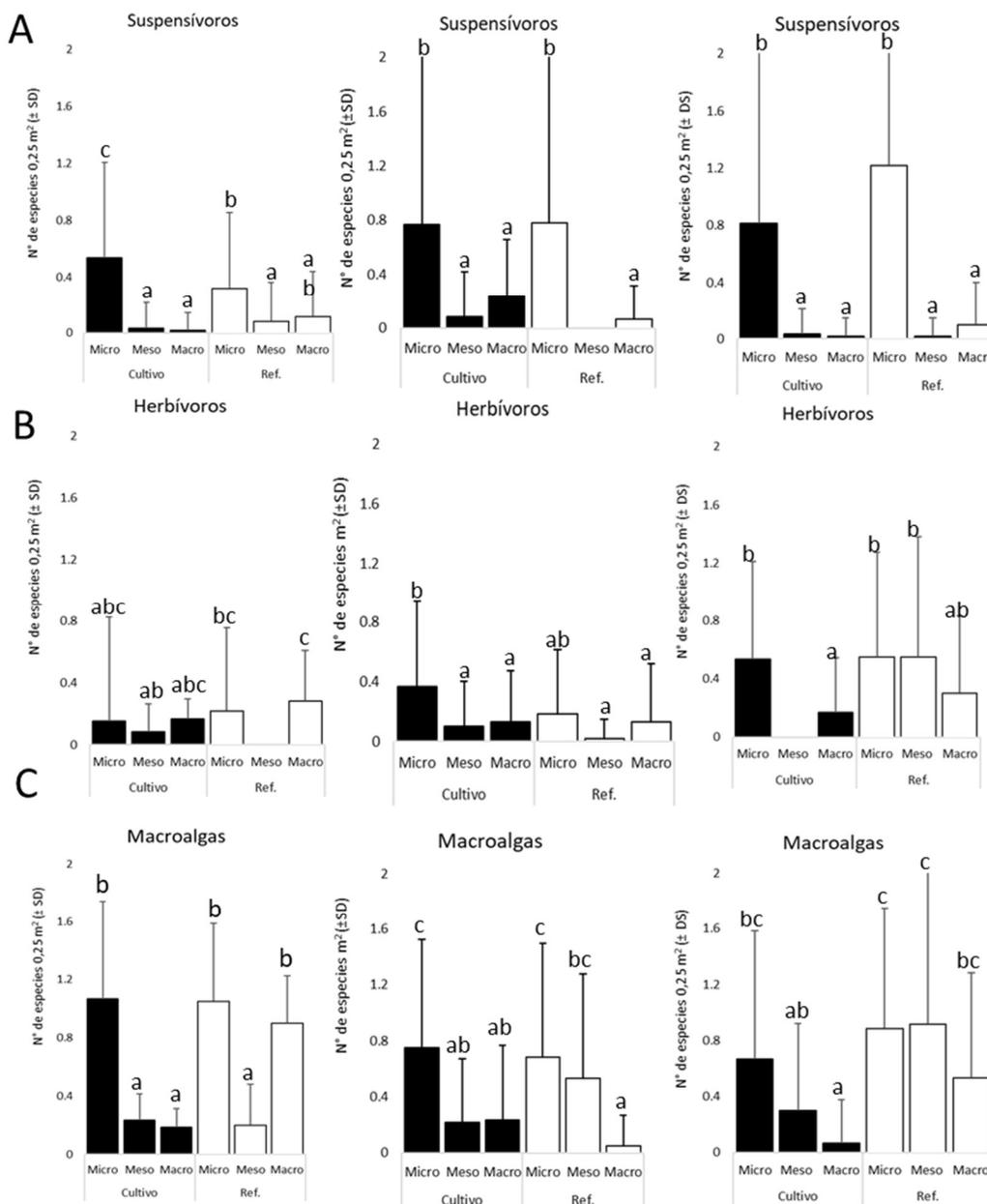
Por otro lado, suspensívoros (i.e., esponjas marinas como: *Halichondria prostata*, *Mycala doellojuradoi*, *Leucatis nuda*, *Cliona chilensis* además del tunicado *P. chilensis*) parecieron responder a efectos ambientales sitio-específicos de los cultivos de micro escala, pero, mostrando un fuerte patrón local (**Figura 108A**). El resto de los sitios mostraron indistintamente valores bajos, lo que puede evidenciar menor abundancia de estas especies en otros sitios (Efecto local). Por otro lado, el grupo de herbívoros ramoneadores (e.g., *Fisurella* spp., *Fisurellidae patagonica*, *Tegula atra*, Chitones, *Crepidatella* spp., entre otros) tampoco mostró una preferencia clara por hábitats bajo los cultivos mostrando amplia variabilidad, con marcadas respuestas locales dentro de sitios (**Figura 108B**). Por



otro lado, si bien los sitios de meso escala presentaron mayor profundidad (> 15 m), sitios de micro y macro escala se encuentran alrededor de los 10 m, donde las macroalgas (grupo principal de productores primarios bentónicos) mostró una mayor riqueza de especies bajo cultivos de pequeña escala, contrastando, con los sitios de mayor escala.



**Figura 107.** Riqueza promedio ( $\pm$  DS) de grupos funcionales. A) Cangrejos depredadores, B) Erizos, y C) Detritívoros, en noviembre 2020, marzo 2021 y noviembre 2021 en sitios de cultivo de micro, meso y macro-escala y respectivos sitios de referencia. Letras muestran las diferencias de medias entre sitios (HSD Tukey).

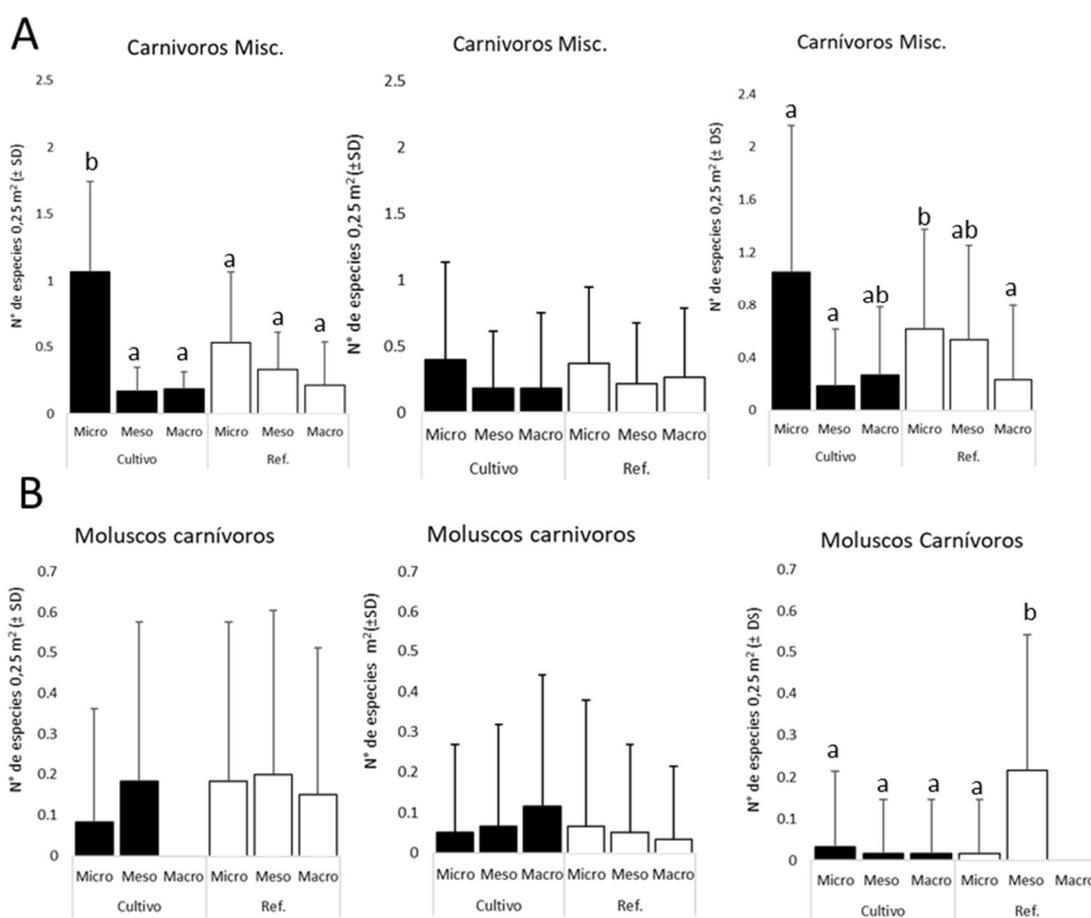


**Figura 108.** Riqueza promedio ( $\pm$  DS) de grupos funcionales. A) Suspensivos, B) Herbívoros, y C) Macroalgas, en noviembre 2020, marzo 2021 y noviembre 2021 en sitios de cultivo de micro, meso y macro-escala y respectivos sitios de referencia. Letras muestran las diferencias de medias entre sitios (HSD Tukey).

El grupo de carnívoros misceláneos que incluyó a peces crípticos (e.g., *Helcogrammoides cunninghami*), gremios de nudibranquios, estrellas de mar y anémonas carnívoras (*Anthothoe*



*chilensis*, *Metridium* sp.), parecen responder localmente a sitios con cultivo a micro-escala, generalmente con valores de riqueza funcional hasta seis veces mayor que en otros sitios, incluyendo sitios de referencia, los cuales mostraron riqueza variable. Los sitios de mayor pobreza funcional correspondieron a cultivos de meso y macro-escala (**Figura 109A**). Finalmente, el grupo de los moluscos carn3voros que incluy3 especies de nudibranquios, gastr3podos muricidos y vol3tidos (*Chorus giganteus*, *Fusitron cancellatus*, *Adelomelon ancilla*, etc.) y cefal3podos (*Robsonella fontaini*, *Enteroctopus megalocyanthus* y *Semirroslia patag3nica*) mostr3 amplia variabilidad entre sitios, pero, fueron generalmente escasos en todos los sitios de muestreo, desapareciendo del muestreo en noviembre del 2020 particularmente los sitios de macro-escala (**Figura 109B**).

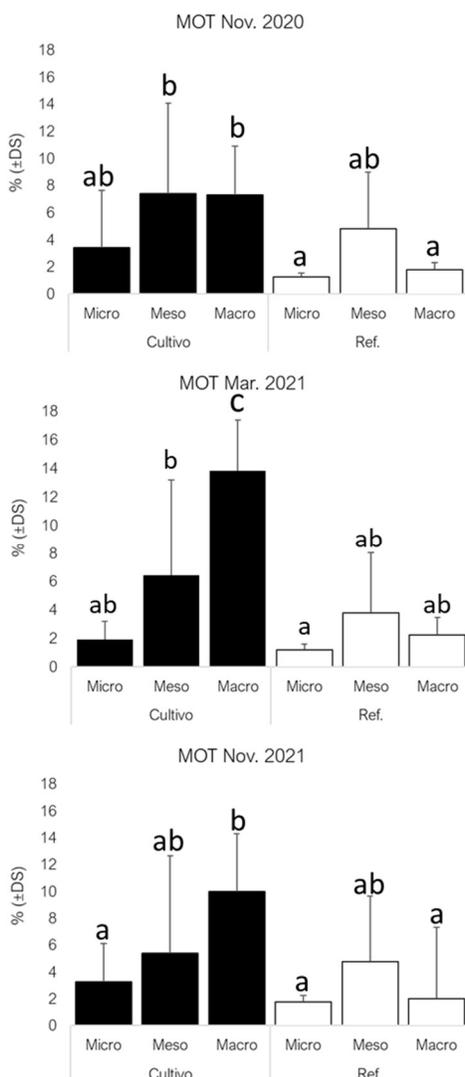


**Figura 109.** Riqueza promedio ( $\pm$  DS) de grupos funcionales. A) Carn3voros miscel3neos y B) Moluscos carn3voros, en noviembre 2020, marzo 2021 y noviembre 2021 en sitios de cultivo de micro, meso y macro-escala y respectivos sitios de referencia. Letras muestran las diferencias de medias entre sitios (HSD Tukey).



### 5.8.6.7. Parámetros químicos del sedimento

La materia orgánica total (MOT) en el sedimento, en promedio, mostr3 valores similares entre todos los sitios de referencia y micro-escala (< 9%, MOT RAMA), mientras que los sitios de cultivo a meso y macro-escala fueron más altos, pero, con mayor variabilidad (**Figura 110**), no existiendo diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (**Tabla 55**). Los valores promedio altos fueron observados en sitios de meso-escala oscilando alrededor de la norma (~9% MOT, RAMA). Valores máximos fueron registrados en dos temporadas y sitios de macro-escala, los cuales excedieron la norma (**Figura 110**).



**Figura 110.** Materia orgánica total (MOT) promedio (± DS) bajo sitios de cultivo y respectivos sitios de referencia en noviembre 2020 (arriba), marzo 2021 (centro) y noviembre 2022 (abajo). Letras muestran diferencias entre medias (HSD Tukey).

**Tabla 55.**

Resumen análisis de ANOVA anidado (Escala (Condición)) del porcentaje de materia orgánica total del sedimento en cultivos de micro, meso y macro-escala y respectivos sitios de referencia.

		Materia Orgánica		
	Fuente de variación	g.l.	F	p
Noviembre 2020	Condición	1	0,007	0,9
	Escala (Condición)	4	0,2	0,79
Marzo 2021	Condición	1	0,1	0,7
	Escala (Condición)	4	0,2	0,8
Noviembre 2021	Condición	1	0,16	0,3
	Escala (Condición)	4	1,29	0,2

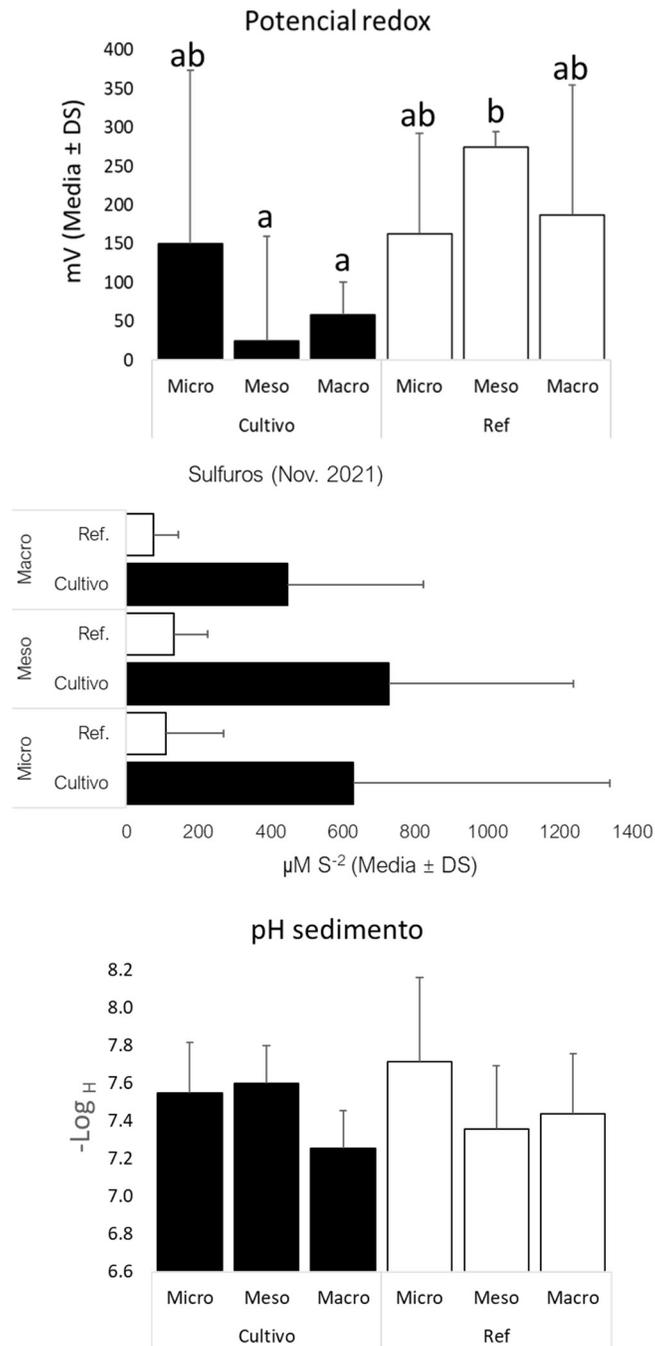
El comportamiento de variables adicionales que explican el estado ecológico del sedimento como Redox, Sulfuro y pH se muestran en la **Figura 111**. El único parámetro que mostró diferencias significativas fue el potencial Redox, el cual, evidenció efectos significativos del cultivo y las escalas de producción (**Tabla 56**). Los valores promedio en sitios de referencia estuvieron entre ~200 – 350 mV, lo cual indica sedimentos oxigenados, lo que promueve comunidades no perturbadas (i.e., > 100 mV = aceptable, RAMA). Bajo sitios de cultivo, valores cercanos a sitios de referencia fueron observados particularmente en sitios de micro-escala. Promedios ~50 mV, en sitios de meso y macro-escala (y alcanzando valores negativos en algunas muestras) indicaron sedimentos en estado de transición (hipoxia leve – ligeramente perturbados).

A pesar de mostrar una marcada tendencia a obtener concentraciones más altas bajo cultivos, los sulfuros, con máximos ~ 1400  $\mu\text{M}$  (cultivos) y ~ 200 – 300  $\mu\text{M}$  (referencias), todos los sitios permanecieron dentro de rangos aceptables (< 1500  $\mu\text{M S}^{-2}$ ), no existiendo diferencias significativas entre tratamientos (**Tabla 56**). El pH tampoco varió significativamente (**Tabla 56**) con niveles promedio, generalmente, aceptables (i.e.,  $-\text{Log}_{10} > 7,5$ ). Sitios de macro-escala mostraron valores < 7,5, lo que indica sedimentos en estado de transición. En general el pH no fue menor a 7, que indica el límite para sedimentos impactados negativamente. Para referencias sobre niveles de aceptabilidad ambiental de todos los parámetros ver “Estudio del desempeño ambiental de la acuicultura en Chile y su efecto en los ecosistemas de emplazamiento” (IFOP, agosto 2021).

**Tabla 56.**

Resumen análisis de ANOVA anidado (Escala (Condición)) para Redox, Sulfuros totales y pH del sedimento en cultivos de micro, meso y macro-escala y respectivos sitios de referencia en noviembre del 2021.

	Fuente de variación (Nov. 2021)	g.l.	F	p
Redox	Condición	1	13,4	<0,01
	Escala (Condición)	4	3,6	0,038
Sulfuros	Condición	1	2,5	0,12
	Escala (Condición)	4	1,8	1,7
pH	Condición	1	0,15	0,69
	Escala (Condición)	4	3,55	0,09

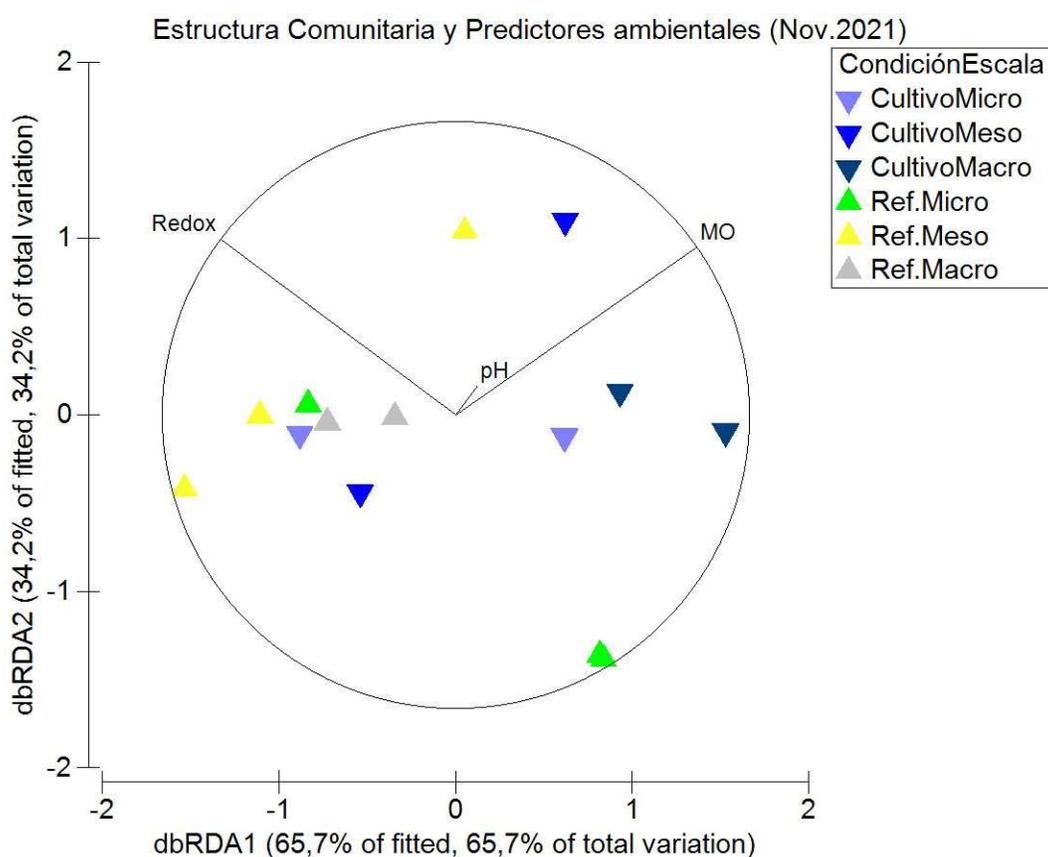


**Figura 111.** Potencial Redox (mV), Sulfuros ( $\mu\text{m}$ ) y pH promedio ( $\pm$  DS) del sedimento en sitios de cultivo y referencias en noviembre 2021. Letras muestran diferencias entre medias (HSD Tukey).



Finalmente, un an3lisis de redundancia basado en distancia multivariada que correlaciona la distribuci3n comunitaria promedio vs par3metros qu3micos del sedimento (**Figura 112**) muestra que los valores de MOT se correlacionan con la estructura comunitaria de sitios de meso y macro-escala, y el potencial redox con sitios de referencia (Pearson  $p = 0,7$ ).

Adem3s, la estructura de la comunidad en algunos sitios de cultivo de micro y meso-escala muestra una mayor asociaci3n comunitaria (similitud multivariada) con sitios de referencia (**Figura 112**). El pH y los sulfuros tuvieron efectos m3nimos en las distribuciones de datos comunitarios. El modelo explica el 99,9 % de la variaci3n observada.



**Figura 112.** An3lisis de redundancia basado en distancia multivariada (dbRDA) entre la comunidad de epifauna bent3nica promedio en sitios de micro, meso y macro-escala de acuicultura de mit3lidos y respectivos par3metros qu3micos del fondo en noviembre del 2021. Vectores indican una correlaci3n de Spearman ( $r = 0,7$ ). El c3rculo indica una correlaci3n  $r = 1$



## 5.9. Identificaci3n de servicios ecosist3micos asociadas a la APE

### 5.9.1. Servicios ecosist3micos, planificaci3n y manejo ambiental y productivo

Aproximaciones de planificaci3n y manejo ambiental sist3micas, como el manejo o enfoque ecosist3mico aplicado a las costas, las pesquerías o acuicultura, corresponden a instancias basadas en el lugar o regi3n que consideran el ecosistema completo y las conexiones entre sus diferentes componentes, incluyendo las conexiones entre los sistemas sociales y naturales (i.e., sistemas socio-ecol3gicos acoplados), y que se focalizan en mantener al ecosistema en una condici3n saludable, productiva y resiliente para que pueda proporcionar los servicios que los humanos quieren y necesitan (McLeod & Leslie 2009, Brugère et al. 2019) (**Figura 113**).

El concepto de manejo ecosist3mico est3 fundamentado en la idea que los humanos manejan las actividades humanas que afectan a los ecosistemas m3s que a los ecosistemas mismos. De esta forma, para promover la sostenibilidad ambiental y la provisi3n de beneficios socio-econ3micos se requiere de la incorporaci3n efectiva de informaci3n científica que permita entender las compensaciones (i.e., *trade-offs*) entre servicios ecosist3micos y actividades humanas (Granek et al. 2010, Lester et al. 2013, Cust3dio et al. 2020).

Respecto a la acuicultura, el enfoque ecosist3mico se ha definido como una estrategia para su integraci3n dentro de un ecosistema m3s amplio, de manera que promueva el desarrollo sostenible, la equidad y la resiliencia de los sistemas socio-ecol3gicos interrelacionados (Brugère et al. 2019). El enfoque ecosist3mico de la acuicultura se gui3 por tres principios estrat3gicos:

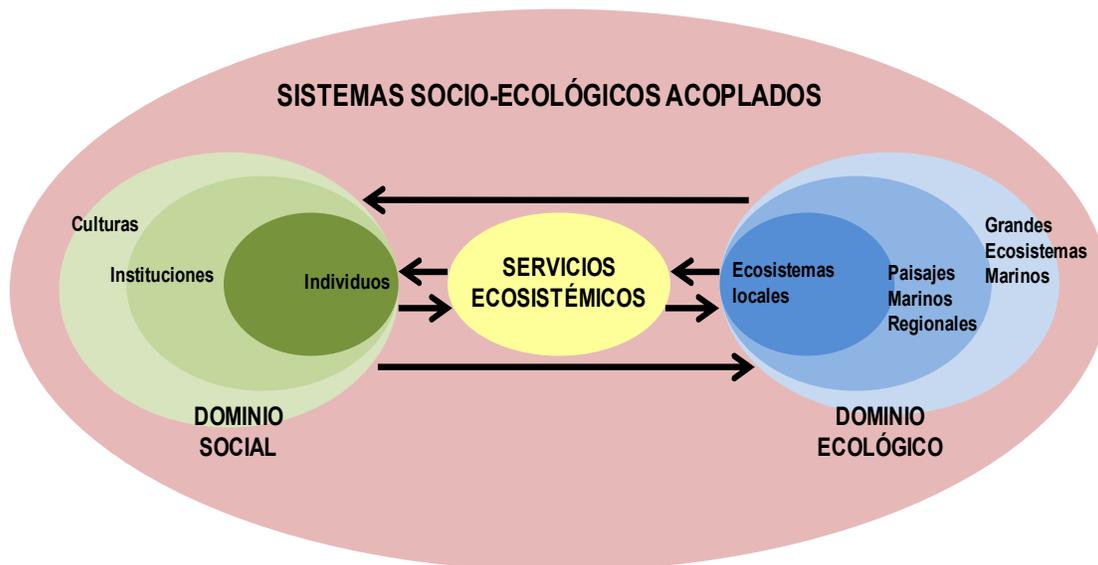
1. Su desarrollo y manejo debe considerar la gama completa de funciones y servicios ecosist3micos y no debe amenazar la provisi3n sostenida de éstos.
2. La acuicultura debería mejorar el bienestar humano y la equidad para todos los actores sociales interesados y pertinentes (i.e., stakeholders).
3. La acuicultura debe desarrollarse en el contexto de otros sectores, políticas y metas, seg3n corresponda.

De manera general, los servicios ecosist3micos se han definido como los beneficios que las poblaciones humanas obtienen directa o indirectamente desde las funciones ecosist3micas (Costanza et al. 1997, MEA 2005), involucrando todos los dominios de la sociedad humana, desde la supervivencia individual al desarrollo de la economía mundial (Cust3dio et al. 2020).

El uso del concepto servicios ecosist3micos es promovido como un enfoque que permite integrar las dimensiones ecol3gicas y socio-econ3micas de una manera útil para la toma de decisiones (MEA 2005, Farber et al. 2006, Tallis et al. 2010). Utilizar el concepto de servicios ecosist3micos proporciona un lenguaje com3n a los diferentes actores sociales interesados y puede facilitar comparaciones entre alternativas de manejo (Granek et al. 2010, Cust3dio et al. 2020). Focalizar el manejo en servicios ecosist3micos m3s que en el funcionamiento del ecosistema per se permite reconocer y dar cuenta de los factores físicos, ecol3gicos y sociales que afectan la producci3n y provisi3n de éstos (McLeod & Leslie 2009). La evaluaci3n de servicios ecosist3micos puede involucrar an3lisis cualitativos y



cuantitativos, desde una representaci3n conceptual de c3mo las actividades humanas dependen y afectan los ecosistemas hasta la cuantificaci3n del valor monetario de servicios particulares (Tallis et al. 2010, Alleway et al. 2019, Cust3dio et al. 2020).



**Figura 113.** Diferentes interacciones existentes entre sistemas humanos y sistemas ecol3gicos reconocidas en el manejo ecosist3mico. Los dominios social y ecol3gico pueden interactuar a diferentes escalas organizacionales y geogr3ficas, siendo la comprensi3n de las conexiones, a trav3s de los diferentes dominios y escalas, cr3tica para la implementaci3n y 3xito a largo plazo de iniciativas de MBE. Los servicios ecosist3micos representan una conexi3n clave entre los dominios y su flujo, es afectado tanto por factores ecol3gicos como sociales (Figura modificada a partir de McLeod & Leslie 2009).

En la 3ltima d3cada, se ha promovida fuertemente avanzar hacia una Planificaci3n Espacial Marina y Costera (PEMC), incorporando totalmente al componente bio-f3sico de un ecosistema marino las superposiciones socio-econ3micas, jurisdiccionales y de gobernanza, las que pueden ser muy informativa para la designaci3n y emplazamiento de usos marinos costeros y para el manejo de actividades que mantengan o restauren ecosistemas saludables, permitiendo la provisi3n de servicios ecosist3micos y un uso sustentable de los recursos marinos (Foley et al. 2010, Lester et al. 2013, Sanz-Lazaro & Sanchez-Jerez 2020, Venier et al. 2021).

### 5.9.2. Servicios ecosist3micos asociados a ecosistemas marinos y costeros

Los ecosistemas marinos y costeros proporcionan una gran variedad de bienes y servicios que son esenciales para la mantenci3n del bienestar de nuestra sociedad (MEA 2005, Beaumont et al. 2007). Presiones antropog3nicas como la sobreexplotaci3n pesquera, la p3rdida de h3bitat y biodiversidad y la contaminaci3n acu3tica (MEA 2005, Worm et al. 2006, Halpern et al. 2008), que sumadas a la



vulnerabilidad de los ecosistemas al cambio climático (Hoegh-Guldberg & Bruno 2010, Doney et al. 2011), impactan directa o indirectamente su funcionamiento y la capacidad de proveer servicios. Diversos autores han identificado y descrito bienes y servicios ecosistémicos proporcionados por ecosistemas marinos y costeros (**Tabla 57**). Para el caso de Chile, se puede mencionar los servicios identificados por diversos actores sociales en un área candidata a ser declarada área marina costera protegida de múltiples usos (AMCP-MU) en el norte de Chile (**Tabla 58**) (Cárcamo et al. 2014).

**Tabla 57.**

Principales bienes y servicios ecosistémicos comúnmente identificados en ecosistemas marinos y costeros (De Groot et al. 2002, MEA 2005, Beaumont et al. 2007, Liqueste et al. 2013, Hasselström et al. 2018).

Categoría	Bien o servicio ecosistémico
Servicios de soporte o hábitat	Ciclo biogeoquímico o de nutrientes Producción primaria Dinámica trama trófica Hábitat Resiliencia
Servicios de aprovisionamiento	Provisión de alimento Provisión y almacenamiento de agua Materias primas Recursos ornamentales Recursos genéticos Biocombustibles
Servicios de regulación	Regulación climática y atmosférica Retención de sedimentos Regulación de la eutroficación Biorremediación Purificación del agua Protección costera
Servicios culturales	Valores estéticos y simbólicos Recreación y turismo Efectos cognitivos Herencia cultural y natural



**Tabla 58.**

Bienes y servicios ecosistémicos identificados para área costera en el norte de Chile (Adaptado de Cárcamo et al. 2014).

Categoría	Bien o servicio ecosistémico	Descripción
Soporte o hábitat	Hábitat para especies carismáticas	Área donde viven, se alimentan y se reproducen especies como delfines nariz de botella, pingüinos de Humboldt, nutrias y lobos marinos, entre otros.
	Hábitat para especies migratorias	Área de tránsito y alimentación de especies migratorias como ballenas y aves marinas
	Bosques de huiro	Huirales proporcionan la estructura física para diversas comunidades submareales, incluidas especies comerciales.
	Áreas de desove y crianza	Área con altas densidades de larvas y reclutamiento de especies marinas comerciales
Aprovisionamiento	Caladeros de pesca	Área altamente productiva en términos de abundancia de peces y mariscos comerciales
	Alimentos marinos	Peces y mariscos son consumidos como alimento por las comunidades locales humanas.
	Acuicultura	Área apta para el desarrollo de acuicultura
Cultural	Educación ambiental	Área donde se pueden desarrollar actividades y programas de educación ambiental
	Avistamiento de vida silvestre	Área con buenas condiciones para el avistamiento permanente o estacional de vida silvestre
	Investigación científica	Área relevante para el desarrollo de la investigación científica
	Turismo y recreación	Área con buenas condiciones para el desarrollo de actividades turísticas como camping, gastronomía, complejos de cabañas, canotaje, caminatas, uso recreativo de playas, entre otras.
	Buceo	Área con buenas condiciones para el desarrollo de buceo recreativo
	Valor paisajístico	Área con gran valor paisajístico para desarrollo residencial costero

### 5.9.3. Acuicultura y servicios ecosistémicos

Asociado al funcionamiento de la acuicultura, en los últimos años, diferentes autores han realizado esfuerzos por identificar y caracterizar servicios ecosistémicos y cómo éstos podrían ser considerados e incorporados en el manejo y gestión de la acuicultura (Ferreira & Bricker 2016, Alleway et al. 2019, Weitzman 2019, Willot et al. 2019, Gentry et al. 2020, van der Schatte Olivier et al. 2020). En la **Tabla 59** se muestran los bienes y servicios ecosistémicos frecuentemente identificados como proporcionados por la actividad de acuicultura.



**Tabla 59.**

Bienes y servicios ecosistémicos frecuentemente asociados al funcionamiento de la acuicultura (Basado en Smaal et al. 2018, Alleway et al. 2019, Aubin et al. 2019, Custódio et al. 2020, Gentry et al. 2020, van der Schatte Olivier et al. 2020, Barrett et al. 2022).

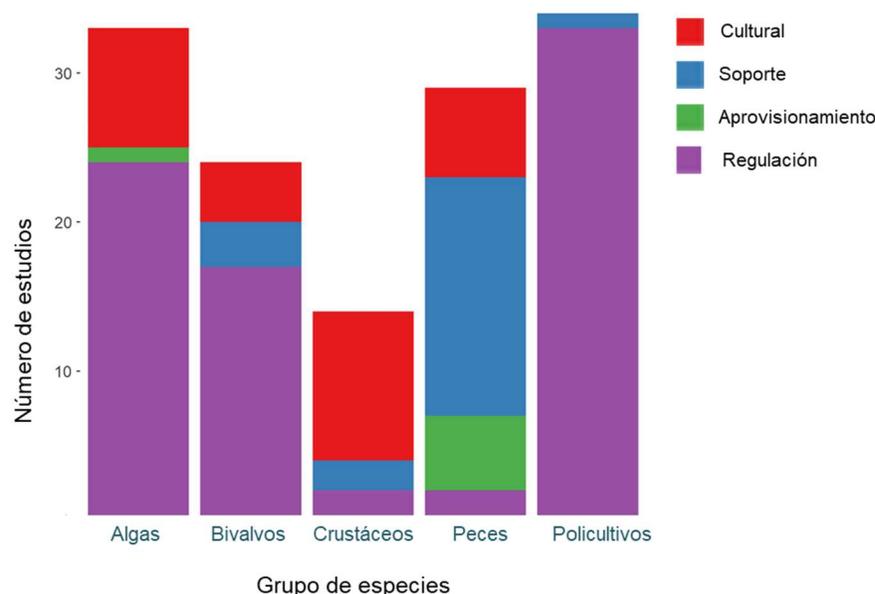
Categoría	Bien o servicio ecosistémico	Descripción	Tipo(s) de cultivo asociados
Soporte o hábitat	Provisión de hábitat	Estructuras y organismos en cultivos pueden actuar como nuevos refugios o hábitats (artificiales) para diversas especies no cultivadas	Bivalvos, peces, otros invertebrados
	Zonas de alimentación	Especies silvestres se pueden alimentar en áreas de cultivo de los organismos cultivados y/o el biofouling	Bivalvos, peces, otros invertebrados
	Diversidad genética	Acuicultura puede contribuir a aumentar la diversidad genética en poblaciones silvestres genéticamente limitadas	Bivalvos, peces, otros invertebrados
Aprovisionamiento	Provisión directa de alimento	Producción de acuicultura es destinada a consumo humano	Bivalvos, peces, algas, otros invertebrados
	Provisión de productos no alimenticios	Producción de acuicultura es destinada a otros usos (e.g., industriales, cosméticos, agrícolas, farmacéuticos, medicinales, ornamentales)	Bivalvos, peces, algas, otros invertebrados
	Aumento desembarques de pesca	La acuicultura proporciona indirectamente hábitat y enriquecimiento orgánico para especies silvestres objetos de pesca	Bivalvos, peces, algas, otros invertebrados
Regulación	Secuestro y almacenamiento de carbono	Producto de procesos fisiológicos naturales, organismos en cultivo capturan, secuestran, almacenan carbono	Bivalvos, algas
	Regulación de la acidificación	Producto de procesos fisiológicos naturales, organismos en cultivo pueden regular acidificación oceánica	Algas
	Protección costera/atenuación del oleaje	Cultivos pueden modificar la hidrodinámica de los sitios, disminuyendo eventualmente la energía que impacta la costa y estabilizando sedimentos	Bivalvos, peces, algas
	Biorremediación y remoción de nutrientes	Producto de procesos fisiológicos naturales, organismos en cultivo capturan y remueven nutrientes y fitoplancton	Bivalvos, algas



	Mejoramiento de la claridad del agua	Producto de procesos fisiológicos naturales, organismos en cultivo disminuyen la turbidez del agua	Bivalvos, algas
Cultural	Medios de vida o subsistencia (i.e., livelihoods)	Acuicultura constituye o contribuye al sustento económico de numerosas personas y comunidades	Bivalvos, peces, algas, otros invertebrados
	Turismo y recreación	Acuicultura puede ser un medio o contribuir al desarrollo de nuevas actividades turísticas y recreativas	Bivalvos, peces, algas, otros invertebrados
	Investigación científica	Acuicultura permite el desarrollo de actividades científicas (e.g., experimentos)	Bivalvos, peces, algas, otros invertebrados
	Educación	Acuicultura permite el desarrollo de actividades educativas	Bivalvos, peces, algas, otros invertebrados
	Estilo de vida y sentido del lugar	La participación directa en acuicultura o el consumo de organismos cultivados localmente puede aumentar la conexión con el medio ambiente.	Bivalvos, peces, algas, otros invertebrados
	Simbolismos culturales	Especies en cultivo o su acuicultura son simbólicas para algunas culturas	Bivalvos, peces, algas, otros invertebrados

Una revisión reciente de Gentry et al. (2020), encontró que de 129 estudios sobre servicios ecosistémicos proporcionados por la acuicultura, más del 50 % correspondieron a servicios de regulación, siendo el 75 % de éstos, remoción de nutrientes. El segundo servicio más estudiado fue el de medios de vida (22% de los estudios). En contraste, la claridad del agua, la protección costera y el turismo fueron cubiertos cada uno por el 3% o menos de los estudios incluidos. Entre los grupos o taxones, el cultivo de algas y lo policultivos son los más estudiados, y principalmente se orientaron al estudio de los servicios de regulación (**Figura 114**).

Es importante destacar que la magnitud y características de los servicios ecosistémicos proporcionados serán variables, afectados y/o dependientes de las características particulares de la actividad de acuicultura (e.g., escala productiva, especies en cultivo, sistema de cultivo) y el contexto en el que ella se desarrolla (e.g., sistema ecológico, sistema físico, capacidad de carga del sistema). De esta forma, la salud del ecosistema donde se desarrolla acuicultura será clave para la provisión de servicios por parte de ésta. Por otro lado, ecosistemas degradados pueden representar oportunidades para que la acuicultura tenga un mayor efecto, por ejemplo, recuperación de hábitat por pérdida de sustrato. Consecuentemente, numerosos factores y a diferentes escalas, pueden fuertemente influenciar la dirección (i.e., si la acuicultura, finalmente, proporciona efectos netos positivos o negativos sobre los servicios ecosistémicos) y magnitud de los servicios ecosistémicos proporcionados por la acuicultura (Lester et al. 2013, Outeiro & Villasante 2013, Alleway et al. 2019, Gentry et al. 2020). En la **Tabla 60** se muestran algunos factores y procesos que pueden influenciar la provisión de servicios ecosistémicos desde la acuicultura.



**Figura 114.** Estudios que demuestran la provisi3n de servicios ecosistémicos por grupo de especies: algas, bivalvos, crustáceos, peces y policultivos (Traducido de Gentry et al. 2020).

**Tabla 60.**

Ejemplos de factores y procesos abi3ticos y bi3ticos, a trav3s de sucesivas escalas de ecosistemas, que podr3an influir en la capacidad de diferentes tipos de acuicultura para proporcionar servicios ecosistémicos (basado en Alleway et al. 2019, Gentry et al. 2020).

Factores/ procesos	Escala local (< 1 km)	Escala regional (2 - 20 km)	Escala biogeogr3fica (> 20 km)
Abi3ticos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• M3todo, infraestructura, y equipamiento de cultivo</li> <li>• Cultivo extensivo o intensivo</li> <li>• Características hidrodinámicas locales (e.g., velocidad y direcci3n de corrientes, amplitud de mareas, exposici3n al oleaje)</li> <li>• Profundidad del cultivo</li> <li>• Tipo de fondo o sedimento</li> <li>• Parámetros y rangos de calidad y química del agua (e.g., pH, oxígeno, nitr3geno, f3sforo, di3xido de carbono, turbidez)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Características hidrodinámicas regionales (e.g., escala fiordo, bahía)</li> <li>• Rangos de temperatura y salinidad del agua</li> <li>• Patrones meteorol3gicos (e.g., r3gimen de precipitaciones, direcci3n predominante del viento)</li> <li>• Distancia entre cultivos y/o densidad de operaciones de acuicultura</li> <li>• Distancia y magnitud de descarga de fuentes de nutrientes y contaminantes</li> <li>• Parámetros y rangos de calidad y química del agua (e.g., pH, oxígeno,</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Calificaci3n tr3fica del ecosistema (e.g., oligotr3fico, eutr3fico, hipertr3fico)</li> <li>• Aportes antropogénicos adicionales (e.g., escorrentía terrestre, aportes de estuarios o deltas)</li> <li>• Rangos de temperatura y salinidad del agua</li> <li>• Patrones meteorol3gicos (e.g., r3gimen de precipitaciones, direcci3n predominante del viento)</li> <li>• Vulnerabilidad a perturbaciones climáticas</li> </ul>



	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo de hábitat utilizado en el cultivo (e.g., columna de agua o suspendido, de fondo o bentónico, intermareal)</li> </ul>	nitrógeno, fósforo, dióxido de carbono, turbidez) <ul style="list-style-type: none"> <li>• Irradiación solar (particularmente para algas marinas)</li> </ul>	(e.g., acidificación y calentamiento oceánico) <ul style="list-style-type: none"> <li>• Irradiación solar (particularmente para algas marinas)</li> </ul>
Bióticos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Densidad del cultivo</li> <li>• Co-cultivo e interacción con múltiples especies</li> <li>• Tipo de hábitat bentónico</li> <li>• Estructura de la comunidad bentónica y biodiversidad</li> <li>• Vías de diseminación de patógenos</li> <li>• Presencia de plagas marinas y vías de diseminación</li> <li>• Disponibilidad de fitoplancton (bivalvos)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prevalencia de enfermedades y parásitos</li> <li>• Estado reproductivo del stock (potencialmente o no reproductivo)</li> <li>• Distancia a los hábitats naturales</li> <li>• Distancia a hábitats críticos o sensibles, áreas de relevancia para la biodiversidad o áreas protegidas</li> <li>• Biodiversidad regional y uso de sustrato duro</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cultivo de especies endémicas o asilvestradas</li> <li>• Estado poblacional de los recursos pesqueros o cosechables silvestres existentes</li> <li>• Estado de conservación del hábitat costero y la biodiversidad existente</li> </ul>

Las interacciones entre acuicultura y el medio ambiente son complejas y pueden originar una serie de compensaciones y/o sinergias entre varios servicios ecosistémicos, en los que algunos servicios se mejoran o aumentan su provisión, mientras que otros se reducen. De esta forma, el conocimiento de estas interacciones y cómo éstas pueden variar en diferentes contextos productivos, ambientales, espaciales, temporales será esencial para el desarrollo sostenible de la actividad y la implementación del enfoque ecosistémico. Existe umbrales o puntos aún poco explorados en los que los efectos netos sobre los servicios ecosistémicos pueden pasar de positivos a negativos (Barrett et al. 2019, Gentry et al. 2020, Lacoste et al. 2020). Por ejemplo, mientras que a densidades de cultivo y tamaños de granjas de cultivo medios-bajas, los efectos positivos de los moluscos bivalvos en la claridad del agua y la eliminación de nutrientes pueden aumentar con la densidad de cultivo, a densidades o tamaños de granja grandes o industriales, la relación posiblemente se vuelva negativa a medida que la producción de desechos aumenta (Gentry et al. 2020). Para que se evalúen tales compensaciones y la dependencia del contexto ambiental y de cultivo (e.g., densidades y especies en cultivo, tecnologías), es fundamental que el trabajo futuro articule estas condiciones en los sitios de estudio. Además, los estudios deberían ir más allá de las evaluaciones sitio específicos de servicios ecosistémicos individuales, orientándose a evaluar una gama de bienes y servicios y su interacción (Alleway et al. 2019, Custódio et al. 2020, Gentry et al. 2020).

#### 5.9.4. Identificación de servicios ecosistémicos en la APE en Chile

Para el caso de los servicios ecosistémicos proporcionados por la acuicultura de pequeña escala en Chile, no hay mayores antecedentes en la literatura nacional e internacional. Sin embargo, se puede mencionar el trabajo de Outeiro et al. (2015), donde se identifican las sinergias y compensaciones causadas por la salmonicultura en una variedad de servicios ecosistémicos, encontrándose que los



grandes beneficios económicos debido al aumento de los servicios de aprovisionamiento (i.e., provisión de alimento) también están provocando una reducción de los servicios culturales (e.g., valor o calidad paisajística) y de regulación (e.g., biorremediación y remoción de nutrientes).

En base a las características actuales que describen a la APE en Chile (e.g., principales especies o grupos en cultivo, escala productiva, sistemas de cultivo, y principales áreas de cultivo), además de las características de cultivos pilotos implementados en el presente Programa, se identificaron los siguientes servicios ecosistémicos, indicándose los alcances en su caracterización y conocimiento respecto a su provisión e interacción. Es importante destacar que la APE en Chile se basa principalmente en el cultivo de especies que no requieren la adición de alimento externo (i.e., acuicultura extensiva o acuicultura de bio-extracción).

#### 5.9.4.1. Servicios de soporte o hábitat

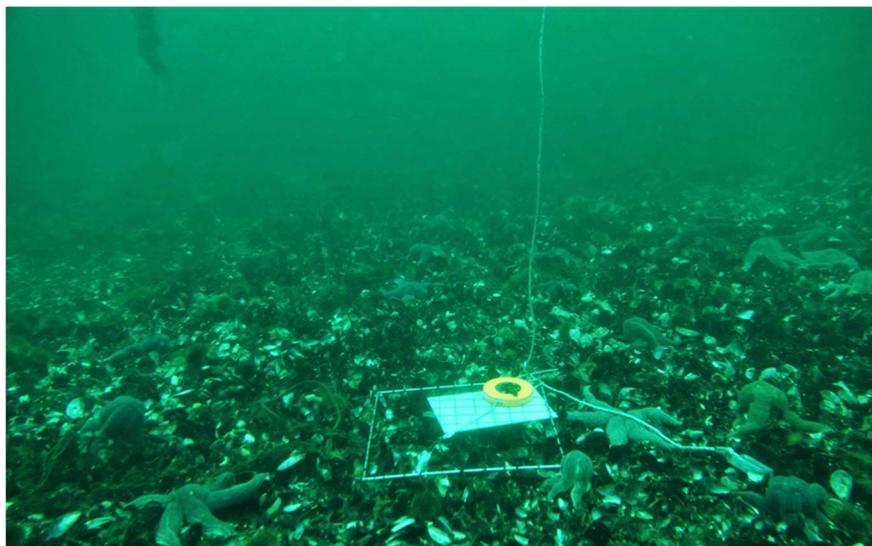
##### Provisión de hábitat

La infraestructura (e.g., linternas, líneas, sistemas de anclaje y flotación) y los organismos en cultivo proporcionan una estructura de hábitat tridimensional compleja que, en muchos sistemas, está asociada con un aumento de poblaciones de biota silvestre. Esto ha sido bastante reportado para cultivos de peces, pero en los últimos años también ha sido reportado internacionalmente en cultivos de algas y bivalvos (Hasselström et al. 2018, Callier et al. 2018, Theuerkauf et al. 2022, Corrigan et al. 2022). Si bien la acuicultura puede proporcionar hábitats, también puede alterar (negativamente) las dinámicas ecosistémicas, por ejemplo, cuando el cultivo o granja facilita la propagación de especies invasoras y transmisión de enfermedades (Gentry et al. 2020, Barrett et al. 2022), también para animales, principalmente vertebrados (e.g., aves y mamíferos marinos), existe un riesgo de mortalidad por atrapamiento, transformado a las granjas más bien en trampas ecológicas que en hábitats productivos (Callier et al. 2018, Barrett et al. 2019). Por otro lado también se ha reportado efectos repulsivos de fauna marina hacia las granjas (Callier et al. 2018)

En Chile y la APE este servicio ecosistémico ha sido escasamente reportado y estudiado. En el presente estudio Programa APE, se ha obtenido evidencia temprana de numerosas especies de biota, incluyendo de interés comercial, que cohabitan y se alimentan en las granjas, sin embargo, esto no ha sido mayormente cuantificado (**Figura 115**), a excepción de la formación de bancos emergentes asociados a cultivos de mitilidos (**Figura 116**). Para más detalles ver **Sección 5.8**.



**Figura 115.** Biodiversidad asociada a granjas de cultivo flotantes en el presente estudio. A) Cultivos de algas; B) Cultivos de bivalvos.



**Figura 116.** Banco emergente asociado a cultivos de mitílidos.



### Zonas de alimentación

Cultivos de algas y bivalvos corresponden a zonas de alta densidad de alimento potencial para numerosas especies, incluidas especies de interés comercial, y de exportación de nutrientes. Por ejemplo, se ha reportado alta abundancia de langostas en cultivos de mitílidos (Sardenne et al. 2019) y numerosas especies herbívoras alimentándose desde cultivos de algas (Corrigan et al. 2022). Adicionalmente, el biofouling y la producción de desechos orgánicos de los cultivos también constituye una fuente de alimento atractiva para especies silvestres (Callier et al. 2018, Gentry et al. 2020). En Chile y la APE este servicio ecosistémico ha sido escasamente reportado y estudiado. En el presente estudio Programa APE, también se ha observado este servicio ecosistémico, donde especies silvestres se alimentan directamente de los cultivos e incluso de organismos cultivados que se desprenden y caen al fondo marino. Para más detalles, ver **Sección 5.7 y 5.8**.

#### 5.9.4.2. Servicios de aprovisionamiento

##### Provisión directa de alimento

Este servicio corresponde al más evidente aportado por la acuicultura, que, en el caso de la APE en Chile, se orienta principalmente a la venta en mercados locales y hacia la exportación. Un estudio reciente (IFOP 2019), mostró un aumento en el consumo de productos del mar del año 2019 respecto al 2013, explicado principalmente por el aumento en el consumo de pescado. Si embargo, no hay mayor información respecto a los aportes de la acuicultura, y por otro lado se desconoce la magnitud de consumo como alimento de sus cosechas por parte de los cultivadores.

##### Provisión de productos no alimenticios

A excepción de los cultivos de pelillo, orientados a la producción de agar, la APE en Chile está orientada a la producción de alimento para consumo humano, con algunas otras excepciones que corresponden más bien a iniciativas experimentales o aisladas, como la producción de algas para alimentación de abalones y extracción de polisacáridos, o la producción de biocombustibles (Henríquez-Antipa & Cárcamo 2019).

Por otro lado, a nivel internacional se ha llamado la atención respecto a la producción y destino de las conchas de bivalvos de cultivo que ha aumentado significativamente en el mundo y en Chile, indicándose que la reutilización de las conchas puede ser un grave problema en términos de protección ambiental, pero también, una gran oportunidad en términos del desarrollo de la economía circular (Zhan et al. 2022). El componente principal de las conchas de moluscos es el carbonato de calcio, cuya estructura se basa, por ejemplo, en aragonita (mitílidos, almejas) o calcita (ostras) (Zhan et al. 2022). En los últimos años, se han reportado usos en aplicaciones en los campos de la agricultura, la construcción, la protección ambiental, la producción química, aditivos alimenticios y biomateriales (Morris et al. 2019, Zhan et al. 2022). De esta forma, ha cambiado el énfasis desde considerarse un desecho a un biomaterial de gran valor comercial. En Chile, si bien existe evidencia de uso ancestral de algas y mariscos con fines agrícolas (e.g., mejoramiento de suelos, abono para siembras), estos insumos provienen desde la pesca y recolección costera.



Asociado a la acuicultura se puede mencionar la implementación de plantas de proceso de conchas de mitílidos, que, en la actualidad, utilizan gran parte de las conchas de cultivos para la producción de cal agrícola. También se pueden mencionar algunos desarrollos experimentales para uso de las tónicas de piures de cultivo como insumos agrícolas.

### Aumento desembarques de pesca

Si bien se ha reportado la provisión de hábitat y alimento directo e indirecto (e.g., nutrientes, material particulado, escape o caída de organismos) desde la acuicultura a la biota silvestre, el potencial efecto positivo en las pesquerías y/o en el aumento de desembarques de pesca es aún muy limitado (Gentry et al. 2020). Para el caso de la APE en Chile, investigaciones recientes de IFOP han demostrado la formación de bancos emergentes de mitílidos asociados a cultivos de mitílidos de diferentes escalas productivas (ver **Sección 5.8.**), y la potencial provisión de servicios ecosistémicos de soporte (e.g., hábitat, zonas de alimentación) y de aprovisionamiento (e.g., provisión de alimento, provisión de larvas). Parte de lo anterior ha sido incluido, en el reciente reglamento para la APE (SUBPESCA 2022), bajo el concepto de “aprovechamiento de recursos hidrobiológicos”, que se define como una actividad complementaria a la acuicultura, que permite la utilización de las especies bio-incrustantes u otras especies bentónicas que se asienten dentro del centro de cultivo, como resultado de la actividad de acuicultura generada. Este reglamento indica que la SUBPESCA, mediante resolución, establecerá las cosechas anuales máximas y los recursos hidrobiológicos sobre los cuales podrá realizarse la actividad de aprovechamiento, lo que en ningún caso podrá superar el 10% respecto a lo cosechado por la actividad de acuicultura. De esta forma, la implementación de esta acción demostraría un eventual aumento de desembarques de pesca producto de la acuicultura.

### Suministro de larvas y juveniles

No solo producto del desprendimiento o caída (no intencionadas) se podrían aportar organismos de cultivo, en diferentes estadios de desarrollo, al ambiente, eventualmente, y de alcanzar la madurez reproductiva, organismos en cultivo pueden aportar larvas o juveniles al medio circundante, y potencialmente, en el caso de propágulos de alta dispersión podrían no solo tener un impacto a escala espacial de cultivo o sitio. Solo recientemente y por primera vez, se ha demostrado en Nueva Zelanda que la acuicultura del mitílido *Perna canaliculus*, puede proporcionar un “subsido larval” (i.e., *spillover*) para asistir en la restauración de poblaciones (Norrie et al. 2020). Sin embargo, esta interacción y las respectivos compensaciones e interacciones han sido escasamente estudiados (Barrett et al. 2019, Theuerkauf et al. 2022). Por ejemplo, en el caso de cultivo de bivalvos o de los bancos emergentes descritos y asociados a la APE, si bien pueden aportar larvas y juveniles, también pueden competir con las poblaciones silvestres por alimento en suspensión, ingerir larvas planctónicas de numerosas especies de peces e invertebrados, y pueden ser sustrato de asentamiento y reclutamiento para especies silvestres. Todos estos procesos pueden combinarse para impactar el desempeño y reclutamiento de poblaciones silvestres en áreas con densidades muy altas de cultivo, especialmente cuando se emplea la selección no selectiva de semillas (Molinet et al. 2017, Barrett et al. 2022), como las observadas en varios sectores del sur de Chile. Estos procesos son difíciles de valorar ya que son complejos y dependen del contexto (e.g., estado de las poblaciones silvestres, características del sitio,



densidades de organismos en cultivo y granjas, métodos de cultivo y captación de semillas), y, por lo tanto, requieren mayor estudio. En el caso de la APE en Chile, las actividades de acuicultura en CCAA y AMERB se autorizan siempre y cuando se demuestra la inexistencia de bancos naturales de recursos hidrobiológicos bajo el área solicitada para desarrollar acuicultura. De manera general, y para minimizar los costos de dichas externalidades, se recomienda que los cultivos y áreas de acuicultura permanezcan dentro de la capacidad de carga local (Weitzman & Filgueira 2020, Barrett et al. 2022).

### 5.9.3.3. Servicios de regulación

#### Secuestro y almacenamiento de carbono

Múltiples estudios demuestran que tanto algas como bivalvos capturan y contienen cantidades significativas de carbono que, cuando se cosechan, se remueven del ambiente marino (Gentry et al. 2020). La magnitud del impacto y la relevancia en términos de mitigación del cambio climático es aún tema de discusión, siendo fuertemente dependiente del destino del producto cosechado y la escala productiva, sin embargo, inicialmente, se estima que se requieren grandes escalas de cultivos de algas para impactar significativamente en el secuestro de carbono (Froehlich et al. 2019, Wu et al. 2020). Tang et al. (2011) estimaron que el cultivo de algas y bivalvos en China eliminó 1,2 millones de toneladas de carbono, y Sondak et al. (2017) calcularon que el secuestro de carbono del cultivo de algas marinas en Asia-Pacífico podría valorarse en aproximadamente US\$29 millones.

Otro ítem asociado al secuestro de carbono, corresponde al “carbono azul” (i.e., carbono que puede ser almacenado, transportado y/o enterrado en sedimentos o en el océano profundo, convirtiéndose en sistemas sumideros de carbono global y de relevancia en el contexto del cambio climático global), que en los últimos años ha sido descrito en ecosistemas macroalgales (Xiao et al. 2017, Ahmed et al. 2017, Wu et al. 2020, Kuwae et al. 2022), e incluso bivalvos (van der Schatte Olivier et al. 2020, Alonso et al. 2021), y que puede ser referido también a los respectivos cultivos. En el caso de los bivalvos, aún es poco claro, si son una fuente o sumidero de carbono, debido a que el proceso de formación de la concha es un productor neto de CO<sup>2</sup> (Barrett et al. 2022).

En Chile, no hay reportes de los procesos de secuestro y almacenamiento de carbono asociados a la APE. Solo se puede mencionar, el trabajo de Vásquez et al. (2014) donde se estimó el valor económico total de bosques de macroalgas en norte de Chile, incluyendo una estimación económica de la captación de carbono.

#### Regulación de la acidificación

La actividad fotosintética de las macroalgas, además de impulsar la biosíntesis y la acumulación de biomasa, puede provocar aumentos en el pH, amortiguando la disminución del pH asociada con los aumentos antropogénicos de CO<sub>2</sub>, y mitigando los impactos de la acidificación de los océanos (Mongin et al. 2016). La acidificación de los océanos afecta principalmente a los organismos calcificadores, como los bivalvos. Recientemente se han propuesto que co-cultivos o policultivos que incluyan algas podría actuar como refugio químico para moluscos calcificadores en un escenario de acidificación oceánica (Fernández et al. 2019), sirviendo como una estrategia de adaptación de bajo costo a la acidificación y desoxigenación de los océanos (Xiao et al. 2021). Mongin et al. (2016), indican



que el cultivo de algas puede mitigar los efectos del aumento de la acidificación a nivel local, al aumentar el estado de saturación de la aragonita, estimado que una granja de 1,9 km<sup>2</sup> podría proteger más de 24 km<sup>2</sup> de arrecifes de coral durante 7 a 10 años. En el presente estudio Programa APE se han estado estudiando los efectos en la fisiología y productividad, a escala experimental de laboratorio, del co-cultivo de bivalvos y macroalgas (ver **Sección 5.5**).

### Biorremediación y remoción de nutrientes

Este servicio ecosistémico es uno de los más estudiados, demostrándose la capacidad de remoción de nutrientes (e.g., nitrógeno y fósforo), fitoplancton y material particulado, y potencialmente de biorremediación de monocultivos de bivalvos y algas, y también de policultivos (Xiao et al. 2017, Gentry et al. 2020, Suplicy 2020, Barrett et al. 2022). Efectos netos positivos o negativos, serán altamente dependientes de las condiciones del sitio (e.g., hidrodinámica, disponibilidad de alimento, temperatura) y de la escala y temporalidad del cultivo (Nielsen et al. 2016, Taylor et al. 2019), por ejemplo, Holmer et al. (2015) encontraron que cultivos de mitílidos hasta el primer año de crecimiento se comportaban como un sumidero de nitrógeno, principalmente por las bio-deposiciones en los sedimentos, pero luego se convirtieron en una fuente neta de nitrógeno, debido principalmente a la excreción de nutrientes. Para algas, y en contextos de biorremediación o mitigación de contaminación ambiental, se requieren cultivos de magnitudes enormes, por ejemplo, en Xiao et al. (2017) se indica que China necesitaría aumentar su área de producción de algas en 17 veces para eliminar todo el nitrógeno que ingresa al sistema. Para el caso de la APE en Chile, la magnitud de este servicio no ha sido cuantificado, considerando la escala espacial y productiva de la APE, inicialmente se podría considerar como irrelevante, sin embargo, lo anterior pudiese ser más relevante si se considera la existencia de zonas con una alta concentración de cultivos APE.

### Mejoramiento de la claridad del agua

Tanto algas como bivalvos filtradores pueden contribuir a la provisión de este servicio, sin embargo, ha sido más estudiado y cuantificado en cultivos de filtradores, que pueden consumir y controlar la dinámica de nutrientes, material particulado y fitoplancton, mejorando la transparencia del agua, que en algunos sectores puede ser muy baja por causas naturales o antrópicas. Cultivos suspendidos proporcionan un mayor potencial para clarificar agua debido al acceso directo al material particulado o disuelto disponible en la columna de agua (Nielsen et al. 2016, Smaal et al. 2018). Mediciones directas de la capacidad de clarificación del agua de las granjas de mitílidos han mostrado hasta un 80 % de consumo de partículas dentro de algunas secciones del cultivo (Smaal et al. 2018). Por otro lado, cultivos intermareales en sistemas estuarinos con problemas de eutrofización y transparencia pueden también contribuir significativamente a la recuperación y mantención de la claridad, como en el caso de cultivos de ostreidos (Parker & Bricker 2020). Las ostras son reconocidas por su capacidad de mejorar la claridad del agua mediante filtración de fitoplancton y sólidos en suspensión, reduciendo también, los efectos de la proliferación de algas nocivas (Michaelis et al. 2020). Consecuentemente, mejoras en la claridad del agua, pueden aumentar la expansión y/o recuperación de la vegetación acuática y la calidad del agua para fines recreativos (Michaelis et al. 2020).



En el contexto de la APE en Chile, este servicio puede ser explorado incorporando cultivos de filtradores en sistemas estuarinos que han mostrado algunos signos de eutroficación o disminución de la claridad, como Pudeto, San Pedro de Nolasco y Maullín, sitios que también corresponden a lugares de gran producción de pelillo de cultivo (ver **Sección 5.4.2.3**).

### Protección costera/atenuación del oleaje

Aunque los impactos ambientales y servicios asociados de la acuicultura de algas y filtradores se han centrado más bien en aspectos ecológicos, existe evidencia, aún escasa, de efectos positivos y negativos de la acuicultura sobre la hidrodinámica y protección costera (Gentry et al. 2020, Mascorda Cabre et al. 2021). Plew et al. (2005) demostró que un cultivo de mitílidos frente a la costas de Nueva Zelanda genera atenuación de las olas, sin embargo, no se estudió hasta qué punto este efecto protegía a la costa de la erosión o de eventos extremos.

En Chile no se ha caracterizado y/o cuantificado estos procesos, sin embargo, dada la alta concentración de centros de cultivo en algunos sectores (e.g., **Figura 117**), se pueden suponer efectos y modificaciones en la hidrodinámica costera. Adicionalmente, acuicultores reportan una disminución en los tiempos de engorda históricos para mitílidos, aparentemente producto del aumento de centros de cultivo y la consecuente disminución de la disponibilidad de alimento (IFOP, datos no publicados). También, informalmente, se han reportado problemas en la fluidez de la navegación costera de naves menores producto de la alta densidad de centros de cultivo.



**Figura 117.** Cultivos de mitílidos y salmónidos en el mar interior de Chiloé (Imagen obtenida desde Google Earth).



#### 5.9.3.4. Servicios culturales

Los servicios culturales son difíciles de cuantificar y valorizar (Smaal et al. 2018, Custódio et al. 2020, Gentry et al. 2020), no existiendo mayor información en Chile respecto a su estado. Sin embargo, se puede indicar que dicha provisión, y de acuerdo a las características de estos servicios indicado en la literatura internacional, estos servicios existen y eventualmente podrían ser estudiados y medidos.

##### Medios de vida o subsistencia (livelihoods)

Si bien la APE no es una actividad reciente, la acuicultura industrial de salmónidos y mitílicos la relegó a un segundo plano, y solo en los últimos años ha crecido el interés por su fomento, regulación y estudio de dinámicas. De esta forma la APE es reconocida como una oportunidad para proporcionar medios de vidas alternativos o complementarios a comunidades costeras y de pescadores que administran CCAA, AMERB; ECMPO (Henríquez-Antipa & Cárcamo 2019, Sepúlveda et al. 2019, Albers et al. 2021). Sin embargo, y sobre todo dado lo reciente de implementación de acuicultura en espacios como AMERB y ECMPO, no existe un diagnóstico reciente de su magnitud e importancia como medio de vida complementario. Tampoco, hay información detallada sobre consumo como alimento de los organismos cultivados por parte de acuicultores o pescadores.

##### Turismo y recreación

A nivel internacional se ha reportado las oportunidades que otorga la acuicultura, en determinados contextos, para promover o mejorar el turismo, principalmente asociado a turismo gastronómico (van der Schatte Olivier et al. 2020), y a actividades recreacionales donde la acuicultura (e.g., ostreidos) mejora la pesca recreativa y la calidad del agua para uso de playas (Michaelis et al. 2020). El turismo gastronómico, y sobre todo los festivales gastronómicos basados en mariscos (provenientes desde la pesca y acuicultura) han proliferado en numerosos países, entregando beneficios económicos y culturales para las comunidades locales y mejorando la experiencia del visitante, sobre todo en zonas rurales y costeras (Smaal et al. 2018, van der Schatte Olivier et al. 2020, Michaelis et al. 2021). Si bien en Chile existe el turismo gastronómico en base mariscos, y, principalmente en temporada estival, se realizan numerosos festivales gastronómicos, no son tan evidentes respecto a la relación con la acuicultura. Sin embargo, se puede destacar el turismo gastronómico en ciertos sectores donde la provisión de mariscos proviene principalmente desde la acuicultura, como el caso del ostión del norte de Tongoy (Región de Coquimbo) y la ostra chilena en Caulín (Chiloé). En los últimos años se ha instaurado la celebración del "Día del mejillón chileno", cuya organización es liderada por la Asociación de Miticultores de Chile (AMiChile), y cuyo principal objetivo es promover el consumo del mejillón chileno o choritos, del cual hoy Chile es el primer exportador mundial<sup>1</sup>. También hay antecedentes de algunas iniciativas de pequeña escala orientadas a potenciar los cultivos como destino turístico<sup>2,3</sup>, sin embargo, son aún incipientes y más bien aisladas.

<sup>1</sup> <https://mejillondechile.cl/invitan-al-dia-del-mejillon-chileno/>

<sup>2</sup> <https://tarapacainsitu.cl/contenido/365/sarmenia-cultivar-la-paciencia-y-nadar-contra-la-corriente-por-30-anos>

<sup>3</sup> <https://www.aqua.cl/2016/02/14/cultivo-de-ostras-y-choritos-es-la-gran-apuesta-de-emprendedor-de-llico/>



### Investigación científica

La acuicultura nacional ha sido objeto de estudio científico y frecuente en los últimos 40 años, principalmente asociado a la salmonicultura y la diversificación de la acuicultura, lo que ha permitido la formación y funcionamiento de numerosos grupos de científicos y técnicos al alero de universidades, centros de investigación e incluso la industria. También se han generado fondos y diversas instancias de financiamiento para la investigación científica y tecnológica en acuicultura (e.g., FONDEF, CORFO, FIPA). Respecto a la APE, solo en la última década se ha puesto mayor énfasis en su dinámica y desarrollo, identificándose grupos de trabajo que centran su investigación (o parte de ésta) en ella (e.g., MUSSELS; IFOP, INCAR, SECOS, UCN, UACH). Sin embargo, la magnitud de este servicio no ha sido cuantificada o precisada.

### Educación

Desde la educación formal, el desarrollo de la acuicultura nacional ha fomentado la proliferación de numerosas carreras profesionales y técnicas con eje central en la acuicultura, impartidas por Universidades, Institutos, Centros de formación Técnica y Liceos técnicos con especialidad. A nivel técnico la formación, aparentemente, ha estado permeada por la demanda de la industria salmonicultora. Por otro lado, en la última década se ha visto el cierre de varias carreras que impartían acuicultura<sup>4</sup>. Se puede destacar la existencia de la Red de Liceos Acuícolas formada el año 2013, bajo patrocinio del INCAR (Interdisciplinary Center for Aquaculture Research), y que incluye establecimientos de las regiones de Biobío, Los Lagos, Aysén y Magallanes, con el objetivo fomentar la educación científica y promover la acuicultura sustentable<sup>5</sup>. Para otras actividades educativas no formales no se encontró información disponible.

### Estilo de vida y sentido del lugar - Simbolismos culturales

Algunos autores (Smaal et al. 2018, Krause et al. 2020, Michaelis et al. 2020) han mostrado el potencial de los medios de vida basados en la acuicultura para contribuir a la creación de significado e identidades culturales basadas en el lugar.

A diferencia de algunos países asiáticos, la acuicultura en Chile se puede considerar como una actividad productiva más bien reciente, y que ha estado dominada por la acuicultura industrial de salmónidos y mitílicos. Sin bien no se encontró información bibliográfica que caracterice el sentido del lugar o simbolismos culturales que pudiesen representar la acuicultura, inicialmente se puede mencionar, la existencia de sectores y grupos donde la actividad APE podría representar un fuerte arraigo cultural, influenciado muy significativamente el estilo de vida, el sentido y pertenencia al lugar y el simbolismo cultural que puede representar el recurso en cultivo. Entre ellos se podrían nombrar: los pelilleros de Maullín, Playa Changa y Pudeto, los ostioneros de Tongoy, los miticultores de semilleros del fiordo de Reloncaví.

---

<sup>4</sup> <https://www.salmonexpert.cl/article/estn-interesados-los-jvenes-en-estudiar-acuicultura-en-chile/>

<sup>5</sup> <https://centroincarc.cl/vinculacion/red-de-liceos-acuicolas/descripcion/>



### 5.9.5. Valoración de servicios ecosistémicos

Métodos de valoración de servicios ecosistémicos, permiten la evaluación de escenarios productivos y de conservación, y la evaluación de compensaciones que pueden facilitar la discusión entre actores sociales y tomadores de decisión, y deberían ser incluidos en los procesos de planificación costera y de la acuicultura (Lester et al. 2013, Weitzman 2019, Custódio et al. 2020, Gentry et al. 2020).

Solo en los últimos años, se han realizado estudios empíricos que utilizan métodos de valoración para evaluar las compensaciones entre la acuicultura y el medio ambiente. Se reportan varios métodos de valoración, desde técnicas de valoración monetaria directa para evaluar los servicios de uso directo, hasta enfoques deliberativos para servicios menos tangibles pero que proporcionar una imagen más completa de la capacidad, el flujo y la demanda de servicios ecosistémicos (de Groot et al. 2012, Weitzman 2019, Custódio et al. 2020).

La confiabilidad en el uso de métodos de valoración será fuertemente dependiente del servicio a valorar, dado que algunos métodos obtienen mejores estimaciones de valor que otros (Custódio et al. 2020). Métodos pueden incluir valoraciones económicas y no económicas, métodos de valoración monetaria basadas o no en mercado, valoraciones de uso y no uso (Weitzman 2019, Custódio et al. 2020). Se ha propuesto que el valor de un ecosistema se obtiene utilizando el marco conceptual de Valor Económico Total (VET) que corresponde a la suma de valores de uso (directo, indirecto, de opción) y no uso (de existencia, de opción y de legado). Generalmente, los valores de uso pueden ser valorizados mediante métodos de valoración monetaria (de Groot et al. 2012, Custódio et al. 2020). Las valoraciones monetarias intentan medir las contribuciones de la naturaleza al bienestar humano desde una perspectiva utilitaria, utilizando métricas monetarias y es adecuada para evaluar ciertos tipos de servicios, principalmente de aprovisionamiento y regulación, sin embargo, a menudo no captan la importancia de la naturaleza más allá de los valores económicos (Custódio et al. 2020). En el ámbito del VET, se han creado nuevas herramientas de política ambiental, siendo el Pago por Servicios Ecosistémicos (PSE) uno de los más recientes y con proyección de aplicación, en diversos campos incluido la acuicultura (Custódio et al. 2020, Barrett et al. 2022). PSE se orienta a internalizar las externalidades positivas generadas por los ecosistemas, produciendo incentivos para que los cultivadores creen o aseguren la entrega de servicios ecosistémicos en de los bienes públicos (Custódio et al. 2020, Chen et al. 2021). No obstante, los PSE solo capturan una fracción del valor, y generalmente no se orientan a capturar los valores de no uso y otros beneficios (Custódio et al. 2020). En el ámbito del PSE, van den Burg et al. (2022) exploraron mecanismos de PSE para la acuicultura de mitlidos, ostras y algas en países de Europa, Oceanía, además de Estados Unidos e Israel, bajo el supuesto que el negocio de la acuicultura requiere obtener mayores beneficios económicos e incrementar la producción. Se identificaron seis mecanismos: PSE financiados por contribuyentes, créditos negociables, subsidios, licencias sociales para producir, esquemas de costos compartidos de producción entre beneficiarios, y mayor utilidad para los consumidores. Sin embargo, se llama la atención respecto a la necesidad de mejorar la cuantificación de los servicios, la necesidad de mejorar los marcos regulatorios y la falta de validación independiente. Países como Japón, también están evaluando la implementación de créditos de compensación de carbono azul para praderas y cultivo de macroalgas (Kuwaie et al. 2022). Y en Taiwán, y a manera de promover el aumento en la provisión



de servicios ecosistémicos, se están explorando la implementación de esquemas de pagos por servicios ecosistémicos proporcionados por la ostricultura (Chen et al. 2021).

Los valores de uso suelen obtenerse cuantitativamente utilizando métodos de preferencia revelada (e.g., precio de mercado, costo de reposición, transferencia de beneficios, valoración contingente, créditos de carbono) para productos de consumo comercializados en los mercados y corresponden a los métodos de valoración más utilizados (Weitzman 2019, Custódio et al. 2020). Los valores de uso no basados en mercado y valores de no uso son más difíciles de valorizar con métodos basados en el mercado o económicos, por lo que generalmente, se deben recurrir a procesos participativos (e.g., percepción del valor y opinión, encuestas, talleres, opinión de expertos), que pueden ser más confiables e informativos (de Groot et al. 2012, Weitzman 2019, Custódio et al. 2020).

Recientemente, se ha sugerido que la valoración de servicios ecosistémicos asociados a la acuicultura, debe orientarse hacia la multidimensionalidad y pluralidad, en cuenta a componentes ecosistémicos evaluados y métodos de valoración (Weitzman 2019, Custódio et al. 2020, van den Burg et al. 2022), recordando que el valor monetario es solo uno de los tipos de valor de un ecosistema. Servicios ecosistémicos debiesen ser considerados y evaluados bajo tres dominios de valor: económico, ecológico y socio-cultural (Braat & de Groot 2012, Custódio et al. 2020).

#### 5.9.6. Aplicación y oportunidades de los servicios ecosistémicos en la APE en Chile

En resumen, la acuicultura potencialmente puede proporcionar numerosos servicios ecosistémicos, pero también hace uso de ellos, de esta forma, el conocimiento de las compensaciones y los efectos positivos (netos) de ciertos tipos o enfoques de acuicultura permitiría dimensionar con mayor precisión los valores económicos, ecológicos y sociales de éstos (Alleway et al. 2019, Custódio et al. 2020, Gentry et al. 2020, Barrett et al. 2022), agregando una nueva dimensión a su manejo y planificación (Weitzman & Filgueira 2020). En el contexto de la aplicación del enfoque ecosistémico y la sostenibilidad de la acuicultura, será relevante tanto la identificación, evaluación y la valorización de los servicios ecosistémicos para: revelar las interacciones y compensaciones entre el desarrollo de la acuicultura, economía y medioambiente; evaluar diferentes escenarios productivos y de conservación; caracterizar la cadena de provisión (i.e., capacidad, flujo y demanda de servicios ecosistémicos); y asistir los diversos procesos de toma de decisión que conduzcan a la formulación de (nuevas y claves) políticas y normativa ambientales y productivas.

En el contexto de la APE en Chile, como demuestra esta revisión, los servicios ecosistémicos han sido escasamente explorados, no existiendo una caracterización y dimensionamiento de su provisión, ni mucho menos de valoración económica. En este sentido, las investigaciones iniciales y antecedentes aportados por el presente estudio son de relevancia (e.g., beneficios del co-cultivo alga-bivalvo, dinámica de bancos emergentes) para avanzar en la incorporación de este marco como una nueva dimensión hacia la promoción de la APE y su desarrollo bajo un enfoque ecosistémico como se declara en la LGPA. También, fuertemente se ha llamado la atención respecto a reconocer los sistemas de acuicultura como sistemas socio-ecológicos integrados (SES) y/o como parte de otros SES de mayor escala espacial, los que requieren estrategias de gestión multi-escala, interdisciplinarias y adaptativas (Krause et al. 2015, Weitzman & Filgueira 2020). En este sentido, los servicios ecosistémicos y su



valoración multi-dimensional pueden ser una buena aproximación para integrar los diferentes aspectos de los SES dentro de evaluaciones de capacidad de carga de los sistemas (Custódio et al. 2020, Weitzman et al. 2021), el enfoque ecosistémico (Brugère et al. 2019) y la planificación espacial marina y costera (Lester et al. 2013, Lombard et al. 2019). La capacidad de carga de la acuicultura ha evolucionado en objetivos de manejos múltiples para alcanzar metas no solo productivas, sino también ecológicas, físicas y sociales (Weitzman & Filgueira 2020). En el ámbito de la planificación espacial costera y de la acuicultura nacional, se pueden destacar los trabajos de Outeiro et al. (2015), que en base a la provisión e interacción de tres servicios ecosistémicos (ecoturismo y recreación, vida silvestre y especies formadoras de hábitat) con actividades y presiones antrópicas proponen escenarios alternativos de zonificación para el mar interior de Chiloé, y el de Camelo-Guarín et al. (2021), que en base a la actual distribución y escala de granjas comerciales de mitílidos y salmónidos proponen que es factible implementar en algunos sectores acuicultura multi-trófica integrada (IMTA) a escala de paisaje o regional (Sanz-Lazaro & Sanchez-Jerez 2020).

Avances en la comprensión de los servicios ecosistémicos de la acuicultura nacional, incluida la APE, no solo permitiría la aplicación de enfoques de manejo y planificación más holísticos (como lo demanda la LGPA), sino también entregar evidencia para la creación y modificación de políticas públicas, normativas y regulaciones que permitan mantener o fomentar la provisión de éstos.



**Objetivo específico 5:** *Evaluar diseños de sistemas de cultivos para implementar acuicultura de pequeña escala.*

Las dos actividades de este objetivo fueron desarrolladas a través de una asesoría experta ejecutada por el Laboratorio de Tecnología en Pesca y Acuicultura, Escuela de Ciencias del mar de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. En **Anexo 2** se presenta el informe en extenso.

**5.10. Revisión de diseños y características de los sistemas de cultivos disponibles a nivel nacional para el desarrollo de APE**

El objetivo fue identificar la operatividad, funcionamiento, dimensionamiento, materialidad y costos probables de diferentes sistemas de cultivo para desarrollar APE. Se caracterizaron los criterios de diseño que se emplean al momento de desarrollar tecnológicas de cultivo suspendido. Se realizó una descripción de los elementos de conexión y distribución de cargas en el sistema de fondeo. Además, se definieron las condiciones y requerimientos mínimos del estado de los componentes de los long line para un desempeño seguro respecto a los niveles de tolerancia que tienen dichas estructuras (los que pueden ser referidos por medio de la intensidad de las fuerzas ambientales como altura de ola y corriente), de manera que en una memoria de cálculo de fondeo se establezca no sólo las condiciones del dimensionamiento de éste propiamente tal, sino que también permita asegurar la integridad estructural del sistema

**5.10.1. Tecnologías de cultivo**

Debido a que el cultivo extensivo se basa en técnicas tradicionales con captación de semilla de forma natural o su adquisición, y su posterior engorde con alimentación natural, resulta ser el cultivo *a priori* más apropiado para las APE. Según estadísticas de SUBPESCA, el 96% de los cultivos APE corresponden a cultivos de tipo extensivo, de algas y moluscos, mientras sólo el 4% corresponden a cultivos intensivos, de trucha arcoíris y camarón de río (UCSC 2015).

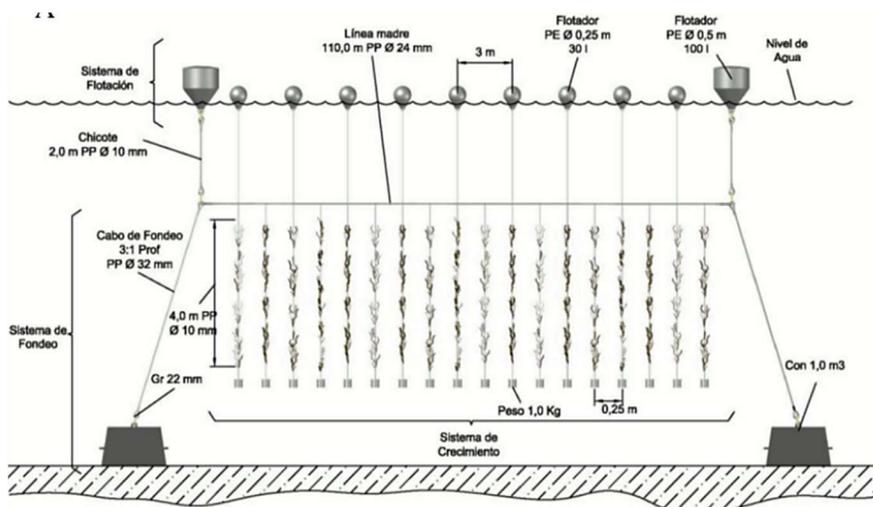
Se distinguen principalmente dos tipos de sistemas:

1. Sistemas de superficie. Dentro de estos sistemas se encuentra el “long-line”, sistema de origen japonés, de características simples en cuanto a su materialidad y nivel de inversión, ideales para APE. Las **Figura 118** y **119** muestran un ejemplo de sistemas de cultivos de superficie.
2. Sistemas de fondo. Este sistema utiliza el fondo marino como soporte. La selección de la tecnología de cultivo dependerá principalmente del tipo de sustrato, velocidad de corriente, presencia de zonas de rompiente de olas, profundidad, dinámica del sustrato, y disponibilidad de mano de obra especialidad permanente (buzo). En las **Figura 120** y **121** se muestran ejemplos de sistemas de fondo. Las unidades de crecimiento, en que se fijan o depositan los recursos, pueden consistir en estacas de fondo, bandejas de fondo, long-line de fondo, piedras, cabos con estacas de fondo, sistema de horquilla y sistema de cabos entre muertos.

En el **Anexo 2**, se presentan en detalles las siguientes sistemas y tecnologías de cultivo potencialmente utilizables en APE:



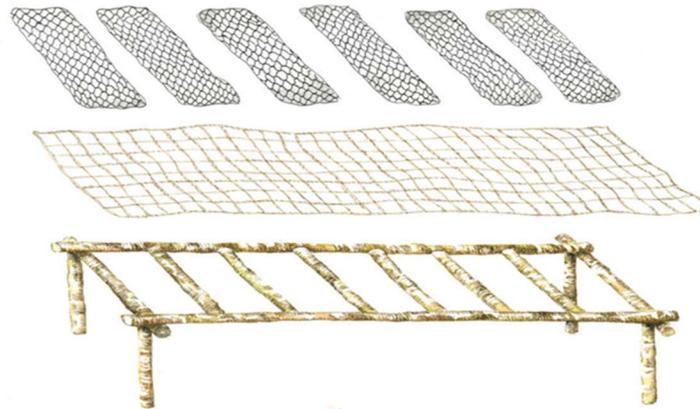
1. Long-line con cuelgas
2. Long-line con linternas
3. Long-line doble
4. Camillas (cultivo intermareal)
5. Bolsas (cultivo intermareal)
6. Sistema de planas
7. Estacas de fondo
8. Bandejas de fondo
9. Cultivo algas de fondo
10. Bateas superficiales y sumergibles
11. Smart Units



**Figura 118.** Sistema de cultivo - Long line con cuelgas. (Fuente: Proyecto FIPA 2015-02 "Diseño y valoraci3n de modelos de cultivo para la acuicultura de pequeña escala".)



**Figura 119.** Sistema de cultivo - Long line doble.



**Figura 120.** Sistema de cultivo intermareal en camillas.



**Figura 121.** Sistema de cultivo intermareales en bolsas (flipbag).

#### 5.10.2. Dinámica del sistema long-line

La acuicultura con long-line, como método de acuicultura marina productiva y flexible, se utiliza en todo el mundo para cultivar algas y mariscos. Además, casi todos los mejillones se cultivan mediante sistema long-line a nivel mundial, produciendo altas biomásas en Nueva Zelanda, China, Italia y Chile (Buck & Langan 2017). Sin embargo, la migración de la APE a sitios costa afuera desafía los problemas técnicos de diseño, prueba y construcción de sistemas para entornos duros y de alta energía en lugares expuestos. Como consecuencia, los estudios sobre las respuestas estructurales de varias



configuraciones de diseño son de importancia clave para diseñar un sistema long-line robusto capaz de sobrevivir y operar en condiciones marinas severas.

Un sistema long-line generalmente consta de líneas, anclas, boyas y organismos cultivados. Por lo general, se debe utilizar una serie de líneas, incluida una línea principal para mantener a flote todo el sistema, líneas de amarre para conectar todas las partes suspendidas a los anclajes y líneas verticales para colgar las linternas o cuelgas (*droppers*). Por lo tanto, la seguridad de estas líneas afecta significativamente el desempeño de estabilidad de la instalación del sistema de cultivo.

El sistema long-line es de fácil operación y frecuentemente está ubicado en zonas costeras (López et al. 2017). Estos sistemas suelen estar confinados en la zona costera, lo que genera preguntas relacionadas con cuestiones estéticas y de navegación, el potencial agotamiento de nutrientes /fitoplancton, la asignación de espacio y el posible papel de la contaminación terrestre y también límites de expansión y crecimiento de esta actividad económica (Stevens et al. 2007). Cabe destacar que las zonas costeras tienen competencias y demandas por espacio marítimo (limitación), por lo tanto, nace un desafío de llevar el sistema long-line a alta mar (Zhao et al. 2019).

Por otra parte, existen varios factores que afectan la estabilidad del sistema (e.g., oceanografía local, ensuciamiento, carga en el amarre y variabilidad estructural) (Zhao et al. 2019). La fuerte exposición a olas y agitación disminuye la producción en el sistema (Kingzett & Bourne 1991) y la tensión de la línea madre disminuye al incrementar el periodo del oleaje. (Zhao et al. 2019), sin embargo, la tensión también disminuye al incrementar el ángulo de incidencia del oleaje respecto al sistema de cultivo (Zhang et al. 2015, López et al. 2017). En este contexto, es probable que una variedad de factores afecte la estabilidad de la instalación, por lo tanto, para comprender los antecedentes, es necesario buscar alguna estructura análoga, por ejemplo, la *performance* de un sistema balsa jaula.

Algunos antecedentes indican que el movimiento de los cultivos suspendidos introducido por la acción de las olas afecta el crecimiento de la producción (Freites et al. 1999). La fuerte exposición a las olas y el movimiento de la estructura causarán una mayor asignación de energía a la especie cultivada para mantenerse y el crecimiento será menor (Kingzett & Bourne 1991). Como consecuencia los sistemas long-lines sumergidos en términos estructurales poseen una mejor resistencia al oleaje ocasionando que sea menos vulnerable al daño estructural, la deformación y la abrasión, y en términos productivos: altas tasas de supervivencia, produciendo individuos de mejor calidad (Lee et al. 2009). Además, podría ser posible evitar los efectos dañinos de la proliferación de algas tóxicas (Drach et al. 2013). Como alternativa también se propone aumentar la profundidad de las unidades de cultivo, no hasta el punto en que el crecimiento se vea limitado por temperaturas más bajas, sin embargo, es considerada otra estrategia para evitar organismos contaminantes y competidores (Lodeiros & Himmelman 1996).

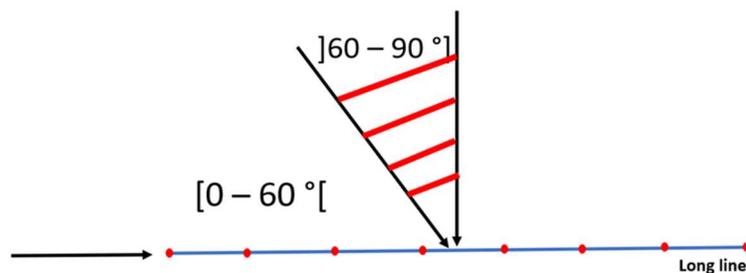
### 5.10.3. Modelación de sistemas long-line

Gagnon & Bergeron (2017) observaron las fuerzas y el movimiento de un long-line de mejillón en mar abierto para determinar el coeficiente de arrastre de las cuelgas y/o linternas y el efecto de protección sobre la fuerza de arrastre masiva ejercida por las corrientes constantes en el sistema long-line. Se han desarrollado o adaptado modelos numéricos utilizando el método de elementos finitos para predecir la carga y el movimiento de la estructura de varios diseños bajo el forzamiento actual y



monocromático de las olas (Stevens et al. 2007, Raman-Nair et al. 2008). Las características hidrodinámicas de los sistemas de acuicultura con long-line sumergido están influenciadas por el diseño estructural y las condiciones ambientales. Sobre la base de modelos numéricos y experimentos de laboratorio, se llevó a cabo una investigación sobre el efecto de la configuración del diseño en el movimiento y la carga de una estructura long-line a escala y se extrajeron las siguientes conclusiones:

1. El peso de la cuelga y/o linterna y el ángulo de onda incidente tienen una influencia significativa en el movimiento y la carga de la instalación. El desplazamiento máximo de la línea principal se correlaciona negativamente con el peso de la cuelga y/o linterna, es decir, a mayor peso menor es el desplazamiento.
2. El aumento del peso de las cuelgas y/o linterna da como resultado un aumento de la tensión en la línea principal, la línea de fondeo, en los chicotes y cabos, pero ayuda a reducir la tensión máxima de la línea de fondeo
3. El impacto por la forma de la boya superior en los movimientos y cargas de los sistemas long-line se considera insignificante.
4. La tensión máxima de la línea de amarre y el desplazamiento de la línea madre se correlacionan positivamente con la orientación de la estructura dentro de  $0^\circ - 60^\circ$  respecto a la incidencia del oleaje  $^\circ$  y muestra una correlación negativa dentro de  $60^\circ - 90^\circ$ . El impacto de la orientación de la estructura en la línea principal y en las cuelgas y/o linterna es insignificante (**Figura 122**).
5. La aceleración vertical de las linternas es de particular interés porque las aceleraciones grandes y repetidas a lo largo de su eje pueden causar una caída intensa en la especie de cultivo (Gagnon & Bergeron 2014). La aceleración vertical máxima de las linternas observadas en el long-line sumergido monitoreado ( $\sim 1 / 20 g$ ) es la misma que la predicha por el modelo numérico del WHOI (2002) para un longline sumergido (línea principal en reposo 7 m debajo de la superficie) en el estado del mar (olas de 2,5 a 4 m) y es mucho más baja que la observada en un long line de superficie en olas de 2 m ( $1/4 g$ ; Stevens et al. 2007). Esto se debe al hecho de que la carga de las olas disminuye exponencialmente con la profundidad. Las aceleraciones registradas para el long-line monitoreado no fueron lo suficientemente grandes como para causar la caída del mejillón (desprendimiento). Sin embargo, no hubo tormentas durante el período de monitoreo y la fuerza de unión de los mejillones en el sitio de monitoreo es mayor durante la primavera que durante el verano (Seguin-Heine et al. 2014).



**Figura 122.** Ángulo de incidencia del oleaje respecto al posicionamiento del sistema de cultivo long-line (Fuente: elaboración propia - PUCV).



### 5.11. Propuesta de diseño de sistema de cultivo APE para zona norte y sur, y/o condiciones de mayor exposición (Fase 1)

Para el desarrollo de esta actividad se consideraron los resultados de la **Actividad 5.10**, con el fin de seleccionar 2 tecnologías de cultivos factibles para desarrollar APE en Chile y posteriormente elaborar la ingeniería conceptual y de detalle de estas tecnologías seleccionadas a través de *Softwares* como AutoCad o Inventor de Autodesk. Principalmente se realizó el diseño de estos sistemas de cultivo caracterizados en 3 dimensiones en planos de detalle. Posteriormente se caracterizaron las condiciones hidrodinámicas reinantes y dominantes de la zona sur (zona protegida) y zona norte (zona expuesta-semi-expuesta) donde tradicionalmente se ejerce APE en Chile, con el fin de representar las condiciones ambientales a las cuales estas tecnologías se enfrentarán. Esta representación se realizó con modelos numéricos como AquaSim y/o ANSYS, para evaluar los componentes estructurales de los sistemas diseñados (**Figura 123**), y, así, proponer un sistema de cultivo resistente y seguro para desarrollar APE, fortaleciendo su desempeño en el medio marino.

Seleccionar 2 tecnologías de cultivo factibles para la APE en Chile.	
Desarrollar ingeniería básica, conceptual y detalle de las tecnologías de cultivo seleccionadas (CAD, inventor)	
Caracterizar las condiciones hidrodinámicas (Oleaje-corriente) reinantes y dominantes de la zona sur y norte típicas de cultivo	Proponer combinaciones de carga (oleaje – corriente) para evaluar el diseño de los sistemas de cultivo
Evaluación numérica de los componentes estructurales / redimensionar / de los sistemas de cultivo	
Propuesta sistema de cultivo para desarrollar APE en Chile	

**Figura 123.** Propuesta de desarrollo metodológico para sistema APE.

#### 5.11.1. Simulación numérica de sistema de cultivo tipo long-line

A continuación, se presenta la propuesta de diseño de un sistema de cultivo tipo long-line, evaluada y analizada mediante un software (Aquasim) basado en métodos de elementos finitos (MEF), describiendo sus componentes en materialidad y dimensión, y por supuesto, las combinaciones de cargas de diseño respecto a diferentes fuentes de información:

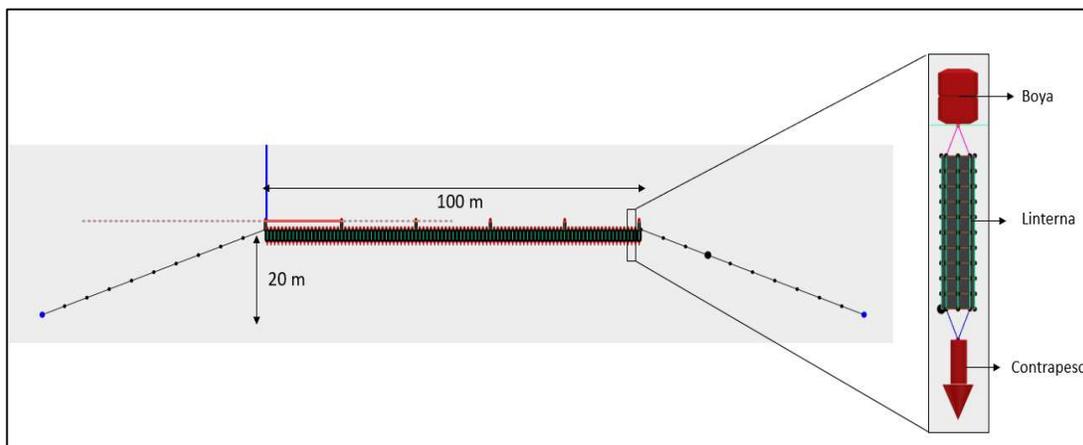
##### 5.11.1.1. Propuesta de diseño long-line

El diseño del sistema de cultivo tipo long-line (**Figura 124**) del presente trabajo esta caracterizado y sustentado en los antecedentes anteriormente recopilados, en el conocimiento y en la experiencia de los materiales tradicionalmente utilizados en la industria. Por lo tanto, en este caso el largo total del long line a evaluar es de 100 metros (**Figura 125**), linterna de 2 metros de altura, con 10 pisos de 20 cm cada una, separación entre linternas de 1 metro a lo largo de la línea madre. Cada linterna se

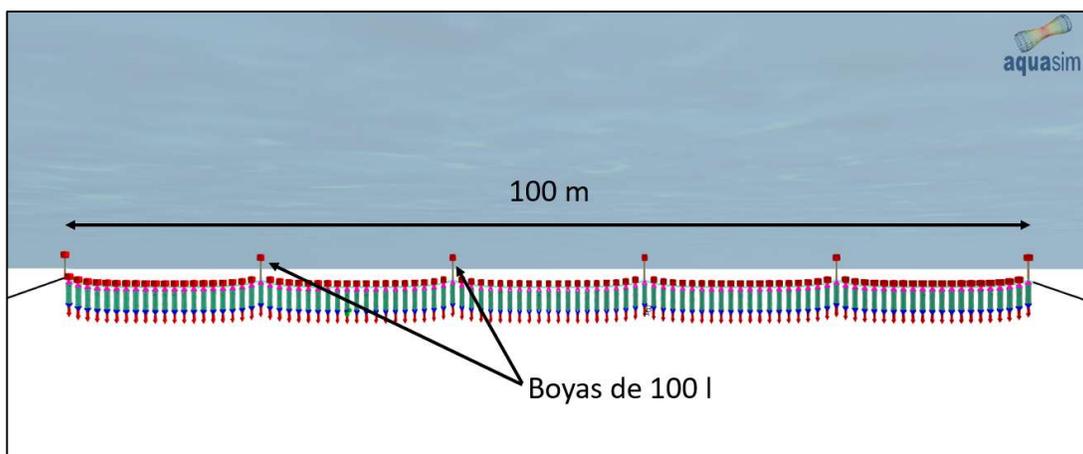


conecta a la lnea madre travs de chicotes de 6 mm, siendo amortiguada con boyas de 30 litros (**Figura 126**). Adicionalmente cabe sealar que en el sistema de flotaci3n estn consideradas boyas sealaras de 100 litros en la superficie cada 20 metros (**Figura 127**).

Cada linterna del sistema long-line propuesto en el diseo tiene un contrapeso de 2 kg en la parte inferior, conectado a travs de un chicote de 6mm. En la parte superior, descrito anteriormente, cada linterna es amortiguada con una boya sumergida de 30 litros en periodos de cosecha, considerando que las linternas tienen 25 ejemplares por piso, vale decir, 4 kg por piso aproximadamente. Estas propiedades y supuestos son claves para la simulaci3n numrica, dinmica del sistema y posterior anlisis estructural. Considerando lo anterior, se detallan los componentes utilizados en el modelo digital del sistema de cultivo tipo long-line (**Figura 128**).



**Figura 124.** Modelo digital sistema de cultivo tipo long-line.



**Figura 125.** Largo lnea madre modelo digital.

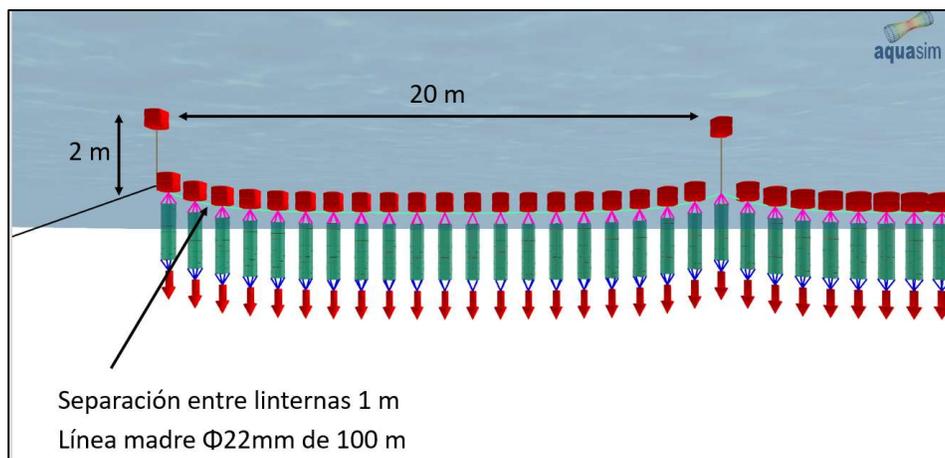


Figura 126. Separaci3n entre linternas modelo digital.

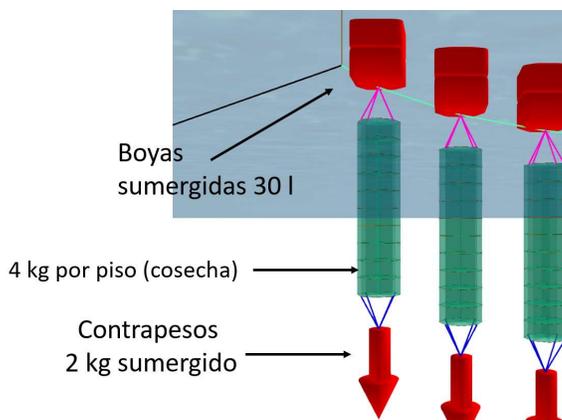


Figura 127. Características boyas y contrapesos, modelo digital.

- Chicotes superiores PP de  $\Phi 6$  mm
- Boyas se1alizadoras de 100 l
- Boyas sumergidas 30 l
- Linterna de 40 cm diámetro
- Linterna 10 pisos de 20 cm
- Fondeo a 20m relaci3n 1:3
- L3nea madre a 2m sumergido
- Separaci3n entre linternas 1 m
- Contrapesos de linternas 2 kg
- L3nea madre  $\Phi 22$ mm de 100 m
- Alambre de  $\Phi 4$ mm en cada piso de la linterna
- Chicotes inferiores PP de  $\Phi 6$  mm
- Cosecha osti3n (4 kg por piso)



Figura128. Detalle componentes long-line.



### 5.11.1.2. Fuentes de informaci3n hidrodinámicas-meteorol3gicas

#### Zona norte

Para caracterizar la zona norte de Chile se utilizaron los parámetros de resumen de aguas profundas del Atlas de oleaje de Chile (Beyá et al. 2016), correspondientes al nodo de Coquimbo. Esta fuente de informaci3n corresponde al pron3stico de oleaje propagado (**Figura 129 y 130**) desde aguas profundas hasta la bahía entre el 3 y 12 de noviembre del 2021.



Figura 129. Bahía de Coquimbo, ubicaci3n nodo informaci3n pron3stico de oleaje.

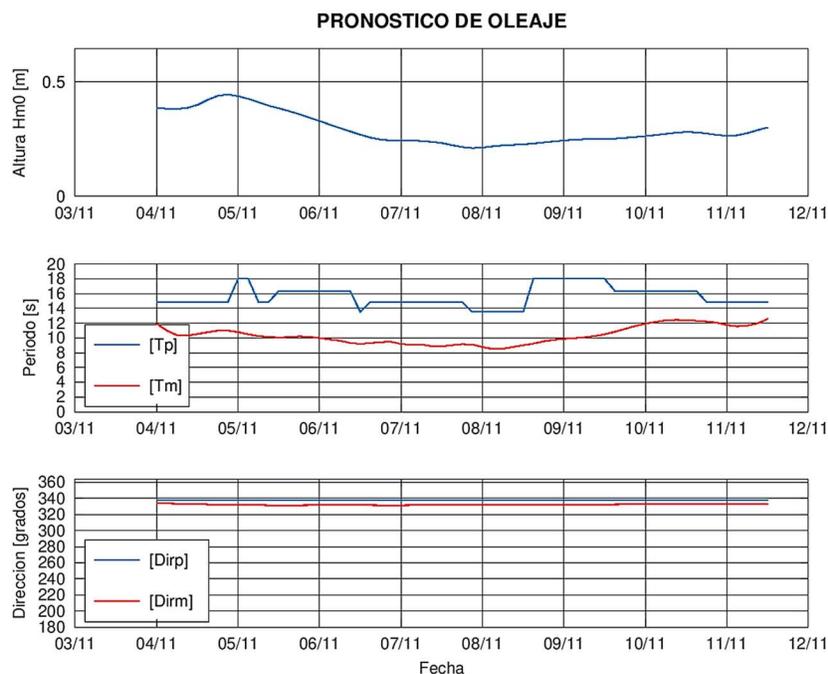


Figura 130. Pron3stico de oleaje para nodo en Bahía Coquimbo (Fuente: oleaje.uv.cl).



Adicionalmente, para obtener datos de velocidad de corrientes oceánicas se utilizaron los antecedentes desarrollados en un proyecto privado. Datos donde la mayor velocidad obtenida de simulación no superó los 0,3 [m/s]. En consecuencia, no existen datos medidos ni simulados, por lo tanto, la escasez de información nos hace proponer una velocidad de corriente. Es por esto, que para zona norte de Chile la clasificación de sitio y parámetros de resumen se presentan en las siguientes **Tablas 61, 62, 63 y 64**. En la **Tabla 61** el acrónimo Hs: Altura de ola significativa y Tp: Periodo peak de la ola, sin embargo, en la **Tabla 62**, Vc significa Velocidad de corriente

**Tabla 61.**

Estado de mar de la zona norte para el diseño del sistema de cultivo tipo long-line.

Hm0 (altura de ola)	0,5	m
Hmax (altura de ola máxima) [REX 1821 Hmax = Hm0 x 1,86]	0,93	s
Tp (Periodo Peak de la ola)	18	s
Dp (Dirección Peak de la ola)	340	°
V.c (V. corriente oceánica)	0,25	m/s
V. corriente (según Rex 1821) Periodo de retorno de 10 años Vc x 1.65	0,4125	m/s
Hm0 (altura de ola)	0,5	m
Hmax (altura de ola máxima) [REX 1821 Hmax = Hm0 x 1,86]	0,93	s
Tp (Periodo Peak de la ola)	18	s
Dp (Dirección Peak de la ola)	340	°
V.c (V. corriente oceánica)	0,25	m/s
V. corriente (según Rex 1821) Periodo de retorno de 10 años Vc x 1.65	0,4125	m/s

**Tabla 62.**

Clase de oleaje del estado de mar de diseño para zona norte.

Clase de oleaje	Hs [m]	Tp [s]	Designación
A	0 - 0.5	0 - 2.0	Exposición mínima
<b>B</b>	<b>0.5 - 1.0</b>	<b>1.6 - 3.2</b>	<b>Exposición moderada</b>
C	1.0 - 2.0	2.5 - 5.1	Exposición considerable
D	2.0 - 3.0	4.0 - 6.7	Exposición alta
E	> 3.0	5.3 - 18	Exposición extrema

**Tabla 63.**

Clase de corriente respecto a los antecedentes recopilados, zona norte.

Clase de corriente	Vc [m/s]	Designación
a	0 - 0.3	Exposición mínima
<b>b</b>	<b>0.3 - 0.5</b>	<b>Exposición moderada</b>
c	0.5 - 1.0	Exposición considerable
d	1.0 - 1.5	Exposición alta
e	> 1.5	Exposición extrema

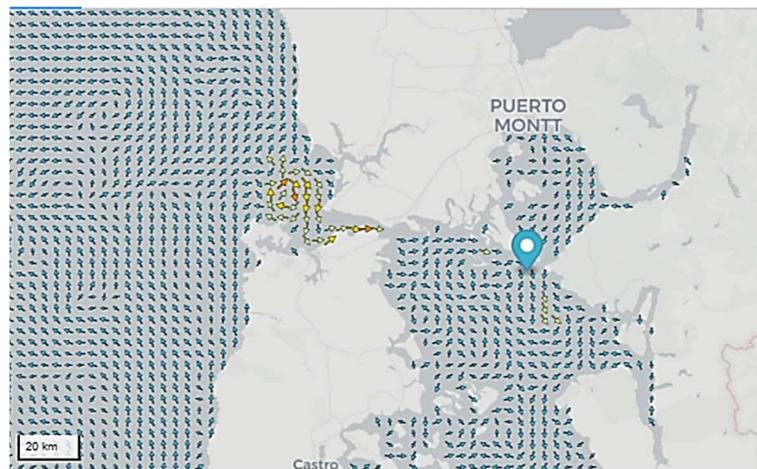


**Tabla 64.**  
Categoría de sitio de la condici3n de dise±o, zona norte.

Categoría de sitios	Clase de sitios				
Protegido	Aa	Ab			
	Ba				
Semi-protegido		Bb	Ac	Ad	Ae
			Bc	Bd	
Semi-expuesto	Ca				Be
		Cb	Cc	Cd	Ce
Expuesto	Da				De
	Ea	Eb	Ec	Ed	Ee

### Zona sur

La fuente de informaci3n para la zona sur de Chile se extrajo de CHONOS (**Figura 131**). (<https://www.ifop.cl/chonos/>), sistema de informaci3n oceanográfico y atmosférico, resultado de estudios ambientales dise±ados para el desarrollo de la modelaci3n numérica en la Patagonia de Chile por IFOP.



**Figura 131.** Captura de pantalla de la plataforma CHONOS.

En este contexto, se utiliz3 una zona del fiordo de Reloncaví (Puerto Montt) para representar la zona sur de Chile en el dise±o del sistema de cultivo, obteniendo datos de medici3n del día 4 de noviembre del 2021 de la velocidad de corriente en profundidad, además las velocidades de viento en m/s (**Figuras 132 y 133**).

En este contexto, al no poseer en los datos la potencia estadística (Cantidad de datos mínimos necesarios para realizar estadística), se utiliz3 la escala de Beaufort para estimar la altura de ola respecto a la fuerza del viento, tal como se demuestra a continuaci3n (**Figura 134**).

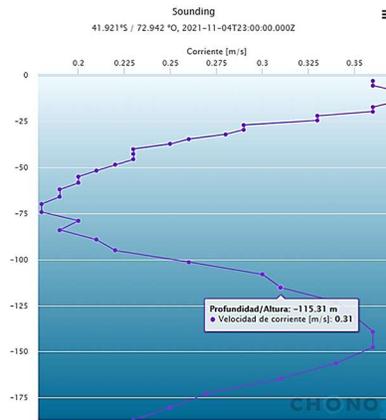


Figura 132. Velocidad de corriente en profundidad en plataforma CHONOS.

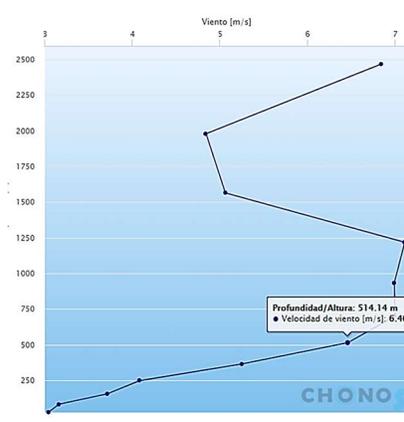


Figura 133. Velocidad de viento en altura en plataforma CHONOS.

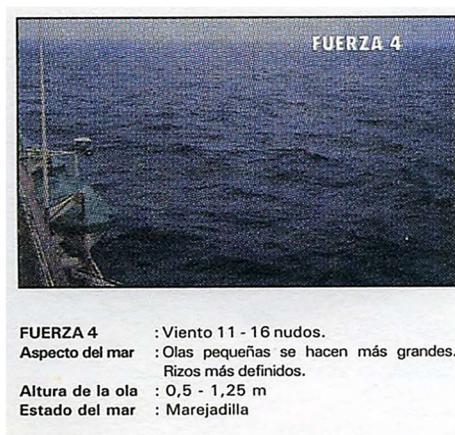


Figura 134. Estimaci3n de altura de la ola seg3n escala Beaufort.



En consecuencia, para la zona sur de Chile la clasificación de sitio y parámetros se presentan en las siguientes **Tablas 65, 66, 67 y 68**.

**Tabla 65.**

Estado de mar de la zona sur para el diseño del sistema de cultivo tipo long-line.

<b>Hm0 (altura de ola)</b>	1,25	m
<b>Hmax (altura de ola máxima) [R. Ex. 1821 Hmax = Hm0 x 1,86]</b>	2,325	m
<b>Tp (Periodo Peak de la ola)</b>	12	s
<b>Dp (Dirección Peak de la ola)</b>	290	°
<b>V.c (V. corriente oceánica)</b>	0,31	m/s
<b>V. corriente (según R. Ex. 1821) Periodo de retorno de 10 años Vc x 1.65</b>	0,5115	m/s

**Tabla 66.**

Clase de oleaje del estado de mar de diseño para zona sur

Clase de oleaje	Hs [m]	Tp [s]	Designación
A	0 - 0.5	0 - 2.0	Exposición mínima
B	0.5 - 1.0	1.6 - 3.2	Exposición moderada
<b>C</b>	<b>1.0 - 2.0</b>	<b>2.5 - 5.1</b>	<b>Exposición considerable</b>
D	2.0 - 3.0	4.0 - 6.7	Exposición alta
E	> 3.0	5.3 - 18	Exposición extrema

**Tabla 67.**

Clase de corriente del estado de mar de diseño zona sur.

Clase de corriente	Vc [m/s]	Designación
a	0 - 0.3	Exposición mínima
<b>b</b>	<b>0.3 - 0.5</b>	<b>Exposición moderada</b>
c	0.5 - 1.0	Exposición considerable
d	1.0 - 1.5	Exposición alta
e	> 1.5	Exposición extrema

**Tabla 68.**

Categoría de sitio de la condición de diseño, zona sur

Categoría de sitios	Clase de sitios				
Protegido	Aa	Ab			
	Ba				
Semi-protegido			Ac	Ad	Ae
		Bb	Bc	Bd	
Semi-expuesto	Ca				Be
		<b>Cb</b>	Cc	Cd	Ce
Expuesto	Da				
		Db	Dc	Dd	De
	Ea	Eb	Ec	Ed	Ee



### 5.11.1.3. Combinaciones de carga para el dise1o del sistema de cultivo long-line

Se propusieron las siguientes combinaciones de carga para realizar el dise1o del sistema de cultivo tipo long-line en etapa de cosecha (4 kg por piso de linterna), bajo condiciones oceanogr1ficas representativas de la zona norte, categorizado como un sitio de cultivo semi-protegido, mientras que en la zona sur el sitio de cultivo es categorizado como semi-expuesto (**Figura 135**).

Cabe destacar que para estas condiciones se propusieron 2 casos de estudios. En el primero se simul3 con una direcci3n paralela al posicionamiento del sistema long-line (**Figura 136**) y un caso desfavorable o extremo, con una direcci3n perpendicular al sistema de cultivo (**Figura 137**).

	Combinaciones de carga			
	C1		C2	
	Zona norte de Chile		Zona sur de Chile	
Hm0	1,86	m	2,3	m
Tp	18	s	12	s
Dp	340	°	315	°
Vc	0,3	m/s	0,5	m/s

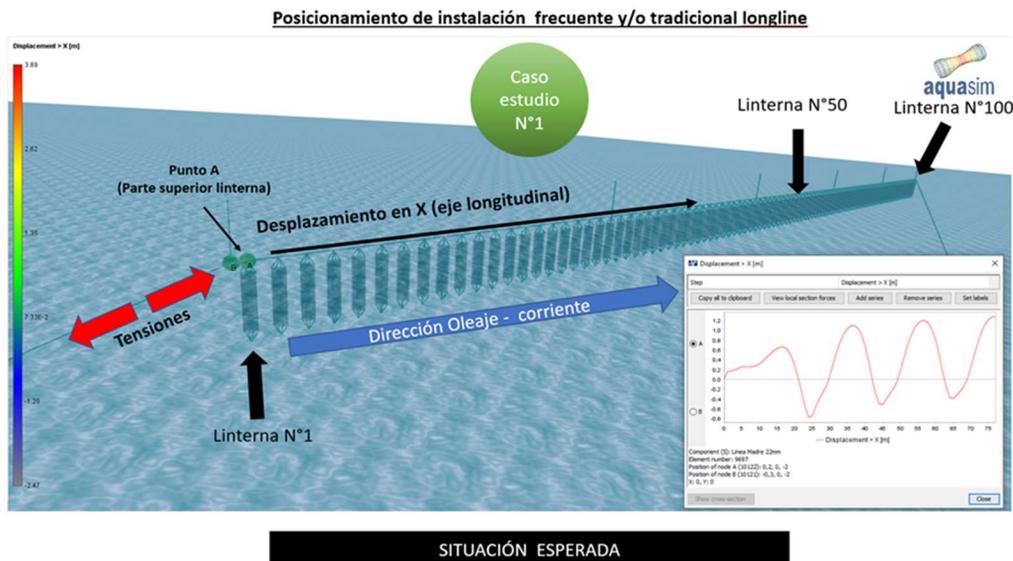
↑

Sitio semi - protegido

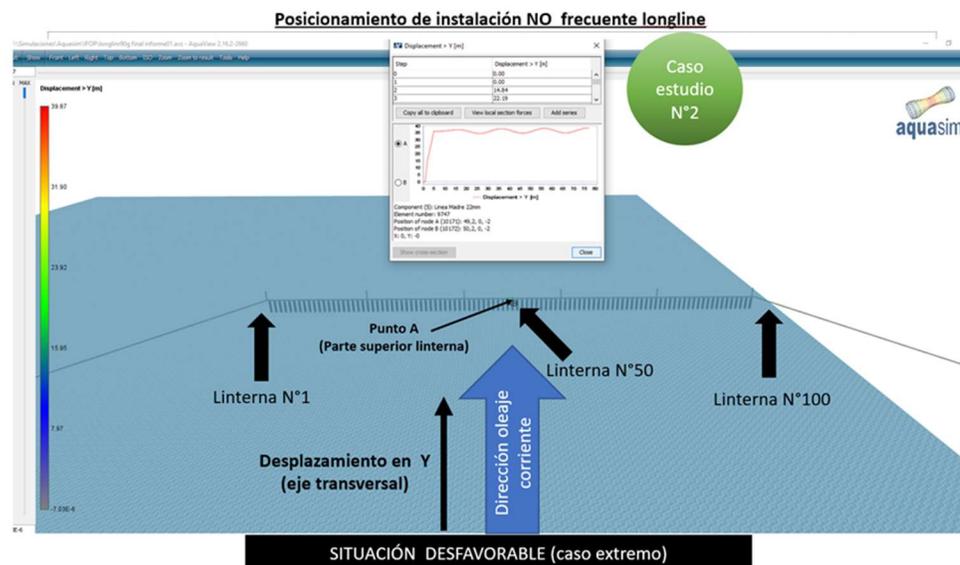
↑

Semi expuesto

**Figura 135.** Combinaciones de Carga a considerar en el dise1o del sistema long-line.



**Figura 136.** Caracterizaci3n grafica de an1lisis en sistema de cultivo tipo long-line (Direcci3n paralela al oleaje y corriente respecto al sistema, ubicaci3n punto superior de linterna N° 1, 50 y 100).



**Figura 137.** Caracterización grafica de análisis en sistema de cultivo tipo long-line (Dirección perpendicular al oleaje y corriente respecto al sistema, ubicación punto superior de linterna N° 1, 50 y 100).

#### 5.11.1.4. Análisis de sensibilidad de las tensiones y desplazamientos en el sistema de cultivo long-line

Este análisis de sensibilidad consideró una función objetivo que permitió cuantificar la evolución de las tensiones ( $\partial T_e$ ) y desplazamientos axiales ( $\partial D_e$ ) en el eje x del modelo, ocurridos en el sistema de cultivo tipo long-line, que dependen de variables independientes que interactúan en el medio de forma paralela (**Figura 136**): altura de ola significativa ( $H_s$ ), periodo peak de la ola ( $T_p$ ), y velocidad de corriente ( $\partial V_c$ ). Este análisis de sensibilidad se evaluó con contrapesos de 2 kg por linterna, con el fin de entender la sensibilidad de la función objetivo respecto a las condiciones ambientales:

$$\partial T_e = \frac{\partial T_e}{\partial H_s} \partial H_s + \frac{\partial T_e}{\partial T_p} \partial T_p + \frac{\partial T_e}{\partial V_c} \partial V_c \quad (\text{Tensiones})$$

$$\partial D_e = \frac{\partial D_e}{\partial H_s} \partial H_s + \frac{\partial D_e}{\partial T_p} \partial T_p + \frac{\partial D_e}{\partial V_c} \partial V_c \quad (\text{Desplazamientos})$$

Considerando lo anterior, se proponen las siguientes combinaciones de carga de oleaje y corrientes (**Tablas 69 y 70**).

En la **Tabla 69** se caracteriza el formato visual de los resultados de tensiones máximas en el cabo línea de madre, cabo chicote, cabo línea de fondeo y cabo de boya señalizadora ante diferentes condiciones ambientales de corriente y oleaje. Sin embargo, en la **Tabla 70** se caracteriza el análisis de los desplazamientos axiales de la parte superior de la linterna 1, 50 y 100, considerando que las combinaciones de carga actúan de forma paralela o axialmente al sistema de cultivo tipo long-line, en consecuencia, los resultados de desplazamientos se presentaron en gráficos de dispersión.



**Tabla 69.**

Combinación de carga de oleaje y corriente para la simulación del sistema long-line respecto a la función objetivo de tensiones.

COMBINACIONES DE CARGA					
Análisis 1	Tensiones MAX Línea madre, cabo chicote, Línea de fondeo, cabo boya [Ton]				
	OLEAJE				
VELOCIDAD DE CORRIENTE	Sin oleaje	Hs 0,5 m T 7s	Hs 1 m T 10s	Hs 1,5 m T 15s	
	0,15 [m/s]				
	0,30 [m/s]				
	0,50 [m/s]				
	0,7 [m/s]				
	1,0 [m/s]				

**Tabla 70.**

Combinación de carga para determina la función objetivo de desplazamientos.

COMBINACIONES DE CARGA					
Análisis 2	Desplazamientos axiales [m] Linterna N° 1, 50 y 100				
	OLEAJE				
VELOCIDAD DE CORRIENTE	Sin oleaje	Hs 0,5 m T 7s	Hs 1 m T 10s	Hs 1,5 m T 15s	
	0,15 [m/s]				
	0,30 [m/s]				
	0,50 [m/s]				
	0,7 [m/s]				
	1,0 [m/s]				

## 5.11.2. Resultados simulación

### 5.11.2.1. Tensiones y desplazamientos en diseño del sistema de cultivo tipo long-line

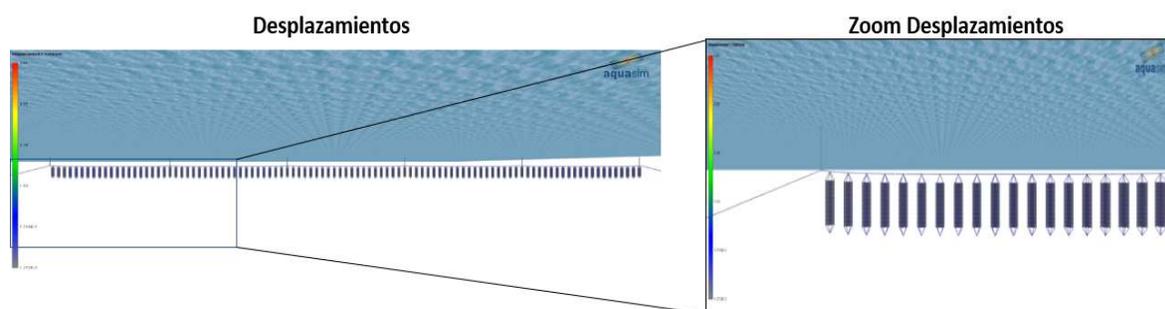
A continuación, se presentan los resultados de tensiones y desplazamientos del sistema long line en etapa de cosecha (4 kg por piso de cada linterna) en la zona norte y sur, con el objetivo de analizar el estado límite de esta estructura en fase de diseño. Considerando que al sobrepasar el estado limite la



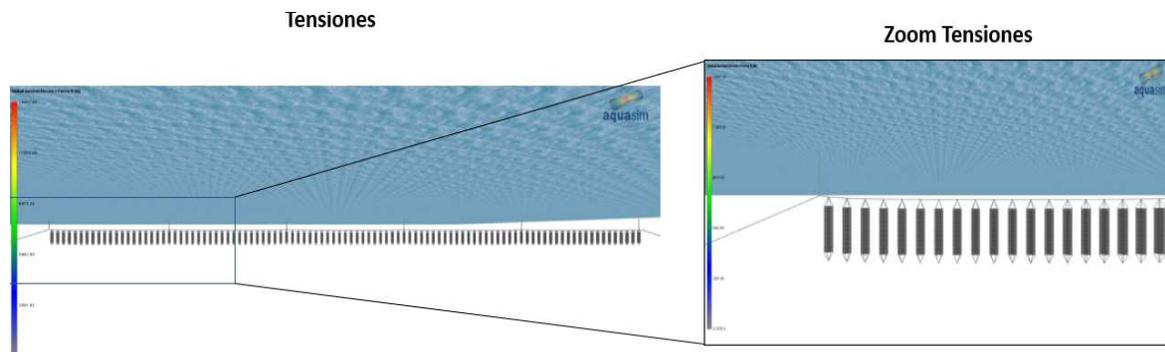
estructura tiene una alta probabilidad de que un componente falle o desestabilice el sistema respecto al desplazamiento de muertos m3sicos.

### Caso estudio N° 1, situaci3n favorable

En las **Figuras 138 y 139**, se presentan los resultados de desplazamiento y tensiones del sistema de cultivo long-line en el modelo Aquasim.



**Figura 138.** Representaci3n gr3fica de los resultados de desplazamiento del sistema long-line en el modelo Aquasim.



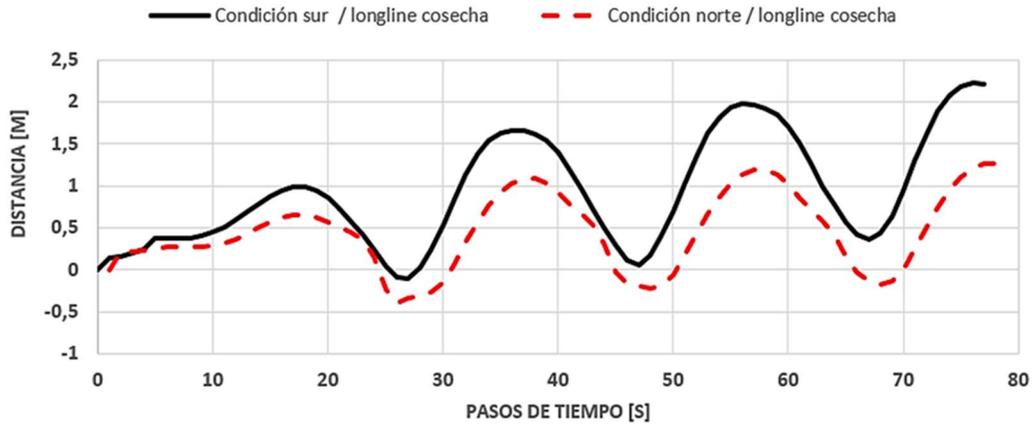
**Figura 139.** Representaci3n gr3fica de resultados de tensiones del sistema de cultivo long-line en el modelo Aquasim.

En la **Figura 140** se puede observar que, al superar los 60 segundos (s) de simulaci3n, los desplazamientos axiales alcanzan su peak para ambas condiciones, en la condici3n sur la lnea madre se desplaz3 2,2 metros de distancia respecto al momento inicial, mientras que en la condici3n norte solo 1,3 metros.

En la **Figura 141** se puede observar que la tensi3n m3xima en la lnea de fondeo del sistema de cultivo long-line es aproximadamente 3,7 toneladas en la condici3n sur, en cambio para la condici3n norte 1,5 toneladas. La condici3n sur duplic3 la tensi3n en el sistema respecto a la condici3n norte en etapa de cosecha.

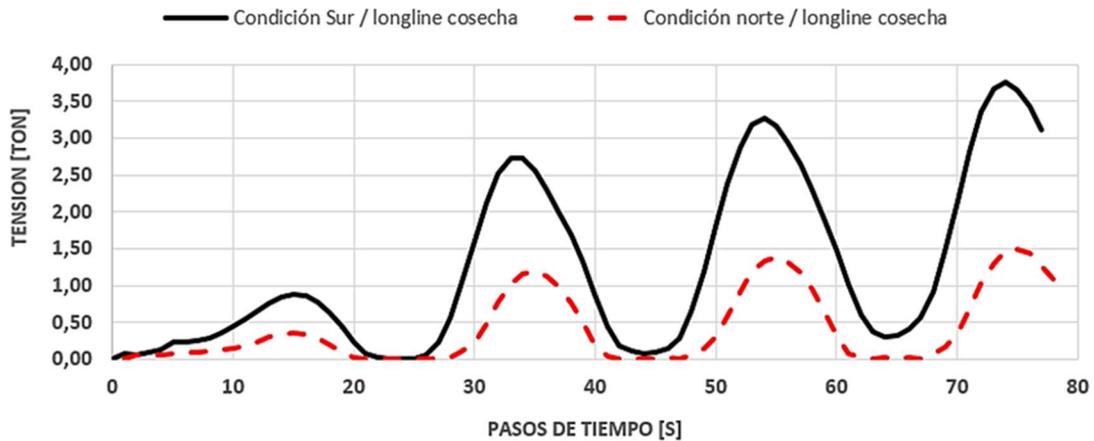


### Desplazamiento axial linea madre



**Figura 140.** Resultados de desplazamiento axial linea madre en el sistema long-line a condiciones oceanogr3ficas representativas de la zona sur y norte en etapa de cosecha.

### Tensi3n Linea de fondeo Longline

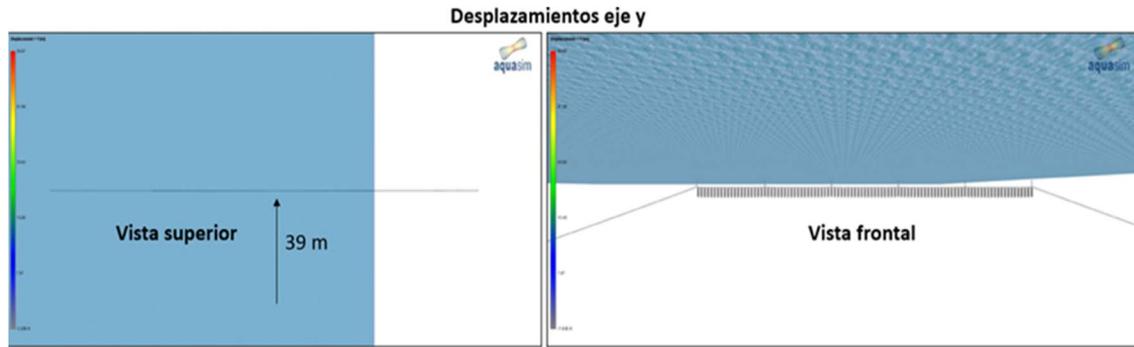


**Figura 141.** Resultados de tensiones en el sistema long-line a diferentes condiciones hidrodin3micas y de contrapeso.

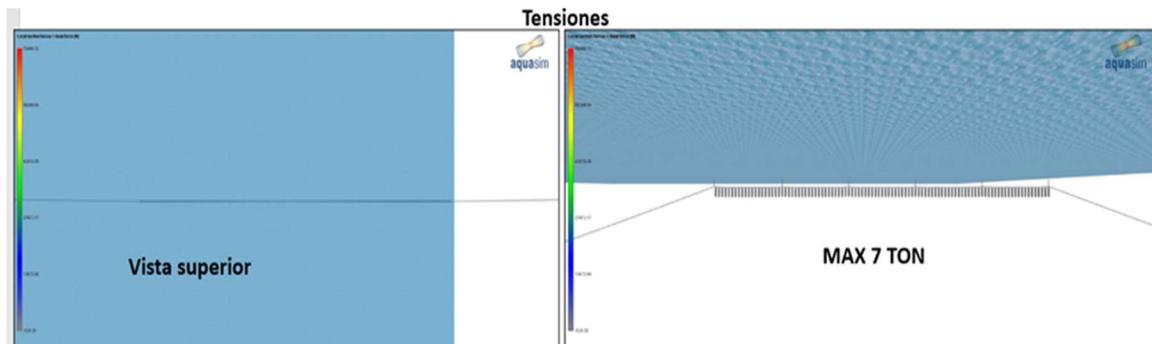


Caso estudio N° 2, situaci3n favorable

En las **Figuras 142** y **143**, se presentan los resultados de desplazamiento y tensiones del sistema de cultivo long-line en el modelo Aquasim.



**Figura 142.** Representaci3n gr3fica de los resultados de desplazamiento del sistema long-line en el modelo Aquasim.



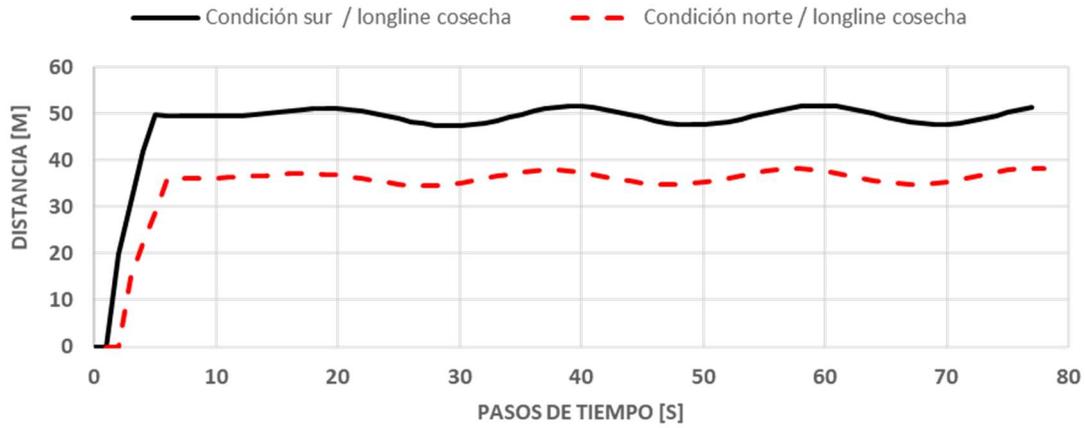
**Figura 143.** Representaci3n gr3fica de los resultados de tensiones del sistema long-line en el modelo Aquasim.

En la **Figura 144** se puede observar que, al superar los 5 segundos (s) de simulaci3n, los desplazamientos en el eje y (transversal) alcanzan su peak para ambas condiciones, en la condici3n sur la l3nea madre se desplaz3 50 metros de distancia respecto al momento inicial, mientras que en la condici3n norte solo 39 metros.

En la **Figura 145** se puede observar que la tensi3n m3xima en la l3nea de fondeo del sistema de cultivo long-line es aproximadamente 13 toneladas en la condici3n sur, en cambio para la condici3n norte 7 toneladas. La condici3n sur duplic3 la tensi3n en el sistema respecto a la condici3n norte en etapa de cosecha.

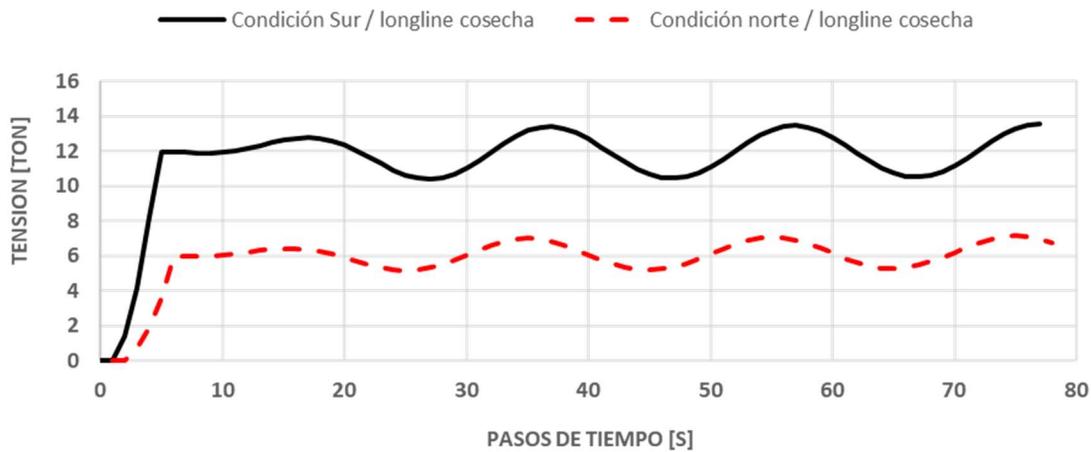


### Desplazamiento axial linea madre



**Figura 144.** Resultados de desplazamiento axial linea madre en el sistema long-line a condiciones oceanogr3ficas representativas de la zona sur y norte en etapa de cosecha.

### Tensi3n Linea de fondeo Longline



**Figura 145.** Resultados de tensiones en el sistema long-line a diferentes condiciones hidrodin3micas y de contrapeso.



### 5.11.2.2. Análisis de sensibilidad de las tensiones

A continuación, se presentan los resultados del análisis de sensibilidad de la función objetivo tensiones en las **Tablas 71 - 74** para las componentes: Cabo línea madre, Cabo línea de fondeo, Cabo chicote de la línea madre y cabo de la boya señalizadora.

En la **Tabla 71** se puede observar que la acción de la corriente sin oleaje en la tensión de la línea madre no es directamente proporcional a la intensidad. Es decir, a una velocidad de 0,5 [m/s] la línea madre se tensionó 0,22 toneladas mientras que a un 1 [m/s] la tensión máxima se incrementó 4 veces (0,956 toneladas). En consecuencia, al incrementar el doble la velocidad de corriente, aumento 4 veces su tensión. Por otra parte, la acción de oleaje en la tensión de la línea madre debe ser considerada muy importante y principal debido a que a medida que se incrementaba la intensidad del oleaje, la tensión también incrementaba sustancialmente. Por ejemplo, al combinar la velocidad de 1 [m/s] con una altura de ola de 1 m la tensión en la línea madre incrementaba a 2 toneladas, sin embargo al incrementar solo 0,5 m más (altura de ola 1,5 m) la tensión incrementaba casi a 3 toneladas.

**Tabla 71.**  
Análisis sensibilidad función objetivo tensiones en línea madre.

COMBINACIONES DE CARGA					
		Tensiones MAX Línea madre [Ton]			
		OLEAJE			
		Sin oleaje	Hs 0,5 m T 7s	Hs 1 m T 10s	Hs 1,5 m T 15s
VELOCIDAD DE CORRIENTE	0,15 [m/s]	0,103	0,345	0,830	0,994
	0,30 [m/s]	0,123	0,320	0,774	1,131
	0,50 [m/s]	0,229	0,434	0,944	1,415
	0,7 [m/s]	0,379	0,636	1,21	1,73
	1,0 [m/s]	0,956	1,20	2,05	2,83

En la **Tabla 72** se puede observar que la tensión máxima de la línea de fondeo fue de 2,9 toneladas y los efectos de la acción de la corriente y el oleaje en la componente es similar a lo descrito anteriormente.



**Tabla 72.**  
Análisis sensibilidad función objetivo tensiones en línea fondeo.

COMBINACIONES DE CARGA					
Tensiones MAX Línea fondeo [Ton]					
OLEAJE					
VELOCIDAD DE CORRIENTE		Sin oleaje	Hs 0,5 m T 7s	Hs 1 m T 10s	Hs 1,5 m T 15s
	0,15 [m/s]	0,089	0,208	0,677	1,038
	0,30 [m/s]	0,124	0,277	0,762	1,173
	0,50 [m/s]	0,240	0,457	0,989	1,469
	0,7 [m/s]	0,400	0,668	1,264	1,802
	1,0 [m/s]	0,996	1,25	2,121	2,908

En la **Tabla 73** se puede observar que la tensión máxima en el chicote de línea madre fue de 0,4 toneladas y los efectos de la acción de la corriente y el oleaje en la componente es similar a lo descrito en la **Tabla 71**.

**Tabla 73.**  
Análisis sensibilidad función objetivo tensiones en chicote.

COMBINACIONES DE CARGA					
Tensiones MAX Chicote Línea madre [Ton]					
OLEAJE					
VELOCIDAD DE CORRIENTE		Sin oleaje	Hs 0,5 m T 7s	Hs 1 m T 10s	Hs 1,5 m T 15s
	0,15 [m/s]	0,019	0,036	0,045	0,061
	0,30 [m/s]	0,031	0,053	0,063	0,077
	0,50 [m/s]	0,053	0,097	0,114	0,126
	0,7 [m/s]	0,071	0,151	0,197	0,160
	1,0 [m/s]	0,201	0,232	0,360	0,410

En la **Tabla 74** se puede observar que la tensión máxima en el cabo de la boya señalizadora fue de 0,3 toneladas y los efectos de la acción de la corriente y el oleaje tiende a ser directamente proporcional entre la intensidad y la tensión.



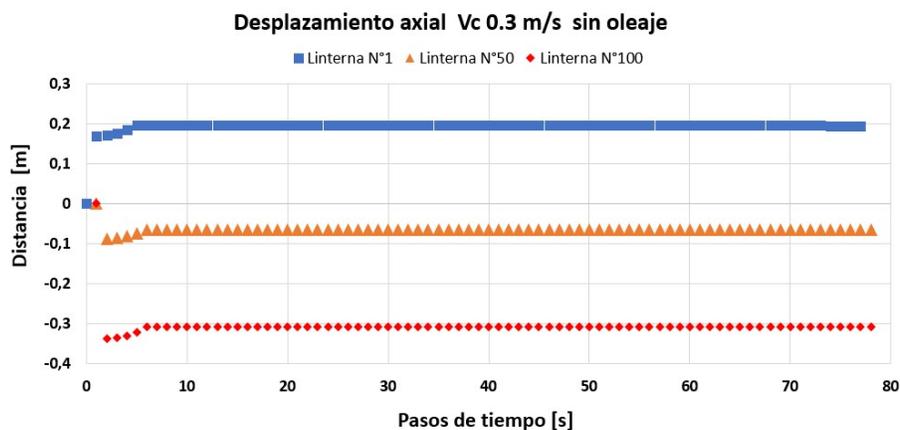
**Tabla 74.**  
Análisis sensibilidad función objetivo tensiones en cabo boya señalizadora.

COMBINACIONES DE CARGA					
Tensiones MAX Cabo boya señalizadora [Ton]					
OLEAJE					
VELOCIDAD DE CORRIENTE		Sin oleaje	Hs 0,5 m T 7s	Hs 1 m T 10s	Hs 1,5 m T 15s
	0,15 [m/s]	0,095	0,118	0,161	0,196
	0,30 [m/s]	0,095	0,124	0,175	0,206
	0,50 [m/s]	0,107	0,148	0,195	0,233
	0,7 [m/s]	0,133	0,173	0,220	0,254
	1,0 [m/s]	0,220	0,239	0,266	0,308

### 5.11.2.3. Análisis de sensibilidad desplazamiento axial

A continuación, en las **Figuras 146 – 153** y a través de gráficos de dispersión se visualizan los resultados de desplazamientos axiales de la parte superior de la linterna N° 1, 50 y 100 del sistema de cultivo tipo long-line:

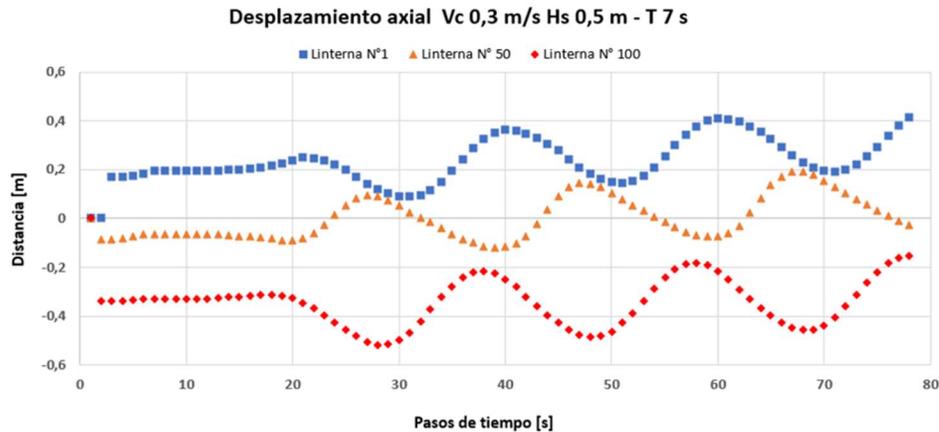
En la **Figura 146** se puede observar que los desplazamientos en las linternas sin efectos de oleaje son constantes, siendo mayores para linterna número 1 (donde inicia la interacción corriente – estructura) respecto a la linterna número 100. Esto puede ser explicado por el efecto “sombra” de las condiciones hidrodinámicas a lo largo del sistema, donde disipa la energía de forma longitudinal de la velocidad corriente al interactuar con el sistema.



**Figura 146.** Desplazamiento axial sistema de cultivo 0,3 m/s sin oleaje.

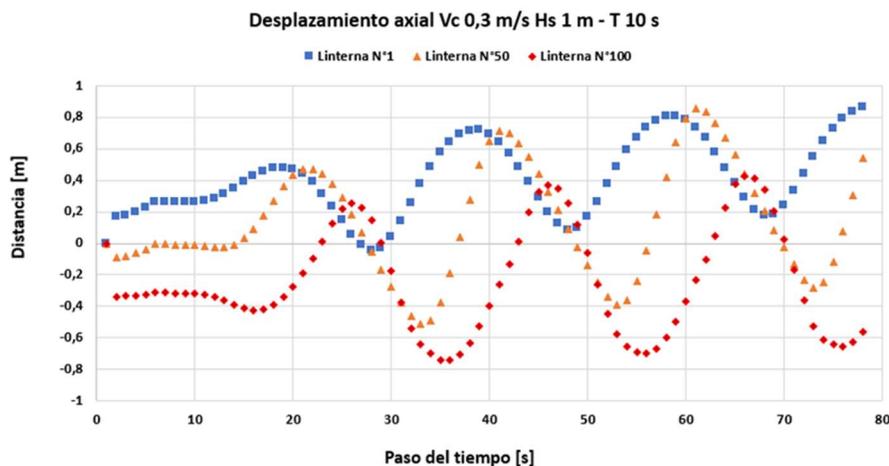


En la **Figura 147** se observa que, al interactuar oleaje junto con la corriente en el sistema, los desplazamientos tienden al comportamiento del oleaje, sin embargo, el desplazamiento sigue siendo mayor en la linterna numero 1 respecto a la 100.



**Figura 147.** Desplazamiento axial sistema de cultivo 0,3 m/s y Hs 0,5 m - T 7 s.

En la **Figura 148** se puede observar que a medida aumenta la intensidad del oleaje, el desplazamiento también incrementa, es decir, que existe dependencia entre la magnitud de la ola respecto al desplazamiento del sistema.



**Figura 148.** Desplazamiento axial sistema de cultivo 0,3 m/s y Hs 1 m - T 10 s.

En la **Figura 149** al seguir incrementando la altura de la ola, el desplazamiento no incrementa significativamente y de forma proporcional a la intensidad, por lo tanto, la relación desplazamiento – intensidad de ola no es directamente proporcional.

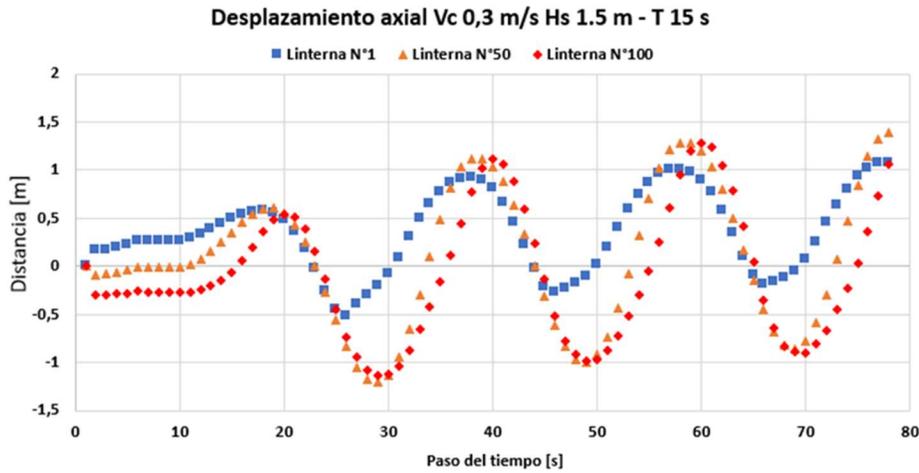


Figura 149. Desplazamiento axial sistema de cultivo 0,3 m/s y Hs 1,5 m - T 15 s.

En la Figura 150 se puede observar que el desplazamiento del sistema en la linterna número 1 fue de aproximadamente 1 metro, siendo similar en el máximo de los resultados de la Figura 149, es decir, la corriente tiene una incidencia importante en el comportamiento del sistema. Sin embargo, la linterna número 50 y 100 tuvieron un desplazamiento axial mayor que la linterna N°1 en condiciones de alta velocidad de corriente.

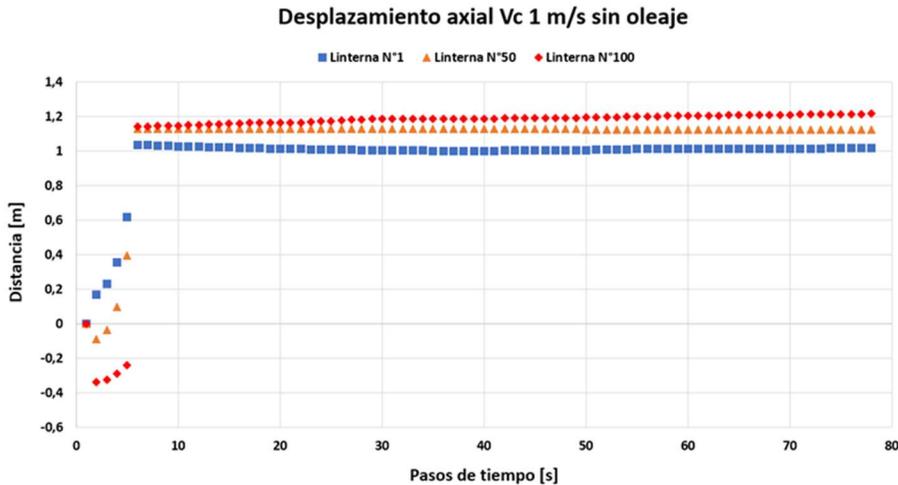


Figura 150. Desplazamiento axial sistema de cultivo 1 m/s sin oleaje.

En la Figura 151 respecto a la Figura 150, el desplazamiento axial incrementa, sin embargo, el movimiento del sistema long-line se adapta a las ondas del oleaje. Por otra parte, el desplazamiento



de la parte superior de la linterna numero 1 sigue siendo menor respecto a la linterna número 50 y 100.

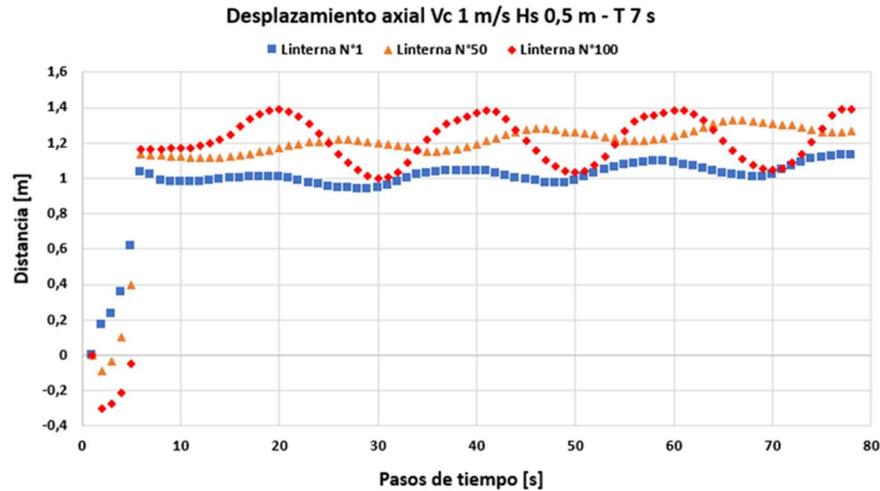


Figura 151. Desplazamiento axial sistema de cultivo 1 m/s y Hs 0,5 m - T 7 s.

En la **Figura 152** se puede observar que, al incrementar la magnitud del oleaje, el desplazamiento axial de cada linterna incrementó, sin embargo, al mantener una velocidad de corriente alta (1 m/s) el desplazamiento axial en la linterna numero 1 sigue siendo menor respecto a la numero 50 y 100.

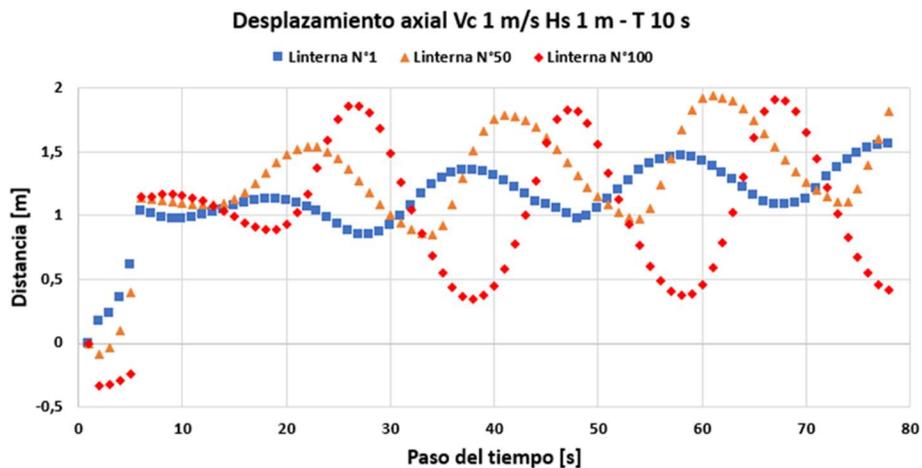
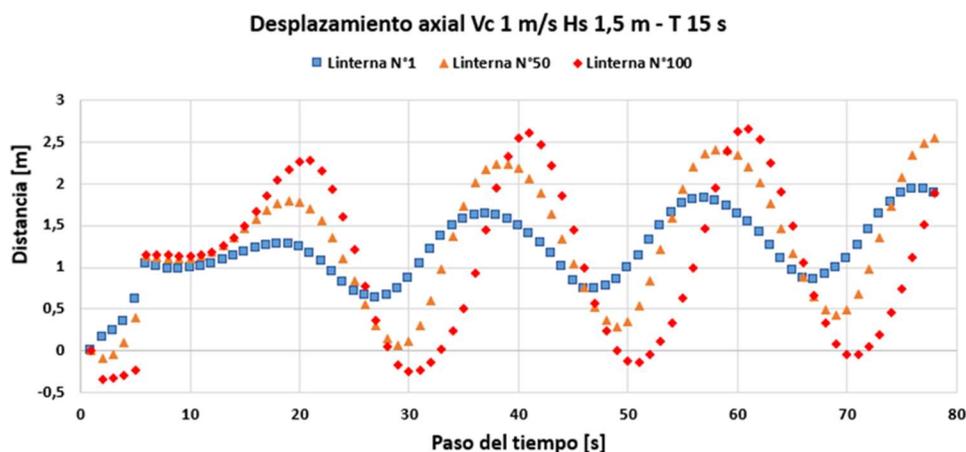


Figura 152. Desplazamiento axial sistema de cultivo 1 m/s y Hs 1 m - T 10 s.

En la **Figura 153** se puede corroborar lo descrito anteriormente, que a mayor intensidad oceanográfica de corrientes y oleaje el desplazamiento axial en la parte superior de la linterna número 50 y 100, tienden a ser mayores que la linterna número 1.



**Figura 153.** Desplazamiento axial sistema de cultivo 1 m/s y Hs 1.5 m - T 15 s.

#### 5.11.2.4. Factores de seguridad

A continuaci3n, respecto a los resultados presentados anteriormente (Condici3n oceanogr3fica norte, condici3n oceanogr3fica sur y an3lisis de sensibilidad), se calcularon los factores de seguridad de los componentes evaluados, por lo tanto, se propone la dimensi3n requerida y/o adecuada para el sistema long-line respecto a la normativa de c3lculo (Res. Ex. N° 1821-2020 que Establece Metodolog3a para el Levantamiento de Informaci3n, Procesamiento y C3lculos del Estudio de Ingenier3a, y Especificaciones T3cnicas de las Estructuras de Cultivo) (SUBPESCA 2020) (**Tablas 75, 76 y 77**).

**Tabla 75.**

Factores de seguridad de los componentes simulados en sistema de cultivo tipo long-line en la condici3n oceanogr3fica de la zona norte.

Componente simulado	Tensi3n Max simulada Condici3n norte	Resistencia Max componente	Factor de seguridad	Factor de seguridad Cumple R. Ex. 1821	Dimensi3n requerida
Cabo 22 mm l3nea madre	1,3 ton	8,4 ton	6,4	(3) SI	16 mm (resistencia 4,5 ton)
Cabo 32 mm l3nea fondeo	1,5 ton	19,9 ton	13,2	(3) SI	16 mm (resistencia 4,5 ton)
Cabo 22 mm boya se3alizador	0,2 ton	8,4 ton	42	(3) SI	6 mm (resistencia 0,75 ton)
Chicote 6 mm l3nea madre	0,39 ton	0,75 ton	2,5	(3) NO	8 mm (resistencia 1,3 ton)



**Tabla 76.**

Factores de seguridad de los componentes simulados en sistema de cultivo tipo longline en la condición oceanográfica de la zona sur.

Componente simulado	Tensión Max simulada Condición sur	Resistencia Max componente	Factor de seguridad	Factor de seguridad Cumple R. Ex. 1821	Dimensión requerida
Cabo 22 mm línea madre	3,1 ton	8,4 ton	2,7	(3) NO	24 mm (resistencia 9,9 ton)
Cabo 32 mm línea fondeo	3,7 ton	19,9 ton	5,37	(3) SI	28 mm (resistencia 9,9 ton)
Cabo 22 mm boya señalizadora	0,3 ton	8,4 ton	28	(3) SI	8 mm (resistencia 1,3 ton)
Chicote 6 mm línea madre	0,4 ton	0,75 ton	1,87	(3) NO	8 mm (resistencia 1,3 ton)

**Tabla 77.**

Factores de seguridad de los componentes simulados en sistema de cultivo tipo longline respecto al análisis de sensibilidad.

Componente simulado	Tensión Max simulada Análisis sensibilidad	Resistencia Max componente	Factor de seguridad	Factor de seguridad Cumple R. Ex. 1821	Dimensión requerida
Cabo 22 mm línea madre	2,8 ton	8,4 ton	3	(3) SI	22 mm (resistencia 8,4 ton)
Cabo 32 mm línea fondeo	2,9 ton	19,9 ton	6,8	(3) SI	24 mm (resistencia 9,9 ton)
Cabo 22 mm boya señalizadora	0,3 ton	8,4 ton	28	(3) SI	8 mm (resistencia 1,3 ton)
Chicote 6 mm línea madre	0,41 ton	0,75 ton	0,6	(3) NO	8 mm (resistencia 1,3 ton)

#### 5.11.2.5. Muerto másico

Se calculó el muerto másico requerido y/o adecuado a utilizar en el diseño de este sistema de cultivo long-line, respecto a los resultados de las condiciones oceanográficas estimados de la zona sur y norte. Cabe considerar, que el análisis de sensibilidad queda excluido en el cálculo del muerto másico debido a que fue utilizado para entender la dinámica del sistema respecto a los parámetros de tensiones y desplazamiento, por lo tanto, no es necesario su uso para el diseño del sistema long-line. Considerando lo anterior, respecto a la R. Ex. 1821 se propone calcular el peso en seco del muerto másico a través de la siguiente ecuación:

$$P = \frac{\rho_{\text{Hormigón}}}{(\rho_{\text{Hormigón}} - \rho_{\text{agua}})} P_w \text{ [Ton]}$$



Por lo tanto, para la condici3n sur (Peso h3medo del muerto m3sico (Pw) m3nimo es de 3,7 toneladas), se recomienda utilizar 2 muertos m3sicos de 6,45 toneladas (peso seco) cada uno, en el sistema de fondeo del long-line simulado:

**P = 6,45 [Ton] ZONA SUR**

En cambio, para la zona norte (Peso h3medo (Pw) m3nimo para el muerto m3sico es de 1,5 toneladas), se recomienda utilizar 2 muertos m3sicos de 2,6 toneladas (peso seco) cada uno, en el sistema de fondeo del long-line simulado:

**P = 2,6 [Ton] ZONA NORTE**

#### 5.11.2.6. Propuestas de dise1o sistema de cultivo long-line zona norte y sur

En las Figuras 154 y 155, se adjuntan los planos de detalle de las propuestas de dise1o de sistema de cultivo long-line para la zona norte y sur, respectivamente.

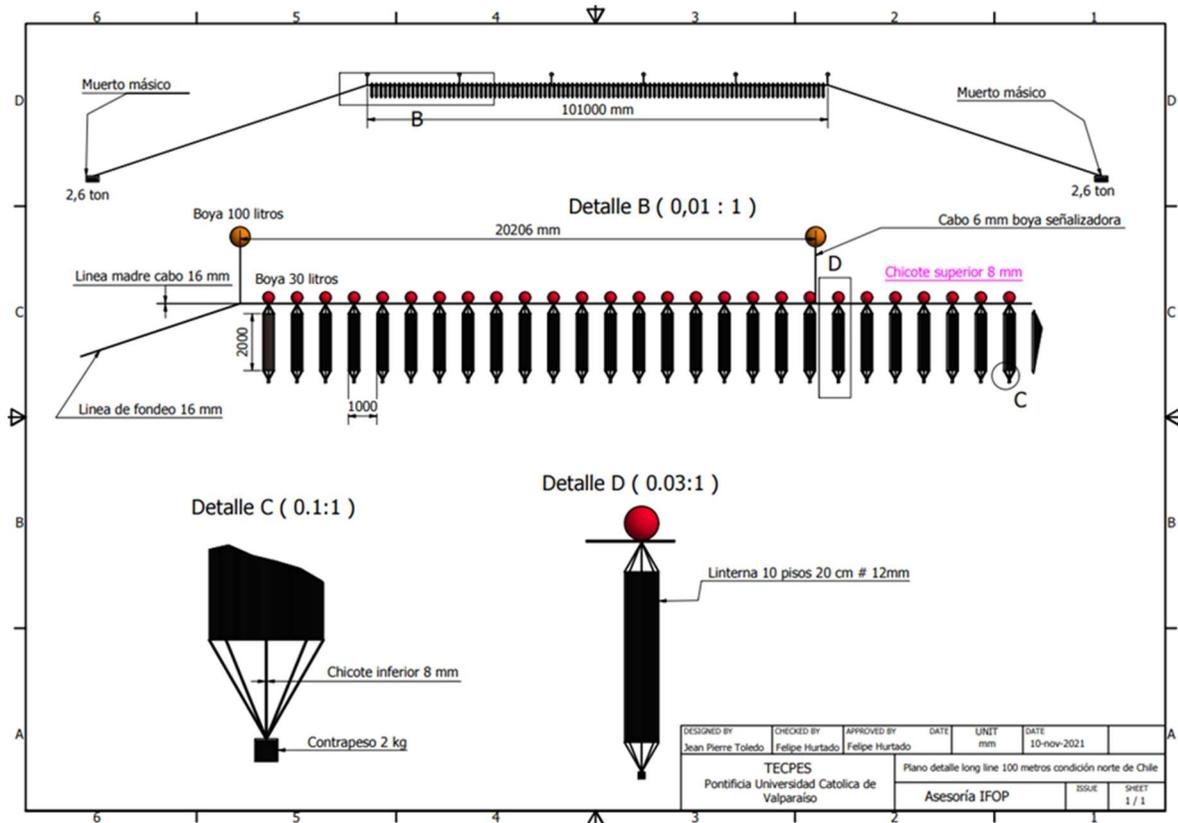


Figura 154. Plano detalle sistema long-line para la condici3n de la zona norte de Chile.

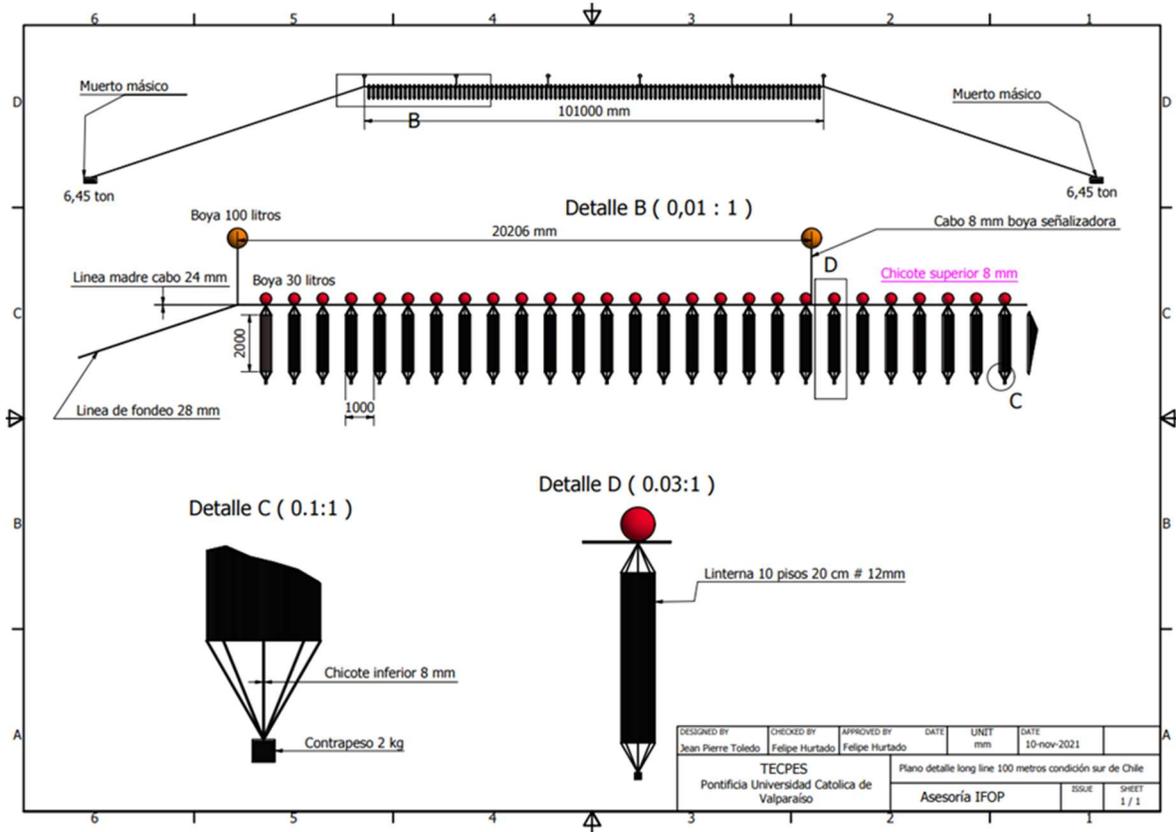


Figura 155. Plano detalle sistema long-line para la condición de la zona sur de Chile.



**Objetivo específico 6:** *Realizar acciones de difusión asociadas al desarrollo de la acuicultura de pequeña escala.*

**5.12. Mantención y actualización de página web APE**

Durante esta etapa, se mantuvo y actualizó permanentemente el sitio web [www.sembradoelmar.cl](http://www.sembradoelmar.cl), diseñado e implementado en la etapa IV del Programa. Este sitio contiene información multidimensional (e.g., legal, económica, productiva, científica) y multimedia (e.g., videos, ilustraciones, publicaciones, manuales, fotografías, links de utilidad) de apoyo al cultivador y/o emprendedor en el ámbito de la acuicultura de pequeña escala (APE) en Chile. Además, permite almacenar y difundir a la comunidad nacional e internacional, de manera digital, toda la información de las actividades de investigación desarrolladas en el marco del Programa y otras relativas a APE.

El análisis del funcionamiento del sitio web se realizó con la herramienta Google Analytics. Esta herramienta es la más utilizada en el mundo y permite el análisis y seguimiento de las páginas web; con ella es posible monitorear el número de visitantes, países, páginas más visitadas y otros datos.

El análisis del funcionamiento del sitio web durante los últimos 28 días (4 de febrero al 3 de marzo 2022) permitió identificar un total de 271 usuarios (**Figura 156**), de los cuales 252 corresponden a nuevos visitantes con un tiempo de interacción medio de 1 minuto y 3 segundos. El nivel más alto de visitas se observa el día 10 de febrero con 93 usuarios.

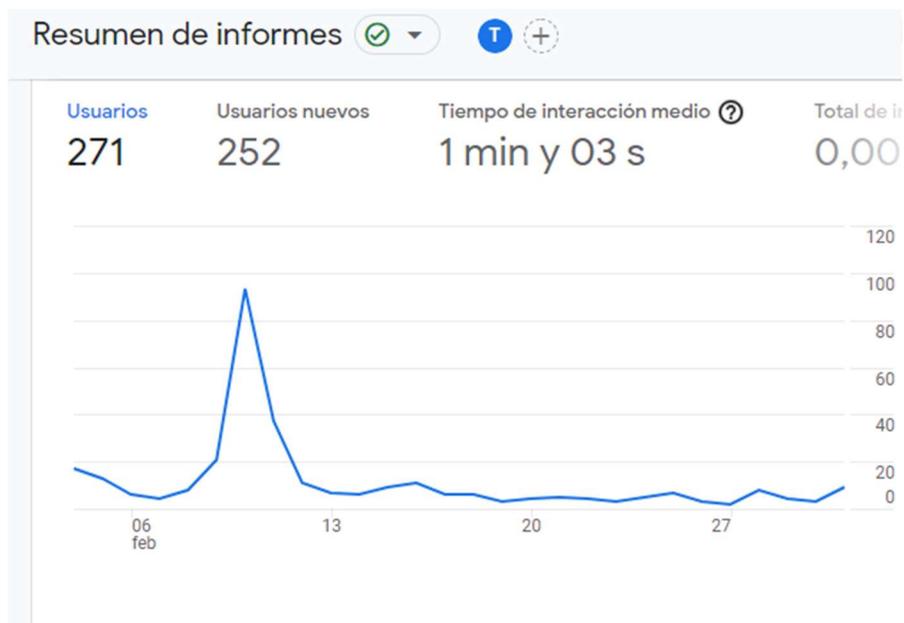
La **Figura 157** señala la dispersión demográfica de consulta del sitio web; destacando como principales usuarios Chile, Estados Unidos y China con un total de 169, 37 y 19 usuarios respectivamente.

En cuanto al contenido, en los últimos 28 días, se obtienen 551 visitas de 271 usuarios en total (**Figura 158**); las secciones que obtienen mayores visualizaciones son:

1. APE - Manual: Sistema de cultivos para acuicultores de pequeña escala con un total de 170 visitas y 119 usuarios.
2. APE- Acuicultura de pequeña escala en Chile, 97 visitas y 72 usuarios.
3. APE- Publicaciones, 85 visitas y 43 usuarios.

Este sitio web también se encuentra vinculado a las redes sociales Instagram (@re poblacion\_y\_cultivo\_ifop) y Twitter (@arm\_labDRC) (**Figura 159**) lo que permite una difusión aún más rápida de los contenidos y actividades del Programa, como también de las últimas publicaciones (científicas, normativa, económicas, manuales, videos etc.) en el ámbito nacional referente a la APE. Instagram posee 81 publicaciones y 616 seguidores mientras que Twitter contiene 85 tweets y 41 seguidores. Entre los usuarios de estas redes sociales se encuentran personas naturales, investigadores e instituciones de investigación nacional e internacional. Instagram ha sido la plataforma digital con mayor popularidad en la comunidad.

Las plataformas digitales utilizadas han permitido la posibilidad de comunicación e intercambio de información con diferentes personas e instituciones que han colaborado en la divulgación de las actividades y productos originados durante el Programa; lo cual permite promover la APE que se desarrolla en Chile.



**Figura 156.** N3mero de usuarios y tiempo de interacci3n media del sitio web [www.sembrandoelmar.cl](http://www.sembrandoelmar.cl) durante los 3ltimos 28 d3as (4 de febrero al 3 de marzo 2022).

Usuarios ▼ por Pa3s



[Ver paises](#) →

**Figura 157.** Dispersi3n demogr3fica de consulta del sitio web [www.sembrandoelmar.cl](http://www.sembrandoelmar.cl) durante los 3ltimos 28 d3as (4 de febrero al 3 de marzo 2022).

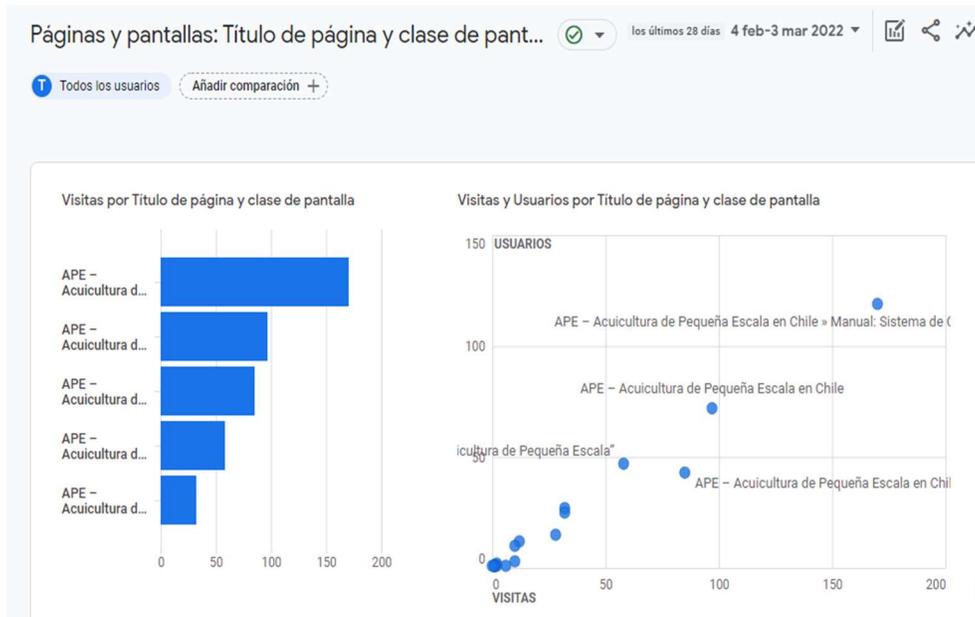


Figura 158. Contenidos más visitados del sitio web [www.sembrandoelmar.cl](http://www.sembrandoelmar.cl) durante los últimos 28 días (4 de febrero al 3 de marzo 2022).

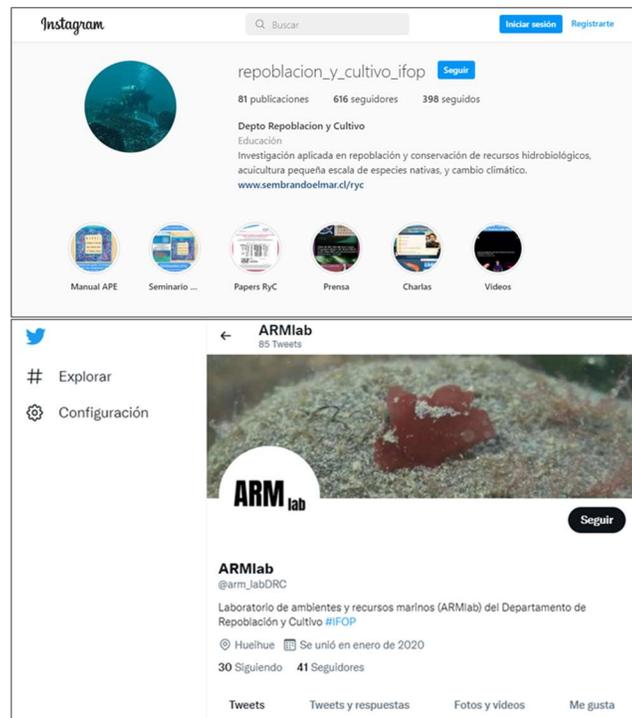


Figura 159. Redes sociales Instagram (@re poblacion\_y\_cultivo\_ifop) y Twitter (@arm\_labDRC) vinculadas a la página web [www.sembrandoelmar.cl](http://www.sembrandoelmar.cl).



### 5.13. Realización de seminarios de difusión y transferencia APE

Se realizaron dos instancias de difusión y transferencia para promover el desarrollo sostenible de la APE. Ambos bajo modalidad on-line y con la participación de representantes de la pesca artesanal, acuicultores, institucionalidad, academia, empresa, entre otros. El registro audiovisual de ambas instancias se encuentra disponible en <https://sembrandoelmar.cl/noticias/>.

#### 5.13.1. Experiencias y Desafíos en el Valor Agregado en prácticas de Acuicultura a Pequeña Escala

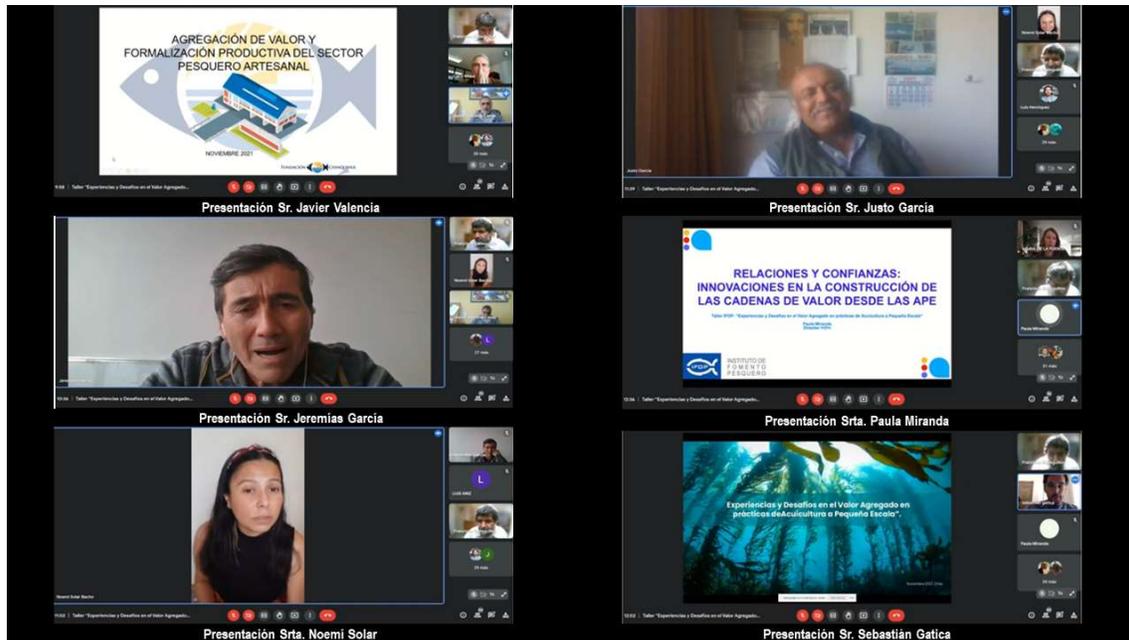
Este taller se desarrolló el día martes 30 de noviembre de 2021 en forma virtual a través de la plataforma Google Meet (ver Programa en **Anexo 3**). El taller tuvo una asistencia variable entre 30-40 personas, y se estructuró en base a la presentación de experiencias de 6 expositores, en ámbitos vinculados a la temática principal del seminario, las cuales se describen brevemente a continuación:

1. Javier Valencia – Fundación Chiquihue: *“Agregación de Valor y Formalización Productiva del sector Pesquero Artesanal”*. Se compartieron experiencias de agregación de valor tanto para productos originados en acuicultura de pequeña escala como pesca extractiva. Se hizo énfasis en que la diversificación productiva debe ir acompañada de formalización tributaria/contable y sanitaria para que las iniciativas de valor agregado sean viables. Los enfoques de género (participación de mujeres) en iniciativas de valor agregado facilitan fuertemente el desarrollo de iniciativas de valor agregado. Se detectan brechas en términos de equipamiento e infraestructura (i.e. agua potable, disponibilidad y tipo de energía eléctrica) acorde a la normativa sanitaria para formalizar iniciativas de valor agregado, además de planificación de las dinámicas del negocio asociadas a iniciativas de valor agregado. Se presentaron líneas de productos de valor agregado congelados, deshidratados, ahumados, conservas en frascos de vidrio (con equipamiento ajustado a la normativa sanitaria). En términos de infraestructura, Fundación Chiquihue ha avanzado en el desarrollo de un micromódulo de planta de proceso aprobada por SEREMI Salud para desarrollar productos de valor agregado. También Fundación Chiquihue desarrolla capacitaciones en un “Centro de prototipaje de alimentos de la Pesca Artesanal” (centradas en los aspectos de elaboración) y en aspectos relacionados a la dinámica de los negocios asociados a productos de valor agregado. Se ha detectado que las iniciativas individuales en torno a la producción de alimentos de valor agregado tienden a ser más eficientes que las iniciativas grupales, a diferencia de la comercialización en donde es más viable la comercialización en conjunto (cooperativa de comercialización con formalización contable).
2. Jeremías García – Sol Tardío S.A.: *“Experiencias de acuicultura de pequeña escala en la zona norte de Chile.”* Se compartieron experiencias de desarrollo histórico de empresas y microempresas vinculadas al cultivo del ostión del norte. El principal problema detectado es que la comercialización de ostiones antes se hacía junto a empresas de mayor tamaño, lo que castigaba los precios de venta. Esta situación ha empezado a ser transformada, al punto que los emprendimientos agregan valor a la cosecha de ostión del norte para ser destinada a mercados nacionales, doblando el valor de venta de los productos. Una de las brechas detectadas es la disponibilidad de micro-plantas de proceso (con topes de producción acotados) para dar valor agregado a los productos y tener un mejor control de la producción. Se plantea el desafío de dar



- valor agregado desde el momento de la extracción/cosecha, permitiendo sacar menos y ganar más. Hoy se trabaja con tres productos (ostión, jaiba, piure) aumentando en un 50% el valor de venta y disminuyendo la cantidad de intermediarios.
3. Noemí Solar – Alguita de Mar SpA: *“Desarrollo de proveedores de algas para el mercado familiar.”* Se presentó una experiencia de comercialización de algas deshidratadas en formato premium. La recolección de materia prima en principio era desarrollada por recolectores y recolectoras a lo largo del país, sin embargo, debido a que el abastecimiento no es continuo (por estacionalidad en la biomasa de praderas naturales o dificultades climáticas por marejadas) se ha comenzado el abastecimiento mediante acuicultura a pequeña escala. Una de las principales dificultades en el abastecimiento de materia originada de acuicultura de pequeña escala es la formación de equipos confiables en el abastecimiento de materia prima, junto con la presencia de epífitos. La acuicultura a pequeña escala permite un abastecimiento continuo de materia prima y hasta cierto punto manejar la calidad del producto cosechado.
  4. Justo García – Cultivos Marinos Cholche: *“Experiencias y Desafíos en la agregación de valor en productos originados desde acuicultura de pequeña escala.”* Se presentó la experiencia de transformación de productos (producto terminado) en base a acuicultura de pequeña escala, reduciendo la cadena de valor y aumentando la rentabilidad del cultivo. Actualmente la parrilla de recursos alcanza a 14 recursos (entre moluscos filtradores y algas). En cuanto a algas, se está trabajando con pellets de algas, extracción de antioxidantes, algas deshidratadas, conservas en frascos de vidrio. Una de las principales dificultades detectadas en la ampliación de la oferta de productos asociados a acuicultura son los trámites asociados a ampliación de especies. También se está trabajando de manera colaborativa con miticultores y ostricultores para producir en planta productos de valor agregado.
  5. Paula Miranda – Acuanativa: *“Relaciones y Confianzas: Innovación en la construcción de cadenas de valor desde la acuicultura de pequeña escala.”* Se presentó la experiencia de elaboración de bio-productos orientados a la acuicultura. Se proyecta un mayor crecimiento de demanda de algas rojas para consumo humano y aditivos para consumo humano de alrededor de 13%. El objetivo de este emprendimiento es poder generar estos productos en Chile a partir de biomasa (algas) provenientes de acuicultura de pequeña escala, generando cadenas de confianza entre los actores de la cadena de valor (i.e. proveedores y productores de bio-moléculas). El objetivo es crear bio-productos (principalmente aditivos) basados en biomasa generada a partir de acuicultura de pequeña escala, que requieran menos biomasa en comparación a la producción de proteínas para consumo animal.
  6. Sebastián Gatica – CoLabUC: *“Acuicultura Oceánica Regenerativa.”* Se plantea un desafío de promoción de modelos más sostenibles de cultivo, que impliquen policultivos, economía circular (reutilización de residuos, minimización de costos) y agregación de valor en ese ejercicio. Se plantean modelos colaborativos entre actores de gran escala (salmoneros) y de pequeña escala (comunidades costeras). En este sentido, los prototipos (modelos pequeños de innovación) implementados en conjunto con los actores y usando los recursos disponibles en los territorios son las vías o medios ideales para poder demostrar la viabilidad de estos sistemas de cultivo propuestos.

Una captura de pantalla de cada una de las presentaciones del taller se muestra en la **Figura 160**.



**Figura 160.** Capturas de pantalla de las presentaciones realizadas durante el taller “Experiencias y Desafíos en el Valor Agregado en prácticas de Acuicultura a Pequeña Escala”.

### 5.13.2. Sistemas y tecnologías de cultivo para desarrollar Acuicultura de Pequeña Escala

Este seminario se desarrolló el día lunes 10 de enero 2022 en forma virtual a través de la plataforma Google Meet (ver Programa en **Anexo 3**). El seminario tuvo una asistencia variable entre 60-110 personas y se estructuró en base a 5 presentaciones en ámbitos vinculados a la temática principal del seminario, las cuales se describen brevemente a continuación:

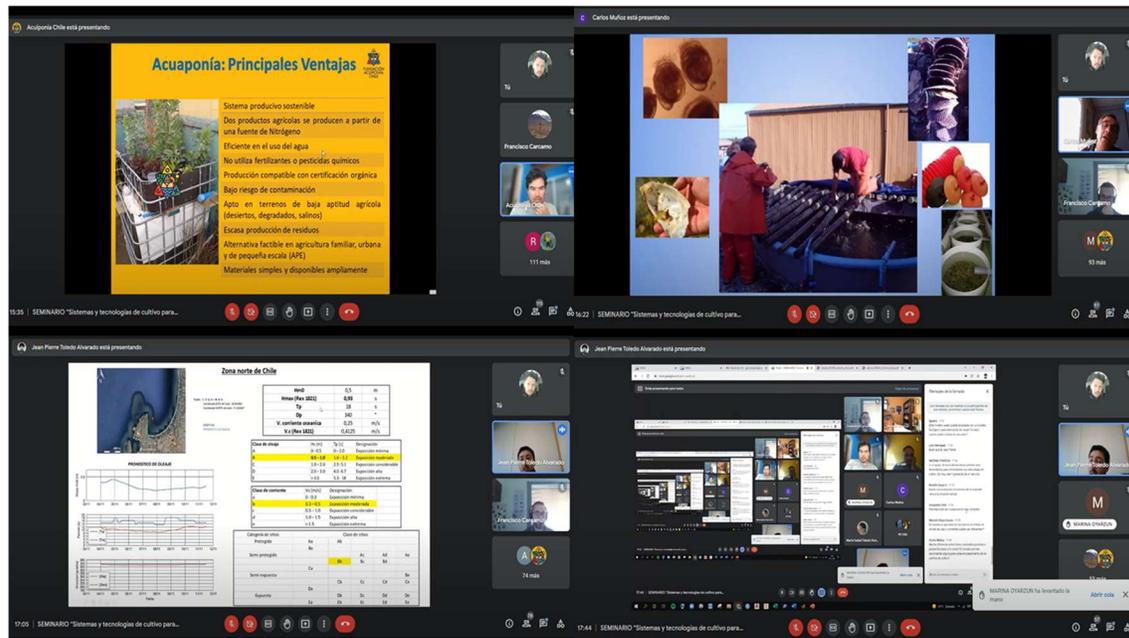
1. Francisco Galleguillos - Departamento Repoblación y Cultivo – IFOP: “Manual sistemas de cultivo para acuicultores APE”. Mediante esta presentación se hizo el lanzamiento inicial del Manual, que tiene por finalidad mostrar de manera amigable y gráfica la confección, la materialidad y el diseño de 10 sistemas de cultivo que podrían ser incorporados en la APE. Se hizo énfasis en que este material fue confeccionado, buscando que pescadores(as) artesanales que estén desarrollando APE, puedan incorporar estas técnicas y/o ampliar sus recursos según sus posibilidades, y que los contenidos del manual se han tratado de reflejar en un lenguaje sencillo y con ilustraciones muy elaboradas, que ayuden a comprender fácilmente el funcionamiento de los sistemas». El manual en su formato «hojeable» puede ser revisado en: <https://sembrandoelmar.cl/manual-sistema-de-cultivo-para-acuicultores-de-pequena-escala/>. Y descargado en: <https://sembrandoelmar.cl/web/wp-content/uploads/2022/02/Manual-Sistemas-Cultivo-APE-comprimido.pdf>
2. Gabriel Salvo - Fundación Acuíponía Chile: “Acuíponía como una alternativa para APE”. El relator realizó una introducción general a la Fundación y el estado del arte de la acuíponía en Chile y el



mundo. Se destacan los beneficios y posibilidades de ejecutar la acuaponía en Chile, incluido el contexto de oportunidades que otorga la APE en aguas continentales, pero también la acuaponía marina.

3. Carlos Muñoz - Consultor en Acuicultura: "Producción de semillas de bivalvos en hatchery, a la medida de la APE". El relator revisa la historia y avances en la producción de larvas y semillas de bivalvos en Chile, principalmente ostión del norte y ostra japonesa. Se presentan y discuten los desafíos de la escala productiva y proponen nuevos enfoques tecnológicos-productivos.
4. Joseba Abaroa – Acuicultor APE: "Sistemas de cultivos de macroalgas". Debido a problemas de conectividad el relator no pudo realizar su presentación.
5. Jean Pierre Toledo – Laboratorio de tecnología en Pesca y Acuicultura -PUCV: "*Modelación en sistemas de cultivos suspendidos APE*". La presentación se centró en dos temas principales: i) resultados de una revisión de diseños y características de los principales sistemas y tecnologías de cultivo disponibles en Chile y el mundo para desarrollar APE, y ii) modelación y simulación numérica de un sistema de cultivo de bivalvos en long-line bajo dos escenarios ambientales, cuyos resultados permiten avanzar en una propuesta de diseño para ejecutar APE en ambientes de mayor energía y exposición.

Una captura de pantalla de las presentaciones del seminario se muestra en la **Figura 161**.



**Figura 161.** Capturas de pantalla de las presentaciones realizadas durante el taller "Sistemas y tecnologías de cultivo para desarrollar Acuicultura de Pequeña Escala".



## 5.14. Actividades generales

### 5.14.1. Reuniones de Coordinación

Durante el año 2021, se mantuvo contacto frecuente con la contraparte técnica, vía mail, teléfono y WhatsApp, para informar la afectación de las actividades del Programa producto de las restricciones de la Pandemia COVID-19, coordinar realización de talleres, así como, para gestionar permisos de acuicultura por parte de SUBPESCA.

Se realizó una reunión vía telemática, el 23 de septiembre. Asistieron: Sergio Mesa (APE, División de Acuicultura, SUBPESCA), Denisse Torres, Francisco Galleguillos y Francisco Cárcamo (IFOP). Se presentaron el avance de actividades y los requerimientos de coordinación. El temario propuesto fue:

- Estado de Avance de actividades Programa APE 2021
- Organización Talleres APE 2021
- Términos Técnicos de Referencia y Propuesta Técnica Programa APE año 2022
- Situación cultivo pelillo Maullín y San Pedro
- Actividades año de la pesca y APE 2022
- Otros

### 5.14.2. Difusión de Resultados del Programa

El Taller de Difusión del Informe Final: “Programa Integral de Desarrollo de Acuicultura para Pescadores Artesanales y Acuicultores de Pequeña Escala. Etapa V”, se realizó el día martes 29 de marzo del 2022 en modalidad on-line vía Google Meet. Se presentaron 8 ponencias y contó con una audiencia entre 70-80 personas. El programa, invitación y las respectivas presentaciones se adjuntan en el **Anexo 3**. Una captura de pantalla de las presentaciones se muestra en la **Figura 162**.

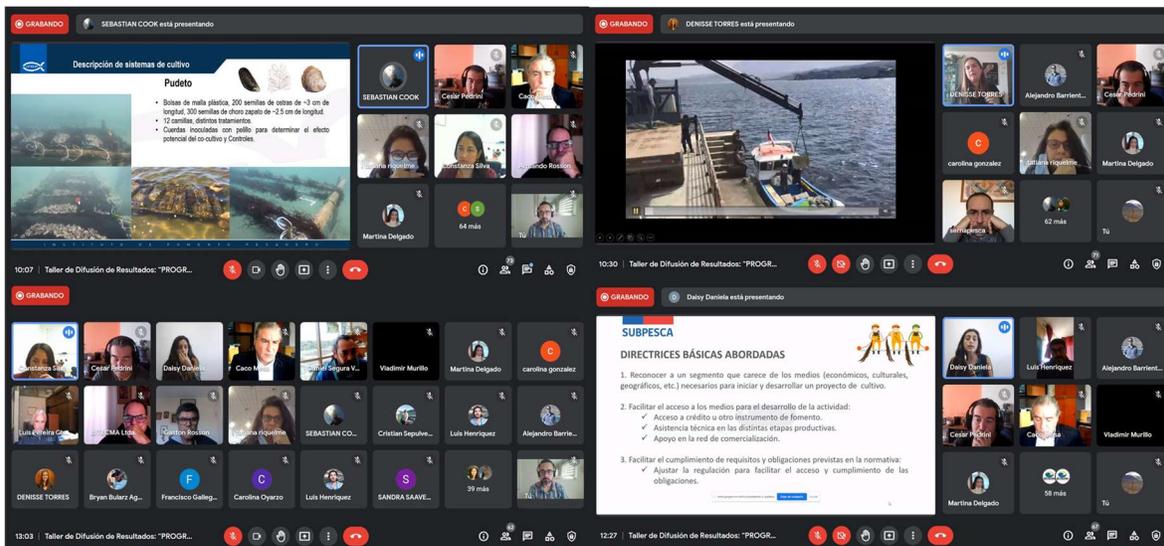


Figura 162. Capturas de pantalla de presentaciones realizadas durante el Taller Difusión del Informe Final.



### 5.14.3. Otras actividades de difusión de resultados

Durante el año 2021, también se realizaron otras acciones de difusión y divulgación de contenidos y resultados del Programa APE:

1. En el marco del Festival de la Ciencia-FECI Los Lagos 2021, y durante los días 20-24 octubre se presentó la cápsula informativa “Macroalgas contra el cambio climático”, orientado a divulgar la importancia de las macroalgas en la mitigación del cambio climático y en el contexto de experiencias de co-cultivo. Ver en <https://www.youtube.com/watch?v=0qMeQkeJFpA>
2. Participación en el programa de Exploradores del Átomo al Cosmos, emitido el miércoles 1 de septiembre en canal 24Horas TVN Chile. Sección ¿Cómo desarrollar una acuicultura sostenible?. Ver en <https://www.youtube.com/watch?v=JVqG3RSb4ro>
3. Tres entrevistas en la radio Valparaíso, Programa Twittercafe. Luis Henríquez - *Hábitats Emergentes en APE de choritos*; Pablo Leal - *Acidificación del océano*; y Francisco Galleguillos - *Acuicultura a Pequeña Escala*.
4. Entre el 29 de noviembre y el 3 de diciembre, se realizó el VIII Congreso Nacional de Acuicultura. El evento fue organizado por la Universidad Católica de Temuco (UCT) junto a la Sociedad Chilena de Acuicultura (SCHACUI), contando también con el patrocinio de IFOP. Se presentaron 3 ponencias. Sebastián Cook - *Experiencias de acuicultura a pequeña escala de algas y bivalvos en la isla de Chiloé*; Francisco Galleguillos - *Brechas y desafíos en el desarrollo de la acuicultura de pequeña escala en Chile: una mirada desde la modelación bio-económica*; y Francisco Cárcamo - *Contribución de la acuicultura a la repoblación y restauración ecológica en Chile*.
5. El 25 de noviembre, en el marco del VII Seminario de Investigación Aplicada a la Mitilicultura (SIAM 2021)”, instancia en que se reúnen investigadores de distintas instituciones nacionales para presentar sus resultados asociados a la mitilicultura, Luis Henríquez presentó la ponencia: *Acuicultura de ingenieros ecosistémicos, efectos del cultivo, estructuración biogénica y su rol en la restauración de ecosistemas costeros*.
6. El 24 de septiembre, en el marco del World Fisheries Congress (Australia, via telemática), Luis Henríquez presentó la ponencia: *Linking small-scale aquaculture of ecosystem engineers to both habitat restoration and benthic fisheries: a case of study in southern Chile*.



## 6. DISCUSIÓN

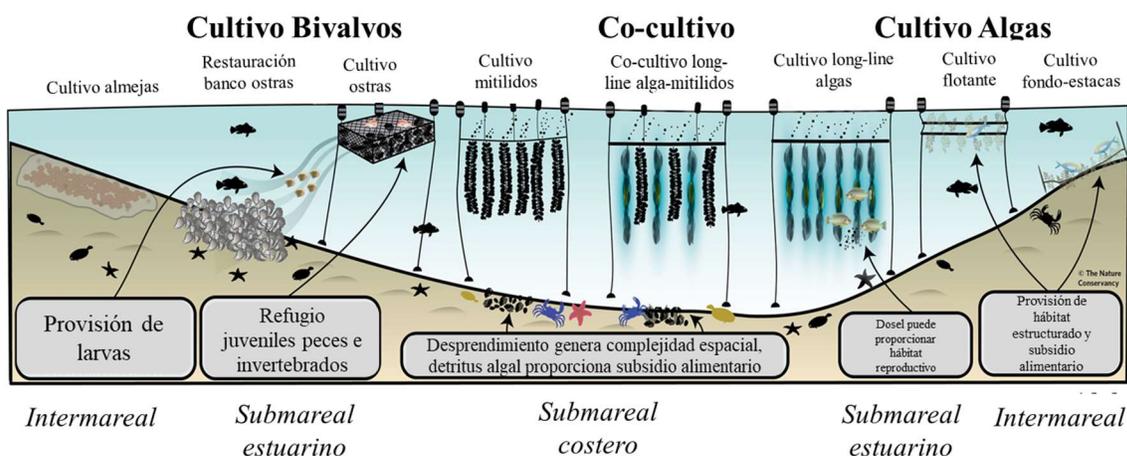
### 6.1. Análisis bio-económico de modelo de cultivo APE con aprovechamiento de recursos bentónicos (Fase 1)

Tradicionalmente, la acuicultura ha sido vista como una actividad antrópica que genera externalidades al medio ambiente y que por lo general son externalidades negativas, tales como contaminación, alteración del hábitat y pérdida de la diversidad genética. Sin embargo, bajo ciertas circunstancias la acuicultura puede generar externalidades positivas (Ver e detalle es **Sección 5.9**). Por ejemplo, se ha reportado que los centros de cultivo pueden asociarse con una mayor abundancia y diversidad de especies silvestres y que incluso la diversidad de aves se ve aumentada (Barrett et al. 2019). Este efecto se atribuye principalmente al hecho de que las estructuras de cultivo generan un hábitat estructurado que puede ser aprovechado por un alto número de especies, generalmente invertebrados, que utilizan estas estructuras como una fuente de refugio, alimento y reclutamiento. Para el caso de aves, peces y mamíferos marinos no se conoce exactamente si este aumento en la disponibilidad de presas es lo que los atrae o existe una relación ecológica más estrecha, por lo que faltan estudios de parámetros claves, tales como reclutamiento y sobrevivencia en la interfase acuicultura – biodiversidad, para tener aproximaciones más causales y directas del efecto de la acuicultura sobre las poblaciones silvestres.

Recientemente, Theuerkauf et al. (2022) realizaron una revisión acerca del tema de la contribución al valor del hábitat donde el cultivo de moluscos y algas es importante. La revisión incluyó 65 estudios a nivel mundial enfocados a la comprensión de la interacción del cultivo de bivalvos y algas con el hábitat. La **Figura 163** resume la propuesta de los autores, relativa a los mecanismos y rutas asociadas al valor del hábitat cuando se considera el cultivo de bivalvos y algas. Los mecanismos pueden variar en distintos ambientes (i.e. intermareal o submareal), dependiendo del tipo de sistema de cultivo y si el cultivo es mono-específico o mixto. En ambientes más someros la reproducción de organismos en cultivo puede proveer de larvas que eventualmente contribuyen a la restauración de la población silvestre (Norrie et al. 2020) y si el tipo de sistema de cultivo puede significar un refugio estructurado para una variedad de invertebrados y peces juveniles; además puede significar un subsidio trófico y constituir un hábitat adicional para la reproducción de esta fauna asociada. En el caso cultivos mixtos o poli-cultivos en ambientes con mayor profundidad, la acumulación de conchas y/o estructuras desprendidas del cultivo, así como el detritus aportado por las algas pueden generar un ambiente tridimensional, convirtiéndose de esta forma en un subsidio trófico y eventualmente generar una comunidad asociada a este hábitat emergente. La mayor cantidad de estudios desarrollados para evaluar la interacción de cultivos de moluscos y algas con el hábitat natural o la aparición de nuevos hábitats se ha desarrollado principalmente en Norteamérica, seguido de África, Asia y Oceanía. Para Sudamérica, solo se reporta un estudio, sobre impacto de cultivos de macroalgas (de Carvalho et al. 2017). En cuanto al tipo de sistema de cultivo, los más estudiados han sido aquellos que utilizan long-lines, los que propician la aparición de hábitat no estructurados (i.e., hábitats emergentes) y los principales resultados observados han sido una mayor abundancia y riqueza de

especies de macrofauna móvil y un efecto positivo en la provisión de hábitat (estructurado y no estructurado), alimento y mejoramientos en la reproducción y el reclutamiento.

La viabilidad de estos HE dependerá de múltiples factores (Gilby et al. 2018), entre los que se pueden mencionar, las propiedades del ambiente que sean adecuadas no sólo para los taxa inferiores, sino también para los taxa superiores como los depredadores móviles; la conectividad con otros hábitats con los cuales puede haber un flujo permanente de propágulos; el tipo de figuras de manejo pesquero y la capacidad para monitorear cambios y adaptar las tácticas de forma rápida una vez que los cambios son detectados.



**Figura 163.** Resumen de los mecanismos y rutas asociadas a la interacción de la acuicultura de bivalvos y algas con el hábitat (Tomada y traducida de Theuerkauf et al. 2022)

La construcción de un modelo económico-productivo, que incorpora aspectos regulatorios de la actividad de acuicultura, constituye uno de los primeros esfuerzos por tratar de ordenar y enlazar los distintos niveles de complejidad del enfoque acuicultura – poblaciones naturales. Tal como se deduce del enfoque cualitativo, la complejidad del sistema es mayor y es posible que cuantificar cada variable y determinar cada parámetro requerido para su modelamiento cuantitativo sea una tarea complicada de resolver en el corto y mediano plazo. Probablemente, de manera inicial la atención se pueda centrar en el aporte del HE sobre la abundancia y la biodiversidad, sobre todo de especies de interés de conservación y eventualmente de interés comercial que pudieran significar un aporte económico.

Un aspecto que no está incorporado en el modelo cualitativo es el referido al tema de los servicios ecosistémicos que pueden ser generados por los cultivos. De manera complementaria, a lo indicado en la **Sección 5.9**, la incorporación de estos servicios resulta relevante en términos de la contribución de la acuicultura dentro de las medidas basadas en el océano (Farías et al. 2020) para la contribución determinada a nivel nacional (NDC) y que representan los compromisos del Estado de Chile ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Actualmente, la SSPA, a través de la Unidad de Biodiversidad, en conjunto con el Ministerio de Medio Ambiente trabajan en coordinación en el Plan de Adaptación en Pesca y Acuicultura al Cambio Climático y que en parte está recogido en CESSO (2021). Entre estos servicios ecosistémicos uno de los que es más inmediatos de



evaluar tiene que ver con el aporte en términos de carbono azul (Ver **Sección 5.9**). Su valoración económica en la industria acuicultora nacional es un aspecto importante para considerar dentro del modelo e incorporarlo en la siguiente etapa del programa en el marco de la APE.

Finalmente, las consideraciones anteriores implican un cambio importante en la visión del concepto de HE, donde probablemente se requiera mover el “Aprovechamiento” en un HE hacia el “Valor” del HE, el cual es un concepto más amplio, pudiendo dar cabida al “aprovechamiento” y al valor de los servicios ecosistémicos.

## **6.2. Validación de modelo de gestión y productivo para APE en base a portafolio multi-especie propuesto para la zona sur (Fase 1)**

La instalación de un esquema de gestión y productivo tipo portafolio es una actividad orientada a lograr visualizar un esquema de producción continua (i.e., cosechas múltiples) dentro de un año calendario y en el contexto de actividades de APE. En este contexto, la instalación de una unidad experimental de cultivo de moluscos filtradores y macroalgas es un primer paso para lograr comprender las dinámicas de crecimiento y cosecha de múltiples recursos de diferente nivel.

En esta primera fase de la actividad, se instaló una unidad experimental de cultivo compuesta por un set de 4 moluscos filtradores (ostión del norte, ostra japonesa, chorito y choro zapato) y pelillo durante octubre de 2021. A pesar de la disponibilidad de semillas de talla pequeña al momento de la instalación de la experiencia, para todos los recursos se observó un incremento significativo de la talla promedio inicial en comparación con la talla promedio a la fecha del primer control, es decir 90 días desde iniciado el cultivo. En ninguno de los cultivos de moluscos filtradores se observaron diferencias en la talla promedio en relación a la profundidad.

En el recurso ostión del norte, la talla promedio (alto concha, en cm) se incrementó desde un tamaño promedio de 0,5 cm en octubre 2021 a 2,99 cm en enero 2022 (casi 6 veces respecto de la talla inicial) El crecimiento observado dentro de los primeros 90 días de cultivo se ajusta a la curva de crecimiento descrita por Avendaño & Cantillánez (2005) y a las curvas de crecimiento observadas por Pérez *et al.* (2012).

En el recurso ostra japonesa, la talla promedio (largo concha, cm) varió de 1,0 cm en octubre del 2021 a 4,18 cm en enero 2022 (casi 4 veces respecto de la talla inicial). Estos resultados son de difícil comparación con otros estudios disponibles en Chile (costa centro sur), dado principalmente por la baja talla promedio inicial de las semillas de ostras utilizadas en este estudio. Sin embargo, el estudio realizado por Díaz & Sobenes (2022) indica que semillas de una talla inicial de  $5,65 \pm 0,1$  cm, sembradas en junio, a diferentes profundidades, ambientes (i.e., sitios no protegidos v/s protegidos) y en diferentes sistemas de cultivo, al cabo de 90 días registran un crecimiento de entre 7,5 y 8,2 cm aproximadamente, es decir un incremento neto de entre 1,9 y 2,6 cm, valores netos más bajos en comparación a los registrados hasta ahora en el cultivo de ostras de esta experiencia de portafolio.

La talla promedio de los choritos (largo total, cm) aumentó desde 2,8 cm en octubre del 2021 a 4,41 cm en enero 2022, esto representa un aumento neto de aproximadamente 1,6 cm en 90 días de cultivo. Estos resultados son muy similares a los reportados por Díaz *et al.* (2019), quienes sembraron semillas



de chorito de un tamaño inicial promedio de  $3,22 \pm 0,28$  cm a 2 y 5 m de profundidad, y al cabo de 90 días de cultivo, registraron un tamaño promedio de alrededor de 5,0 cm, es decir, un incremento neto de 1,78 cm en 90 días de cultivo, sin diferencias significativas en relación a la profundidad de cultivo.

Finalmente, la talla promedio de las semillas de choro zapato (largo total, cm) pasó de 2,4 cm en octubre del 2021 a 4,48 cm en enero 2022, representando un incremento neto de aproximadamente 2,08 cm en 90 días de cultivo. Estos resultados son superiores a los reportados por Avendaño et al. (2017), quienes reportaron un crecimiento de semillas desde  $2,92 \pm 0,47$  cm hasta  $4,0 \pm 0,48$  cm en 90 días de cultivo, representando un incremento neto de sólo 1,08 cm dentro de esa ventana de tiempo del cultivo.

El crecimiento de los recursos chorito y choro zapato (casi 2 veces respecto de sus tallas iniciales) si bien fue menor al de los otros moluscos filtradores, de todas maneras, representa una buena señal del desempeño hasta la fecha del primer control. Es de esperar que en los controles sucesivos que se desarrollarán durante la siguiente etapa de este programa (a partir de abril 2022) se mantengan tasas de crecimiento significativas que permitan alcanzar tallas de valor comercial y simular cosechas durante este período. Por otro lado, se continuará con siembras de nuevas semillas para comprender de mejor forma la dinámica de siembra/cosecha que permita establecer un esquema de producción continuo dentro de un año calendario.

### 6.3. Desempeño productivo y ambiental de los cultivos

#### 6.3.1. Cultivos en sitio Chungungo

La ostra japonesa o del Pacífico *C. gigas* fue introducida para su cultivo en la bahía de Coquimbo en 1978, con el objetivo de evaluar su adaptación a las condiciones del Pacífico sur, comprobándose, además, que al alcanzar su madurez sexual no se reproducía en condiciones naturales (Munita 1989, Moller et al. 2001). Esta especie es euri térmica y eurihalina (Miossec et al. 2009), lo que le permite desarrollarse y sobrevivir dentro de rangos amplios de temperatura ( $-2$  hasta  $35$  °C) y salinidad (0 hasta 50 ups) (Héral & Deslous-Paoli 1991). Por lo anterior, ha sido cultivada exitosamente en diversos países con resultados variables en cuanto a su crecimiento.

El cultivo de ostra japonesa en AMERB Chungungo B, mostró una tasa de crecimiento promedio de  $0,18$  mm día<sup>-1</sup> y un aumento de biomasa de  $0,09$  g día<sup>-1</sup>. En comparación con la tasa de crecimiento registrada en la actividad de portafolio (Sección 5.2), que en 4 meses aumentó en 4 veces su talla de siembra, los resultados obtenidos en Chungungo fueron menores, sin embargo, los tamaños de siembra difieren. En la actividad de portafolio las semillas sembradas median 1 cm promedio, mientras que las sembradas en Chungungo presentaban una longitud promedio de 4,9 cm, por lo tanto, el crecimiento a partir de esta talla es más lento. En la literatura internacional también se registran tasas de crecimiento mayores a las registradas en Chungungo. Por ejemplo, Osorio (1990) obtuvo una tasa de crecimiento de  $6,3$  mm mes<sup>-1</sup> (equivalente a  $0,21$  mm día<sup>-1</sup>) en Ecuador, mientras que, en Perú, Cisneros et al. (2000) registraron tasas de crecimiento de  $7,70$  mm mes<sup>-1</sup> ( $0,25$  mm día<sup>-1</sup>) en los años 1995 – 1996,  $8,36$  mm mes<sup>-1</sup> ( $0,27$  mm día<sup>-1</sup>) en la cohorte del año 1996 y de  $13,31$  mm mes<sup>-1</sup> ( $0,44$



mm día<sup>-1</sup>) en la cohorte del año 1998, similar a lo registrado por Akaboshi (1979) en Brasil. En México las tasas de crecimiento muestran gran variabilidad de resultados. Por ejemplo, las tasas de crecimiento en largo de la concha van desde los 0,09 a los 0,50 mm día<sup>-1</sup>, mientras que las tasas de peso total presentan valores desde 0,05 hasta 0,42 g día<sup>-1</sup> (Chávez-Villalba 2014). En Chile, Díaz & Sobenes (2022), obtuvieron un crecimiento de 0,08 y 0,09 mm día<sup>-1</sup>, valores menores a los registrados en Chungungo. En cuanto a la supervivencia Lodeiros et al. (2018) estimaron una supervivencia del 60 al 65% en las costas ecuatorianas. Según Chávez-Villalba (2014) los reportes sobre la supervivencia muestran una fluctuación importante con registros desde 11% hasta el 100% en México. Los resultados del presente estudio muestran una supervivencia superior al 75%.

Para el cultivo de ostión del norte *A. purpuratus*, el crecimiento se cuadruplicó en los 7 meses de cultivo, mientras que en la actividad de portafolio (**Sección 5.2**) fue de casi 6 veces en 4 meses de cultivo. Soto (2012) registró en Bahía Inglesa una tasa de crecimiento promedio de 0,26 mm día<sup>-1</sup> llegando al día 120 de cultivo con una longitud promedio de 43,5 mm en cultivos en linternas, siendo este crecimiento superior al registrado en Chungungo. La alta mortalidad al inicio del cultivo, pudo ocasionarse por la baja talla de siembra y por la calidad de la semilla. Al día 230, las valvas presentaron una gran fragilidad y un aumento en el fouling, lo que explicaría la mortalidad de individuos de mayor tamaño. Según algunos autores (Duggan 1973, Wildish et al. 1988) el fouling por organismos incrustantes es un factor limitante en el crecimiento de ya que limita la circulación de agua y de alimento al interior de las estructuras de cultivo.

Los resultados en cuanto a las cosechas serán dados a conocer en la siguiente etapa. Además, se implementará un nuevo ciclo de cultivo que permitirá enfrentar desafíos en cuanto a la organización y comercialización de los recursos cultivados.

El cultivo de huiro *M. pyrifera* es reciente, por lo tanto, aún no se registran datos suficientes para evaluar el aumento de biomasa. Sin embargo, la experiencia previa de cultivo (instalada el 22 de octubre del 2021) mostró un aumento de 4,4 kg de alga húmeda en, aproximadamente, 3 meses de cultivo. Este resultado, aunque preliminar, es similar a lo registrado por Buschmann et al. (Buschmann et al. 2008) quienes obtuvieron una biomasa de 25 kg m<sup>-1</sup> en 5 meses de cultivo, Macchiavelo et al. (2010) que registraron una biomasa de 22 kg m<sup>-1</sup> en 5 meses de cultivo y Gutiérrez et al. (2006) que obtuvieron 14,4 kg m<sup>-1</sup> en 8 meses de cultivo. En la etapa 2 del presente Programa, cultivos de huiro implementados en Chiloé, registraron un mayor crecimiento a fines de noviembre para luego disminuir en verano, patrón que concuerda con otros estudios realizados en el sur de Chile (Gutiérrez et al. 2006). Es por ello que se espera un mayor crecimiento en los meses de otoño, estos resultados se verán reflejados en los reportes de la siguiente etapa.

### 6.3.2. Cultivos macroalgas, sitios Quinchao, Pudeto y Hueihue

Para chicorea *C. chamissoi* en el sitio Quinchao, el crecimiento observado fue similar entre densidades de siembra y controles. Posterior a la poda (día 58), y para las dos densidades, las macroalgas logran crecer, alcanzando valores finales similares a los controles. De esta forma, ambas densidades de siembra inicial, permiten rendimientos equivalentes, pero el efecto de la poda permitiría un rendimiento



superior a los controles sin poda, si se considera adicionalmente la biomasa obtenida en la poda o cosecha. Dado los problemas de desprendimiento y pérdida de biomasa en el sitio Hueihue, no se pueden hacer comparaciones productivas con otros sitios y/o ciclos productivos.

Considerando, solo los datos productivos para chicorea en Quinchao, se observa que los resultados fueron menores a los obtenidos en ciclos de cultivo anteriores realizados por IFOP (Cárcamo et al. 2020, 2021).

Para pelillo *A.chilense* en el sitio Quinchao, el crecimiento observado también fue similar entre densidades de siembra. Luego de 119 días de cultivo, solo el control de alta densidad obtiene valores significativamente superiores a los demás tratamientos. Sin embargo, si se considera la poda y la biomasa obtenida en ésta (21 kg), se evidencia que esta práctica presenta una posibilidad de tener un mejor desempeño productivo total. En el sitio Hueihue, el crecimiento observado también fue similar entre densidades de siembra, pero la alta densidad presentó mejores rendimientos que los controles al día 85 de cultivo, en el cual se realizó la poda. Posterior a esto (día 137), los tratamientos con poda, no logran alcanzar los crecimientos de los controles, sin embargo, si se considera la biomasa obtenida en la poda (~79 kg), se evidencia también para este sitio que esta práctica presenta una posibilidad de tener un mejor desempeño productivo total. Comparando los rendimientos de pelillo entre ambos sitios, y a pesar de los problemas asociados a las estructuras de cultivo en Hueihue, este último presentó un mejor desempeño productivo. Lo anterior podría explicarse aparentemente por las características de productividad e hidrodinámica de este sitio. Los resultados en Quinchao fueron similares a ciclos de cultivo anteriores (Cárcamo et al, 2020; Cárcamo et al 2021).

Para pelillo *A.chilense* en el sitio Pudeto, los mejores rendimientos se obtienen en el cultivo solo algas (7.88 kg/5m) respecto al co-cultivo con ostra (1.02 kg/5m) y co-cultivo con choro zapato: 1.87 kg/5m). Los rendimientos del tratamiento solo algas, fueron significativamente mayores que Quinchao y Hueihue, aunque se debe considerar las diferencias entre sistemas naturales (estuario vs bahía) y los sistemas de cultivo (fondo vs suspendido). El co-cultivo con choro zapato mostró valores cercanos a los obtenidos en los otros sitios y en ambas densidades de siembra. Por otro lado, los resultados fueron similares a lo observado en ciclos de cultivo anteriormente realizados en este mismo sitio (Cárcamo et al. 2021).

No se observaron diferencias significativas en el crecimiento, luego de aplicar la poda al segundo mes de cultivo en el sitio Quinchao y para ambas algas y densidades, y en el sitio Hueihue, para pelillo. De esta forma, la poda incrementaría el rendimiento productivo final. Dicha situación, de un aumento de la biomasa y aceleración de crecimiento en algas sometidas a podas también ha sido demostrada por otros autores (Westemeier et al. 1991, McNeill et al. 2003). Se evidencia que los cultivos de ambas especies se pueden realizar en distintos sitios, con desempeños variables dependiendo de las condiciones ambientales y de sistemas de cultivo.

Se debe considerar que el periodo de cultivo no debe sobrepasar los 3 a 4 meses (hasta fines de primavera), ya que posterior a esto las algas disminuyen su crecimiento diario y son más propensas al epifitismo.



### 6.3.3. Co- cultivo macroalgas-bivalvos, sitio Pudeto

Para los co-cultivos de ostra *C. gigas* y choro zapato *C. chorus* con pelillo *A. chilense*, no se evidencia un efecto significativo en el crecimiento de los bivalvos respecto a los controles. Para ostra, los valores de crecimiento son similares, aunque levemente mayores en el tratamiento solo ostra. Para choro zapato, se observó un crecimiento sostenido en el tiempo en ambos tratamientos con un valor levemente mayor para el co-cultivo. En comparación con resultados obtenidos en ciclos de cultivo anteriores, se observan valores similares para ambos bivalvos (Lopes et al. 2013, Cárcamo et al. 2020, 2021). La dinámica del estuario Pudeto (i.e., condiciones ambientales fluctuantes, alta disponibilidad de alimento), permite el crecimiento satisfactorio de ambos bivalvos. Se evidencia que la incorporación de organismos filtradores a los sistemas de cultivo, permite el co-cultivo con pelillo, aunque, los resultados productivos de la macroalga fueron inferiores que los controles.

Al comparar los resultados productivos en bivalvos con los del portafolio multi-especie (**Sección 5.2.**), y luego de 90 días de cultivo para ambos, pero iniciando en distintos periodos del año (Pudeto: septiembre; Hueihue: fines de octubre), se observaron algunas diferencias. Para choro zapato las condiciones de longitud y peso fueron mayores en Pudeto, particularmente en peso (4.9 cm y 9.40 g, respectivamente), que en Hueihue (4.7 cm y 6.36 g, respectivamente). Para ostra, los valores fueron mayores en Pudeto, particularmente en longitud (5.40 cm y 10.64 g, respectivamente), que en Hueihue (4.48 cm y 9.94 g, respectivamente). Las diferencias pueden ser explicadas por el sitio en el cual se encuentran emplazados los cultivos, ya que Hueihue corresponde a una bahía abierta al mar interior de Chiloé, en comparación con Pudeto, que es una zona estuarina, en donde existe una alta disponibilidad de alimento para los organismos filtradores, desde el mar (ingreso oceánico) y desde el río (escorrentías) (Odum 1970, Peterson 2010).

### 6.3.4. Monitoreo ambiental. Nutrientes

Los valores obtenidos para ambos nutrientes (nitratos y fosfatos) se mantienen dentro de los rangos y valores reportados en informes anteriores del estudio y en la literatura científica para la zona de estudio (Guerra & Silva 2004, Cárcamo et al. 2020, 2021).

### 6.3.5. Cultivo de fondo de huiro *L. trabeculata* en sitio Chungungo

EL desprendimiento y pérdida de las plántulas sembradas observado, puede ser explicado, inicialmente, por una combinación de factores. El tamaño de las plántulas fue superior al utilizado en la primera experiencia del año 2019 (i.e., plántulas con discos de fijación de mayor tamaño y mayor cantidad de estipes), demandando una mayor cantidad de cianoacrilato para mejorar la adhesión de plántulas que ofrecen mayor resistencia a la corriente y marejadas que se observaron post-siembra. Westermeier et al. (2014), probaron distintas metodologías de adhesión de fragmentos de discos de *L. berteroa* y *M. pyrifera* en la región de Atacama. Entre las técnicas probadas, los fragmentos trasplantados que se desarrollaron en cantos rodados fueron los más inestables, con desprendimientos de hasta el 90%. Según estos autores, la fijación de fragmentos a los cantos rodados puede ser crítica, porque este tipo de sustrato puede desplazarse fácilmente por fuerzas



mecánicas y causar heridas o incluso aplastamiento de las plántulas. Además, el efecto abrasivo de las partículas de arena puede ser crítico, dañando estrías y desprendiendo individuos completos. Para la siguiente etapa se realizará una nueva experiencia considerando el tamaño de las plántulas y evaluando nuevos sistemas de adhesión que permita una mayor persistencia de las plántulas en el sustrato.

#### **6.4. Evaluación del desempeño fisiológico-productivo de macroalgas y bivalvos co-cultivados**

De manera similar a los experimentos anteriores, se observó un Rendimiento Relativo Total (RRT) significativamente  $> 1,0$  en co-cultivos de ambos experimentos, indicando que existe una relación mutuamente positiva en las proporciones iniciales de biomasa de 2:1, 1:1 y 2:1. Además, se observó una clara (pero no significativa) tendencia de que el RRT mayor podría ser obtenido usando una proporción inicial de biomasa de 2:1 (macroalga: bivalvo). En los co-cultivos, las tasas de crecimiento de las macroalgas y los bivalvos no fueron estadísticamente diferentes (excepto *A. chilense* en el experimento 1), pero también se observó una tendencia que podría indicar que sufrieron un mayor estímulo en comparación a los mono-cultivos, debido a su interacción metabólica que genera beneficios mutuos al excretar/utilizar de los desechos de cada especie en el medio de cultivo (Fernández et al. 2019)

No existe literatura acerca del uso de las series de reemplazo en un contexto de producción de acuicultura. Sin embargo, los resultados de los diferentes experimentos realizados en distintas etapas confirman que la metodología De Wit (1960) es consistente y útil para la identificación de proporciones de co-cultivos en APE. Por ejemplo, en la etapa anterior, el RRT también fue significativamente mayor en co-cultivos de *C. chamissoi* y *C. gigas*, y *S. skottsbergii* y *C. gigas*. Por otro lado, es importante destacar que el uso de semillas de bivalvos (*M. chilensis* y *C. gigas*) permite detectar diferencias significativas entre proporciones ya que presentan una mayor tasa de crecimiento que la mostrada por adultos. Sin embargo, el desafío sigue siendo una evaluación del desempeño de co-cultivos en experimentos de mayor duración y en terreno. En este contexto, la siguiente etapa experimental se evaluará el desempeño de *M. chilensis* co-cultivado en serie junto a diferentes especies de macroalgas que serán reemplazadas en serie cada dos o tres semanas, por ejemplo. Esto con el fin de simular un sistema de portafolio (Sección 5.2.) en el cual las especies de macroalgas son cosechadas cuando alcanzan su rendimiento máximo.

Las condiciones experimentales de cultivo pudieron afectar la tasa de crecimiento de las especies co-cultivadas. Para el caso de las macroalgas,  $F_v/F_m$ , considerado un indicador de funcionamiento adecuado del aparato fotosintético (Figueroa et al. 2013), mostró valores que están dentro del rango normal y saludable de macroalgas rojas, indicando que *A. chilense* no estuvo bajo condiciones de estrés fotosintético ni de limitación de nutrientes (Gordillo et al. 2003, Fernández et al. 2020, Leal et al. 2020). En el caso de *M. chilensis*, la tasa de respiración fue  $< 2 \text{ mg g peso fresco}^{-1}$  en tratamientos de co-cultivo, lo que sugiere que su tasa metabólica fue afectada negativamente por alguna condición experimental (Gosling 2015, Navarro et al. 2020). Posiblemente, la respiración fue medida mucho tiempo después de alimentar a los individuos de *M. chilensis*, durante la tasa basal de respiración.



Esto ocurre cuando los bivalvos abren sus valvas, pero muestran una actividad mínima de alimentación (Riisgård & Larsen 2001, Gosling 2015). Esta relación entre consumo de oxígeno y el suministro de alimento es compleja y necesita ser incorporada como factor en futuras actividades experimentales.

La acuicultura está buscando herramientas para mitigar los efectos de factores relacionados a la crisis climática, tales como la acidificación oceánica (AO). Los cambios en la química del agua asociados a la AO (reducción en el pH y la saturación del aragonito ( $\Omega_{arg}$ )) pueden impactar negativamente la producción y mantención de las conchas en bivalvos. Por lo tanto, la AO tiene el potencial de afectar negativamente a la industria mitilicultura en Chile y el mundo. Sin embargo, la incorporación de macroalgas a cultivos de bivalvos contrarrestaría estos efectos negativos, ya que durante la fotosíntesis se utiliza  $CO_2$ , incrementando el pH y  $\Omega_{arg}$ , generando un halo amortiguador de los efectos de AO que favorece la calcificación (Fernández et al. 2019). En definitiva, los co-cultivos macroalga-bivalvo pueden ser una herramienta para diversificar, así como también para mitigar los efectos de la AO en APE.

### **6.5. Fenoles solubles e insolubles en *D. incurvata***

Una de las especies de macroalgas más importantes para fines comestibles es el cochayuyo *D. incurvata*. Sus beneficios nutricionales incluyen el aporte de proteínas, vitaminas, minerales, y fibra dietaria soluble. También puede ser utilizada en la industria alimentaria durante el envasado de productos debido a los biocompuestos antioxidantes (Smith et al. 2010). Además, se ha reportado que uno de los beneficios del consumo de *D. incurvata* incluye la modulación del sistema inmune y como potencial antioxidante y anticancerígeno (Kennedy et al. 2018, Yang et al. 2018). Los compuestos fenólicos son parte del mecanismo antiestrés de las macroalgas, siendo asociados a la defensa anti-herbívora y a la actividad anti-fouling (Arnold & Targett 1998, Targett & Arnold 1998, Wikström & Pavia 2004). La producción de fenoles también puede ser inducida por la radiación UV, cumpliendo un rol fotoprotector (Gómez & Huovinen 2010, Huovinen et al. 2010). Además, su actividad antioxidante ha sido propuesta como mecanismo de defensa en la interacción redox con iones de metales (Connan et al. 2006, Wang et al. 2009). En Chile, *D. incurvata* se distribuye desde el sur de la Isla de Chiloé hasta la Región de Coquimbo (Collantes et al. 2002, Fraser et al. 2020), por lo que está sujeta a una gran variación de condiciones ambientales que pueden afectar la cantidad y calidad de biomoléculas de importancia comercial (Deniaud-Bouët et al. 2014, 2017).

En este contexto, los resultados del presente estudio indican que el contenido de biomoléculas varía de acuerdo al origen de los individuos muestreados. En este caso, individuos de *D. incurvata* de dos lugares separados por ~7 Km de distancia, mostraron diferencias significativas en el contenido de fenoles.



## **6.6. Validación de modelos tróficos para evaluar impactos ecosistémicos de acuicultura de macroalgas e invertebrados**

### 6.6.1. Modelos y desarrollo de escenarios de estabilidad/ inestabilidad

#### 6.6.1.1. Caso 1. Cultivo de macroalgas

Los resultados permiten identificar los principales componentes del cultivo de chicorea de mar visto como un sistema y sus relaciones en las diferentes etapas del cultivo. La comprensión de estas relaciones permitiría sugerir y desarrollar una estrategia de APE sostenible para esta especie.

En el análisis, se identificaron 6 etapas (siembra, pre-cosecha, cosecha única, cosecha 1, cosecha 2 y post-cosecha) dentro del cultivo; a partir de las cuales, se desarrollaron cinco modelos. Dentro de los modelos resalta la variable manejo (limpieza) como primordial para obtener biomasa de calidad, por la eliminación de epifitos (Delgadillo-Garzón & Newmarck 2008), que permitiría mayores retornos económicos (Sievers et al. 2019); para mantener la infraestructura de los sistemas de cultivo operativos durante todo el ciclo productivo, y para sostener el sistema de cultivo en una temporada posterior (si es que el acuicultor elige realizar varias cosechas por temporada), lo cual permitiría la permanencia de este cultivo APE en el tiempo.

En cuanto a las cosechas se ofrecen dos opciones al acuicultor; una cosecha única o una cosecha parcializada que posibilitaría obtener mayores producciones por temporada y por lo tanto mayores oportunidades e ingresos (Buschmann et al. 1995, Buschmann, Troell, et al. 2001, Candia 2010).

La principal diferencia entre los modelos está determinada por las auto-retroacciones, establecidas por las perturbaciones del medio sobre las variables; en algunos casos negativas, donde las variables vuelven a su condición inicial y en otros casos positivas ocasionando una respuesta amplificada (Levins 1998). Mediante las auto-retroacciones es posible determinar cuáles son las variables limitantes o de mayor sensibilidad para el buen funcionamiento, crecimiento y productividad de un sistema de cultivo de macroalgas, en sus diferentes etapas. De acuerdo a los resultados obtenidos; en la etapa de siembra, la variable limitante es la presencia de epifitos; durante la pre-cosecha el manejo, durante la cosecha única/cosecha 1 el detritus y el fitoplancton, y para la etapa de cosecha 2 y post-cosecha el manejo es la limitante. Si las auto-retroacciones se mantienen negativas las poblaciones poseen un crecimiento oscilando entre  $k$  y  $k/2$ ; si son cero, se mantienen cercanas al equilibrio; en estos dos casos, se cumplen los criterios de estabilidad de un sistema.

#### 6.6.1.2. Caso 2. Co-cultivo mitílidos-macroalgas

El análisis de los 3 escenarios de modelación sugiere que el sistema de co-cultivo puede alcanzar estabilidad local (entendido como un proxy de sostenibilidad), si todos los procesos descritos resultan en la conservación de la dinámica de abundancia de las variables (grupos o componentes) sensibles que facilitan el funcionamiento del sistema ecológico analizado (i.e., zooplancton, fitoplancton, suspensívoros, detritívoros, banco emergente). El banco emergente podría ser intervenido en periodos de postcosecha, siempre y cuando, el acuicultor y los depredadores epibentónicos presenten mecanismos que restrinjan sus dinámicas. En el caso de los depredadores, esto implica un auto-



control en la relación depredador-presa. Para los acuicultores, esta auto-retroacción negativa debería ser entendido mediante regulaciones extractivas similares a las establecidas para el sistema de AMERB, las cuales, pueden aumentar la estabilidad local del sistema, en el caso que la variable demanda comercial, exhiba algún tipo de auto-control o es limitada (Ortiz et al. 2013). En el caso de depredadores bentónicos comerciales, el incremento controlado de la mortalidad por pesca se puede adecuar a través de estas medidas restrictivas. Sin embargo, la implementación local de acciones de manejo debe considerar las fluctuaciones de abundancia entre  $K$  y  $K/2$  de la comunidad de presas (i.e., auto-retroacciones negativas o neutras en suspensívoros, detritívoros, banco emergente). Debido a que el abastecimiento de servicios ecosistémicos (SE) que facilitan las actividades productivas derivan de funciones y procesos ecológicos múltiples e interconectados (Rullens et al. 2019), los resultados sugieren que los SE generados por acuicultura de mitílidos y algas (i.e., modificación de hábitat, estructuración biológica, alimento, asimilación de nutrientes, liberación de  $O_2$ , fijación de C) deberían ser estratégica y cuidadosamente manejados por los actores relevantes para asegurar estabilidad (**Sección 5.9**).

Por otro lado, la estabilidad local del sistema durante la “lluvia” de materia orgánica y propágulos (cosecha) sugiere que la macrofauna bentónica, que incluye especies de importancia comercial (e.g., jaibas depredadoras, erizos, mitílidos) y de función ecológica clave (e.g., detritívoros, suspensívoros, plancton), parecen responder positivamente a los recursos facilitados durante la cosecha. Esto es consistente con incrementos en riqueza y abundancia de grupos específicos que responden a disponibilidad de materia orgánica y alimento en presencia de cultivos (ver Gutiérrez et al., 2003, para más referencias). Estudios cuantitativos (Inglis & Gust 2003, D’Amours et al. 2008, Dumbauld et al. 2009, Wong & O’Shea 2011, Rullens et al. 2019, Sardenne et al. 2019) y aproximaciones cualitativas (Forget et al. 2020) han evidenciado que depredadores y detritívoros carroñeros son grupos favorecidos positivamente. Esto acentúa la protección de la función de componentes sensibles para el sistema ecológico construido bajo el cultivo. En este sentido, el uso de medidas nóveles de manejo en acuicultura que resguarden la integridad del ambiente circundante se vuelve pertinente. Esta premisa sugiere que la huella ecológica de la acuicultura de macroalgas y bivalvos puede ser manejada. Además, la información disponible sobre efectos negativos causados por bioacumulación puede complementarse con entendimiento sobre la función y los servicios del sistema acuicultura como parte del entorno ecológico, escasamente estudiado (Chamberlain et al. 2001, Hartstein & Rowden 2004, Callier et al. 2007, Ysebaert et al. 2009). Estas aproximaciones cualitativas o semi-cuantitativas holísticas son necesarias para mejorar políticas de protección de los SE o para establecer regulaciones ambientales efectivas para el futuro de la acuicultura (Ferriss et al. 2016, Forget et al. 2020).

Otros grupos altamente sensibles a disturbios, como el grupo del Biofouling y Anfípodos herbívoros, mostraron respuestas monotónicas en el escenario de Precosecha. Esto parece depender de acciones de manejo de cultivo (ver **Sección 5.7.2.1. Caso 1. Cultivo de macroalgas**). El primero puede representar entre el 5 – 10% de los costos de producción total (Dempster et al. 2012), y su control es un problema en la industria acuícola (Bannister et al. 2019). Sin embargo, el efecto directo de su remoción parcial desde estructuras de cultivo hacia el fondo, podría aumentar la probabilidad de mantener oscilaciones poblacionales entre  $K$  y  $K/2$  (auto-retroacción negativa). Sin embargo, su efecto en el fondo subyace a las variaciones de los procesos predominantes del ensamblaje comunitario en



cada sitio de cultivo. Esta relación sitio-específico parece ser favorable según este estudio, pero, carece de referentes cuantitativos en el sur de Chile. Por otro lado, el anfípodo *Sunamphitoe femorata*, puede alcanzar densidades  $\sim 400$  individuos  $\text{Kg}^{-1}$  de *M. pyrifera* en cultivo (Camus et al. 2016), y también podría ser regulado con alternativas de manejo (e.g., tiempo de siembra-cosecha, susceptibilidad de sitios, aumento de exposición al oleaje). No obstante, el manejo de esta especie y a otros epibiontes, usualmente comunes en el ambiente, no presenta soluciones simples (Peteiro & Freire 2013, Førde et al. 2016, Bannister et al. 2019). Sin embargo, los escenarios modelados sugieren pistas relevantes para su estudio.

Los cultivos de mitílidos y macroalgas no requieren de alimento procesado, y tanto el control ejercido por mitílidos sobre el fitoplancton en ambientes eutrofizados como la incorporación de compuestos nitrogenados por las macroalgas (Neori et al. 2004, Barrington et al. 2010), permiten la atenuación de efectos negativos para el ecosistema (Reusch et al. 1994, Hartstein & Rowden 2004, Borthagaray & Carranza 2007).

Los resultados obtenidos en el escenario 3 (Postcosecha) sugieren que la estabilidad local del sistema acuicultura-entorno ecológico depende de la función biológica de las especies y la conciencia del acuicultor. El acuicultor, últimamente, debe decidir mantenerse en una dinámica de autocontrol o restricción en dos escenarios (1 y 3). Esta premisa sugiere que el crecimiento en dirección al aumento del volumen de producción conlleva un aumento del consumo sobre las comunidades de Fito y Zooplancton, las cuales, deben oscilar entre  $K/2$  y su capacidad de carga para el funcionamiento del cultivo (Dame & Prins 1997). Los posibles beneficios de un cultivo que facilite la reestructuración del fondo y altere la abundancia, podría ser una vía para el aprovechamiento sostenible de especies, si los efectos estabilizadores bajo el área de influencia son promovidos. El funcionamiento de los escenarios implica conciencia y reconocimiento social de que un sistema productivo permanece ligado al equilibrio dinámico de un ecosistema que promueve el crecimiento y la persistencia de todas las especies que alberga.

Por último, se debe considerar que los modelos cualitativos o semicuantitativos construidos y analizados corresponden a representaciones arbitrarias de la interacción de variables observadas en la compleja dinámica ecológica del mar interior del sur de Chile. Sin embargo, estas limitantes son propias de cualquier modelo independientemente de su nivel de complejidad (Levins 1966, 1994). Primero, el supuesto principal de los escenarios fue que: 1) el sistema cultivo-ecológico estudiado presentaría un equilibrio dinámico que podría exhibir diferentes escenarios de estabilidad local móvil único. No obstante, la compleja dinámica biofísica entre sitios de cultivo del sur de Chile requiere análisis complementario (Forget et al. 2020); 2) el Acuicultor y la dirección de su dinámica es la única variable directamente relacionada al contexto socio-económico que envuelve a la acuicultura; y 3) los procesos que subyacen los sistemas analizados consideran sólo dinámicas a corto plazo (un ciclo de cultivo). Sin embargo, el método de modelación se acomoda a cualquier escenario con interacciones complejas, generalmente difíciles de estudiar por escasez de información y dificultades operativas. Por lo tanto, el análisis cualitativo o semicuantitativo de redes facilita la obtención de información valiosa para la formulación de acciones de manejo holístico (sistémicas) y toma de decisiones en escenarios complejos de alta incertidumbre ambiental.



### 6.6.1.3. Caso 3. Repoblación de huero en fondos blanqueados

En el caso de la AMERB Chungungo B, se busca determinar las acciones de manejo que permitan cambiar la trayectoria de la sucesión ecológica desde fondos blanqueados a bosques de *L. trabeculata*, a través de acciones de manejo ejecutadas bajo ciertas condiciones de las variables analizadas en este estudio, y que permitan la inestabilidad local del sistema. Algunos estudios han sugerido que los bosques de macroalgas y las comunidades de fondos blanqueados no difieren en términos de biodiversidad, complejidad trófica y riqueza de especies (Graham 2004, Vásquez et al. 2006). Sin embargo, estos resultados difieren a partir de un análisis sistémico basado en la Ascendencia (*sensu* Ulanowicz 1986, 1997), mostrando que los bosques de algas de la Península de Mejillones dominada por *M. pyrifera* y *L. trabeculata* construyen sistemas ecológicos más desarrollados, más saludables y menos resistentes a las perturbaciones que las propiedades macroscópicas cuantificadas para fondos blanqueados (Ortiz 2008). Una conclusión similar fue obtenida por Marzloff et al. (2013), quienes utilizaron un modelo de análisis de sensibilidad y sugieren que los fondos blanqueados dominados por erizos de mar serían altamente resilientes. Asimismo, el fondo blanqueado también se considera en un estado degradado en comparación con los bosques de macroalgas (Suding et al. 2004, Ortiz 2008). Según Ortiz & Uribe (2021) los criterios de estabilidad local utilizados, podrían ser una técnica adecuada para evaluar la probabilidad de cambios de estados ecológicos transitorios para resistir o cambiar, ya que considera estados en equilibrio para mantener su propiedades solo contra pequeñas perturbaciones. Por consiguiente, es importante monitorear la sucesión ecológica de los fondos blanqueados y determinar la estabilidad local de forma constante, con el objeto de determinar el mejor escenario ecológico para cambiar la trayectoria de la sucesión hacia un sistema de bosque de macroalgas.

Los resultados muestran que, para lograr desestabilizar el sistema, es necesario conocer las condiciones en las que encuentran el resto de las variables para poder predecir el resultado de la acción de manejo sobre el ambiente, en este caso el sistema de fondo blanqueado. El análisis de los resultados no estables, oscilantes y no holísticamente estables, no son concluyentes en cuanto a identificar las variables sensibles, sin embargo, el análisis de los resultados estables, muestra cuales son las variables sensibles y en que condición deben presentar para mantener la estabilidad del sistema luego de una acción de manejo. Las variables que presentaron mayor sensibilidad a las acciones propuestas fueron *Lithophyllum* spp. (Li) y rodófitas (Rho). Ambas parecen ser particularmente sensibles en las modelaciones realizadas. Para mantener la estabilidad del sistema en los escenarios que involucran la repoblación de *L. trabeculata* y la disminución de *T. niger*, la abundancia de ambas debe ser baja y para los escenarios que involucran el aumento de estrellas, ambas variables deben presentar abundancias cercanas a K (capacidad de carga). Esto se explicaría porque *Lithophyllum* spp. compite por el sustrato con las variables correspondientes a productores primarios. Esta competencia está dada por el efecto alelopático de esta alga crustosa que evitaría el asentamiento de propágulos de otras especies (Masaki et al. 1984, Morse & Morse 1984, Breitbart 1985). Por otra parte, en el modelo, la variable rodófitas, es consumida por los herbívoros presentes en el sistema. Por lo tanto, al ingresar biomasa de *L. trabeculata*, aumentaría el uso de sustrato y mayor biomasa para alimento de herbívoros. Al aumentar carnívoros al sistema, deben aumentar los productores primarios y, por lo tanto, estar en abundancias cercanas a la capacidad de carga como



resultó en el análisis. Las variables estrellas (Str) y Small epifauna (SE) requieren de modelamiento con auto-retroacciones establecidas previamente de otras variables para definir con mayor precisión las condiciones de abundancia se deben encontrar para mantener la estabilidad del sistema.

## 6.6.2. Desarrollo de balance trófico de modelos propuestos

### 6.6.2.1. Caso 2. Co-cultivo mitílicos-macroalgas con banco emergente

Hasta aquí, el uso de Ecopath con Ecosim permitiría explorar escenarios de impacto ambiental y posibles efectos del incremento del volumen de cultivo sobre la interacción entre especies y grupos clave dentro del ecosistema bentónico de bahía Hueihue. En este estudio son de especial interés los límites de agotamiento del fitoplancton frente al incremento inherente del pastoreo del banco emergente generado por el cultivo. Por esto, el cálculo de la capacidad de carga ecológica y sus índices es una herramienta útil para aprender sobre mecanismos ambientales y aproximarse al manejo ecosistémico en acuicultura y prevenir escenarios indeseables.

Los datos muestran que la modificación en la diversidad y biomasa del fondo bajo el cultivo es mediada por mitílicos formadores de hábitat (Bruno & Bertness 2001), los que facilitan a conoespecíficos y especies de omnívoros con tendencia a la carnivoría, como jaibas depredadoras (*M. edwardsii*, *M. gregaria*) y Echinoideos (*A. dufresnii* y *P. magellanicus*). Los sitios de referencia, presentan especies similares en menor abundancia, en algunos casos hasta en más de un 90% (i.e., erizos, bivalvos y macroalgas) comparados con el cultivo.

Aunque algunas similitudes pueden estar promovidas por inmigración de especies desde la zona de cultivo, las diferencias con sitios de referencia están mediadas por un grupo de especies de función similar pero más diverso. Estas premisas sugieren que la modificación de la estructura comunitaria es mediada por la disponibilidad de alimento, especies secundarias y materia orgánica derivada del cultivo.

En términos energéticos, el cultivo promueve acumulación de biomasa de elevado valor nutritivo (Yagubi et al., 2021) como *A. atra*, *C. chorus* y *M. chilensis*. Sin embargo, el pastoreo ejercido por el banco emergente sobre el plancton podría afectar la base de la cadena trófica por partición excesiva de recursos (Newell 2004). El efecto de la acuicultura de mitílicos en la disponibilidad de recursos y hábitat (Dumbauld et al. 2009) requiere atención, sobre todo en escenarios ambientales de mayor impredecibilidad, como los actuales.

Por otro lado, la biomasa bentónica excedente que puede llegar a generar un cultivo, representa una alternativa interesante de manejo ecosistémico para pequeños acuicultores. Estos podrían cosechar el banco emergente como mecanismo de control ecológico de la huella de la acuicultura con obtención moderada de biomasa. Esta moderación, se debe a que la sobreexplotación del banco emergente tendrá efectos inmediatos en su comunidad de omnívoros, los cuales, parecen funcionar como reguladores del exceso de materia orgánica del cultivo que entra al ecosistema.

Para nuestro conocimiento, este enfoque en la práctica de acuicultura representa una aproximación novedosa, poco explorada en nuestro país y con escasos referentes en países con acuicultura similar (Kluger et al. 2016). Este estudio de caso es relevante para determinar efectos sobre uso y partición de recursos y especies cuya función provee servicios ecosistémicos clave como fitoplancton y el



reciclaje de materia orgánica por omnívoros y detritívoros en ecosistemas sometidos a alteraciones por el cultivo intensivo.

#### 6.6.2.2. Caso 3. Repoblación de huairo en fondos blanqueados

El modelo trófico cuantitativo puede ser usado para el diseño y evaluación del manejo adaptativo de las pesquerías (Hilborn et al. 1995). La aplicación de la teoría de redes provee de una eficiente herramienta en la estimación de macro-descriptores de ecosistemas. Estas han sido usadas para evaluar y describir las propiedades de un sistema, su dinámica y su salud general (Costanza & Mageau 1999).

El modelo conceptual propuesto para el modelamiento trófico del sistema de fondos blanqueados en AMERB Chungungo B, coincide en gran medida con los modelos realizados en otros sistemas de fondos blanqueados en el norte de Chile. Ortiz (2008) construyó modelos tróficos de sistemas bentónicos dominados por *Macrocystis*, *L. trabeculata* y fondos blanqueados. El modelo de fondos blanqueados propuesto por Ortiz (2008), consta de grupos funcionales similares, sin embargo, con un número menor de compartimientos. Por otro lado, Hermosillo-Nuñez et al. (2018) construyó modelos tróficos para determinar el complejo de especies clave en siete sistemas ecológicos pesqueros dominados por bosques de algas de la región de Antofagasta. Entre los grupos funcionales propuestos por estos autores, se incluyen la división de Small epifauna según su nivel trófico y también variables correspondientes a la fauna íctica.

Para llevar a cabo la modelación trófica es necesario la recopilación de mayor información como la biomasa de cada compartimiento, mortalidad y la tasa de consumo, que serán recopiladas durante la siguiente etapa del programa con la finalidad de modelar escenarios de repoblación de *L. trabeculata* en el sistema de AMERB Chungungo B.

### 6.7. Monitoreo del efecto de la APE sobre comunidades bentónicas

Los resultados del monitoreo sugieren que la mayor disponibilidad de sustrato biogénico bajo cultivos de *M. chilensis* es capaz de atraer una diversa comunidad de organismos epibentónicos. Sin embargo, pareciera que la estructura comunitaria que cohabita sobre el banco emergente se diferencia, en los casos expuestos, de la estructura comunitaria de sitios de referencia ubicados al menos 200 m del sitio de cultivo. Estas diferencias, medidas bajo tres escalas de cultivo sugieren que, además, el volumen del cultivo y su efecto inherente (i.e., bioacumulación), más particularidades topográficas y oceanográficas sitio-específicas, pueden modificar las respuestas comunitarias (i.e., estructura y función trófica) sobre el banco emergente de manera consistente en todas las temporadas de evaluación.

Si bien se demostró que existe una tendencia al aumento en la diversidad total de especies epibentónicas bajo los cultivos, para los sitios de meso y macro-escala, este aumento estuvo acompañado con una disminución en la riqueza de especies de infauna. Esta respuesta de la infauna parece seguir el modelo clásico de enriquecimiento orgánico de Pearson-Rosenberg (Pearson & Rosenberg 1978), en donde, la presencia de una fuente de materia orgánica (i.e., cultivo) aumenta la bioacumulación de fecas y pseudofecas, ocasionando en casos crónicos, la disminución de la



biodiversidad. Por ejemplo, dentro de la infauna, la presencia de cultivos de meso y macro-escala respondió con una mayor abundancia de juveniles ( $< 1\text{cm}$ ) de *M. chilensis* de manera consistente en noviembre y marzo. Esto contrasta con sitios de referencia en donde especies de oligoquetos Taphididos y otras especies de bivalvos (e.g., *S. algosus* y *A. ater*) fueron más abundantes. Sin embargo, la equitatividad (o proporción de individuos de cada especie por muestra) se mantuvo con valores similares en todos los sitios de estudio sugiriendo una dominancia homogénea de las especies presentes (*sensu* Clarke, 1993). Esto sugiere comunidades relativamente equilibradas. A su vez, esto sugiere que los juveniles de *M. chilensis* alcanzan este estado de equitatividad poblacional.

Por otro lado, si bien el volumen de cultivo es capaz de aumentar la bioacumulación, la topografía y el movimiento de agua particular de cada sitio de cultivo pueden jugar un papel clave. Esto ha sido evidenciado en otros estudios sobre efectos ambientales de la mitilicultura (Lacoste et al. 2018). Estos estudios sugieren impactos negativos y/o difusos en condiciones de regímenes de corrientes débiles, e.g.,  $2.28 - 3.14\text{ cm s}^{-1}$  (Chamberlain et al. 2001),  $7.13 - 11.2\text{ cm s}^{-1}$  (Hartstein & Rowden 2004),  $5 - 18\text{ cm s}^{-1}$  (Callier et al. 2006, 2008). De esta manera, esteros o bahías con baja velocidad de corriente pueden generar condiciones favorables para la bioacumulación sobre la comunidad marina aumentando la vulnerabilidad de los sitios de cultivo. A su vez, esto puede condicionar una respuesta comunitaria específica, como el arribo de detritívoros y depredadores omnívoros. De acuerdo a esto, el cultivo, factores oceanográficos y la comunidad predominante son factores clave y sitio-específicos. Estas características naturales deben ser el factor más importante en la toma de decisiones para la adecuación espacial y manejo ambiental sustentable. Esta premisa funciona en cualquier escala de cultivo.

En este estudio, los sitios de micro-escala presentaron velocidades mayores que los sitios de meso y macro-escala, lo que en parte puede explicar las diferencias entre las comunidades estudiadas. Por ejemplo, el sitio de meso-escala Molulco, emplazado en los alrededores de la cabeza del estero Compu, puede promover la bioacumulación con consecuencias tanto para los organismos estructuradores como para la comunidad móvil, independientemente de la escala de cultivo. Esto se evidenció con pobreza funcional  $\sim 2$  ( $0,25\text{ m}^2$ ) en todos los grupos medidos exceptuando el de cangrejos depredadores (e.g., *H. edwardsii*) en noviembre del 2021. En el resto de las comunidades de cultivo, fueron grupos de cangrejos, erizos y detritívoros (e.g., Holoturias), quienes respondieron positivamente ( $> 2$  especies del mismo grupo en  $0,25\text{ m}^2$ ), promoviendo el número de especies que desempeñan la misma función en la comunidad emergente. Estas diferencias permiten observar que la función comunitaria en presencia de cultivos de mitílidos tiende a favorecer especies capaces de reciclar excedentes orgánicos que produce un cultivo, incluyendo el banco emergente a cualquier escala.

El grupo de carnívoros misceláneos parece responder positivamente en comunidades bajo cultivos de micro-escala. En la práctica, esto reflejaría restricciones para el funcionamiento de estas especies en sitios de mayor escala, en donde otros organismos con funciones tróficas claves en el ecosistema, como poblaciones de carnívoros (Summerson & Peterson 1984, Nicola et al. 2010), herbívoros y suspensívoros, pueden ser afectados por depredadores móviles, los cuales, son usualmente atraídos a bancos formados por el desprendimiento de mitílidos desde cultivos (D'Amours et al. 2008). En este



sentido, D'Amours et al. (2008) registró una mayor abundancia de estrellas de mar, cangrejos de roca y peces planos a <50 m alrededor de cultivos de mitílidos, mientras que Sardenne et al. (2019) documentó que bivalvos caídos desde cultivos se convierten en el alimento más importante para la langosta comercial *Homarus americanus*. Similarmente, Inglis & Gust (2003) determinaron que la disponibilidad de alimentos y refugio proporcionada por los bivalvos bajo los cultivos parecen optimizar los rasgos reproductivos de depredadores y consumidores ecológica y económicamente importantes. Estas evidencias han sido ratificadas con evaluaciones de interacciones tróficas usando modelos de redes tróficas en cultivos de bivalvos, sugiriendo el aumento de estos grupos funcionales (Ferriss et al. 2016). Por lo tanto, los resultados sugieren que la concentración de invertebrados móviles bajo los cultivos, si bien, puede aumentar la abundancia y diversidad a nivel local, también puede producir efectos tróficos por presión de depredación sobre los consumidores o presas ("bottom-up"). Esta interacción acuicultura-ambiente y sus consecuencias requerirá mayor atención.

Los invertebrados estructuradores como *A. atra*, *C. chorus*, *O. chilensis* y *Austromegabalanus psittacus* estuvieron presentes en sitios de referencia, pero exhibiendo una menor abundancia comparada con los sitios bajo el cultivo. Esto sugiere que el efecto del desprendimiento, si bien, puede aumentar la abundancia de organismos estructuradores y la abundancia general, también reduce la riqueza funcional de otros grupos frente escalas más elevadas de producción. Como ejemplo, el alga *M. pyrifera*, cuya función como productor primario y facilitador de hábitat es ampliamente conocida (Graham et al. 2007) también fue observada bajo los cultivos, pero con promedios mayores en sitios de micro-escala. Otra respuesta sitio-específica registrada en sitios de micro-escala reveló que el ensamble de esponjas de sitios bajo el cultivo fue similar al de áreas de referencia. Estos resultados sugieren que al menos, a esta escala de cultivo (~ 200 ton año<sup>-1</sup>) y dadas las características específicas de este sitio, el proceso de sucesión sobre sustrato biogénico podría promover la diversidad local de especies estructuradoras de función variada (e.g., otros bivalvos, *A. psittacus*, *Crepidatella* spp., *M.s pyrifera*). La riqueza funcional de herbívoros, (e.g., *Fissurella* spp., *T. atra*), fue relativamente mayor en sitios de micro-escala, con valores similares a sitios de referencia (~ 2 especies de herbívoros 0,25 m<sup>2</sup>). Esta tendencia sugiere que, si bien, la productividad primaria en los hábitats biogénicos estudiados bajo los cultivos puede ser variable debido a la profundidad de tales sitios (entre 12 y 26 m) la presencia de los cultivos podría influir en características atractivas para herbívoros ramoneadores con tendencia a la omnivoría (e.g., *Fisurella* spp.) promoviendo la disponibilidad del biofilm del fondo, lo que ha demostrado favorecer el reclutamiento de larvas de diversos invertebrados y especies filamentosas (Bao et al. 2007).

Finalmente, la asociación entre la estructura comunitaria y parámetros físico-químicos del sedimento (disponible sólo para noviembre del 2021) confirma las premisas discutidas anteriormente. Las comunidades parecen responder a disturbios ambientales del cultivo (evidenciado con potencial Redox y MOT) con cambios en la abundancia de especies de función trófica similar con tendencia a la omnivoría, detritivoría/carnivoría y resuspensión (e.g., *M. gregaria*, *M. edwardsii*, *Metridium* sp., *H. godeffroyi*, erizos, semillas de *M. chilensis*), cuya abundancia es promovida por la disponibilidad de sustrato biogénico (i.e., mitílidos). Sin embargo, esta dinámica podría disminuir la funcionalidad comunitaria total bajo cultivos. Este parece ser el efecto neto de la acuicultura de mitílidos en las comunidades estudiadas. Sin embargo, las variaciones, tanto en especies como entre escalas de



cultivo parecen responder también a condiciones oceanográficas y topográficas sitio-específicas. Esto sugiere que el estudio y evaluación de efectos y funciones ecológicas asociadas a acuicultura de especies de bajo nivel trófico debería enfocarse en unidades geográficas pertinentes como, por ejemplo, canal, bahía, estero, las cuales, presentan diferentes hidrodinámicas, bioacumulación, dispersión y colonización de especies. Esto ha sido sugerido desde un punto de vista empírico (Callier et al. 2007, Ysebaert et al. 2009, Dumbauld et al. 2009) y ecológico (Sanz-Lazaro & Sanchez-Jerez 2020).

Este estudio ha demostrado por primera vez, que, a pesar de la amplia variabilidad estacional y sitio-específica de los hábitats bentónicos del sur de Chile, la acuicultura de mitílidos genera micro-hábitats bajo sus instalaciones, y éstos pueden promover, bajo ciertas circunstancias, la diversidad bentónica local. Sin embargo, la generación de hábitats por el desprendimiento de individuos desde el cultivo tiene efectos disímiles en la riqueza de funciones comunitarias a mayores escalas de cultivo, con efectos negativos sobre grupos claves como carnívoros y especies estructuradoras. Por otro lado, se favorecen especies de crustáceos generalistas y detritívoros, algunas de éstas de importancia comercial.

El efecto de la escala de cultivo es marcado en la comunidad de la infauna, la cual responde al tamaño del cultivo, presumiblemente por aumentos en la bioacumulación de desechos orgánicos, destacando la sensibilidad de esta comunidad como indicador de impacto ambiental. Sin embargo, la APE podría presentar efectos más beneficiosos o menos invasivos sobre la biota bentónica principalmente por la combinación de la introducción de una especie estructuradora, la baja producción de desechos orgánicos y características sitio-específicas favorables. Esta combinación de variables puede ser promovido por la APE. La observación de las funciones de los organismos en este estudio permite inferir que interacciones acuicultura-ambiente facilitan la redundancia de funciones de sólo en algunos grupos (e.g., cangrejos depredadores, detritívoros). Debido a su rol, especies pueden a su vez cambiar sus interacciones a nivel local con consecuencias para la diversidad. Finalmente, los factores físico-oceanográficos predominantes y diferencias sitio-específicas pueden explicar la amplia variabilidad comunitaria, sin embargo, pueden jugar un rol fundamental en la generación de efectos positivos. Esta premisa puede ser aplicada a cualquier tamaño de cultivo y requiere atención para lograr el manejo ecosistémico de hábitats sometidos a vectores de cambio ambiental como la acuicultura.

## **6.8. APE y servicios ecosistémicos**

La revisión y el análisis de servicios ecosistémicos asociados a la acuicultura y la APE, además de los resultados del presente estudio, demuestran la existencia de un amplio rango de beneficios ambientales, más allá de los evidentes servicios de aprovisionamiento (i.e., provisión de alimento y productos no alimenticios), que responden a una meta principalmente comercial (i.e., venta). Sin embargo, es imperante avanzar en una mejor caracterización, cuantificación y, eventualmente, valoración de otros servicios ecosistémicos relevantes, y sobre todo los asociados a especies objeto de la APE en Chile (i.e., especies bio-extractoras, acuicultura extensiva) (Custódio et al. 2020, Barrett et al. 2022). Más aun, en un escenario donde se proyecta que la acuicultura y la APE se expanda para mantener millones de medios de vida y satisfacer una demanda mundial de alimento creciente (Troell



et al. 2014, Short et al. 2021). Desde la investigación, la ciencia debe aportar a través de mejorar el entendimiento sobre las compensaciones (e.g., ventajas y desventajas) y las sinergias entre la provisión de diferentes servicios ecosistémicos, y cómo éstos varían con la escala productiva, espacial y el contexto ambiental, así como, en identificar los umbrales en los que los efectos netos sobre los servicios pueden cambiar de positivos a negativos (Willot et al. 2019, Gentry et al. 2020, Lacoste et al. 2020) .

En general, podríamos esperar que los efectos netos sobre los servicios ecosistémicos de la APE en Chile fuesen positivos, dado principalmente por el tipo de acuicultura y la escala productiva que la caracterizan. Sin embargo, se debe considerar que granjas o cultivos APE pueden coexistir en paisajes costeros junto a granjas de gran escala (e.g., salmonicultura, mitilicultura) o a numerosas otras granjas APE donde la producción de desechos es alta (Camelo-Guarín et al. 2021) y puede llegar a ser un problema.

Proyectando la aplicación del marco conceptual de los servicios ecosistémicos en la acuicultura, son numerosos los vacíos y desafíos de información científica y normativa asociados a la APE en Chile. Entre otros se puede mencionar:

1. Dimensionar la provisión de servicios según tipo de cultivo y escala geográfica y productiva.
2. Identificar las oportunidades económicas asociados al turismo asociado a la APE
3. Investigar la incorporación de servicios culturales (e.g., sentido del lugar, simbolismo) por parte de comunidades de pescadores y/ acuicultores
4. Profundizar en el estudio de las compensaciones y beneficios entre APE y cambio climático (e.g., servicios de regulación) y entre APE y biodiversidad (e.g., servicios de hábitat o soporte) (Ver **Sección 5.7 y 5.8**).
5. Diseños APE resilientes a condiciones de cambio climático (Ver **Sección 5.5**).
6. Incorporar el enfoque de los servicios ecosistémicos en estudios de capacidad de carga (Weitzman & Filgueira 2020) y en la planificación espacial de la acuicultura nacional y APE.
7. Desde la perspectiva de la creación y modificación de políticas públicas, normativas y regulaciones, un mejor conocimiento de las dinámicas de provisión de servicios ecosistémicos (incluyendo la valoración económica), permitiría mantener o fomentar la provisión de éstos a través de la APE (e.g., Pago por Servicios Ecosistémicos).

### **6.9. Propuesta de diseño de sistema de cultivo APE para zona norte y sur, y/o condiciones de mayor exposición**

Se evaluó numéricamente el comportamiento estructural de un sistema long-line con linternas de cultivo de ostión, con el fin de que contenga las dimensiones adecuadas para las condiciones oceanográficas propuestas. Los resultados de simulación estuvieron centrados en tensiones y desplazamientos del sistema long-line, obteniendo tensiones máximas de 3,5 toneladas para la zona sur (alta energía) y 1,5 toneladas para la zona norte (baja energía).

Los resultados de desplazamiento axial y tensiones en los componentes del sistema long-line son mayores en la zona sur respecto a la zona norte, por lo tanto, es probable que las dimensiones de un



componente en un sistema de cultivo tipo long-line en el sur, sea mayor que la de un sistema en el norte. Es por esto, que se recomienda al momento de dise1ar un sistema de estas caracteristicas, evaluar constantemente las combinaciones de cargas del ambiente asociadas al lugar de cultivo en la que el sistema funcionar1, debido a que el desplazamiento y las tensiones en el sistema son sensibles a la intensidad de las condiciones y adem1s aquellos componentes deben cumplir con los factores de seguridad exigidos por la R. Ex. 1821 (que Establece Metodolog1a para el Levantamiento de Informaci3n, Procesamiento y C1lculos del Estudio de Ingenier1a, y Especificaciones T1cnicas de las Estructuras de Cultivo).

En el caso del an1lisis de sensibilidad del desplazamiento axial de la parte superior de cada linterna, se puede corroborar que, a mayores intensidades de corriente y oleaje, las ultimas linternas (entre 50 y 100) poseen mayor desplazamiento respecto a las primeras, sin embargo, a menores velocidades de corriente, la acci3n de oleaje predomina, afectando principalmente en las primeras linternas. En este contexto, el movimiento en cada linterna del sistema depende de la combinaci3n de carga. Como consecuencia para futuros an1lisis, se recomienda investigar y /o evaluar la boyantes requerida y/o necesaria en cada linterna y sistema, debido a que quiz1s existe dependencia entre el amortiguamiento de la boya respecto al desplazamiento y tensi3n del sistema. Es probable que el dimensionamiento del sistema de boyantes sea diferente al momento de evaluar num1ricamente la hidrost1tica del sistema al interactuar con las diferentes combinaciones de carga. En este contexto, estos primeros resultados nos dan indicio de que el desprendimiento, muerte de a par o agitaci3n en cada linterna ser1 diferente respecto a cada condici3n oceanogr1fica.



## **7. CONCLUSIONES**

---

### **7.1. Análisis bio-económico de modelo de cultivo APE con aprovechamiento de recursos bentónicos (Fase 1)**

- A partir de la existencia de bancos y/o hábitats emergentes (HE) asociados a la mitilicultura, se construyó un modelo bio-económico-productivo, que incorpora aspectos regulatorios de la actividad, constituyendo uno de los primeros esfuerzos por tratar de ordenar y enlazar los distintos niveles de complejidad del enfoque acuicultura – poblaciones naturales.
- Se identificaron los principales parámetros a considerar para avanzar en un modelo cuantitativo, sin embargo, es probable que la complejidad del sistema sea mayor, y cuantificar cada variable y determinar cada parámetro requerido para el modelamiento sea una tarea complicada de resolver en el corto y mediano plazo.
- De manera inicial la atención se pueda centrar en el aporte del HE sobre la abundancia y la biodiversidad, sobre todo de especies de interés de conservación y eventualmente de interés comercial que pudieran significar un aporte económico.
- Se sugiere avanzar en la visión del concepto de HE, donde probablemente se requiera mover el “Aprovechamiento” en un HE hacia el “Valor” del HE, el cual es un concepto más amplio, pudiendo dar cabida al “aprovechamiento” y al valor de otros servicios ecosistémicos proporcionados por éste.

### **7.2. Validación de modelo de gestión y productivo para APE en base a portafolio multi-especie propuesto para la zona sur (Fase 1)**

- La primera fase de la instalación de un modelo productivo tipo portafolio ha mostrado crecimientos significativos en los moluscos filtradores, los cuales, si bien no han alcanzado una talla comercial debido al bajo tamaño promedio al momento de la instalación, se espera que puedan completar su crecimiento en una siguiente etapa, la cual será monitoreado regularmente.

### **7.3. Desempeño productivo y ambiental de los cultivos**

- La incorporación de distintas densidades de cultivo de pelillo y chicorea en los sistemas de cultivo tipo plana permite obtener al final del ciclo productivo, biomasa cosechables equivalentes.
- La aplicación de podas en pelillo y chicorea, permite obtener biomasa cosechable finales superiores que los controles sin poda. Se debería evaluar la aplicación de más podas durante el ciclo productivo para observar si mejora su desempeño en biomasa final cosechada.
- Se evidencia nuevamente que la incorporación de organismos filtradores en cultivos estuarinos o de baja profundidad, es una alternativa real de diversificación productiva para las organizaciones de pescadores o titulares de CCAA que históricamente han desarrollado mono-cultivos de pelillo, además, de proporcionar servicios ecosistémicos (e.g., biorremediación), que aún no han sido cuantificados y valorizados.
- La mantención mensual de las estructuras de cultivo, tomando en cuenta su revisión y limpieza, permiten obtener mejores resultados de biomasa cosechable.



- Los datos ambientales observados a lo largo de los ciclos de cultivo, presentan variabilidad interanual e inter-sitios. Pero los organismos son capaces de desarrollarse en variadas condiciones o sitios, por lo que no son un factor limitante al momento de realizar cultivos de macroalgas o co-cultivos.
- Para el cultivo en AMERB Chungungo B, si bien, se obtuvieron resultados productivos variables entre recursos, se debe valorar la transferencia tecnológica e iniciación en APE de esta OPA.
- Para el cultivo de fondo (repoblación) de *L. trabeculata* es necesario considerar otros factores a los identificados en las etapas anteriores a este programa, como son la herbivoría en la zona. El tamaño de la plántula y las corrientes en los sitios de adhesión también son factores relevantes para el éxito.

#### **7.4. Evaluación del desempeño fisiológico-productivo de macroalgas y bivalvos co-cultivados**

- Los co-cultivos de *A. chilense*: *M. chilensis* y *C. chamissoi*: *M. chilensis* mostraron un mayor Rendimiento Relativo Total (RRT) en comparación a los mono-cultivos.
- El análisis de series de reemplazo De Wit demuestra ser una herramienta consistente y útil para la identificación de proporciones óptimas para el co-cultivo APE.
- El co-cultivo de macroalgas y bivalvos podría aumentar la producción de biomasa en APE, pero aún se requiere de experiencias de mayor escala en laboratorio y terreno.
- Los co-cultivos macroalga-bivalvo pueden ser una herramienta para diversificar, así como también para mitigar los efectos de la acidificación oceánica en APE.

#### **7.5. Fenoles solubles e insolubles en *D. incurvata***

- La concentración de fenoles solubles e insolubles en *D. incurvata* fue significativamente diferente entre localidades de origen, indicando que la producción de estas biomoléculas está asociada a las condiciones ambientales locales.

#### **7.6. Modelos para evaluar impactos ecosistémicos de acuicultura de macroalgas e invertebrados**

##### 7.6.1. Modelos y desarrollo de escenarios de estabilidad/ inestabilidad

- La modelación semicuantitativa de redes (e.g., Loop análisis) permite formular, describir e interpretar interacciones múltiples entre organismos, grupos funcionales, variables abióticas y sociales de un sistema complejo analizando diferentes escenarios para sugerir alternativas de manejo sostenibles.
- Para el cultivo de macroalgas APE (*C. chamissoi*) la estrategia para lograr un desarrollo sostenible (i.e., estabilidad local) consiste en mantener un manejo (limpieza de macroalgas e infraestructura de cultivo) continuo sobre el sistema, independiente del tipo de cosecha que el acuicultor decida implementar. Con la ejecución de esta actividad (manejo) el acuicultor se beneficiaría desde el punto de vista productivo debido a la posibilidad de diversificación de sus productos como también desde el punto de vista económico. Por lo tanto, la sostenibilidad y permanencia en el tiempo de un cultivo APE,



dentro de un equilibrio dinámico, está determinado exclusivamente por la comprensión y responsabilidad que asuma el acuicultor.

- El sistema de co-cultivo podría alcanzar estabilidad local, si es que se conserva ciertas auto-retroacciones o diferentes estados en la dinámica de abundancia de grupos clave (zooplancton, fitoplancton, suspensívoros, detritívoros, banco emergente). Los excedentes de materia orgánica y propágulos arrojados al fondo pueden tener un efecto positivo si la comunidad del fondo exhibe una nula auto-retroacción. Esto significa, por ejemplo, no establecimiento de abundancias máximas o mínimas.
- El bancos o hábitat emergente (HE) puede ser intervenido en periodos de Postcosecha, si las variables acuicultor y depredadores bentónicos se encuentran en autocontrol. El manejo y explotación deberían actuar como auto-retroacciones negativas sobre grupos. El manejo y mantenimiento del co-cultivo requiere aplicar un enfoque precautorio de conservación en el posible aprovechamiento de un HE, puesto que son factores sociales primordiales, tanto para la obtención de proteína de calidad como para la conservación del ecosistema que sustenta la actividad.
- Un co-cultivo comercial de bivalvos y macroalgas puede alcanzar estabilidad dentro del ecosistema. Además, es posible el aprovechamiento de un HE, pero, se requiere aplicar un enfoque precautorio de conservación para garantizar la función del ecosistema que sustenta tanto al banco como al cultivo. Estrategias que apunten a mejorar y dirigir la percepción del acuicultor hacia las consecuencias de su actividad ligada al funcionamiento del ecosistema parecen ser claves para evitar prácticas no-sostenibles.
- El monitoreo de la estabilidad local del sistema de fondos blanqueados permite determinar las condiciones en la que es factible realizar ciertas acciones de manejo para cambiar la trayectoria ecológica a un sistema de bosque de macroalgas.
- La repoblación de huero palo *L. trabeculata* en comunidades de fondos blanqueados, es factible siempre y cuando la acción de repoblación o incorporación de plántulas al sistema se realice considerando la incorporación del manejo de otras especies clave como consumidores primarios y secundarios. Esto permite la desestabilización del sistema estable de fondo blanqueado.

#### 7.6.2. Balance trófico de modelos propuestos

- La mayor biomasa de bivalvos, aparece asociada a especies cuya función es la omnivoría/carnivoría, las cuales, responden tanto al refugio que provee el banco, pero también, al alimento y la materia orgánica disponible bajo el cultivo. Esto representa cambios en la disponibilidad de recursos y abundancia, por lo tanto, una alteración trófica que requiere atención.
- El aumento en un orden de magnitud de la biomasa  $m^{-2}$  de bivalvos bajo el cultivo y su efecto sobre la comunidad planctónica debe ser estudiado. La aproximación de modelamiento trófico y balance de masas Ecopath con Ecosim permitiría proyectar escenarios de aumento de volumen de cultivo y determinar límites aceptables para evitar prácticas no sostenibles.
- El manejo y/o aprovechamiento del HE, puede ser llevada a cabo siempre y cuando se resguarde o regule la integridad del banco emergente, ya que grupos de especies claves (e.g., omnívoros, jaiabas depredadoras) proveen servicios que mantienen la salud del ecosistema.
- La modelación trófica permite determinar la dinámica y la salud del sistema cuando existan acciones de manejo tendientes a la repoblación de *L. trabeculata*. El modelo conceptual elaborado es



similar a la construida por otros autores en el norte de Chile, por lo que se concluye que posee la información necesaria para las siguientes etapas de la modelación.

### **7.7. Monitoreo del efecto de la APE sobre comunidades bentónicas**

- La acuicultura de mitílidos en el sur de Chile tiene la capacidad de generar hábitats biogénicos emergentes que facilitan una estructura comunitaria con mayor número de especies.
- La acuicultura APE de bivalvos muestra efectos que favorecen una comunidad más diversa en términos específicos y funcionales comparada con cultivos de mayor escala.
- Los HE en cultivos de mayor escala pueden promover mayor riqueza funcional de invertebrados omnívoros, carnívoros, detritívoros, y a pequeña escala de herbívoros/generalistas y una variedad de carnívoros.
- Algunas especies en los HE son de importancia comercial (*H. edwardsii*, *C. plebejus*, *L. albus*), sin embargo, la prevalencia de especies del mismo grupo podría disminuir la riqueza funcional de otras especies clave, menos abundantes, dentro del ecosistema.
- Las implicancias socio-ecológicas de efectos beneficiosos/perjudiciales de la acuicultura de bivalvos debería ser discutida en términos del manejo consciente del ecosistema bentónico incluyendo a todas sus especies y funciones en la comunidad del banco emergente.

### **7.8. APE y servicios ecosistémicos**

- Servicios ecosistémicos (SE) (dimensión, flujo, trade-offs, valoración) asociados a la acuicultura en Chile han sido escasamente estudiados.
- Es esperable que los efectos netos sobre los SE de la APE en Chile sean positivos (más allá del SE de aprovisionamiento), dado principalmente, el tipo de acuicultura (i.e., especies bio-extractoras, acuicultura extensiva) y la escala productiva que la caracterizan. Sin embargo, se debe considerar que granjas o cultivos APE pueden coexistir en paisajes costeros junto a granjas de gran escala o a numerosas otras granjas.
- La incorporación del concepto de SE es un buen proxy para incorporar en enfoques más holísticos de planificación y manejo ambiental y de la acuicultura (e.g., capacidad de carga, enfoque ecosistémico, planificación espacial marina-costera).
- Desde la perspectiva de la creación y modificación de políticas públicas, normativas y regulaciones, un mejor conocimiento de las dinámicas de provisión de SE (incluyendo la valoración económica), permitiría mantener o fomentar la provisión de éstos a través de la APE (e.g., Pago por Servicios Ecosistémicos).
- El presente estudio aporta en la reducción de brechas de investigación de SE en acuicultura en Chile.

### **7.9. Propuesta de diseño de sistema de cultivo APE en condiciones de mayor exposición**

- Los resultados de la simulación muestran que, a menores velocidades de corriente, la acción del oleaje predomina, afectando principalmente en las primeras linternas de cultivo. A mayores



intensidades de corriente y oleaje, las últimas linternas (entre la 50 y 100) poseen mayor desplazamiento respecto a las primeras.

- La dinámica de cada linterna de cultivo del sistema depende de la combinación de carga de oleaje y corrientes.
- Para los resultados de tensiones y desplazamientos se pudo apreciar que su variación es sensible a las intensidades de la corriente y el oleaje, por lo tanto, a medida que las condiciones ambientales eran extremas, los desplazamientos y tensiones tienden a ser similares en casi todo el sistema.
- Para el sistema de fondeo se recomienda utilizar muertos máxicos mínimos de 6,5 toneladas para la zona sur (mayor energía) y 2,6 toneladas para la zona norte (menor energía) respecto las condiciones oceanográficas evaluadas.
- Este diseño de sistema long-line es replicable para otras especies de cultivo, considerando que generalmente otras especies tienen menor peso. Son embargo, hay que considerar que este diseño solo es factible para las condiciones oceanográficas evaluadas, por lo tanto, en caso de existir otras condiciones, se deberá reevaluar el dimensionamiento y materialidad del sistema.



## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- Abreu MH, Varela DA, Henríquez L, Villarroel A, Yarish C, Sousa-Pinto I, Buschmann AH (2009) Traditional vs. Integrated Multi-Trophic Aquaculture of *Gracilaria chilensis* C. J. Bird, J. McLachlan & E. C. Oliveira: Productivity and physiological performance. *Aquaculture* 293:211–220
- Acuna FH, Zamponi MO (1995) Ecology of intertidal sea anemones. Density, dispersion and autoecology of *Phymactis clematis* Dana, 1849 (Anthozoa: Actiniaria). *Ciencias Mar* 21:1–12
- Ahmed N, Bunting SW, Glaser M, Flaherty MS, Diana JS (2017) Can greening of aquaculture sequester blue carbon? *Ambio* 46:468–477
- Ainsworth CH, Pitcher TJ (2006) Modifying Kempton's species diversity index for use with ecosystem simulation models. *Ecol Indic* 6:623–630
- Akaboshi S (1979) Notas sobre el comportamiento de la ostra japonesa *Crassostrea gigas* (Thunberg 1795) en el litoral del estado de Sao Paulo, Brasil. *Boletín Inst Pesca* 5:93–104
- Albers HJ, Baquedano M, Chávez C, Dresdner J, Yubini K (2021) Opportunities and challenges for small-scale aquaculture: The stakeholders' perspective in Los Lagos Region-Chile. *Int J Agric Nat Resour* 48:259–287
- Aldana M, Maturana D, Pulgar J, García-Huidobro MR (2016) Predation and anthropogenic impact on community structure of boulder beaches. *Sci Mar* 80:543–551
- Alleway HK, Gillies CL, Bishop MJ, Gentry RR, Theuerkauf SJ, Jones R (2019) The Ecosystem Services of Marine Aquaculture: Valuing Benefits to People and Nature. *Bioscience* 69:59–68
- Alonso AA, Álvarez-Salgado XA, Antelo LT (2021) Assessing the impact of bivalve aquaculture on the carbon circular economy. *J Clean Prod* 279:123873
- Angel A, Ojeda FP (2001) Structure and trophic organization of subtidal fish assemblages on the northern Chilean coast: The effect of habitat complexity. *Mar Ecol Prog Ser* 217:81–91
- Arismendi I, Penaluna BE, Dunham JB, García de Leaniz C, Soto D, Fleming IA, Gomez-Uchida D, Gajardo G, Vargas P V., León-Muñoz J (2014) Differential invasion success of salmonids in southern Chile: Patterns and hypotheses. *Rev Fish Biol Fish* 24:919–941
- Arnold TM, Targett NM (1998) Quantifying in situ rates of phlorotannin synthesis and polymerization in marine brown algae. *J Chem Ecol* 24:577–595
- Arrontes J (1990) Composition, Distribution on Host, and Seasonality of Epiphytes on Three Intertidal Algae. *Bot Mar* 33:205–212
- Aubin J, Callier M, Rey-Valette H, Mathé S, Wilfart A, Legendre M, Slembrouck J, Caruso D, Chia E, Masson G, Blancheton JP, Ediwarman, Haryadi J, Prihadi TH, Matos Casaca J de, Tamassia STJ, Tocqueville A, Fontaine P (2019) Implementing ecological intensification in fish farming: definition and principles from contrasting experiences. *Rev Aquac* 11:149–167
- Avendaño M, Cantillán M (2005) Crecimiento y estructura demográfica de *Argopecten purpuratus* en la Reserva Marina La Rinconada, Antofagasta, Chile. *Ciencias Mar* 31:491–503
- Avendaño M, Cantillán M, González J (2017) Evaluation of culture of the mussels *Choromytilus chorus* and *Aulacomya ater* (Molina) in northern coasts of Chile. *Aquac Res* 48:3556–3567
- Bannister J, Sievers M, Bush F, Bloecher N (2019) Biofouling in marine aquaculture: a review of recent research and developments. *Biofouling* 35:631–648
- Bao WY, Satuito CG, Yang JL, Kitamura H (2007) Larval settlement and metamorphosis of the mussel *Mytilus galloprovincialis* in response to biofilms. *Mar Biol* 150:565–574
- Barrett LT, Swearer SE, Dempster T (2019) Impacts of marine and freshwater aquaculture on wildlife: a global meta-analysis. *Rev Aquac* 11:1022–1044
- Barrett LT, Theuerkauf SJ, Rose JM, Alleway HK, Bricker SB, Parker M, Petrolia DR, Jones RC (2022)



- Sustainable growth of non-fed aquaculture can generate valuable ecosystem benefits. *Ecosyst Serv* 53:101396
- Barrington K, Ridler N, Chopin T, Robinson S, Robinson B (2010) Social aspects of the sustainability of integrated multi-trophic aquaculture. *Aquac Int* 18:201–211
- Beaumont NJ, Austen MC, Atkins JP, Burdon D, Degraer S, Dentinho TP, Deros S, Holm P, Horton T, Ierland E van, Marboe AH, Starkey DJ, Townsend M, Zarzycki T (2007) Identification, definition and quantification of goods and services provided by marine biodiversity: Implications for the ecosystem approach. *Mar Pollut Bull* 54:253–265
- Berstad AJ, Tronstad H, Ytterland A (2004) Design rules for marine fish farms in Norway. Calculation of the structural response of such flexible structures to verify structural integrity. In: *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE*.p 867–874
- Beyá J, Álvarez M, Gallardo A, Hidalgo H, Aguirre C, Valdivia J, Parra C, Méndez L, Contreras F, Winckler P, Molina M (2016) Atlas de Oleaje de Chile. Primera edición. Valparaíso, Chile, Escuela de Ingeniería Civil Oceánica - Universidad de Valparaíso.
- Bi H, Turvey ND (1994) Inter-Specific competition between seedlings of *Pinus radiata*, *Eucalyptus regnans* and *Acacia melanoxylon*. *Aust J Bot* 42:61–70
- Borthagaray AI, Carranza A (2007) Mussels as ecosystem engineers: Their contribution to species richness in a rocky littoral community. *Acta Oecologica* 31:243–250
- Braat LC, Groot R de (2012) The ecosystem services agenda:bridging the worlds of natural science and economics, conservation and development, and public and private policy. *Ecosyst Serv* 1:4–15
- Breitbart DL (1985) Development of a subtidal epibenthic community: factors affecting species composition and the mechanisms of succession. *Oecologia* 65:173–184
- Brugère C, Aguilar-Manjarrez J, Beveridge MCM, Soto D (2019) The ecosystem approach to aquaculture 10 years on – a critical review and consideration of its future role in blue growth. *Rev Aquac* 11:493–514
- Bruno J, Bertness M (2001) Habitat modification and facilitation in benthic marine communities. In: Bertness M, Gaines S, Hay M (eds) *Marine Community Ecology*. Sinauer Associates Inc., Sunderland, Massachusetts, p 201–218
- Buck BH, Langan R (2017) Aquaculture perspective of multi-use sites in the open ocean: The untapped potential for marine resources in the anthropocene.
- Burg SWK van den, Termeer EEW, Skirtun M, Poelman M, Veraart JA, Selnes T (2022) Exploring mechanisms to pay for ecosystem services provided by mussels, oysters and seaweeds. *Ecosyst Serv* 54:101407
- Buschmann A, Correa J, Westermeier R, Hernández-González M, Norambuena R (2001) Red algal farming in Chile: A review. *Aquaculture* 194:203–220
- Buschmann AH, Hernández-González MC, Varela DA (2008) Seaweed future cultivation in Chile: perspectives and challenges. *Int J Environ Pollut* 33:432–456
- Buschmann AH, Moreno C, Vásquez JA, Hernández-González MC (2006) Reproduction strategies of *Macrocystis pyrifera* (Phaeophyta) in Southern Chile: the importance of population dynamics. *J Appl Phycol* 18:575–582
- Buschmann A, Steven P, Potin P, Faugeton S, Vásquez JA, Camus C, Infante J, Hernández-González MC, Gutierrez A, Varela D (2014) The Status of Kelp Exploitation and Marine Agronomy, with Emphasis on *Macrocystis pyrifera*, in Chile. *Adv Bot Res* 71:161–188
- Buschmann AH, Troell M, Kautsky N (2001) Integrated algal farming: A review. *Cah Biol Mar* 42:83–90
- Buschmann A, Varela D, Hernández-González M, Huovinen P (2008) Opportunities and challenges for the development of an integrated seaweed-based aquaculture activity in Chile: Determining the physiological capabilities of *Macrocystis* and *Gracilaria* as biofilters. *J Appl Phycol* 20:571–577
- Buschmann AH, Vásquez JA, Osorio P, Reyes E, Filún L, Hernández-González MC, Vega A (2004) The effect



- of water movement, temperature and salinity on abundance and reproductive patterns of *Macrocystis* spp. (Phaeophyta) at different latitudes in Chile. *Mar Biol* 145:849–862
- Buschmann AH, Westermeier R, Retamales CA (1995) Cultivation of *Gracilaria* on the sea-bottom in southern Chile: a review. *J Appl Phycol* 7:291–301
- Caillaux LM, Stotz WB (2003) Distribution and abundance of *Rhynchocinetes typus* (Crustacea: Decapoda), in different benthic community structures in northern Chile. *J Mar Biol Assoc United Kingdom* 83:143–150
- Callier MD, Byron CJ, Bengtson DA, Cranford PJ, Cross SF, Focken U, Jansen HM, Kamermans P, Kiessling A, Landry T, O'Beirn F, Petersson E, Rheault RB, Strand Ø, Sundell K, Svåsand T, Wikfors GH, McKindsey CW (2018) Attraction and repulsion of mobile wild organisms to finfish and shellfish aquaculture: a review. *Rev Aquac* 10:924–949
- Callier M, McKindsey C, Desrosiers G (2007) Multi-scale spatial variations in benthic sediment geochemistry and macrofaunal communities under a suspended mussel culture. *Mar Ecol Prog Ser* 348:103–115
- Callier MD, McKindsey CW, Desrosiers G (2008) Evaluation of indicators used to detect mussel farm influence on the benthos: Two case studies in the Magdalen Islands, Eastern Canada. *Aquaculture* 278:77–88
- Callier MD, Weise AM, McKindsey CW, Desrosiers G (2006) Sedimentation rates in a suspended mussel farm (Great-Entry Lagoon, Canada): Biodeposit production and dispersion. *Mar Ecol Prog Ser* 322:129–141
- Camelo-Guarín S, Molinet C, Soto D (2021) Recommendations for implementing integrated multitrophic aquaculture in commercial farms at the landscape scale in southern Chile. *Aquaculture* 544:737116
- Camus C, Infante J, Buschmann AH (2016) Overview of 3 year precommercial sea farming of *Macrocystis pyrifera* along the Chilean coast. *Rev Aquac*
- Candia A (2010) Biorremediación de Ambientes Marinos Intervenidos por la Actividad Acuicola a través de Cultivos Integrados de Macroalgas y Crustáceos en la X Región. Puerto Montt
- Cárcamo PF, Garay-Flühmann R, Squeo FA, Gaymer CF (2014) Using stakeholders' perspective of ecosystem services and biodiversity features to plan a marine protected area. *Environ Sci Policy* 40:116–131
- Cárcamo F, Henríquez L, Galleguillos F, Saavedra S, Torres D, Cook S, Leal PP, Alanis Y, Pérez E, Silva C (2020) Informe Final: Programa Integral de Desarrollo de Acuicultura de Algas para Pescadores Artesanales. III Etapa. Convenio IFOP -SUBECON.
- Cárcamo F, Henríquez L, Galleguillos F, Saavedra S, Torres D, Cook S, Leal PP, Alanis Y, Pérez E, Silva C (2021) Informe Final: Programa Integral de Desarrollo de Acuicultura de Algas para Pescadores Artesanales y Acuicultores de Pequeña Escala. IV Etapa. Convenio IFOP -SUBECON.
- Cardoza C (1992) Dinámica del asentamiento larvario de *Scurria scurra* (Lesson, 1830) (Gastropoda: Acmeidae), en el intermareal rocoso de Mehuín. (Doctoral dissertation, Tesis. UACH. Fac. de Ciencias. Esc. de Graduados. 86pp)
- Carvalho LL de, Souza EGA de, Mata Jíç ½nior MR da, Villaiç ½a RC (2017) Assessment of rocky reef fish assemblages close to seaweed farming. *Aquac Res* 48:481–493
- Castillo MI, Castillo MI, Valenzuela C, Valenzuela C (2008) Circulation regime in the austral Chilean channels and fjords. *Prog Oceanogr Knowl Chil Inter waters, from Puerto Montt to Cape Horn*:59–62
- CESSO (2021) Contribución al Plan de Adaptación en pesca y acuicultura, mediante la conservación y uso sustentable de los ecosistemas de algas pardas y estudio de su aporte al Carbono Azul., Coquimbo, Chile. Informe Final. PNUD.
- Chamberlain J, Fernandes TF, Read P, Nickell TD, Davies IM (2001) Impacts of biodeposits from suspended mussel (*Mytilus edulis* L.) culture on the surrounding surficial sediments. *ICES J Mar Sci* 58:411–416
- Chávez-Villalba J (2014) Cultivo de ostión *Crassostrea gigas*: Análisis de 40 años de actividades en México. *Hidrobiologica* 24:175–190
- Chen JL, Hsiao YJ, Chuang CT (2021) Developing payment for ecosystem service schemes for coastal aquaculture in southwestern Taiwan. *Aquac Environ Interact* 13:477–488



- Chopin T (2006) Integrated Multi-Trophic Aquaculture: What it is, and why you should care.....and don't confuse it with polyculture. *Aquac North Am*:4
- Chopin T, Neori A, Buschmann A, Pang S, Sawhney M (2011) Diversification of the aquaculture sector: Seaweed cultivation, integrated multi-trophic aquaculture, integrated sequential biorefineries. *Global Aquaculture Advocate (USA)*. :58–60
- Chopin T, Robinson S, Troell M, Neori A, Buschmann A, J F (2008) Multitrophic integration for sustainable marine aquaculture. In: *Encyclopedia of Ecology, Ecological Engineering*. Elsevier, Oxford, Great Britain, p 2463–2475
- Christensen V, Walters CJ (2004) Ecopath with Ecosim: methods, capabilities and limitations. *Ecol Modell* 172:109–139
- Chung IK, Oak JH, Lee JA, Shin JA, Kim JG, Park KS (2013) Installing kelp forests/seaweed beds for mitigation and adaptation against global warming: Korean Project Overview. *ICES J Mar Sci* 70:1038–1044
- Cisneros R, Bautista J, Arguelles J (2000) Cultivo en ambiente natural de la Ostra del pacifico *Crassostrea gigas* Thunberg 1975. Informe progrecivo IMARPE 116.
- Clarke K (1993) Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure. *Aust J Ecol* 18:117–143
- Clarke KR, Gorley R, Somerfield P, Warwick R (2014) *Change in marine communities: an approach to statistical analysis and interpretation*, 3rd edition. Prim Plymouth UK
- Collantes G, Merino A, Lagos V (2002) Fenología de la gametogénesis, madurez de conceptáculos, fertilidad y embriogénesis en *Durvillaea antarctica* (Chamisso) Hariot (Phaeophyta, Durvillaeales). *Rev Biol Mar Oceanogr* 37:83–112
- Connan S, Delisle F, Deslandes E, Gall EA (2006) Intra-thallus phlorotannin content and antioxidant activity in Phaeophyceae of temperate waters. *Bot Mar* 49:39–46
- Cornwall CE, Hepburn CD, Mcgraw CM, Currie KI, Pilditch CA, Hunter KA, Boyd PW, Hurd CL (2013) Diurnal fluctuations in seawater pH influence the response of a calcifying macroalga to ocean acidification. *Proc R Soc B Biol Sci* 280
- Corrigan S, Brown AR, Ashton IGC, Smale DA, Tyler CR (2022) Quantifying habitat provisioning at macroalgal cultivation sites. *Rev Aquac*
- Costanza R, D'Arge R, Groot R De, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V., Paruelo J, Raskin RG, Sutton P, Belt M Van Den (1997) The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387:253–260
- Costanza R, Mageau M (1999) What is a healthy ecosystem? In: *Aquatic Ecology*. Springer, p 105–115
- Custódio M, Villasante S, Calado R, Lillebø AI (2020) Valuation of Ecosystem Services to promote sustainable aquaculture practices. *Rev Aquac* 12:392–405
- D'Amours O, Archambault P, CW M (2008) Local enhancement of epibenthic macrofauna by aquaculture activities. *Mar Ecol Prog Ser* 371:73–84
- Dambacher JM, Gaughan DJ, Rochet M-J, Rossignol PA, Trenkel VM (2009) Qualitative modelling and indicators of exploited ecosystems. *Fish Fish* 10:305–322
- Dame RF, Prins TC (1997) Bivalve carrying capacity in coastal ecosystems. *Aquat Ecol* 31:409–421
- Delgadillo-Garzón O, Newmarck F (2008) Cultivo piloto de macroalgas rojas (Rhodophyta) en Bahía Portete, La guajira, Colombia. *Bol Investig Mar Costeras* 37:1–20
- Deniaud-Bouët E, Hardouin K, Potin P, Kloareg B, Hervé C (2017) A review about brown algal cell walls and fucose-containing sulfated polysaccharides: Cell wall context, biomedical properties and key research challenges. *Carbohydr Polym* 175:395–408
- Deniaud-Bouët E, Kervarec N, Michel G, Tonon T, Kloareg B, Hervé C (2014) Chemical and enzymatic fractionation of cell walls from Fucales: Insights into the structure of the extracellular matrix of brown



- algae. *Ann Bot* 114:1203–1216
- Díaz-Astudillo M, Cáceres MA, Landaeta MF (2017) Zooplankton structure and vertical migration: Using acoustics and biomass to compare stratified and mixed fjord systems. *Cont Shelf Res* 148:208–218
- Díaz C, Sobenes C (2022) Growth of *Crassostrea gigas* (Thunberg, 1793) cultivated in different cultivation devices deployed in sheltered and non-sheltered sites of central Chile. *Aquac Res* 53:2330–2342
- Díaz C, Sobenes C, Machino S (2019) Comparative growth of *Mytilus chilensis* (Hupé 1854) and *Mytilus galloprovincialis* (Lamarck 1819) in aquaculture longline system in Chile. *Aquaculture* 507:21–27
- Diehl S, Berger S, Ptacnik R, Wild A (2002) Phytoplankton, Light, and Nutrients in a Gradient of Mixing Depths: Field Experiments. *Ecology* 83:399
- Dixon J, Schroeter S, Kastendick J (1981) Effects of the encrusting bryozoan *Membranipora membranacea* on the loss of blades and fronds by the giant kelp *Macrocystis pyrifera* (Laminariales). *J Phycol* 17:341–345
- Doney SC, Ruckelshaus M, Emmett Duffy J, Barry JP, Chan F, English CA, Galindo HM, Grebmeier JM, Hollowed AB, Knowlton N, Polovina J, Rabalais NN, Sydeman WJ, Talley LD (2011) Climate Change Impacts on Marine Ecosystems. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-marine-041911-111611> 4:11–37
- Drach A, Tsukrov I, Decew J, Swift MR, Celikkol B, Hurtado CF (2013) Design and modeling of submersible fish cages with copper netting for open ocean aquaculture marine 2013. *Comput Methods Mar Eng V - Proc 5th Int Conf Comput Methods Mar Eng Mar 2013*:178–189
- Duarte WE, Asencio G, Moreno CA (1996) Long-term changes in population density of *Fissurella picta* and *Fissurella limbata* (Gastropoda) in the marine reserve of Mehuin, Chile. *Rev Chil Hist Nat* 69:45–56
- Duggan WP (1973) Growth and survival of the bay scallop, *Argopecten irradians*, at various locations of the water column. *Proc Natl Shellfish Assoc* 63:68–71
- Dumbauld BR, Ruesink JL, Rumrill SS (2009) The ecological role of bivalve shellfish aquaculture in the estuarine environment: A review with application to oyster and clam culture in West Coast (USA) estuaries. *Aquaculture* 290:196–223
- Dunn RJK, Waltham NJ, Teasdale PR, Robertson D, Welsh DT (2017) Short-term nitrogen and phosphorus release during the disturbance of surface sediments: A case study in an urbanised estuarine system (Gold Coast Broadwater, Australia). *J Mar Sci Eng* 5
- Edding ME, Fonck E, Orrego P, Venegas M, Macchiavello J (1993) A comparison between two populations of *Lessonia trabeculata* (Phaeophyta: Laminariales) microscopic stages. *Hydrobiologia* 260–261:231–237
- Farber S, Costanza R, Childers D, Erickson J, Gross K, Grove M, Hopkinson C, Kahn J, Pincett S, Troy A, Warren P, WILSON M (2006) Linking Ecology and Economics for Ecosystem Management. *Bioscience* 56:121–133
- Fariás L, Ubilla K, Aguirre C, Bedriñana L, Cienfuegos R, Delgado V, Fernández C, Fernández M, Gaxiola A, González H, Hucke-Gaete R, Marquet P, Montecino V, Morales C, Narváez D, Osses M, Peceño B, Quiroga E, Ramajo L, Sepúlveda H, Soto D, Vargas E, Viddi F, Valencia J (2020) Nueve medidas basadas en el océano para las Contribuciones Determinadas a nivel Nacional de Chile. Comité científico COP25, mesa Océanos. Santiago, Chile
- Fariña J, Aldana M, Ogalde F, Ojeda F (2000) Ecología trófica de *Girella laevifrons* (Pisces: Kyphosidae) en zonas intermareales rocosas del norte de Chile afectadas y no afectadas por contaminantes derivados de la minería del cobre. *Rev Chil Hist Nat* 73:139–149
- Feehan C, Scheibling RE, Lauzon-Guay JS (2012) Aggregative feeding behavior in sea urchins leads to destructive grazing in a Nova Scotian kelp bed. *Mar Ecol Prog Ser* 444:69–83
- Fernández PA, Gaitán-Espitia JD, Leal PP, Schmid M, Revill AT, Hurd CL (2020) Nitrogen sufficiency enhances thermal tolerance in habitat-forming kelp: implications for acclimation under thermal stress. *Sci Rep* 10:3186
- Fernández PA, Leal PP, Henríquez LA (2019) Co-culture in marine farms: Macroalgae may act as chemical refuge for shell-forming mollusks under an ocean acidification scenario. *Phycologia* 58:542–551



- Ferreira JG, Bricker SB (2016) Goods and services of extensive aquaculture: shellfish culture and nutrient trading. *Aquac Int*
- Ferriss BE, Reum JCP, McDonald PS, Farrell DM, Harvey CJ (2016) Evaluating trophic and non-trophic effects of shellfish aquaculture in a coastal estuarine foodweb. *ICES J Mar Sci* 73:429–440
- Figueroa FL, Jerez CG, Korbee N (2013) Use of in vivo chlorophyll fluorescence to estimate photosynthetic activity and biomass productivity in microalgae grown in different culture systems. *Lat Am J Aquat Res* 41:801–819
- Filbee-Dexter K, Scheibling RE (2014) Sea urchin barrens as alternative stable states of collapsed kelp ecosystems. *Mar Ecol Prog Ser* 495:1–25
- Finn JT (1976) Measures of ecosystem structure and function derived from analysis of flows. *J Theor Biol* 56:363–380
- Foley MM, Halpern BS, Micheli F, Armsby MH, Caldwell MR, Crain CM, Prahler E, Rohr N, Sivas D, Beck MW, Carr MH, Crowder LB, Emmett Duffy J, Hacker SD, McLeod KL, Palumbi SR, Peterson CH, Regan HM, Ruckelshaus MH, Sandifer PA, Steneck RS (2010) Guiding ecological principles for marine spatial planning. *Mar Policy* 34:955–966
- Førde H, Forbord S, Handå A, Fossberg J, Arff J, Johnsen G, Reitan KI (2016) Development of bryozoan fouling on cultivated kelp (*Saccharina latissima*) in Norway. *J Appl Phycol* 28:1225–1234
- Forget NL, Duplisea DE, Sardenne F, McKindsey CW (2020) Using qualitative network models to assess the influence of mussel culture on ecosystem dynamics. *Ecol Modell* 430:109070
- Fraser CI, Velásquez M, Nelson WA, Macaya EC, Hay CH (2020) The Biogeographic Importance of Buoyancy in Macroalgae: A Case Study of the Southern Bull-Kelp Genus *Durvillaea* (Phaeophyceae), Including Descriptions of Two New Species. *J Phycol* 56:23–36
- Freites L, Côté J, Himmelman JH, Lodeiros CJ (1999) Effects of wave action on the growth and survival of the scallops *Euvola ziczac* and *Lyropecten nodosus* in suspended culture. *J Exp Mar Bio Ecol* 239:47–59
- Froehlich HE, Afflerbach JC, Frazier M, Halpern BS (2019) Blue Growth Potential to Mitigate Climate Change through Seaweed Offsetting. *Curr Biol* 29:3087–3093.e3
- Gagnon M, Bergeron P (2017) Observations of the loading and motion of a submerged mussel longline at an open ocean site. *Aquac Eng* 78:114–129
- Gentry RR, Alleway HK, Bishop MJ, Gillies CL, Waters T, Jones R (2020) Exploring the potential for marine aquaculture to contribute to ecosystem services. *Rev Aquac* 12:499–512
- Gilby BL, Olds AD, Peterson CH, Connolly RM, Voss CM, Bishop MJ, Elliott M, Grabowski JH, Ortodossi NL, Schlacher TA (2018) Maximizing the benefits of oyster reef restoration for finfish and their fisheries. *Fish Fish* 19:931–947
- Gómez I, Huovinen P (2010) Induction of phlorotannins during UV exposure mitigates inhibition of photosynthesis and DNA damage in the kelp [*Lessonia nigrescens*]. *Photochem Photobiol* 86:1056–63
- Gonzalez-Poblete E, Hurtado F. CF, Rojo S. C, Norambuena C. R (2018) Blue mussel aquaculture in Chile: Small or large scale industry? *Aquaculture* 493:113–122
- Gordillo FJL, Figueroa FL, Niell FX (2003) Photon- and carbon-use efficiency in *Ulva rigida* at different CO<sub>2</sub> and N levels. *Planta* 218:315–322
- Gosling E (2015) *Marine bivalve mollusc*, Second edit. Wiley-Blackwell, Chchester, UK
- Graham MH (2004) Effects of local deforestation on the diversity and structure of southern California giant kelp forest food webs. *Ecosystems* 7:341–357
- Graham M, Vásquez J, Buschmann A (2007) Global Ecology of the Giant Kelp *Macrocystis*. :39–88
- Granek EF, Polasky S, Kappel C V., Reed DJ, Stoms DM, Koch EW, Kennedy CJ, Cramer LA, Hacker SD, Barbier EB, Aswani S, Ruckelshaus M, Perillo GME, Silliman BR, Muthiga N, Bael D, Wolanski E (2010) Ecosystem Services as a Common Language for Coastal Ecosystem-Based Management. *Conserv Biol*



24:207–216

- Groot R de, Brander L, Ploeg S van der, Costanza R, Bernard F, Braat L, Christie M, Crossman N, Ghermandi A, Hein L, Hussain S, Kumar P, McVittie A, Portela R, Rodriguez LC, Brink P ten, Beukering P van (2012) Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosyst Serv* 1:50–61
- Groot RS De, Wilson MA, Boumans RMJ (2002) A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecol Econ* 41:393–408
- Guerra D, Silva N (2004) 2.1 Distribución de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y nutrientes entre la boca del Guafo y el fiordo Aysén. Resultados crucero CIMAR 9 Fiordos. *Com Ocean Nac Valparaíso*:15–24
- Gutierrez A, Correa T, Muñoz V, Santibañez A, Marcos R, Cáceres C, Buschmann AH (2006) Farming of the Giant Kelp *Macrocystis Pyrifera* in Southern Chile for Development of Novel Food Products. *J Appl Phycol* 2006 183 18:259–267
- Gutiérrez JL, Jones CG, Strayer DL, Iribarne OO (2003) Mollusks as ecosystem engineers: The role of shell production in aquatic habitats. In: *Oikos*.p 79–90
- Hafting JT, Craigie JS, Stengel DB, Loureiro RR, Buschmann AH, Yarish C, Edwards MD, Critchley AT (2015) Prospects and challenges for industrial production of seaweed bioactives. *J Phycol* 51:821–837
- Halpern BS, Walbridge S, Selkoe KA, Kappel C V., Micheli F, D'Agrosa C, Bruno JF, Casey KS, Ebert C, Fox HE, Fujita R, Heinemann D, Lenihan HS, Madin EMP, Perry MT, Selig ER, Spalding M, Steneck R, Watson R (2008) A global map of human impact on marine ecosystems. *Science* (80- ) 319:948–952
- Harrison P, Hurd CL (2001) Nutrient physiology of seaweeds: application of concepts to aquaculture. *Cah Biol Mar* 42:71–82
- Hartstein ND, Rowden AA (2004) Effect of biodeposits from mussel culture on macroinvertebrate assemblages at sites of different hydrodynamic regime. *Mar Environ Res* 57:339–357
- Hasselström L, Visch W, Gröndahl F, Nylund GM, Pavia H (2018) The impact of seaweed cultivation on ecosystem services - a case study from the west coast of Sweden. *Mar Pollut Bull* 133:53–64
- Häussermann V, Försterra G (2009) Fauna marina bentónica de la Patagonia Chilena: guía de identificación ilustrada. *Nature in Focus*
- Heijs FML (1987) Qualitative and quantitative aspects of the epiphytic component in a mixed seagrass meadow from Papua New Guinea. *Aquat Bot* 27:363–383
- Henríquez-Antipa LA, Cárcamo F (2019) Stakeholder's multidimensional perceptions on policy implementation gaps regarding the current status of Chilean small-scale seaweed aquaculture. *Mar Policy* 103:138–147
- Héral M, Deslous-Paoli J-M (1991) Oyster culture in European countries. In: *Estuarine & Marine Bivalve mollusk culture*. Ed. Menzel.p 154–190
- Hermosillo-Núñez BB, Ortiz M, Rodríguez-Zaragoza FA (2018) Keystone species complexes in kelp forest ecosystems along the northern Chilean coast (SE Pacific): Improving multispecies management strategies. *Ecol Indic* 93:1101–1111
- Heymans JJ, Guénette S, Christensen V (2007) Evaluating network analysis indicators of ecosystem status in the Gulf of Alaska. *Ecosystems* 10:488–502
- Hilborn R, Walters CJ, Ludwig D (1995) Sustainable exploitatin of renewable resources. *Annu Rev Ecol Syst* 26:45–67
- Hoegh-Guldberg O, Bruno JF (2010) The impact of climate change on the world's marine ecosystems. *Science* (80- ) 328:1523–1528
- Hofmann GE, Smith JE, Johnson KS, Send U, Levin LA, Micheli F, Paytan A, Price NN, Peterson B, Takeshita Y, Matson PG, Crook E de, Kroeker KJ, Gambi MC, Rivest EB, Frieder CA, Yu PC, Martz TR (2011) High-frequency dynamics of ocean pH: A multi-ecosystem comparison. *PLoS One* 6
- Holmer M, Thorsen SW, Carlsson MS, Kjerulf PJ (2015) Pelagic and benthic nutrient regeneration processes



- in mussel cultures (*Mytilus edulis*) in a eutrophic coastal area (Skive Fjord, Denmark). *Estuaries and Coasts* 38:1629–1641
- Huovinen P, Leal P, Gmez I (2010) Interacting effects of copper, nitrogen and ultraviolet radiation on the physiology of three south Pacific kelps. *Mar Freshw Res* 61:330–341
- Hurd CL, Durante KM, Harrison PJ (2000) Influence of bryozoan colonization on the physiology of the kelp *Macrocystis integrifolia* (Laminariales, Phaeophyta) from nitrogen-rich and -poor sites in Barkley Sound, British Columbia, Canada. *Phycologia* 39:435–440
- Hyslop EJ (1980) Stomach contents analysis—a review of methods and their application. *J Fish Biol* 17:411–429
- IFOP (2019) Monitoreo Económico de la Industria Pesquera y Acuícola Nacional, 2018. Informe Final. Convenio de Desempeño 2018. IFOP+SUBECON y EMT.
- Inglis GJ, Gust N (2003) Potential indirect effects of shellfish culture on the reproductive success of benthic predators. *J Appl Ecol* 40:1077–1089
- Irigoyen AJ, Trobbiani G, Galván DE (2018) Peces de arrecife y ambientes de buceo argentinos.
- Jara F, Cespedes R (1994) An experimental evaluation of habitat enhancement on homogeneous marine bottoms in southern Chile. *Bull Mar Sci* 55:295–307
- Jiménez JC, González JG, Montejano G (2002) Taxonomía y distribución de *hildenbrandia nardo* (*hildenbrandiales*, *rhodophyta*) de agua dulce en la región central de México. *Hidrobiológica* 12:7–14
- Johnson CR, Frusherb SD, Ridgway KR, Castilla JC (2009) Overfishing Reduces Resilience of Kelp Beds to Climate-Driven Catastrophic Phase Shift. *Proc Natl Acad Sci U S A* 106:22341–22345
- Kanamori M, Goshima S, Mukai H (2004) Seasonal Variation in Host Utilization of Epiphytic *Lacuna* Species in Mixed Algal and Surfgrass Stands in Japan. *Mar Ecol* 25:51–69
- Keeley N, Forrest BM, Hopkins G, Gillespie P, Clement D, Webb S, Knight B, Gardner J (2009) Sustainable Aquaculture in New Zealand: Review of the Ecological Effects of Farming Shellfish and Other Non-fish Species.
- Keeley NB, Forrest BM, Macleod CK (2013) Novel observations of benthic enrichment in contrasting flow regimes with implications for marine farm monitoring and management. *Mar Pollut Bull* 66:105–116
- Kempton RA, Taylor LR (1976) Models and statistics for species diversity. *Nat* 1976 2625571 262:818–820
- Kennedy V, Subha T, Gomathi M (2018) Evaluation of in-Vitro Anti-Cancer and Antioxidant Activity of *Durvillaea Antarctica*. *World J Pharm Pharm Sci* 7:702–710
- Kingzett BC, Bourne N (1991) Overwintering growth of juvenile Japanese scallops *Patinopecten yessoensis* in pearl nets: Effects of density and wave exposure. *J Shellfish Res* 10:238
- Kluger LC, Taylor MH, Mendo J, Tam J, Wolff M (2016) Carrying capacity simulations as a tool for ecosystem-based management of a scallop aquaculture system. *Ecol Modell* 331:44–55
- Koivikko R, Loponen J, Honkanen T, Jormalainen V (2005) Contents of soluble, cell-wall-bound and exuded phlorotannins in the brown alga *Fucus vesiculosus*, with implications on their ecological functions. *J Chem Ecol* 31:195–212
- Kong I, Clarke M, Escribano R (1995) Alimentación de *Paralichthys adspersus* (Steindachner, 1867) en la zona norte de Chile. *Osteichthyes: Paralichthyidae*. *Rev Biol Mar* 30:29–44
- Krause-Jensen D, Duarte CM (2016) Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration. *Nat Geosci* 9:737–742
- Krause G, Billing SL, Dennis J, Grant J, Fanning L, Filgueira R, Miller M, Pérez Agúndez JA, Stybel N, Stead SM, Wawrzynski W (2020) Visualizing the social in aquaculture: How social dimension components illustrate the effects of aquaculture across geographic scales. *Mar Policy* 118:103985
- Krause G, Brugere C, Diedrich A, Ebeling MW, Ferse SCA, Mikkelsen E, Pérez Agúndez JA, Stead SM, Stybel N, Troell M (2015) A revolution without people? Closing the people–policy gap in aquaculture development. *Aquaculture* 447:44–55



- Krumhansl K (2012) Production and fate of kelp detritus. *Mar Ecol Prog Ser* 467:281–302
- Kuwaé T, Watanabe A, Yoshihara S, Suehiro F, Sugimura Y (2022) Implementation of blue carbon offset crediting for seagrass meadows, macroalgal beds, and macroalgae farming in Japan. *Mar Policy* 138:104996
- Lacoste É, Drouin A, Weise AM, Archambault P, McKindsey CW (2018) Low benthic impact of an offshore mussel farm in Îles-de-la-Madeleine, eastern Canada. *Aquac Environ Interact* 10:473–485
- Lacoste É, McKindsey CW, Archambault P (2020) Biodiversity–Ecosystem Functioning (BEF) approach to further understanding aquaculture–environment interactions with application to bivalve culture and benthic ecosystems. *Rev Aquac* 12:2027–2041
- Leal PP, Ojeda J, Sotomayor C, Buschmann AH (2020) Physiological stress modulates epiphyte (*Rhizoclonium* sp.)-basiphyte (*Agarophyton chilense*) interaction in co-culture under different light regimes. *J Appl Phycol* 32:3219–3232
- Lee CW, Lee GH, Choe MY, Song DH, Hosseini SA (2009) Dynamic behavior of a submersible fish cage. *Proc Int Conf Offshore Mech Arct Eng - OMAE* 4:201–206
- Lester SE, Costello C, Halpern BS, Gaines SD, White C, Barth JA (2013) Evaluating tradeoffs among ecosystem services to inform marine spatial planning. *Mar Policy* 38:80–89
- Levins R (1998) Qualitative mathematics for understanding, prediction and interventions in complex ecosystems. In: Rapport, D, et al. (eds) (ed) *Ecosystem Health*. Blackwell Publishing Ltd, p 178–204
- Liquete C, Piroddi C, Drakou EG, Gurney L, Katsanevakis S, Charef A, Egoh B (2013) Current Status and Future Prospects for the Assessment of Marine and Coastal Ecosystem Services: A Systematic Review. *PLoS One* 8:e67737
- Lodeiros CJM, Himmelman JH (1996) Influence of fouling on the growth and survival of the tropical scallop, *Euvola (Pecten) ziczac* (L. 1758) in suspended culture. *Aquac Res* 27:749–756
- Lodeiros C, Rodríguez-Pesantes D, Márquez A, Revilla J, Chávez-Villalba J, Sonnenholzner S (2018) Suspended cultivation of the Pacific oyster *Crassostrea gigas* in the Eastern Tropical Pacific. *Aquac Int* 26:337–347
- Lombard AT, Ban NC, Smith JL, Lester SE, Sink KJ, Wood SA, Jacob AL, Kyriazi Z, Tingey R, Sims HE (2019) Practical approaches and advances in spatial tools to achieve multi-objective marine spatial planning. *Front Mar Sci* 6:166
- Lopes GR, Gomes CHA de M, Tureck CR, Melo CMR de (2013) Growth of *Crassostrea gasar* cultured in marine and estuary environments in Brazilian waters. *Pesqui Agropecuária Bras* 48:975–982
- López J, Hurtado CF, Gómez A, Zamora V, Queirolo D, Gutiérrez A (2017) Stress analysis of a submersible longline culture system through dynamic simulation. *Lat Am J Aquat Res* 45:25–32
- Lorenzen S, Gallardo C, Jara C, Clasing E, Pequeño G, Moreno CA (1979) Mariscos y peces de importancia comercial en el sur de Chile . :131
- Macchiavello J, Araya E, Bulboa C (2010) Production of *Macrocystis pyrifera* (Laminariales; Phaeophyceae) in northern Chile on spore-based culture. *J Appl Phycol* 22:691–697
- Mageau MT, Costanza R, Ulanowicz RE (1998) Quantifying the trends expected in developing ecosystems. *Ecol Modell* 112:1–22
- Marzloff MP, Dambacher JM, Johnson CR, Little LR, Frusher SD (2011) Exploring alternative states in ecological systems with a qualitative analysis of community feedback. *Ecol Modell* 222:2651–2662
- Marzloff MP, Johnson CR, Little LR, Soulié JC, Ling SD, Frusher SD (2013) Sensitivity analysis and pattern-oriented validation of TRITON, a model with alternative community states: Insights on temperate rocky reefs dynamics. *Ecol Modell* 258:16–32
- Masaki T, Fujita D, Hagen NT (1984) The surface ultrastructure and epithallium shedding of crustose coralline algae in an “Isoyake” area of southwestern Hokkaido, Japan. *Hydrobiologia* 116–117:218–223
- Mascorda Cabre L, Hosegood P, Attrill MJ, Bridger D, Sheehan E V. (2021) Offshore longline mussel farms: a



- review of oceanographic and ecological interactions to inform future research needs, policy and management. *Rev Aquac* 13:1864–1887
- Matus L (1994) Ecología trófica de *Stichaster striatus* Muller y Troschel 1840 (Echinodermata: Asteroidea) en la Reserva Marina Mehuin, Tesis de Magister en Ciencias mención Ecología, Facultad de Ciencias, Universidad Austral de Chile
- McLeod K, Leslie H (2009) *Ecosystem-based management for the oceans*. Island Press
- McNeill SE, Page M, Falshaw R (2003) Field trials to optimise timing and frequency of pruning for cultivation of a New Zealand carrageenophyte, *Gigartina atropurpurea*. *J Appl Phycol* 15:391–405
- MEA (2005) *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Millennium Ecosystem Assessment. Island Press, Washington, DC.
- Medina M, Araya M, Vega C (2004) Alimentación y relaciones tróficas de peces costeros de la zona norte de Chile. *Investig Mar* 32:33–47
- Michaelis AK, Walton WC, Webster DW, Shaffer LJ (2020) The role of ecosystem services in the decision to grow oysters: A Maryland case study. *Aquaculture* 529:735633
- Michaelis AK, Walton WC, Webster DW, Shaffer LJ (2021) Cultural ecosystem services enabled through work with shellfish. *Mar Policy* 132:104689
- Miossec L, Deuff R-M Le, Gouletquer P (2009) Alien species alert: *Crassostrea gigas* (Pacific oyster). ICES Cooperative Research Report No. 299.
- Molinet C, Díaz M, Marín SL, Astorga MP, Ojeda M, Cares L, Asencio E (2017) Relation of mussel spatfall on natural and artificial substrates: Analysis of ecological implications ensuring long-term success and sustainability for mussel farming. *Aquaculture* 467:211–218
- Moller P, Sánchez P, Bariles J, Muñoz-Pedrerros A (2001) Cultivo de la ostra del pacífico *Crassostrea gigas* una opción productiva para pescadores artesanales en un humedal estuarino del sur de Chile. *Gestión Ambient* 7:65–78
- Mongin M, Baird ME, Hadley S, Lenton A (2016) Optimising reef-scale CO<sub>2</sub> removal by seaweed to buffer ocean acidification. *Environ Res Lett* 11:034023
- Moreira D, Pires JCM (2016) Atmospheric CO<sub>2</sub> capture by algae: Negative carbon dioxide emission path. *Bioresour Technol* 215:371–379
- Morris JP, Backeljau T, Chapelle G (2019) Shells from aquaculture: a valuable biomaterial, not a nuisance waste product. *Rev Aquac* 11:42–57
- Morse ANC, Morse DE (1984) Recruitment and metamorphosis of *Haliotis* larvae induced by molecules uniquely available at the surfaces of crustose red algae. *J Exp Mar Bio Ecol* 75:191–215
- Munita C (1989) Ostra del pacífico: una realidad que partió en Tongoy. *Rev Aquanoticias Int Fund Chile* 1:26–31
- Muñoz AA, Ojeda FP (1998) Guild structure of carnivorous intertidal fishes of the Chilean coast: Implications of ontogenetic dietary shifts. *Oecologia* 114:563–573
- Navarro JM, Villanueva P, Rocha N, Torres R, Chaparro OR, Benítez S, Andrade-Villagrán P V., Alarcón E, Benítez S, Andrade-Villagrán P V., Alarcón E (2020) Plastic response of the oyster *Ostrea chilensis* to temperature and pCO<sub>2</sub> within the present natural range of variability. *PLoS One* 15:e0234994
- Naylor RL, Goldberg RJ, Primavera JH, Kautsky N, Beveridge MCM, Clay J, Folke C, Lubchenco J, Mooney H, Troell M (2000) Effect of aquaculture on world fish supplies. *Nature* 405:1017–1024
- Neori A, Chopin T, Troell M, Buschmann AH, Kraemer GP, Halling C, Shpigel M, Yarish C (2004) Integrated aquaculture: Rationale, evolution and state of the art emphasizing seaweed biofiltration in modern mariculture. *Aquaculture* 231:361–391
- Neori A, Troell M, Chopin T, Yarish C, Critchley A, Buschmann AH (2007) The need for a balanced ecosystem approach to blue aquaculture. *Environment* 49:36–43
- Newell RIE (2004) Ecosystem influences of natural and cultivated populations of suspension-feeding bivalve



- molluscs: A review. *J Shellfish Res* 23:51–61
- Nicola GG, Almodóvar A, Elvira B (2010) Effects of environmental factors and predation on benthic communities in headwater streams. *Aquat Sci* 72:419–429
- Nielsen P, Cranford PJ, Maar M, Petersen JK (2016) Magnitude, spatial scale and optimization of ecosystem services from a nutrient extraction mussel farm in the eutrophic Skive Fjord, Denmark. *Aquac Environ Interact* 8:311–329
- Norling P, Kautsky N (2008) Patches of the mussel *Mytilus* sp. are islands of high biodiversity in subtidal sediment habitats in the Baltic sea. *Aquat Biol* 4:75–87
- Norrie C, Dunphy B, Roughan M, Weppe S, Lundquist C (2020) Spill-over from aquaculture may provide a larval subsidy for the restoration of mussel reefs. *Aquac Environ Interact* 12:231–249
- Odum W (1970) Insidious Alteration of the Estuarine Environment. *Trans Am Fish Soc* 99:836–847
- Orrego H, Mendo J (2015) Hábitos alimenticios del jurel *trachurus murphyi* (nichols) en la zona nor-central del mar peruano. *Ecol Apl* 14:103
- Ortiz M (2008) Mass balanced and dynamic simulations of trophic models of kelp ecosystems near the Mejillones Peninsula of northern Chile (SE Pacific): Comparative network structure and assessment of harvest strategies. *Ecol Modell* 216:31–46
- Ortiz M (2018) Robustness of macroscopic-systemic network indices after disturbances on diet-community matrices. *Ecol Indic*
- Ortiz M, Levins R, Campos L, Berrios F, Campos F, Jordán F, Hermosillo B, Gonzalez J, Rodriguez F (2013) Identifying keystone trophic groups in benthic ecosystems: Implications for fisheries management. *Ecol Indic* 25:133–140
- Ortiz M, Uribe RA (2021) Comparing the stability of successional transient models in kelp forests and barrens (south-east Pacific): Implications for conservation monitoring. *Aquat Conserv Mar Freshw Ecosyst* 31:1297–1310
- Osoorio V (1990) El cultivo de moluscos en Ecuador. Cultivo de moluscos en America latina. Memorias segunda Reunión grupo de trabajo técnico. Ancud, Isla Chiloé, Chile, noviembre 7-11.
- Outeiro L, Häussermann V, Viddi F, Hucke-Gaete R, Försterra G, Oyarzo H, Kosiel K, Villasante S (2015) Using ecosystem services mapping for marine spatial planning in southern Chile under scenario assessment. *Ecosyst Serv* 16:341–353
- Outeiro L, Villasante S (2013) Linking salmon aquaculture synergies and trade-offs on ecosystem services to human wellbeing constituents. *Ambio* 42:1022–1036
- Parker M, Bricker S (2020) Sustainable Oyster Aquaculture, Water Quality Improvement, and Ecosystem Service Value Potential in Maryland Chesapeake Bay. *J Shellfish Res* 39:269–281
- Pauly D, Christensen V, Walters C (2000) Ecopath, Ecosim, and Ecospace as tools for evaluating ecosystem impact of fisheries. *ICES J Mar Sci* 57:697–706
- Pearson TH, Rosenberg R (1978) Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment. *Oceanogr Mar Biol An Annu Rev* 16:229–311
- Pérez-Matus A, Pledger S, Díaz FJ, Ferry LA, Vásquez JA (2012) Plasticity in feeding selectivity and trophic structure of kelp forest associated fishes from northern Chile. *Rev Chil Hist Nat* 85:29–48
- Pérez E (2021) Análisis Económico – Productivo De Cultivos Mono Y Bi específicos Desarrollados En El Marco De La Etapa 4 Del Programa De Acuicultura De Pequeña Escala. Informe Final Consultoría IFOP. Viña del Mar, Chile
- Perez EP, Azocar C, Araya A, Astudillo O, Ramos M (2012) Comparacion del crecimiento de *Argopecten purpuratus* entre cohortes obtenidas de captacion de larvas en ambiente natural y de hatchery. *Lat Am J Aquat Res* 40:1026–1038
- Perreault MC, Borgeaud IA, Gaymer CF (2014) Impact of grazing by the sea urchin *Tetrapygus niger* on the kelp *Lessonia trabeculata* in Northern Chile. *J Exp Mar Bio Ecol* 453:22–27



- Peteiro C, Freire Ó (2013) Biomass yield and morphological features of the seaweed *Saccharina latissima* cultivated at two different sites in a coastal bay in the Atlantic coast of Spain. *J Appl Phycol* 25:205–213
- Peterson MS (2010) A Conceptual View of Environment-Habitat-Production Linkages in Tidal River Estuaries. <https://doi.org/10.1080/10641260390255844> 11:291–313
- Petraitis PS, Dudgeon SR (2004) Detection of alternative stable states in marine communities. *J Exp Mar Bio Ecol* 300:343–371
- Piazzì L, Ceccherelli G (2019) Effect of sea urchin human harvest in promoting canopy forming algae restoration. *Estuar Coast Shelf Sci* 219:273–277
- Plew DR, Stevens CL, Spigel RH, Hartstein ND (2005) Hydrodynamic implications of large offshore mussel farms. *IEEE J Ocean Eng* 30:95–108
- Potvin C, Roff DA (1993) Distribution-free and robust statistical methods: viable alternatives to parametric statistics. *Ecology* 74:1617–1628
- Prado P, Alcoverro T, Romero J (2010) Influence of nutrients in the feeding ecology of seagrass (*Posidonia oceanica* L.) consumers: a stable isotopes approach. *Mar Biol* 157:715–724
- Puccia CJ, Levins R (1991) Qualitative Modeling in Ecology: Loop Analysis, Signed Digraphs, and Time Averaging.
- Quinn GP, Keough MJ (2002) *Experimental Design and Data Analysis for Biologists*. Exp Des Data Anal Biol
- Radulovich R, Neori A, Valderrama D, Reddy CRK, Cronin H, Forster J (2015) Farming of seaweeds.
- Raman-Nair W, Colbourne B, Gagnon M, Bergeron P (2008) Numerical model of a mussel longline system: Coupled dynamics. *Ocean Eng* 35:1372–1380
- Rebours C, Marinho-Soriano E, Zertuche-González JA, Hayashi L, Vásquez JA, Kradofer P, Soriano G, Ugarte R, Abreu MH, Bay-Larsen I, Hovelsrud G, Rødven R, Robledo D (2014) Seaweeds: An opportunity for wealth and sustainable livelihood for coastal communities. *J Appl Phycol* 26:1939–1951
- Reusch TBH, Chapman ARO, Groger JP (1994) Blue mussels *Mytilus edulis* do not interfere with eelgrass *Zostera marina* but fertilize shoot growth through biodeposition. *Mar Ecol Prog Ser* 108:265–282
- Reyes J, Afonso-Carrillo J (1995) Morphology and distribution of nongeniculate coralline algae (Corallinales, Rhodophyta) on the leaves of the seagrass *Cymodocea nodosa* (Cymodoceaceae). *Phycologia* 34:179–190
- Riisgård HU, Larsen PS (2001) Minireview: Ciliary filter feeding and bio-fluid mechanics-present understanding and unsolved problems. *Limnol Oceanogr* 46:882–891
- Riisgård HU, Lundgreen K, Larsen PS (2012) Field data and growth model for mussels *Mytilus edulis* in Danish waters. *Mar Biol Res* 8:683–700
- Rodríguez S (2000) Transferencia de recursos alimentarios entre diferentes ambientes del ecosistema marino. *Rev Chil Hist Nat* 73:199–207
- Ross LG, Martínez Palacios CA, Morales EJ (2008) Developing native fish species for aquaculture: The interacting demands of biodiversity, sustainable aquaculture and livelihoods. *Aquac Res* 39:675–683
- Ruiz JF, Ibáñez CM, Cáceres CW (2007) Morfometría del tubo digestivo y alimentación del pepino de mar *Athyonidium chilensis* (Semper, 1868) (Echinodermata: Holothuroidea). *Rev Biol Mar Oceanogr* 42:269–274
- Rullens V, Lohrer AM, Townsend M, Pilditch CA (2019) Ecological mechanisms underpinning ecosystem service bundles in marine environments - A case study for shellfish. *Front Mar Sci* 6
- Ruz CS, Muth AF, Tala F, Pérez-Matus A (2018) The herbivorous fish, *Aplodactylus punctatus*, as a potential facilitator of dispersal of kelp, *Lessonia trabeculata*, in Chile. *J Exp Mar Bio Ecol* 500:112–119
- Santos SAO, Félix R, Pais ACS, Rocha SM, Silvestre AJD (2019) The quest for phenolic compounds from macroalgae: A review of extraction and identification methodologies. *Biomolecules* 9:847
- Sanz-Lazaro C, Sanchez-Jerez P (2020) Regional Integrated Multi-Trophic Aquaculture (RIMTA): Spatially separated, ecologically linked. *J Environ Manage* 271:110921



- Sapag N, Sapag R (2008) Preparación y evaluación de proyectos, 5 ta. McGraw Hill Interamericana, Bogotá, Colombia
- Sardenne F, Forget N, McKindsey CW (2019) Contribution of mussel fall-off from aquaculture to wild lobster *Homarus americanus* diets. *Mar Environ Res* 149:126–136
- Schatte Olivier A van der, Jones L, Vay L Le, Christie M, Wilson J, Malham SK (2020) A global review of the ecosystem services provided by bivalve aquaculture. *Rev Aquac* 12:3–25
- Schreiber U, Bilger W, Neubauer C (1995) Chlorophyll fluorescence as a noninvasive indicator for rapid assessment of in vivo photosynthesis. In: Schulze ED, Caldwell MM (eds) *Ecophysiology of Photosynthesis*. Springer Study Edition, vol 100, Berlin, Heidelberg, p 49–70
- Seguin-Heine MO, Lachance AA, Genard B, Myrand B, Pellerin C, Marcotte I, Tremblay R (2014) Impact of open sea habitat on byssus attachment of suspension-cultured blue mussels (*Mytilus edulis*). *Aquaculture* 426–427:189–196
- Sepúlveda RD, Moreno RA, Carrasco FD (2003) Diversidad De Macroinvertebrados Asociados a Arrecifes De *Phragmatopoma Moerchi* Kinberg, 1867 (Polychaeta: Sabellariidae) En El Intermareal Rocoso De Cochohgüe, Chile. *Gayana (Concepción)* 67
- Sepúlveda C, Rivera A, Gelcich S, Stotz WB (2019) Exploring determinants for the implementation of mixed TURF-aquaculture systems. *Sci Total Environ* 682:310–317
- Shears NT, Babcock RC (2003) Continuing trophic cascade effects after 25 years of no-take marine reserve protection. *Mar Ecol Prog Ser* 246:1–16
- Short RE, Gelcich S, Little DC, Micheli F, Allison EH, Basurto X, Belton B, Brugere C, Bush SR, Cao L, Crona B, Cohen PJ, Defeo O, Edwards P, Ferguson CE, Franz N, Golden CD, Halpern BS, Hazen L, Hicks C, Johnson D, Kaminski AM, Mangubhai S, Naylor RL, Reantaso M, Sumaila UR, Thilsted SH, Tigchelaar M, Wabnitz CCC, Zhang W (2021) Harnessing the diversity of small-scale actors is key to the future of aquatic food systems. *Nat Food* 2021 29 2:733–741
- Sievers M, Dempster T, Keough MJ, Fitridge I (2019) Methods to prevent and treat biofouling in shellfish aquaculture. *Aquaculture* 505:263–270
- Sievers HA, Silva N (2006) Masas de agua y circulación en los canales y fiordos australes. *Cona*:53–58
- Smaal AC, Ferreira JG, Grant J, Petersen JK, Strand Ø (2018) Goods and services of marine bivalves.
- Smith JT (1970) Taxonomy, distribution, and phylogeny of the Cymatiid Gastropods *Argobuccinum*, *Fusitriton*, *Mediargo*, and *Priene*. *Bull Am Paleontol* 56:445–573
- Smith JL, Summers G, Wong R (2010) Nutrient and heavy metal content of edible seaweeds in New Zealand. *New Zeal J Crop Horti Sci* 38:19–28
- Sondak CFA, Ang PO, Beardall J, Bellgrove A, Boo SM, Gerung GS, Hepburn CD, Hong DD, Hu Z, Kawai H, Largo D, Lee JA, Lim PE, Mayakun J, Nelson WA, Oak JH, Phang SM, Sahoo D, Peerapornpis Y, Yang Y, Chung IK (2017) Carbon dioxide mitigation potential of seaweed aquaculture beds (SABs). *J Appl Phycol* 29:2363–2373
- Stevens CL, Plew DR, Smith MJ, Fredriksson DW (2007) Hydrodynamic Forcing of Long-Line Mussel Farms: Observations. *J Waterw Port, Coastal, Ocean Eng* 133:192–199
- Stotz WB, Aburto J, Caillaux LM, González SA (2016) Vertical distribution of rocky subtidal assemblages along the exposed coast of north-central Chile. *J Sea Res* 107:34–47
- Stotz WB, Amesti P De, Martinez DJ, Perez E (1991) Lugares de asentamiento y desarrollo de juveniles tempranos de *Concholepas concholepas* (Brugiere, 1789) en ambientes inter y submareales de la IV región, Coquimbo, Chile. *Rev Biol Mar, Valparaiso* 26:339–350
- SUBPESCA (2020) Resolución Exenta N° 1821-2020, Establece Metodología para el Levantamiento de Información, Procesamiento y Cálculos del Estudio de Ingeniería, y Especificaciones Técnicas de las Estructuras de Cultivo a la que se Refiere el Artículo 4° Letra E) del D.S. . Ministerio de Economía, Fomento y Turismo, Subsecretaría de Pesca y Acuicultura, Chile



- SUBPESCA (2022) Reglamento de Acuicultura de Pequeña Escala. Ministerio de Economía, Fomento y Turismo, Subsecretaría de Pesca y Acuicultura, Chile.  
<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1173027>
- Suding KN, Gross KL, Houseman GR (2004) Alternative states and positive feedbacks in restoration ecology. *Trends Ecol Evol* 19:46–53
- Summerson H, Peterson C (1984) Role of predation in organizing benthic communities of a temperate-zone seagrass bed. *Mar Ecol Prog Ser* 15:63–77
- Suplicy FM (2020) A review of the multiple benefits of mussel farming.
- Tallis H, Levin PS, Ruckelshaus M, Lester SE, McLeod KL, Fluharty DL, Halpern BS (2010) The many faces of ecosystem-based management: Making the process work today in real places. *Mar Policy* 34:340–348
- Tang Q, Zhang J, Fang J (2011) Shellfish and seaweed mariculture increase atmospheric CO<sub>2</sub> absorption by coastal ecosystems. *Mar Ecol Prog Ser* 424:97–104
- Targett NM, Arnold TM (1998) Predicting the effects of brown algal phlorotannins on marine herbivores in tropical and temperate oceans. *J Phycol* 34:195–205
- Taylor D, Saurel C, Nielsen P, Petersen JK (2019) Production Characteristics and Optimization of Mitigation Mussel Culture. *Front Mar Sci* 6:698
- Taylor MH, Wolff M, Vadas F, Yamashiro C (2008) Trophic and environmental drivers of the sechura bay ecosystem (Peru) over an ENSO cycle. *Helgol Mar Res* 62:15–32
- Theuerkauf SJ, Barrett LT, Alleway HK, Costa-Pierce BA, Gelais A St., Jones RC (2022) Habitat value of bivalve shellfish and seaweed aquaculture for fish and invertebrates: Pathways, synthesis and next steps. *Rev Aquac* 14:54–72
- Troell M, Naylor RL, Metian M, Beveridge M, Tyedmers PH, Folke C, Arrow KJ, Barrett S, Crépin AS, Ehrlich PR, Gren Å, Kautsky N, Levin SA, Nyborg K, Österblom H, Polasky S, Scheffer M, Walker BH, Xepapadeas T, Zeeuw A De (2014) Does aquaculture add resilience to the global food system? *Proc Natl Acad Sci U S A* 111:13257–13263
- UCSC (2015) Estudio de emplazamiento de áreas de acuicultura de pequeña escala en la zona sur (VI a XIV regiones). Universidad Católica de la Santísima Concepción. Informe Final FIPA.
- Ulanowicz RE (1986) Growth & Development: Ecosystems Phenomenology.
- Ulanowicz RE (1997) Ecology, the ascendent perspective.
- Ulanowicz RE (2004) Quantitative methods for ecological network analysis. *Comput Biol Chem* 28:321–339
- Uribe RA, Ortiz M, Macaya EC, Pacheco AS (2015) Successional patterns of hard-bottom macrobenthic communities at kelp bed (*Lessonia trabeculata*) and barren ground sublittoral systems. *J Exp Mar Bio Ecol* 472:180–188
- Uribe RA, Rubio J, Carbajal P, Berrú P (2013) Invertebrados Marinos Bentónicos Del Litoral De La Región Áncash, Perú. *Boletín Inst del Mar del Perú* 28:1–159
- Vásquez J, Buschmann AH (1997) Herbivore-kelp interactions in Chilean subtidal communities: a review. *Rev Chil Hist Nat* 70:41–52
- Vásquez JA, Vega JM (2005) Macroinvertebrados asociados a discos de adhesión de algas pardas: biodiversidad de comunidades discretas como indicadora de perturbaciones locales y de gran escala. *Biodivers Mar Valoración, uso y Perspect ¿Hacia donde va Chile?* 429–450
- Vásquez JA, Vega JMA, Buschmann AH (2006) Long term variability in the structure of kelp communities in northern Chile and the 1997-98 ENSO. *J Appl Phycol* 18:505–519
- Vásquez J, Zuñiga S, Tala F, Piaget N, Rodríguez D, Vega JM (2008) Bases ecológicas y evaluación de usos alternativos para el manejo de preaderas de algas pardas de la III y IV regiones. Universidad Católica del Norte. Informe final proyecto FIP N° 2005-22. 283 pp.
- Vásquez JA, Zuñiga S, Tala F, Piaget N, Rodríguez DC, Vega JMA (2014) Economic valuation of kelp forests in northern Chile: values of goods and services of the ecosystem. *J Appl Phycol* 26:1081–1088



- Venier C, Menegon S, Possingham HP, Gissi E, Zanella A, Depellegrin D, Sarretta A, Barbanti A, McGowan J (2021) Multi-objective zoning for aquaculture and biodiversity. *Sci Total Environ* 785:146997
- Villegas MJ, Laudien J, Sielfeld W, Arntz WE (2008) *Macrocystis integrifolia* and *Lessonia trabeculata* (Laminariales; Phaeophyceae) kelp habitat structures and associated macrobenthic community off northern Chile. *Helgol Mar Res* 62:33–43
- Wang T, Jónsdóttir R, Ólafsdóttir G (2009) Total phenolic compounds, radical scavenging and metal chelation of extracts from Icelandic seaweeds. *Food Chem* 116:240–248
- Weitzman J (2019) Applying the ecosystem services concept to aquaculture: A review of approaches, definitions, and uses. *Ecosyst Serv* 35:194–206
- Weitzman J, Figueira R (2020) The evolution and application of carrying capacity in aquaculture: towards a research agenda. *Rev Aquac* 12:1297–1322
- Weitzman J, Figueira R, Grant J (2021) Development of best practices for more holistic assessments of carrying capacity of aquaculture. *J Environ Manage* 287:112278
- Westermeier R, Murúa P, Patiño DJ, Müller DG (2017) Population biology and long-term mariculture studies in the brown alga *Lessonia trabeculata* in Atacama, Chile. *J Appl Phycol* 29:2267–2275
- Westermeier R, Murúa P, Patiño DJ, Muñoz L, Atero C, Müller DG (2014) Repopulation techniques for *Macrocystis integrifolia* (Phaeophyceae: Laminariales) in Atacama, Chile. *J Appl Phycol*
- Westermeier R, Rivera P, Gomez I (1991) Cultivo de *Gracilaria chilensis* Bird, McLachlan y Oliveira, en la zona intermareal y submareal del Estuario Carquilda, Maullín, Chile. *Rev Chil Hist Nat* 64:307–321
- Wikström SA, Pavia H (2004) Chemical settlement inhibition versus post-settlement mortality as an explanation for differential fouling of two congeneric seaweeds. *Oecologia* 138:223–230
- Wildish D, Wilson A, Young-Lai W, Decoste AM, Aiken DE, Martin J (1988) Biological and economic feasibility of four grow-out methods for the culture of giant scallops in the Bay of Fundy.
- Williams JD, McDermott JJ (2004) Hermit crab biocoenoses: A worldwide review of the diversity and natural history of hermit crab associates. *J Exp Mar Bio Ecol* 305:1–128
- Willot PA, Aubin J, Salles JM, Wilfart A (2019) Ecosystem service framework and typology for an ecosystem approach to aquaculture. *Aquaculture* 512:734260
- Wit CT De (1960) On Competition. *Versl. Landbouwk. Onderz.* 66
- Wolff M, Soto M (1992) Population dynamics of *Cancer polyodon* in La Herradura Bay, northern Chile. *Mar Ecol Prog Ser* 85:69–81
- Wong KLC, O'Shea S (2011) The effects of a mussel farm on benthic macrofaunal communities in Hauraki Gulf, New Zealand. *New Zeal J Mar Freshw Res* 45:187–212
- Worm B, Barbier EB, Beaumont N, Duffy JE, Folke C, Halpern BS, Jackson JBC, Lotze HK, Micheli F, Palumbi SR, Sala E, Selkoe KA, Stachowicz JJ, Watson R (2006) Impacts of biodiversity loss on ocean ecosystem services. *Science* (80- ) 314:787–790
- Wu J, Zhang H, Pan Y, Krause-Jensen D, He Z, Fan W, Xiao X, Chung I, Marbà N, Serrano O, Rivkin RB, Zheng Y, Gu J, Zhang X, Zhang Z, Zhao P, Qiu W, Chen G, Duarte CM (2020) Opportunities for blue carbon strategies in China. *Ocean Coast Manag* 194:105241
- Xiao X, Agusti S, Lin F, Li K, Pan Y, Yu Y, Zheng Y, Wu J, Duarte CM (2017) Nutrient removal from Chinese coastal waters by large-scale seaweed aquaculture. *Sci Rep* 7:1–6
- Xiao X, Agustí S, Yu Y, Huang Y, Chen W, Hu J, Li C, Li K, Wei F, Lu Y, Xu C, Chen Z, Liu S, Zeng J, Wu J, Duarte CM (2021) Seaweed farms provide refugia from ocean acidification. *Sci Total Environ* 776:145192
- Yang Y, Zhao X, Li J, Jiang H, Shan X, Wang Y, Ma W, Hao J, Yu G (2018) A  $\beta$ -glucan from *Durvillaea antarctica* has immunomodulatory effects on RAW264.7 macrophages via toll-like receptor 4. *Carbohydr Polym* 191:255–265
- Yong YS, Yong WTL, Anton A (2013) Analysis of formulae for determination of seaweed growth rate. *J Appl*



Phycol 25:1831–1834

- Ysebaert T, Hart M, Herman PMJ (2009) Impacts of bottom and suspended cultures of mussels *Mytilus* spp. on the surrounding sedimentary environment and macrobenthic biodiversity. *Helgol Mar Res* 63:59–74
- Zhan J, Lu J, Wang D (2022) Review of shell waste reutilization to promote sustainable shellfish aquaculture. *Rev Aquac* 14:477–488
- Zhang G, Luan J, Zhang B, Liang J (2015) Analysis on wind resistance ability of deepwater long-line rope aquaculture facility by finite element method. *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions Chinese Soc Agric Eng* 31:197–203
- Zhao YP, Yang H, Bi CW, Chen QP, Dong GH, Cui Y (2019) Hydrodynamic responses of longline aquaculture facility with lantern nets in waves. *Aquac Eng* 86
- Zuniga-Jara S, Marín-Riffo MC, Bulboa-Contador C (2016) Bioeconomic analysis of giant kelp *Macrocystis pyrifera* cultivation (Laminariales; Phaeophyceae) in northern Chile. *J Appl Phycol* 28:405–416
- Zúñiga H (1988) Comparación morfológica y dietaria de *Paralichthys adspersus* (Steindachner, 1867) y *Paralichthys microps* (Gunther, 1881) en Bahía de Coquimbo. Tesis de Biología Marina, Universidad Católica del Norte, Coquimbo, 144 pp

# **A N E X O S**

---



---

**INSTITUTO DE FOMENTO PESQUERO**

Sección Ediciones y Producción  
Almte. Manuel Blanco Encalada 839,  
Fono 56-32-2151500  
Valparaíso, Chile  
[www.ifop.cl](http://www.ifop.cl)



[www.ifop.cl](http://www.ifop.cl)