



EVALUACIÓN DE LA FACTIBILIDAD DE UN
PILOTO DE REVEGETACIÓN DE *LESSONIA*
TRABECULATA PARA RESTAURAR ZONAS
COSTERAS EROSIONADAS DE LA REGIÓN DE
COQUIMBO

MYRIAM CAMILA ELMES MUÑOZ

PROFESOR(ES) GUÍA: MARÍA ESTRELLA ALCAMÁN

PROYECTO DE GRADO PRESENTADO A LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA
UNIVERSIDAD DEL DESARROLLO PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE
MAGÍSTER EN GESTIÓN DE SUSTENTABILIDAD
MAGISTER EN GESTIÓN DE LA SUSTENTABILIDAD

SANTIAGO – CHILE
2025



EVALUACIÓN DE LA FACTIBILIDAD DE UN PILOTO DE REVEGETACIÓN DE *LESSONIA TRABECULATA* PARA RESTAURAR ZONAS COSTERAS EROSIONADAS DE LA REGIÓN DE COQUIMBO

POR: MYRIAM CAMILA ELMES MUÑOZ

Proyecto de Grado presentado a la Comisión integrada por los profesores:

PROFESORES GUIA: MARÍA ESTRELLA ALCAMÁN

PROFESOR INTEGRANTE 1: Gabriel Candia Agusti

PROFESOR INTEGRANTE 2: (Académico)

PROFESOR INTEGRANTE 3: (Empresa)

Para completar las exigencias del Grado de Magister en Gestión de la Sustentabilidad

Diciembre, 2025

Santiago, Chile

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Por medio de la presente, declaro que el trabajo titulado: **TITULO DE TESIS DE MAGISTER**, que presento a la Universidad del Desarrollo de Chile, es de mi autoría y no ha sido publicado previamente, ni está siendo considerado para publicación bajo otra filiación. En igual sentido, declaro que el trabajo de tesis y su contenido, son originales y que todos los datos y referencias a trabajos ya publicados con anterioridad han sido debidamente identificados, referenciados o citados en el documento, y que estas citas han sido incluidas en las referencias bibliográficas. Afirmo, asimismo, que los materiales presentados no se encuentran protegidos por derechos de autor; y en caso de que así lo estuvieran, me hago responsable de cualquier litigio o reclamo relacionado con la violación de derechos de propiedad intelectual, exonerando de toda responsabilidad a la Universidad del Desarrollo de Chile.

Finalmente, me comprometo a no someter este trabajo (o parte de este), a consideración en ninguna revista o congreso para publicación sin contar con la aprobación y haber pasado el debido proceso de revisión en Universidad del Desarrollo. En caso de que un artículo sea aprobado para su publicación, autorizo a la Universidad del Desarrollo a incluir dicho artículo en sus revistas, y a reproducirlo, editarlo, distribuirlo, exhibirlo y comunicarlo en el país y en el extranjero, por medios impresos, electrónicos, Internet o cualquier otro medio, para propósitos científicos y sin fines de lucro.

MYRIAM CAMILA ELMES MUÑOZ

Firma

*Dedicado a Dios por permitirme cursar este Magíster;
A mi hijito Pedro, por su paciencia y comprensión, y
a mis padres por ser mi mayor apoyo*

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad del Desarrollo por todos los conocimientos adquiridos, incluyendo María Estrella Alcamán, mi guía que comprendía todo tan rápido y con ideas tan certeras y precisas, a Alex Godoy y Diego Rivera por ayudarme y ayudarnos al curso a egresar y todo lo aportado también durante el Magíster.

A mis colegas y amigos por su comprensión, hubo mucho tiempo que me ausenté, dejando mi lado social un poco al debe.

A mis padres por ser mi red de apoyo y guía en momentos tensos y difíciles, por ayudarme a cuidar de Pedro cuando yo necesitaba estudiar y avanzar.

Y al lugar donde trabajo por darme la oportunidad de ganarme la beca para poder cursar este Magíster.

EVALUACIÓN DE LA FACTIBILIDAD DE UN PILOTO DE REVEGETACIÓN DE *LESSONIA TRABECULATA* PARA RESTAURAR ZONAS COSTERAS EROSIONADAS DE LA REGIÓN DE COQUIMBO

Myriam Camila Elmes Muñoz

Bajo la supervisión del Profesor María Estrella Alcamán

Este trabajo presenta un piloto de revegetación, utilizando el alga Huiro Palo o *Lessonia trabeculata* para zonas costeras que han sufrido erosión producto de diversas causas, incluyendo el cambio climático y antrópicas. Esta solución basada en la naturaleza, ha demostrado una importante infraestructura natural, destacando un potencial relevante para la mitigación de la erosión como también en la protección de las costas. Por su parte las macroalgas en Chile poseen relevancia social, ecológica y económica. Es un componente clave de los ecosistemas marinos proporcionando hábitat, soporte, captura de carbono azul, además de sustentar una importante actividad extractiva. En la Región de Coquimbo, la explotación del Huiro Palo alcanza volúmenes significativos, siendo una fuente de sustento para miles de personas, lo que se aproxima a un estado de sobre explotación. En este contexto, este piloto de revegetación nace como una iniciativa aplicable y escalable, para hacer frente a esta inminente sobre explotación, identificando ventajas y desventajas. Se observa que un piloto de estas características es factible desde una mirada técnica ambiental y regulatoria.

Palabras clave: *Lessonia trabeculata*, recuperación marina, carbono azul.

HIGHLIGHTS

EVALUACIÓN DE LA FACTIBILIDAD DE UN PILOTO DE REVEGETACIÓN DE *LESSONIA TRABECULATA* PARA RESTAURAR ZONAS COSTERAS EROSIONADAS DE LA REGIÓN DE COQUIMBO

Myriam Camila Elmes Muñoz

- **Objetivo:** Evaluar factibilidad de diseño de un piloto de revegetación mediante el cultivo de la macroalga *Lessonia trabeculata* como estrategia de recuperación en áreas costeras erosionadas de la Región de Coquimbo.
- **Metodología:** Búsqueda bibliográfica con un enfoque cuantitativo para la caracterización del entorno y la estimación de captura de carbono, asociado al alga *Lessonia trabeculata*, además, de una investigación de estudios y documentos científicos, orientada a establecer soluciones sustentables y prácticas.
- **Principal resultado:** Se obtiene un piloto de revegetación de *Lessonia trabeculata*, que comprende VIII etapas.
- **Principal conclusión:** El piloto es factible de realizar, además de ser una solución basada en la Naturaleza para futuros proyectos.

ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN.....	10
1.1	LA MACROALGA <i>LESSONIA TRABECULATA</i>	11
1.2	PARTES DEL ALGA.....	15
1.3	1.4. CICLO DE REPRODUCCIÓN DEL HUIRO PALO	16
1.4	CULTIVO DE MACROALGAS	17
I.	SISTEMA DE CULTIVO SUSPENDIDO:.....	17
II.	SISTEMA DE CULTIVO DE FONDO:.....	18
1.5	ZONAS COSTERAS EROSIONADAS EN CHILE.....	19
1.6	IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN PLAYAS	20
1.7	DEFINICIÓN DE REPOBLAMIENTO	22
1.8	OBJETIVO GENERAL	23
1.8.1	<i>Objetivos específicos</i>	23
1.9	PROPUESTA METODOLÓGICA.....	24
1.9.1	<i>Área de estudio</i>	24
2	INFORMACIÓN Y RESULTADOS.....	28
2.1	MARCO REGULATORIO	31
2.2	ASPECTOS AMBIENTALES	33
2.3	DISEÑO DE PILOTO	34
2.3.1	<i>Etapa I: Recopilación básica del territorio para el piloto.....</i>	<i>35</i>
2.3.2	<i>Etapa II: obtención de material reproductivo y su cultivo.....</i>	<i>36</i>
2.3.3	<i>Etapa III: Seguimiento del cultivo</i>	<i>39</i>
2.3.4	<i>Etapa IV: Traslado de las algas desde el laboratorio al mar</i>	<i>40</i>
2.3.5	<i>Etapa V: Censos visuales en ecosistemas submareales.....</i>	<i>41</i>
2.3.6	<i>Etapa VI: Instalación en áreas seleccionadas.....</i>	<i>42</i>
2.3.7	<i>Etapa VII: Seguimiento al cultivo.....</i>	<i>44</i>
2.3.8	<i>Etapa VIII: Instalación de algas a su lugar definitivo.....</i>	<i>44</i>
2.4	ESTIMACIÓN DE CAPTURA DE CARBONO	45
2.5	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	46
2.5.1	<i>Análisis de factibilidad del piloto de revegetación con <i>Lessonia trabeculata</i></i>	<i>48</i>
3	ARTÍCULO	50
4	CONCLUSIONES GENERALES.....	54
4.1	PROPUESTA PARA TRABAJOS FUTUROS.....	57
5	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	58
6	ANEXO: REPORTE DE PLAGIO.....	68

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: IMAGEN DE LESSONIA TRABECULATA ENCONTRADA VARADA EN LA ARENA.....	12
FIGURA 2: CARACTERÍSTICAS HUIRO PALO.....	12
FIGURA 3: PRINCIPALES IMPORTADORES DE ALGAS.....	14
FIGURA 4: PRINCIPALES PARTES QUE CONFORMAN UNA PLANTA DE HUIRO PALO.....	15
FIGURA 5: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL CICLO REPRODUCTIVO DE ESTA ALGA.....	16
FIGURA 6 Y FIGURA 7: SISTEMAS PARA REALIZAR CULTIVOS DE MACROALGAS. A LA IZQUIERDA EL “LONG LINE” Y A LA DERECHA, EL SISTEMA DE CULTIVO DE FONDO.	18
FIGURA 8: SISTEMA DE CULTIVO DE PLANZA	19
FIGURA 9: ÁREA DE ESTUDIO FRENTE A LA COSTA. PUNTOS ROJOS SON LAS PLAYAS PRINCIPALES DE ESTE ESTUDIO	24
FIGURA 10: DETALLE DE LOS CAMBIOS EN LA LÍNEA LITORAL PARA PLAYAS DE LA REGIÓN DE COQUIMBO	29
FIGURA 11: ETAPAS ESTABLECIDAS PARA EL PILOTO DE REVEGETACIÓN.....	34
FIGURA 12: SISTEMA DE CULTIVO TIPO LONG LINE	43

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: CAMBIOS EN LA LÍNEA LITORAL PARA PLAYAS DE LA REGIÓN DE COQUIMBO	28
TABLA 2: PRINCIPAL INFORMACIÓN A CONSIDERAR EN ZONA PREVISTA PARA PILOTO.....	35

ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1: VARIACIÓN DEL PRECIO EN EL PERIODO 2001 AL 2019 DEL HUIRO PALO	13
GRÁFICO 2: DISTRIBUCIÓN MENSUAL DE LA REPRODUCCIÓN DEL HUIRO PALO	36

1 INTRODUCCIÓN

Las algas, son un recurso renovable que se ha aprovechado desde el inicio de la agricultura en zonas cercanas a las costas y su uso está determinado por la disponibilidad de las especies en cada lugar. Estas son un grupo complejo de organismos principalmente fotoautótrofos con una amplia distribución mundial y han sido una fuente de alimento tradicional durante miles de años, especialmente en países asiáticos (Duran-Hernández et al., 2022). Existen algas dulceacuícolas, terrestres y marinas, (Mansillas y Alveal, 2004) y presentan diferentes rasgos morfológicos como tamaño, forma y color característico de cada grupo que conforman diversos paisajes coloridos en el ambiente acuático (Duran-Hernández et al., 2022).

De acuerdo con la importancia de las algas podemos clasificarlas en dos puntos de vista: el ambiental y económico.

Desde el punto de vista ambiental, son los organismos fotosintéticos principales de ríos y mares, producen oxígeno y además son la base de la cadena alimenticia de los ecosistemas acuáticos (Peña-Salamanca, Palacios Peñaranda & Ospina-Álvarez, 2005). A través de la fotosíntesis, las algas marinas y las microalgas producen entre el 50% y el 85% de oxígeno que se libera cada año a la atmósfera, que suple la demanda de los propios organismos del sistema (Mediterranean Algae, 2022). En este sentido, una tonelada de algas cosechada secuestra aproximadamente 203 kg de CO₂ equivalente (Luo, Li, Xie & Yang, 2024)

Por otro lado, desde el punto de vista económico, las algas pueden ofrecer productos muy cotizados en el mercado; se tienen los beneficios alimentarios/culinarios, y también se utilizan en productos farmacéuticos, artículos de limpieza, entre otros.

Chile es reconocido mundialmente por su belleza y atractivos naturales. Su diversidad demostrada en paisajes como el Desierto de Atacama, una extensa carretera Austral, bosques llenos de arrayanes en la selva Valdiviana o su imponente vista en las Torres del Paine, hacen de nuestro país un lugar único, auténtico, digno de visitar de norte a sur. Sin embargo, muy pocos han logrado reconocer un paisaje que no se encuentra a simple vista: los bosques de algas. Estos bosques, conocidos comúnmente como “huirales” son ecosistemas costeros formados por un tipo de alga, el alga parda, llamada así por su pigmentación que varía desde el amarillo pardo al pardo oscuro. En Chile existen seis especies representativas de macroalgas pardas: huiro negro (*Lessonia berteroana*, *Lessonia spicata*, *Lessonia flavicans*, *Lessonia searlesiana*), huiro palo (*Lessonia trabeculata*) y huiro

flotador (*Macrocystis pyrifera*). El huiro negro se distribuye a lo largo de todo el país, mientras que el huiro palo se puede encontrar desde Arica a Chiloé. Por su parte, el huiro flotador se ubica desde Arica a Cabo de Hornos. Todos ellos cumplen una función indispensable en el desarrollo de los ecosistemas marinos ya que se han descrito como uno de los hábitats más diversos y dinámicos ecológicamente. Estas se extienden por muchas hectáreas y pueden hallarse en poca o harta profundidad dentro del mar, dependiendo de la especie de alga; su rango de profundidad abarca desde la zona intermareal (área que abarca entre el nivel de mar en marea baja y el nivel del mar en marea alta) hasta 60 m aproximadamente (Centro de Investigación Aplicada del mar, [CIAM], 2024). Cerca de un tercio de la superficie de macroalgas costeras se encuentra en Chile con más de 5.600 km² (Rehbein et al., 2020). También funcionan como protectoras de la costa frente al impacto de las olas, tsunamis, entre otros, como también contribuyen aproximadamente al 50 % de la fijación global de carbono (Chung et al., 2011) y desempeñan un papel importante en el almacenamiento global de carbono biológico, lo que las convierte en un medio eficaz para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Tanto los lechos naturales de algas como el cultivo artificial de algas pueden facilitar el ciclo de nutrientes y la purificación de residuos (Manninen et al., 2016).

1.1 La Macroalga *Lessonia trabeculata*

El huiro palo, (*Lessonia trabeculata*), es un alga endémica de color café claro con forma de arbusto, de hasta 2,5 m de alto (Figura 1). Crece en ambientes submareales y forma bosques en áreas expuestas y semi-expuestas. Se fijan al sustrato por un disco irregular, no macizo conformado por hapterios (estructuras de fijación similares a las raíces) fusionados de hasta 20 cm de diámetro. De allí emergen estipes aplanados que se ramifican dicotómicamente conformando frondas que se continúan dividiendo igual. Las frondas muy planas de forma lanceolada, anchas, con márgenes lisos y a veces denticulados (Ávila et al., 2010). Sus características se aprecian en la Figura 2.



Figura 1: Imagen de *Lessonia Trabeculata* encontrada varada en la arena
Fotografía de Camila Marchant

<i>Lessonia trabeculata</i>	
Nombre científico: <i>Lessonia trabeculata</i> Villouta y Santelices 1986	
Nombre común: Huiro palo	
Clase:	Phaeophyceae
Orden:	Laminariales
Familia:	Laminariaceae
Genero:	<i>Lessonia</i>
Especie:	<i>L. trabeculata</i>

Figura 2: características Huiro palo.
Fuente: Manual de cultivo algas pardas UAP, 2021

Esta especie se distribuye desde Antofagasta a Puerto Montt, aunque en un estudio realizado el año 2023, reporta por primera vez la presencia de la especie en las costas de la Región de Tarapacá, desde la localidad de Pisagua hacia el sur del país (Centro de Investigación Aplicada del Mar [CIAM], 2024). Su importancia comercial es alta, se comercializa seco y picado para ser utilizado como

materia prima para la producción de alginatos. En Chile, sobre el 90% del desembarque se exporta como alga seca picada, el porcentaje restante se destina como materia prima para la extracción de subproductos en el mercado nacional: ácido algínico, alginato y polímero natural (Subsecretaría de Pesca y Acuicultura [SUBPESCA], s. f.).



Gráfico 1: Variación del precio en el periodo 2001 al 2019 del Huiro palo
Fuente: Sernapesca, 2023

Los principales importadores de estos recursos corresponden a Noruega, Dinamarca, China y Japón (ver Figura 2). Además, tras el alza en los precios de las algas en 2010, Chile se convirtió en el principal productor de algas fuera de Asia, contribuyendo con aproximadamente el 30% del suministro mundial de biomasa algal. Tal demanda depende de la extracción intensiva de bosques de *L. trabeculata*, generando preocupación por los impactos a largo plazo en estos ecosistemas, especialmente en la parte norte de Chile, donde existe una mayor presión pesquera. Así, la fuerte disminución en los bosques submarinos en zonas costeras como frente a Caldera (~27°S) e Iquique (~20.2°S), podría ser consecuencia de la sobreexplotación pesquera, la cual podría afectar gravemente la densidad de los bosques submarinos, exacerbada por la eliminación de depredadores clave que podrían agravar la degradación de los bosques debido al aumento en el pastoreo. Lo anterior, sumado al lento crecimiento de *L. trabeculata* (en alrededor de 21 meses alcanza estructuras adultas relevantes) y su baja capacidad de recuperación tras la cosecha (Bularz

et al., 2022; Gouraguine et al., 2021; Westermeier et al., 2017), explicarían las tendencias sostenidas de declive en estas ecorregiones (Guajardo, 2024). Por otro lado, su valorización pasó de pagarse a 0,05 dólares estadounidense por kilogramo en 1985 (cuando era usado como leña) a cotizarse a más de 0,46 dólares estadounidenses por kilogramo en 2017 (Márquez Porras & Vásquez, 2020). En el año 2016, 49.802 toneladas fueron recolectadas, de las cuales 17.261 se extrajeron en la Región de Coquimbo de manera artesanal, lo que corresponde a un 34%



Figura 3: Principales importadores de algas
Fuente: elaboración propia a partir de datos de OEC, 2023

1.2 Partes del alga

El huiro palo es un alga que puede verse a simple vista. Forma ambientes de densos bosques y son el hogar de depredadores y pequeños moluscos. También son una fuente de alimento para peces y son utilizados como zona de crianza y/o caza por animales de la costa.

Las algas usualmente viven adheridas al sustrato mediante una estructura denominada “disco adhesivo” o “grampón” (Figura 3), el cual tiene diversas formas y tamaños. Por otro lado, se encuentra el “estipe” que sale del disco anteriormente mencionado y permite mantener el alga erguida. Esta estructura es también la que ayuda al alga a permanecer firme ante movimiento de corrientes o oleajes. La zona aplanada de las algas se denomina “lámina”, la que en algunos casos se especializa en la captura de la luz, mientras que en otras se especializa en brindar flotabilidad o incluso para uso reproductivo.

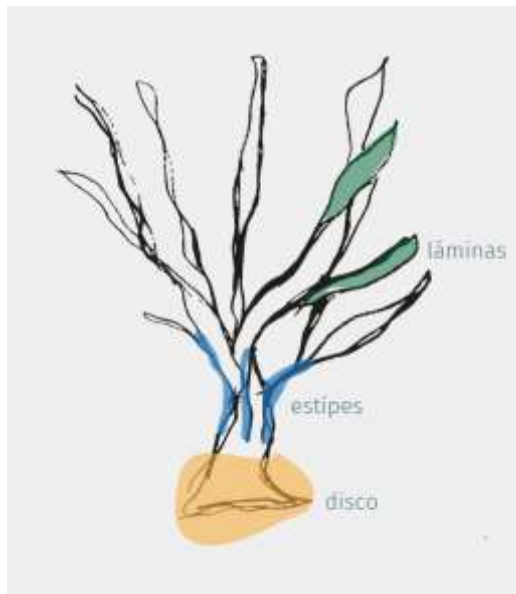


Figura 4: Principales partes que conforman una planta de huiro palo

Adaptado de Sistema de control extractivo y reforestación del alga Huiro Palo mediante un cultivo vertical orquestado por una pieza incubadora (p. 31) por Javiera Kitzing (2020), Memoria de grado Universidad del Desarrollo

1.3 1.4. Ciclo de reproducción del Huiro Palo

Las plantas Laminariales, como es el caso del Huiro Palo, poseen un ciclo de vida haplodiploide, ya que presentan una fase de vida diploide macroscópica y una fase haploide microscópica que presenta dimorfismo sexual con presencia de oogonio en los gametofitos femeninos y anteridios en los gametofitos masculinos. Ilustración por Geraldine Véliz.

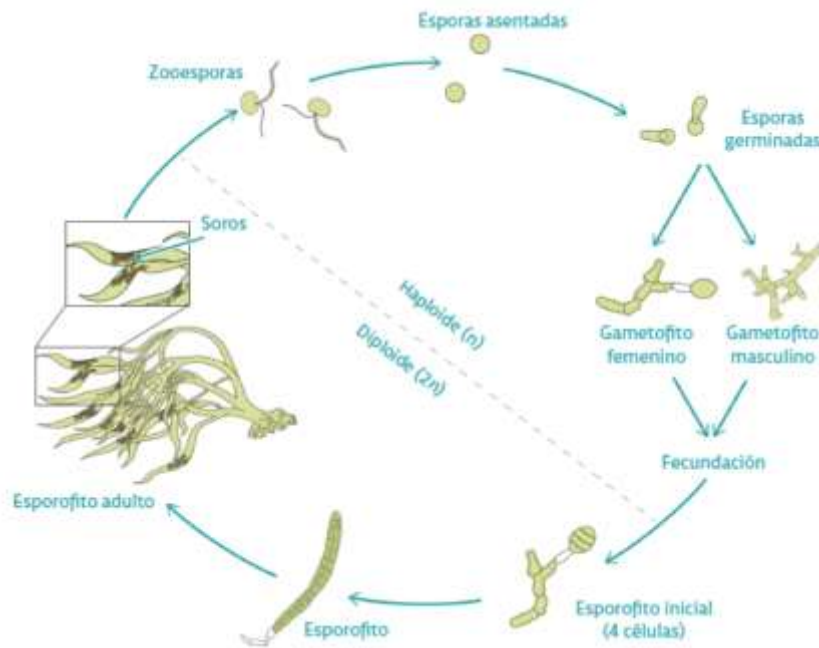


Figura 5: Representación gráfica del ciclo reproductivo de esta alga
Fuente: tomado de Contreras-Porcía et al., 2025

Lessonia trabeculata presenta un ciclo de vida diplonte con alternancia de generaciones heteromórfica, típico de las algas pardas del orden Laminariales, caracterizado por la presencia de una fase macroscópica diploide (esporófito) y una fase microscópica haploide (gametófito) (Santelices, 1990; Buschmann et al., 2014). La fase esporofítica adulta, correspondiente al huiro observable en el ambiente submareal, se desarrolla preferentemente sobre sustratos rocosos estables, entre los 5 y 20 m de profundidad, condiciones frecuentes en la costa del norte de Chile. Este esporófito produce estructuras reproductivas denominadas soros, localizadas en las frondas, donde ocurre la meiosis, generando meiosporas haploides flageladas (Santelices, 1990).

En el norte de Chile, la liberación y viabilidad de las esporas se encuentra fuertemente influenciada por factores ambientales como la temperatura del agua, la disponibilidad de nutrientes asociada a eventos de surgencia costera y la alta radiación solar, características propias del sistema

de la corriente de Humboldt (Buschmann et al., 2014). Las esporas se dispersan en la columna de agua y, al asentarse sobre superficies rocosas limpias y libres de sedimentación excesiva, germinan y dan origen a gametófitos microscópicos, sexualmente diferenciados en masculinos y femeninos.

Estos gametófitos producen los gametos mediante mitosis, y la fecundación ocurre en el sustrato, dando lugar a un cigoto diploide, el cual se fija y comienza su desarrollo como un esporófito juvenil. En ambientes del norte de Chile, el establecimiento exitoso de esporófitos juveniles puede verse limitado por la alta energía del oleaje, la sedimentación de origen antrópico y la presión de herbivoría, factores relevantes en zonas industrializadas o intervenidas (Vásquez et al., 2014).

El esporófito juvenil experimenta un crecimiento progresivo hasta alcanzar la madurez, proceso que puede extenderse por varios años, dependiendo de las condiciones locales de nutrientes, luz y estabilidad del sustrato. Una vez alcanzada la madurez reproductiva, el esporófito adulto reinicia el ciclo mediante la producción de nuevas esporas, cerrando el ciclo de vida de la especie (Buschmann et al., 2014).

1.4 Cultivo de macroalgas

Saavedra, Henríquez, Leal, Galleguillos, Cook y Cárcamo (2019) en su Manual de macroalgas, señalan que existen al menos 14 especies de macroalgas que presentan algún grado de avance en tecnologías de cultivo y comercialización, dentro de las cuales se encuentra el huiro palo. A continuación, los sistemas de cultivo que usualmente se efectúan con macroalgas:

i. Sistema de cultivo suspendido:

También denominado *long line*, consiste en mantener mediante flotadores, una línea principal o “madre” de forma horizontal a la superficie o a una determinada profundidad, unido a través de cabos u otro sistema de anclaje, por lo general de hormigón o concreto. Este sistema de anclaje es fundamental para que la estructura flotante permanezca fija dentro del sitio definido sobre todo durante cambios de marea y marejadas. Es decir, debe ser bien resistente. Aunque la longitud de la línea madre es variable, dependiendo de los requerimientos y condiciones geográficas, por lo general se utilizan líneas de alrededor de 100 metros. La siembra de juveniles se realiza sobre el sistema suspendido, adosando en la línea madre otro cabo inoculado con semillas para su crecimiento. Estas líneas pueden ser dispuestas de forma horizontal o vertical según la especie.

ii. Sistema de cultivo de fondo:

Sistema de cultivo de fondo: este sistema básicamente no utiliza estructuras externas. Se asemeja a sistemas utilizados en agricultura, donde se siembra directamente al sustrato, mediante utensilios como palas u horquillas. Puede ser utilizado en sistemas intermareales y submareales.



Figura 6 y Figura 7: Sistemas para realizar cultivos de macroalgas. A la izquierda el "long line" y a la derecha, el sistema de cultivo de fondo.

Fuente: Manual de cultivo algas pardas UAP, 2021

También, en los últimos años se han adaptado sistemas flotantes llamados "de planza", los cuales maximizan el uso por área de cultivo lineal

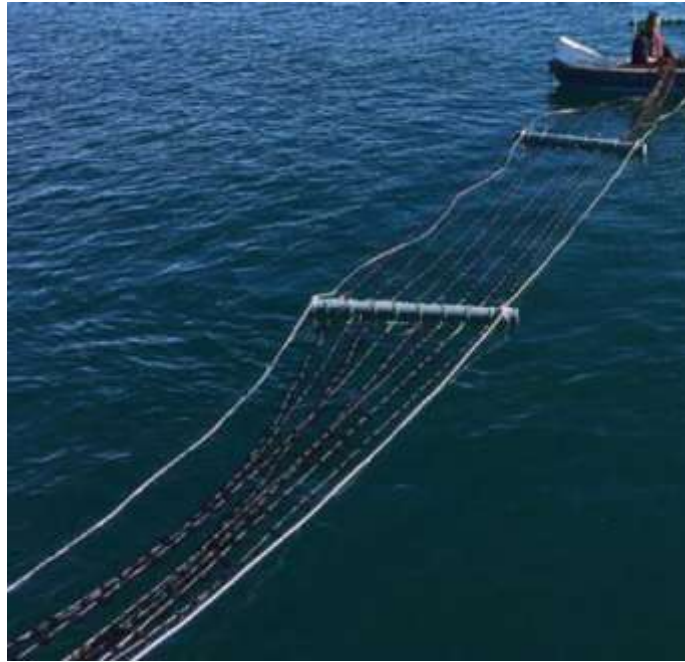


Figura 8: Sistema de cultivo de planza
Fuente: Manual de cultivo algas pardas UAP, 2021

1.5 Zonas costeras erosionadas en Chile

La erosión costera, se constituye como la pérdida o desplazamiento de tierras costeras y el subsiguiente retroceso de la línea costera hacia la tierra, causado por la remoción neta de sedimentos o del lecho rocoso subyacente (United Nations Office for Disaster Risk Reduction [UNDRR], s. f.). Es el resultado de las actividades humanas y los cambios en el entorno natural que hacen que la acción dinámica costera (olas, corrientes, viento) pierda el equilibrio en el proceso costero, y ocasione, la pérdida a largo plazo de sedimentos de la zona costera. Los factores antropogénicos emergen claramente como el principal impulsor del cambio, tanto por la explotación planificada de los recursos costeros (como la construcción de estructuras costeras, por ejemplo), como también por los efectos colaterales imprevistos de las actividades humanas, como la construcción de presas, sistemas de riego y estructuras que modifican el flujo de sedimentos, o la tala de ecosistemas costeros, como los manglares. Otro factor importante es la ocurrencia de desastres naturales como tsunamis y tormentas extremas. La tendencia global observada en la erosión costera podría verse agravada por el aumento del nivel del mar y la mayor frecuencia de

eventos extremos en un clima cambiante. (Mentaschi et al., 2018). Las regiones costeras donde vive aproximadamente el 60% de la población mundial, se consideran zonas donde la interferencia humana en el paisaje es mayor que en otras áreas, exacerbados por el aumento de la población, el uso de los recursos y la expansión de los espacios urbanos como algunos de los factores que afectan el medio ambiente y han causado cambios significativos en el paisaje en cortos periodos de tiempo (UNESCO, 2012). Por su parte, la costa de Chile no escapa de la realidad internacional, además se agregan las condiciones tectónicas, aumento de marejadas, megasequía y presión por desarrollo habitacional, turístico, social y económico en estas áreas (Martínez et al., 2022).

Los bancos de algas marinas son una especie dominante que forma hábitat en todo el mundo. Su presencia, puede tener un rol fundamental en favorecer la diversidad de organismos, incluyendo numerosos recursos pesqueros, pero también puede proteger la línea de costa de la energía del oleaje (Contreras-Porcía et al., 2025). Por su parte, la macroalga *Lessonia trabeculata*, constituye la macroalga parda más abundante en ambientes submareales a lo largo de gran parte de la costa Chilena (18–42°S) [2,3]. *L. trabeculata* sustenta conjuntos ecológicos esenciales, formando hábitats y proporcionando servicios y funciones ecosistémicas, como fuentes de alimento y refugio para diferentes especies de invertebrados y peces y reduciendo la intensidad de las olas y el flujo de agua. (Campos et al., 2021)

1.6 Impactos del cambio climático en playas

Según el *Informe sobre el riesgo de los impactos del cambio climático en las costas de Chile*, realizado el año 2019 por el Ministerio del Medio Ambiente, se señala que, en el análisis de evolución histórica de la línea de costa a lo largo de Chile, se constata que en el 80% de las playas analizadas (35 playas de la región de Antofagasta, Coquimbo, Valparaíso O'higgins y Biobío) se encuentran con erosión o erosión alta. El estudio señala además que las mayores tasas de erosión corresponden a playas de ensenada donde se desarrollan extensos litorales arenosos, asociados a antiguos campos dunares y humedales costeros. Las playas ubicadas entre Arica y el Canal Chacao experimentarán retrocesos medios entre 3 y 23 m, dependiendo del tamaño del grano y la altura de la berma de la playa (Ministerio del Medio Ambiente, 2019). Por otro lado, un estudio realizado por Bird en 1985 desarrollado en las costas de la III y IV Región, evidencia que el 70% de las playas

tienen una tendencia creciente a la erosión; solamente el 10% avanza creciendo hacia el mar, y el 20% restante, muestra una relativa estabilidad; es por tanto la erosión actual de las playas, un testimonio importante de cambio en su tendencia evolutiva actual (Villagrán, 2007). A su vez, existe un aumento en la densidad demográfica en la mayoría de las áreas costeras señaladas, debido a la alta demanda de este espacio, generando modificación en las costas, ya sea de ensanchamiento, relleno y alteración de costas mediante diversas obras de ingeniería, las que, a su vez, siguen siendo modificadas por las condiciones particulares y la dinámica natural de las costas (Villagrán, 2007).

Para la región de Coquimbo, durante las últimas décadas, la altura de las olas se ha incrementado y una comparación entre estas condiciones históricas (periodo 1986-2005) y las proyecciones para mediados de este siglo (2026-2045), muestra que existirá un aumento de la altura de las olas de 10 cm en la zona costera al sur de 29°S, la cual se incrementa hasta aproximadamente 15 cm más hacia el norte; el aumento en la altura del oleaje genera efectos sobre la infraestructura costera, la erosión de las playas y los tiempos de operación de los puertos, entre otros (Gobierno Regional de Coquimbo, 2025)

Un punto fundamental en el combate contra el cambio climático oceánico es la preservación de algas pardas (huido), que cumplen con el rol de estabilizar la costa, gracias a su capacidad de disipar la energía mecánica del oleaje y retener el sedimento. (Martínez et al., 2022).

De hecho, a partir de 69 estudios, Narayan et al. 2016 muestra que, en promedio, estos hábitats pueden reducir la energía del oleaje entre un 70% y un 30%. (Morris et al., 2019)

Lamentablemente, la extracción ilegal de macroalgas, como se ha señalado, muestra un aumento exponencial a principios de los años 2000 (Porras & Vásquez, 2020), generando la pérdida de playas y edificaciones en las mismas (Martínez et al., 2022). La pérdida de macroalgas debido a acciones naturales y antropogénicas genera un deterioro del litoral. En la Región de Coquimbo se han documentado procesos de erosión; la ausencia de metodologías aplicadas para restaurar estos ecosistemas impide la capacidad de recuperación natural.

1.7 Definición de repoblamiento

La Ley General de Pesca y Acuicultura (Ley 18.892) define el repoblamiento como el “conjunto de acciones que tienen por objeto incrementar o recuperar la población de una determinada especie hidrobiológica, por medios artificiales o naturales, dentro de su rango de distribución geográfica”. Repoblar con algas pardas significa, en esencia, sembrar o trasplantar nuevos individuos en el sustrato marino donde habitualmente se desarrollan, o usar otros mecanismos que logren instalar y aumentar la densidad de individuos en una población (Contreras-Porcía et al., 2025).

El siguiente trabajo se orienta a conocer la dinámica costera de algunas de las costas de Coquimbo, en un ambiente con condiciones específicas, de forma de establecer un diseño de un piloto de revegetación con la macroalga *Lessonia trabeculata*, como estrategia de recuperación en zonas erosionadas y a su vez, indicar estimativamente, el potencial de captura o secuestro de carbono azul.

1.8 Objetivo general

Evaluar factibilidad de diseño de un piloto de revegetación mediante el cultivo de la macroalga *Lessonia trabeculata* como estrategia de recuperación en áreas costeras erosionadas de la Región de Coquimbo.

1.8.1 Objetivos específicos

- Caracterizar las condiciones del entorno costero erosionado de la zona de estudio, en relación con su potencial para cultivos de *Lessonia trabeculata*
- Evaluar aspectos ambientales y regulatorios asociados a la implementación del piloto
- Diseñar modelo piloto de cultivo de algas adaptado a las condiciones del sitio de estudio

1.9 Propuesta metodológica

Este documento posee un enfoque cuantitativo para la caracterización del entorno y la estimación de captura de carbono, asociado al alga *Lessonia trabeculata*. Además, corresponde a una investigación de estudios y documentos científicos, orientada a establecer soluciones sustentables y prácticas, con el objetivo de recuperar el área específica del estudio.

1.9.1 Área de estudio

El estudio se desarrolla en el entorno costero de la Región de Coquimbo, Chile en el litoral comprendido en la conurbación entre La Serena y Coquimbo además de la Playa la Herradura y Guanaqueros (ver Figura 9).



Figura 9: Área de estudio frente a la Costa. Puntos Rojos son las playas principales de este estudio

Desde el punto de vista climático, la IV Región de Coquimbo presenta una diversidad de cinco zonas climáticas predominantes, reflejando su ubicación de transición entre el desierto y la zona central de Chile (Gobierno Regional de Coquimbo, 2024). Estas zonas y su representación son:

- **Clima Árido Frío (BWk):** Constituye el 37% de la región. Corresponde a zonas desérticas donde la temperatura media anual es inferior a 18°C. Es característico de la franja costera y las zonas interiores con influencia de corrientes frías.

- **Clima Semiárido Frío (BSk):** Abarca el 32% de la región. Son áreas estepáricas con precipitaciones escasas y concentradas en invierno, y con una temperatura media anual también inferior a 18°C, típico de los valles interiores.

- **Clima Frío de Tundra (ET):** Representa el 26% de la región. Se encuentra en las altas cumbres de la Cordillera de los Andes, donde la temperatura media del mes más cálido está entre 0°C y 10°C, y no hay árboles.

- **Clima Templado Cálido (Cfa, Csa, Cwa, u otras variantes 'C' con influencia cálida):** Con un 4%, se refiere a zonas con inviernos suaves y veranos cálidos. Aunque menos extendido, puede encontrarse en microclimas específicos o en altitudes más bajas hacia el sur de la región.

- **Clima Árido Cálido (BWh):** Ocupa un 0.6% de la superficie. Corresponde a áreas desérticas con una temperatura media anual igual o superior a 18°C. Si bien es minoritario, indica la presencia de sectores muy áridos y de mayores temperaturas, posiblemente en el extremo norte o en fondos de valle muy expuestos.

Específicamente el clima costero, se caracteriza por la presencia de mucha humedad (85%) y mucha nubosidad (principalmente en las mañanas), con temperaturas muy moderadas, media anual de 14,7°C (La Serena) y una oscilación térmica diaria que no sobrepasa los 6°C (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2010).

El relieve de la IV Región está dominado por la presencia de las cordilleras de la Costa y Los Andes, y la presencia de valles fluviales transversales de orientación orienteponiente que hacen desaparecer la típica depresión intermedia presente en el resto del país (Villagrán, 2007).

1.9.1.1 Bahía Coquimbo y La Serena

Esta bahía comprende una amplia franja litoral, ubicada al Noroeste de la IV Región de Coquimbo, (Comuna de La Serena y Coquimbo) de aproximadamente 15 Km. de longitud de playa, siendo una de las importantes bahías que conforman el sistema de bahías de la región. Contendida en ésta, se encuentra la Bahía Herradura Guayacán, con 2 Km de extensión, ubicada a 8 Km al sur de Bahía Coquimbo. En este sector, debido a sus condiciones morfológicas, presenta condiciones de abrigo debido a la presencia de un headland, que actúa frente a los vientos predominantes y el oleaje, macizo correspondiente a la Península de Coquimbo (Pacheco, 2001), agregando además que en este sector comienza el dominio de planicies o terrazas, también denominadas sistema de razas de sedimentación marina, generalmente se dan claramente tres, escalonadas sobre la línea de costa, suavemente inclinadas hacia el Oeste y separadas entre sí por escarpes que forman escalonamiento en dirección hacia el océano. (Villagrán, 2007).

1.9.1.2 Bahía Guanaqueros

La playa de Guanaqueros está ubicada a 34 Km. al sur de Coquimbo y al Norte de Tongoy, la Bahía se extiende por 17 Km. de longitud de playa (Fig. 9), de arenas finas y corresponde a uno de los principales centros turísticos de la Región. Esta bahía presenta una forma similar a la Bahía Coquimbo, perteneciendo al tipo de costa lobulada, con una amplia extensión de las terrazas marinas y un humedal en el extremo norte conocida como Laguna Adelaida.

En el sector sur de esta bahía se ubica el pueblo de Guanaqueros, en el sector centro de la bahía existe una amplia extensión de costa utilizada por camping, mientras que en el sector norte se ubican diferentes complejos turísticos Las Dunas, Morrillos y Totoralillo.

1.9.1.3 Antecedentes Oceanográficos

En cuanto al régimen térmico estacional, la presencia de inversiones térmicas y salinas sería generada por la aparición de ondas internas de diferentes periodos y variaciones en la posición del frente de masas de agua. Bajo los 50 m se encuentran aguas de mayor salinidad, asociadas a bajos contenidos de oxígeno y alto contenido de nutrientes, los cuales penetran a las bahías principalmente debido a las mareas y cambios en la circulación en general (Villagrán, 2007).

Las condiciones oceanográficas en las capas superiores de la zona de Coquimbo indican variaciones estacionales muy pequeñas. Anomalías oceanográficas a largo plazo según se han registrado y han sido atribuidas largamente a la intrusión de una masa de agua del norte. En general, las aguas superficiales cerca de la costa en esta zona son caracterizadas por bajas temperaturas y salinidad, un resultado de upwelling y acto de la mezcla. Más lejos de la costa las aguas son caracterizadas con temperaturas y salinidad más altas asociadas a la contracorriente costera chilena que influye de norte a sur. (Villagrán, 2007).

2 INFORMACIÓN Y RESULTADOS

De acuerdo con el estudio “*determinación del riesgo de los impactos del cambio climático en las costas de Chile*” desarrollado por el Ministerio del Medio Ambiente, en el año 2019, las playas de La Serena, La Herradura y Guanaqueros presentan una categoría de erosión con una tasa de cambio en promedio de 0,40 (Tabla 1). Estos se visualizan en la siguiente Figura 10.

N°	Playa	Periodo (años)	N° años	Tasa de cambio (m/año)*	Categoría
1	Hornitos	2003 - 2016	13	-2.60	Erosión alta
2	La Serena	1978 - 2017	39	-0.30	Erosión
3	La Herradura	1993 - 2017	24	-0.45	Erosión
4	Guanaqueros	1993 - 2018	25	-0.30	Erosión

Tabla 1: Cambios en la línea litoral para playas de la Región de Coquimbo

Fuente: Determinación del riesgo de los impactos del cambio climático en las costas de Chile, 2019



Figura 10: Detalle de los cambios en la línea litoral para playas de la Región de Coquimbo
 Fuente: Determinación del riesgo de los impactos del cambio climático en las costas de Chile, 2019

Playa La Serena

Los cambios espacio-temporales de la línea litoral para la playa La Serena fueron calculados para el periodo 1978-2017 (39 años). Se determinó una tasa de cambio de $-0,30$ m/año, clasificándose como “erosión”. El rango de erosión ($-0,2$ y $-1,5$ m/año) predomina a lo largo de la playa, donde se intercala con sectores con “erosión estable” ($-0,2$ y $+0,2$ m/año). Presenta una forma en planta de playa encajada, tiene $18,8$ km de largo y tipo de zona de rompiente intermedia. Por tratarse de una playa urbana, es más sensible a incrementar los niveles de erosión encontrados.

Playa La Herradura

En playa La Herradura, se determinó una tasa de cambio de $-0,45$ m/año para el periodo 1993-2017 (24 años), clasificándose como “erosión” ($-0,2$ y $-1,5$ m/año). El rango de erosión predomina a lo largo de la playa, variando a “erosión estable” al sur de la bahía debido al efecto de protección generado por el muelle. Esta playa es encajada, tiene $1,5$ km de largo, presenta una zona de rompiente reflectiva y no cuenta con drenaje local. Por tratarse de una playa urbana, es más sensible a incrementar los niveles de erosión encontrados.

Playa Guanaqueros

Considerando el período 1993-2018 (25 años), se determinó para playa Guanaqueros una tasa de cambio de $-0,30$ m/año, clasificándose como “erosión” ($-0,2$ y $-1,5$ m/año). La erosión es el rango que predomina a lo largo de la playa. Esta playa es rectilínea, expuesta al norte, de $5,9$ km de largo y tipo de zona de rompiente reflectiva. Es una playa urbana-periurbana sin drenaje local, por lo cual más sensible a la erosión.

La extracción del huiro palo se encuentra regulado en sectores del norte de Chile. Su captura nacional durante el año 2016 fueron 49.802 toneladas, de las cuales en Coquimbo se extrajeron 17.261 de manera artesanal (Fundación Chile, 2019). Los planes de manejo de algas pardas son obligatorios en las áreas de libre acceso desde la XV a la IV Región. Posee veda extractiva entre la XV a II Región, permitiéndose solo la recolección del alga varada, mientras que desde la III a la IV región existe cuota anual de captura. También se extrae en áreas de manejo que consideren esta alga dentro de su plan de explotación. (Vélez, 2017).

2.1 Marco regulatorio

La Resolución exenta N° 2673, del año 20 de septiembre del 2013 emitida por la subsecretaría de pesca y acuicultura aprueba el Plan de Manejo para los recursos de huiro, dentro de ellos el huiro palo. Este contempla solo las áreas de libre acceso de la región de Coquimbo entre los 29°11' y los 32°10' de latitud Sur. Se excluye todas aquellas medidas de restricción de acceso al litoral costero y marítimo que están en mayor parte determinadas por el establecimiento de concesiones y destinaciones marítimas asignadas, mediante decretos y resoluciones emanadas de la Subsecretaría de Marina del Ministerio de Defensa Nacional (zonas portuarias, concesiones acuícolas y AMERB). En esta Resolución, se señala que el Huiro palo se extrae en caletas de las provincias de Limarí y Choapa.

De acuerdo con la Ley General de Pesca y Acuicultura (LGPA) (Ley 18.892), existe un régimen llamado áreas de manejo y explotación de recursos bentónicos (AMERB), donde se otorgan derechos de uso o explotación exclusiva sobre los recursos bentónicos (invertebrados bentónicos y algas) presentes en sectores geográficos previamente delimitados (SERNAPESCA, 2019). Estos se encuentran claramente normados, no así los sectores de libre acceso (Contreras-Porcía et al., 2025). Según SERNAPESCA, cada AMERB cuenta con 22 hectáreas aproximadamente, de éstas, el 50% se puede utilizar para sistemas de cultivos; por lo tanto, se cuentan con 11 hectáreas por AMERB (Kitzing, 2020). Es importante señalar que el marco normativo del repoblamiento está claramente normado para los repoblamientos en los AMERB, no así para sectores de libre acceso (Contreras-Porcía et al., 2025)

El reglamento de área de manejo (Decreto Supremo, del Ministerio de Economía, fomento y reconstrucción, N°355 de 1995) indica que se debe informar ciertos aspectos para llevar a cabo un piloto de repoblamiento. Los principales, se enlistan a continuación:

- ubicación geográfica y superficie del o los polígonos a repoblar, identificados con coordenadas en datum WGS-84.
- Hábitats de la especie a repoblar, considerando que el sector elegido es el más adecuado.
- Carta batimétrica del sector o área de manejo, con una antigüedad no mayor a 10 años
- Información de los pescadores del sector. Si bien esto no se encuentra tácitamente en la normativa, se considera primordial dentro del éxito de un piloto, dado que estas personas pueden tener información histórica no registrada sobre donde existieron praderas de las macroalgas objetivo, o cuales son los fondos coincidentes con los hábitats de dichas macroalgas (Contreras-Porcía et al., 2025)

La principal normativa aplicable, es la siguiente:

- Ley 20.925 del año 2016: Establece la bonificación estatal para repoblamiento y cultivo de macroalgas marinas nativas, destinada a pescadores artesanales y cooperativas. En esta normativa se establece un concepto que es Repoblamiento, lo que se define como *“conjunto de acciones que tienen por objeto incrementar o recuperar la población de una determinada especie hidrobiológica, por medios artificiales o naturales, dentro de su rango de distribución geográfica”*.
- Resolución Exenta N°2539 del año 2016: Fija el listado de macroalgas nativas autorizadas relacionada con la normativa indicada en el punto anterior. Aquí se incluye el huiro palo.
- Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA): en el caso de posibles impactos ambientales en zonas costeras o un proyecto intensivo, debe someterse al SEIA, ya sea mediante una Declaración de Impacto Ambiental o Estudio de Impacto Ambiental (DIA o EIA, respectivamente). Este último punto se considera para desarrollo y explotación en superficies ubicadas en lugares sensibles, o bien a escalas de gran envergadura.

2.2 Aspectos ambientales

Por el lado de los aspectos ambientales, enlistamos aquellas variables relevantes que se deben considerar.

i. Características del agua

Temperatura

Nutrientes

Disponibilidad de luz

ii. Características geomorfológicas

Lessonia requiere de sustrato rocoso (duro)

iii. Dinámica local biológica

a. Presencia de organismos herbívoros

b. Interacción con la comunidad, con otras algas, predadores herbívoros

iv. Regímenes de alimento

v. Estacionalidad

Como se comporta en su reproducción y crecimiento

vi. Amenazas externas

a. Impactos antrópicos (descargas industriales, construcciones cercanas)

2.3 Diseño de piloto

El piloto en su mayor parte considera el *Manual de buenas prácticas para el repoblamiento de algas pardas*, (Contreras-Porcía et al., 2025) en el cual proporciona una detallada descripción de recomendaciones de procedimientos metodológicos, respaldados por investigación científica sobre repoblamiento de algas pardas. Este piloto comprende VIII etapas, las que en resumen se detallan en la siguiente figura:

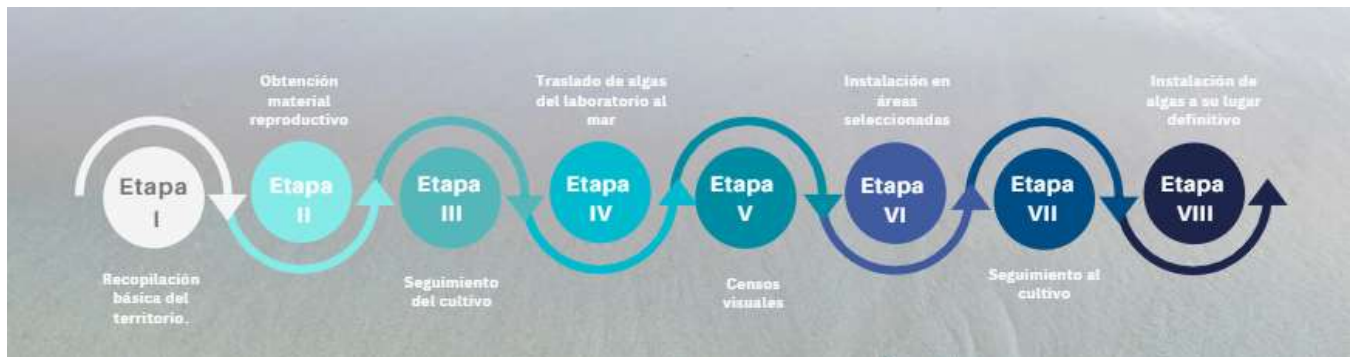


Figura 11: Etapas establecidas para el piloto de revegetación
Fuente: elaboración propia

Uno de los primeros pasos para cualquier proyecto o piloto, es determinar el mejor lugar donde desarrollar la siembra de los ejemplares. En este sentido, es necesario contar con la mayor cantidad de información biótica y abiótica de la zona prevista para su desarrollo (Contreras-Porcía et al., 2025).

2.3.1 Etapa I: Recopilación básica del territorio para el piloto

La información biótica y abiótica básica para considerar se presentan en la siguiente tabla:

Información biótica	Información abiótica
Densidad	Batimetría (profundidades oceánicas)
Estado poblacional	Litología (características de las rocas, tipos de fondo)
Geolocalización de los bancos de la especie a repoblar	Corrientes marinas
Densidad de las principales especies depredadoras del huero palo	Oleaje (sucesión de olas)
Geolocalización de las principales especies depredadoras del huero palo	Vientos
	Clima
	Hidrografía
	Poblaciones

*Tabla 2: Principal información a considerar en zona prevista para piloto
Fuente: Manual de buenas prácticas para el repoblamiento de algas pardas, 2025*

2.3.2 Etapa II: obtención de material reproductivo y su cultivo

Una vez decidido el lugar tomando en cuenta los factores indicados en la tabla, el sector desde donde procede el material reproductivo para la producción del alga debe considerar material reproductivo desde la misma localidad o zona a realizar la actividad (Contreras-Porcía et al., 2025) En caso desfavorable, se debiese recopilar el material de zonas o localidades cercanas, con el fin de mantener el patrimonio genético.

En capítulos anteriores se vieron los métodos más comunes para cultivar especies de huiros, como es el caso del huiro palo. Kitzing, propone cultivo vertical orquestado por una pieza incubadora, con el fin de aprovechar al máximo las 11 hectáreas que se dispone por AMERB. La verticalidad se fundamenta en otros exitosos casos de cultivos marinos tomando en cuenta espacios reducidos. Un importante beneficio es que aprovecha más eficazmente el espacio útil, se controla mejor el desempeño del cultivo y una menor pérdida de producción.

A continuación, se indican las consideraciones para la reproducción del material que iniciará el cultivo:

- Establecer momento y lugar para una recolección efectiva: para esto se debe monitorear las condiciones climáticas y oceanográficas del lugar, marejadas, mareas. A su vez la época del año también es un punto importante, pues en el caso del huiro palo, esta no posee la misma fertilidad durante el año. Su reproducción aumenta en los meses de primavera; es decir de septiembre a diciembre. (ver Gráfico 1)

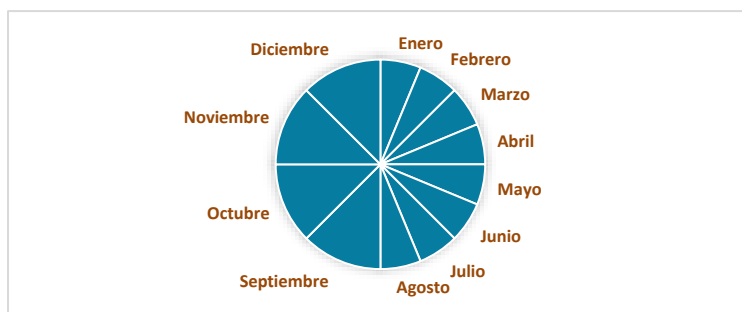


Gráfico 2: distribución mensual de la reproducción del huiro palo
Fuente: elaboración propia

- Conocer las estructuras a recolectar: Para el caso del Huiro palo, las estructuras reproductivas se agrupan en soros, que a simple vista se aprecian como manchas sobre las frondas. Mientras mas gruesas y nítidas, el material será de mejor calidad.

- Traslado de material reproductivo: Una vez obtenido este material, este debe ser llevado a laboratorio, procurando que conserve humedad. Aquí los factores a considerar para que el traslado sea exitoso, tenemos:
 - Humedad (se puede utilizar esponjas o papeles humedecidos en agua de mar)
 - Temperatura: la temperatura debe ser baja (10°C) en oscuridad
 - Formato de transporte: Se recomienda caja térmica.
- Limpieza: el material reproductivo debe ser limpiado para seleccionar el mejor material que será utilizado para su reproducción. Para la limpieza se recomienda usar agua de mar filtrada y lavarla con un cepillo o brocha que permita eliminar impurezas desde las superficies. A su vez, se debe verificar que no debe contener otras especies; el material a reproducir debe estar libre de cambios en coloración ya que podría ser indicio de mala calidad. Pasar un algodón embebido en una solución de alcohol al 2-5% o solución de Lugol al 0,5% también puede ser eficiente (Contreras-Porcía et al., 2025)
- Inicio del cultivo: una vez seleccionados y limpios los segmentos, se procede a la liberación de las esporas e iniciar el cultivo. Se sugiere que la esporulación se realice inmediatamente, para obtener solución de esporas de alta calidad sin materia orgánica o otros contaminantes.
- Obtención de esporas: Si bien existe más de un método para obtener las esporas, el más usado y seguro es la deshidratación parcial del tejido reproductivo seleccionado (Contreras-Porcía et al., 2025). Aquí los soros deben dejarse envueltos en papel absorbente por un máximo de 2 horas. Es importante que los soros no estén hidratados, y sin restos de agua. Considerar también los cambios de luz, ya que para este procedimiento es recomendable tener luz tenue o bien en oscuridad.
- Liberación de esporas: Posterior al periodo de deshidratación, los soros deben ser hidratados en un recipiente limpio, de vidrio o plástico, con agua de mar filtrada en un volumen conocido. Esta agua debe cubrir totalmente el tejido. Se recomienda verificar la presencia de esporas mediante una alícuota cada 20 minutos para observar al microscopio. En la primera hora de realizada la hidratación, se debiese visualizar una cantidad considerable de esporas móviles, lo que nos permitiría indicar que el procedimiento ha sido exitoso.
- Siembra de esporas: Previa a la siembra, es recomendable filtrar el “caldo” de esporas para disminuir la probabilidad de contaminantes que podrían afectar el éxito del cultivo. Un

método efectivo es dejar el caldo en un embudo de decantación por 30 min eliminar el tercio inferior. Esto en oscuridad. Luego este caldo se filtra para retener restos de material orgánico. Teniendo el caldo con esporas, la concentración se debe determinar en una cámara Neubauer o similar y ajustar la concentración. El manual de buenas prácticas (2025) recomienda utilizar soluciones no densas que bordeen las 10.000 a 5.000 esporas mL-1. Una vez ajustada la densidad, la solución se adiciona a acuarios en los que hay sustratos que serán utilizados para repoblar (piedras, bolones, cerámicos, PVC). También en los acuarios deben introducirse portaobjetos como testigos para observar continuamente el desarrollo de las fases. Luego el cultivo de plántulas se realiza en una cuerda en el laboratorio. La cuerda se ordena alrededor de un tubo de PVC para su cultivo y manejo ordenado.

2.3.2.1 Consideraciones para el área de trabajo o laboratorio

El laboratorio o lugar donde se realice el cultivo, debe ser un ambiente que debe cumplir los requisitos enlistados a continuación:

- i. Mesones esterilizados con alcohol al 70%
- ii. Material de vidrio y esterilizado
- iii. Agua de mar que se utiliza debe ser estéril
- iv. Mantener una temperatura menor a los 15°C

2.3.3 Etapa III: Seguimiento del cultivo

Las consideraciones indicadas en la sección 2.3.2, son similares a las que se requieren en este punto y para que el cultivo sea un éxito. Los principales parámetros para controlar son:

- i. Temperatura (entre 10°-13°C)
- ii. Cantidad y calidad de Luz (inferior a 80 $\mu\text{moles fotones m}^{-2}\text{s}^{-1}$.)

Se requiere equipamiento adicional para ir verificando el desarrollo del cultivo. En este punto se necesita:

- i. Autoclave: para esterilizar agua de mar, medios de cultivo, el material a utilizar
- ii. Microscopios y lupas estereoscópicas para revisar el desarrollo de las fases del ciclo de vida y presencia/ausencia de contaminantes
- iii. Computador/cuaderno para ir registrando el comportamiento del cultivo

Se sugiere, posterior a la siembra de esporas, dejar los sistemas reposar por una semana antes de realizar el primer cambio de agua de mar enriquecida con nutrientes junto con la incorporación de aireación. Así, se estimula el asentamiento de esporas y se da inicio al desarrollo de las mismas (Contreras-Porcía et al., 2025). Luego, se realizan los correspondientes cambios de agua de mar y recipientes de cultivo cada una semana, para controlar la contaminación eventual que podría aparecer. Los medios de cultivo deben contener nitrógeno, fósforo, oligoelementos y vitaminas, para así evitar deficiencia de nutrientes en el desarrollo de las fases microscópicas. Las más comunes para el cultivo de algas de huiro son los medios Provasoli y F/2 (Contreras-Porcía et al., 2025)

Se recomienda durante los cambios de agua y limpieza de los cultivos, observar en microscopio el desarrollo de las fases microscópicas, en los portaobjetos indicados anteriormente. Aquí los indicadores a observar son la germinación de las esporas, luego la diferenciación en gametofitos femeninos y masculinos, y formación de primeras plántulas microscópicas. Entre 15 a 30 días se pueden identificar las primeras plántulas. Dependiendo del tamaño de las plántulas, se definirá el inicio de las actividades de recuperación o repoblamiento en el ambiente natural previamente determinado.

Se ha evidenciado que la tasa de crecimiento, en comparación con otros cultivos de macroalgas es mayor. Un estudio realizado en la región de Moquegua, en Perú, señala que al cabo de 140 días de cultivo, se obtuvo un crecimiento diario de 5,91%, lo que corresponde a un valor mayor al registrado para otros cultivos de algas, por ejemplo, *Durvillaea antarctica*, con un crecimiento diario de 3.10%, (Lope Sosa, 2021) mientras que *Macrocystis pyrifera* obtiene tasas de crecimiento entre 2 y 3% cuando se cultiva en efluentes de salmones en jaulas en Chile (Campos, 2017).

2.3.4 Etapa IV: Traslado de las algas desde el laboratorio al mar

Para que el cultivo desarrollado en laboratorio sea un éxito a la hora de repoblar la zona costera, se recomienda siempre hacer una aclimatación previa desde el laboratorio al mar (Paredes-Mella et al., 2024). Las nuevas plántulas se ven enfrentadas a factores bióticos importantes, como la presencia de otras especies, otras algas con crecimiento más rápido que podrían significar competencia. También a la presión de invertebrados como caracoles, erizos. El objetivo de esta etapa es hacer una “transición” es decir una etapa intermedia entre el laboratorio y el mar, con el fin de que las plántulas se adecuen al ambiente diferente del laboratorio, disminuyendo el estrés.

Esta etapa de transición y aclimatación debiera realizarse en acuarios o estanques con flujo de agua y aire constantes. Aquí las plántulas están sujetas a condiciones de temperatura y luz más acorde a su próximo hábitat. Esta etapa podría durar entre 10 a 15 días. Es en este periodo donde en paralelo se realiza un trabajo coordinado para identificar las características físicas del lugar donde se poblará con la macroalga (en línea con la información que se recopila siguiendo las sugerencias del punto 2.3.1), y los materiales necesarios para la instalación. Esto, con el objetivo de optimizar el tiempo de trabajo en un ambiente dinámico, asegurando una adecuada y exitosa instalación. En este periodo, se realiza un trabajo de coordinación e identificación de las características físicas del lugar donde se repoblará, junto con la programación de instalación de los sustratos con plántulas (número por metro cuadrado entre sustratos, cantidad a repoblar, entre otros), procurando un trabajo eficaz en la zona costera. Así, cuando esté todo preparado y listo para ser instalado en el mar, se podrá instalar de forma eficaz y asegurando un mejor porcentaje de éxito en el repoblamiento. Se recomienda que se prepare una gran cantidad de sustratos con plántulas de modo de buscar aumentar el éxito en el repoblamiento; la experiencia de laboratorio indica que

plántulas de mayor tamaño tienen mayor probabilidad de mantenerse en ambiente marino y crecer (Contreras-Porcía et al., 2025).

2.3.5 Etapa V: Censos visuales en ecosistemas submareales

Como ya se vio, el Huiro palo crece en ambientes submareales. Por tanto, para evaluar la efectividad en el repoblamiento es necesario obtener una lista de especies que se encuentren en el sitio de trabajo. Los censos visuales están descritos conforme a la metodología estandarizada Reef Life Survey (RLS, www.reeflifesurvey.com). La unidad básica de trabajo para el monitoreo submareal consiste en utilizar una transecta de 50 metros de largo. El censo visual caracteriza las comunidades marinas a través de tres métodos de estudio. Cada uno de los métodos se enfoca en obtener registros de diferentes grupos taxonómicos conformados por las algas y los invertebrados sésiles, los invertebrados móviles y los peces. Es importante mencionar que el censo visual debe ser realizado por al menos 2 buzos certificados (Contreras-Porcía et al., 2025).

Evaluación Comunidad de Algas e invertebrados sésiles: Aquí se disponen a lo largo de la línea de transecto, 20 cuadrantes de 50x50, cada uno separado por 2,5 metros los cuales deben ser fotografiados a una distancia no menor a 50cm del fondo.

Evaluación Comunidad de invertebrados móviles: En este procedimiento se realiza contabilizando los organismos con un tamaño mayor a 2,5 cm que se encuentren dentro del área conformado por el ancho de un metro a cada lado del transecto de 50m de largo. Es decir 100m².

Evaluación Comunidad de peces: Esto se realiza contando y estimando el tamaño de todos los peces de un tamaño mayor a 2,5 cm los cuales se encuentren dentro del área conformada por el ancho de cinco metros a cada lado del transecto de 50 m de largo, es decir 500 m².

2.3.6 Etapa VI: Instalación en áreas seleccionadas

Según SERNAPESCA, y tal como se indicó en la sección 2.1, cada AMERB cuenta con 22 hectáreas aproximadamente; de éstas, el 50% se puede utilizar para sistemas de cultivos. Por lo tanto, se cuentan con 11 hectáreas por cada AMERB (Kitzing, 2020). En consecuencia, para aprovechar al máximo estas 11 hectáreas, y al verificar que sistema de cultivo sería el más exitoso, se consideró el cultivo tipo long line. Aquí, y tal como se detalló en la sección 1.4 las algas son instaladas sobre una línea madre suspendida mediante el empleo de sistemas de flotación. Posterior a 4 meses de crecimiento, las algas presentan estructuras reproductivas, las cuales liberan esporas y conformarán un nuevo conjunto de individuos de la especie. Figura 08

Las algas son instaladas sobre una línea madre suspendida mediante el empleo de sistemas de flotación (Boya), las cuales son dispuestas dependiendo de la carga productiva. La línea de siembra se sostiene a través de diferentes sistemas de fondeo en función de las condiciones oceanográficas del sitio de trabajo, con el fin de evitar que sea arrastrada por la corriente. Esta debe estar instalada a una distancia de 2 a 3 metros del fondo rocoso. Posterior a 4 meses de crecimiento las algas presentan estructuras reproductivas, las cuales liberan esporas y conformarán entonces un nuevo conjunto de individuos o parche biológico de la especie (Contreras-Porcía et al., 2025).

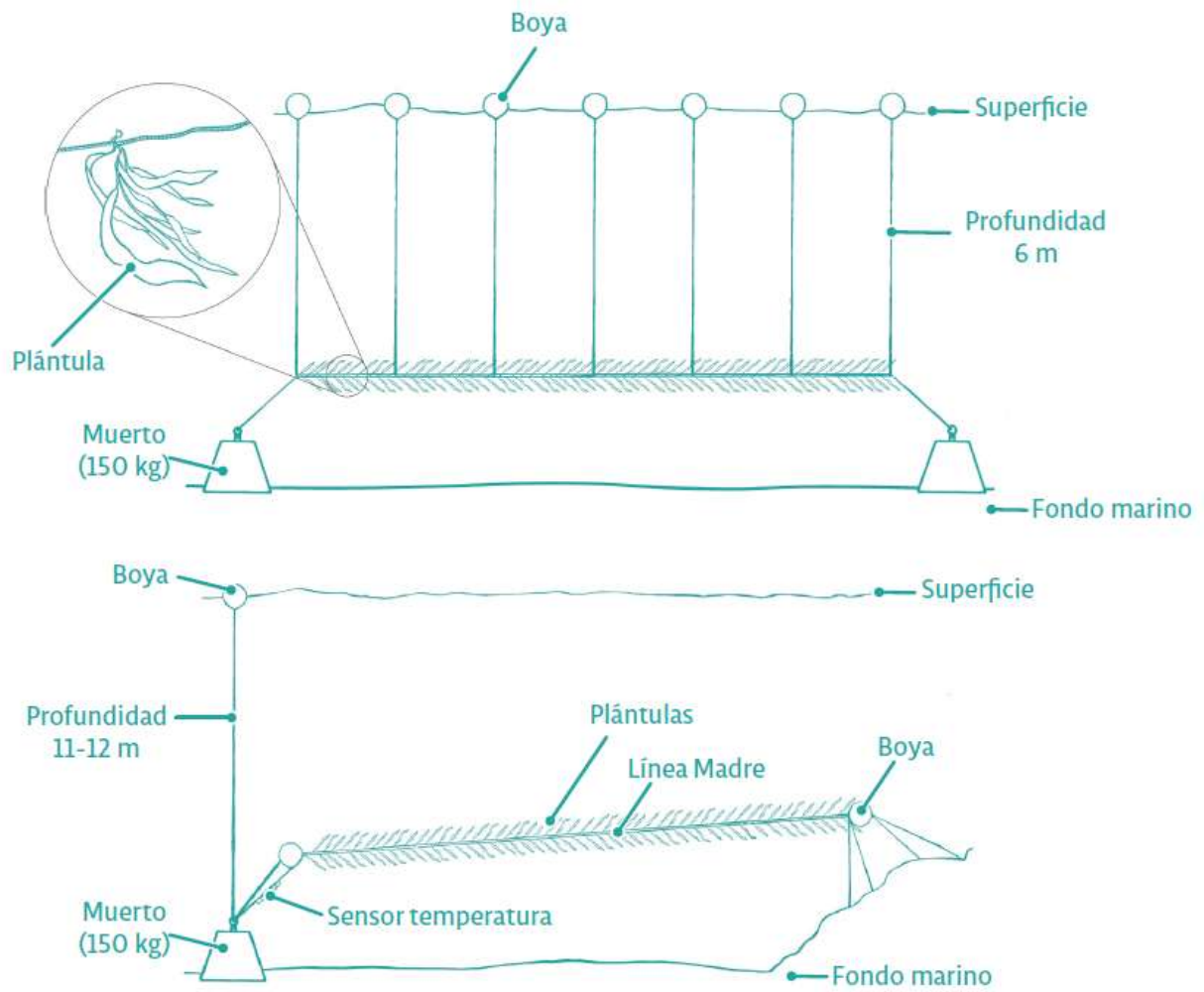


Figura 12: Sistema de cultivo tipo long line
 Fuente: manual de buenas prácticas para el repoblamiento de algas pardas, 2025

2.3.7 Etapa VII: Seguimiento al cultivo

El seguimiento o monitoreo, permite evaluar la efectividad una vez realizado el repoblamiento en nuestra área designada, y de esta manera garantizar la sostenibilidad de este a través del tiempo (Contreras-Porcía et al., 2025). Este debe considerar:

- i. Frecuencia de visitas
- ii. Inspección del estado de las estructuras
- iii. Recolección de datos

2.3.8 Etapa VIII: Instalación de algas a su lugar definitivo

Es importante señalar que la definición para avanzar desde la Etapa VII a la Etapa VIII, no depende exclusivamente de los meses calendario de crecimiento, sino también de criterios biológicos y estructurales (Eger et al., 2020; The Nature Conservancy & Kelp Forest Alliance, 2022). Es recomendable a lo menos 12 meses de cultivo estando en el mar, para que los cultivos alcancen un estado adulto funcional, antes de instalarlas en su lugar definitivo (Buschmann et al., 2014; IFOP, 2019; Eger et al., 2020).

Para la adhesión eficaz de esta macroalga a sus sustratos definitivos con el fin de asegurar su supervivencia, se debe tener en consideración distintos factores:

La textura del sustrato es un factor crítico; deben ser superficies rugosas dado que permite una unión óptima al aumentar el área disponible para el anclaje del disco de fijación del alga (Pinheiro et al., 2025).

Para instalar las algas en su sustrato y lugar definitivo, se tomó la metodología del proyecto “Operation Crayweed” en donde se restauró la especie *Phyllospora comosa* (conocida comúnmente como Crayweed) en Australia, en la costa de Sydney. Esta consiste en instalar mallas de plástico que se fijan directamente al sustrato rocoso mediante pernos o tornillos. Cabe señalar que, para esta técnica, los individuos deben ser utilizados en su edad adulta (como mínimo 18 meses desde su instalación en las cuerdas de la Etapa VI).

Otro aspecto para considerar es la infraestructura de plástico que se debe retirar del fondo marino cuando los adultos trasplantados se hayan reproducido.

2.4 Estimación de captura de carbono

Las macroalgas son responsables de la mitad de la captura de dióxido de carbono en ecosistemas marinos costeros a nivel global, y casi un tercio de todas macroalgas podría estar en Chile (Rehbein, Encalada, & Barbosa, 2020). A diferencia de las macroalgas, los manglares, praderas marinas y marismas son reconocidos como ecosistemas de carbono azul porque secuestran y también almacenan carbono en sí mismos (Lovelock & Duarte, 2019). Rehbein, Encalada y Barbosa (2020) proponen una hoja de ruta de 15 años para poner en valor el carbono azul en Chile como parte de la economía azul nacional. En ella, se señala que el nivel de reconocimiento de las macroalgas para su mitigación está recientemente reconocido por la ciencia. Sin embargo, Smale et al. (2016), señala que las poblaciones de *L. trabeculata* en Chile presentan la mayor captura de carbono documentada entre macroalgas (11,20 t C ha⁻¹), superando la captura de su congénere *L. berteriana* (4,78 t C ha⁻¹), según el conjunto de datos de Tala & Edding (2007). Aún supera las estimaciones para varios bosques alrededor del mundo. Los ejemplos incluyen bosques de *M. pyrifera* (2,73 t C ha⁻¹) y *Saccharina latissima* (2,34 t C ha⁻¹) entre otros.

2.5 Discusión de resultados

El cambio climático y la urbanización costera están aumentando el riesgo de erosión e inundaciones en las costas a nivel mundial (Kittinger y Ayers, 2010; Hinkel et al., 2014). Se prevé que el cambio climático futuro intensifique los factores que impulsan los riesgos costeros mediante el aumento del nivel del mar, una mayor altura de las olas y tormentas más extremas. (Young et al., 2011; IPCC, 2014).

De acuerdo con el Atlas de riesgos climáticos (Ministerio del Medio Ambiente, s. f.), desarrollado por el Centro de investigación del Clima y la Resiliencia (CR2) y el Centro de Cambio Global (CCG-Universidad Católica de Chile) con colaboración de otras instituciones, las playas motivo de este estudio (es decir, las playas de Coquimbo, La Serena, la Herradura y Guanaqueros) presentarían un riesgo de aumento de potencial erosivo. Todas estas playas se encuentran en la categoría “erosión” donde la tasa de cambio medida en m/año, tenemos -0,30 m/año para la conurbación de La Serena y Coquimbo; -0,45 m/año para La Herradura, para terminar con -0,30 m/año en Guanaqueros.

Para la amenaza, esta se encuentra dada por el cambio en la cota de inundación, por una combinación de aumento del nivel de mar y aumento de intensidad de las marejadas proyectados por el clima futuro (2035-2065, bajo un escenario RCP 8.5) con respecto al clima histórico (1980-2010), expresado en términos de probabilidad.

En cuanto a las amenazas naturales que afectan las áreas costeras, podemos señalar:

- Inundaciones y Riesgos Fluviales: La conurbación de La Serena-Coquimbo y su expansión urbana, ha dado como consecuencia un aumento en su vulnerabilidad frente a amenazas.
- Efectos Sísmicos y Tsunami: La costa de Coquimbo está en una zona de seismic gap.
- El terremoto y tsunami de septiembre de 2015 (8.4M) afectó la zona costera de la Región de Coquimbo, provocando una fuerte erosión en las playas arenosas y un retroceso de hasta 100 metros en la Bahía de Coquimbo y Tongoy. Sin embargo, se observó que a diciembre de 2015, las playas que habían sido destruidas por el tsunami se recuperaron de forma natural, lo que implica un superávit sedimentario proveniente de las cuencas.

Las olas son la principal fuerza responsable de la erosión costera y el transporte de sedimentos, y por tanto, de la modificación de la línea de costa (Holman, 1995). La protección costera contra la erosión y las inundaciones es un servicio ecosistémico importante que brindan los sistemas marinos con vegetación. Los bancos de algas marinas son una especie dominante que forma hábitat en todo el mundo. (Krumhansl et al., 2017); la presencia de vegetación costera como las algas, reduce significativamente la velocidad de la corriente de las olas. Las algas marinas tienen un efecto particularmente significativo en las corrientes costeras (Gaylord et al., 2007; Rosman et al., 2007), observándose una reducción de hasta tres veces en la velocidad de la corriente y tiempos de residencia en el agua de hasta una semana en grandes mantos de algas marinas. Son por tanto las macroalgas protagonistas que influyen de manera positiva en el transporte de sedimentos lo que contribuye a la estabilidad de la línea de la costa (Krumhansl et al., 2017).

Si bien los bancos de algas proporcionan un hábitat irremplazable para un gran número de especies marinas (Dayton, 1985), cada vez se realizan más esfuerzos para cuantificar y evaluar económicamente (Barbier et al., 2011) otros servicios ecosistémicos de valor socioeconómico para justificar su restauración. Simultáneamente, existe un creciente interés en el uso de sistemas naturales o restaurados para proporcionar una solución sostenible de defensa costera (Temmerman et al., 2013). En este contexto, resulta urgente y absolutamente necesario avanzar en estudios que permitan cuantificar de manera robusta los beneficios ecosistémicos asociados a estos sistemas incluyendo a su vez su contribución a la captura de carbono azul, con el fin de aumentar su atractivo y beneficios de este tipo de soluciones basadas en la naturaleza.

El huero palo, posee el rol de especie ingeniera y estructuradora, ya que es capaz de generar una coexistencia con distintos habitantes del mundo marino, entregándoles amortiguación contra las corrientes, albergue y protección. También proporciona el hábitat para reproducción de diferentes especies como lo es el tiburón chileno pintarroja (Ávila et al., 2010). Su versatilidad y gran distribución a lo largo de Chile la hacen una candidata óptima para su desarrollo. Además, *Lessonia trabeculata* es la macroalga con mayor capacidad de soporte a los cambios del Medio Ambiente, a diferencia de *Macrocystis pyrifera* y *Lessonia berteroana*, que experimentaron una pérdida completa de abundancia o en estado de frondosidad alterado en los veriles de menor profundidad (Centro de Investigación Aplicada del Mar, 2024).

2.5.1 Análisis de factibilidad del piloto de revegetación con *Lessonia trabeculata*

Conforme a la evidencia recopilada, esta sugiere que *Lessonia trabeculata* presenta características favorables para su utilización en iniciativas de revegetación, principalmente porque ya existen protocolos y/o directrices bastante documentadas para su cultivo en laboratorio y su posterior traslado y trasplante al mar, aunque a su vez, se presentan algunas limitaciones relevantes que se deben considerar.

2.5.1.1 Ventajas del piloto

En cuanto a las ventajas asociadas a implementar un piloto como el propuesto, se destaca el fomento al trabajo colaborativo entre los distintos actores que comprende, pues este tipo de iniciativas debe considerar la opinión y conocimiento que los locatarios, pobladores y pescadores que conocen del sector y del alga, por lo que contribuye a una valoración positiva entre distintos actores involucrados. (Contreras-Porcía et al., 2025).

Además, el Huiro Palo corresponde a un alga resistente frente a cambios del Medio Ambiente a diferencia de *M. Pyrifera* y *L. berteroana* (Centro de Investigación Aplicada del Mar, 2024)

Por otro lado, y en cuanto a los métodos para su instalación definitiva una vez se encuentra en cultivo en el medio marino, se han desarrollado diversas técnicas utilizadas y probadas en cultivos verticales. Entre ellas, destacan el prototipo de pieza incubadora de cemento (Kitzing, 2020) y la fijación directa en sustratos naturales protegidos con mallas. No obstante, estas metodologías se encuentran aún en etapas iniciales de desarrollo, las que se orientan a desarrollar cultivos para su extracción de manera sostenible, no siendo su principal objetivo el mantener estos cultivos de forma indefinida.

A su vez, restaurar bosques con *Lessonia trabeculata* sustenta conjuntos ecológicos esenciales, formando hábitats y proporcionando servicios y funciones ecosistémicas como fuentes de alimento y refugio para diferentes invertebrados y peces, reduciendo intensidad de las olas y el flujo de agua (Campos et al., 2021).

Finalmente, y como se señaló anteriormente, es una de las macroalgas con mayor captura de carbono documentada; en Chile ha alcanzado entre 10,15 y 12,25 toneladas de carbono por hectárea en el centro norte, para toneladas en pie (Cevallos et al., 2024).

2.5.1.2 Desventajas del piloto

Existen ciertas dificultades, que se han identificado, como lo son las escasas evaluaciones técnicas y ambientales de acciones de repoblamiento, junto con su efectividad probada para la especie *Lessonia trabeculata* (Contreras-Porcía et al., 2025). Además, esta alga solo se cultiva de forma experimental y no existe fiscalización de su repoblamiento. Por tanto, en la actualidad, no existe obligatoriedad para encontrar un método para su reforestación (Kitzing, 2020).

Por otro lado, las plántulas son vulnerables a la herbivoría por erizos negros y caracoles. En este sentido, persisten importantes lagunas de conocimiento sobre la capacidad y el plazo para restablecer la biomasa original de *L. trabeculata*, así como su fauna asociada (Bularz et al., 2022).

Para la última etapa del Piloto, no existía información en costas de Chile que permitieran sugerir una instalación a su lugar definitivo del Huiro Palo. Al utilizar la metodología utilizada para la especie *Phyllospora comosa* (Vergés et al., 2025), si bien ambas son algas pardas y esta alga de ejemplo tiene iniciativas de piloto que han dado resultados exitosos, no existe información suficiente disponible en la actualidad para poder determinar la efectividad de este método aplicado a *Lessonia trabeculata*.

3 ARTÍCULO

Evaluación de la factibilidad de un piloto de revegetación de *Lessonia trabeculata* para restaurar zonas costeras erosionadas de la Región de Coquimbo

Myriam Camila Elmes Muñoz^a

^a Graduado del programa de Magister en Gestión de la Sustentabilidad, Universidad de Desarrollo, m.elmesm@udd.cl

^b

Resumen:

Este trabajo presenta un piloto de revegetación, utilizando el alga Huiro Palo o *Lessonia trabeculata* para zonas costeras que han sufrido erosión producto de diversas causas, incluyendo el cambio climático y antrópicas. Esta solución basada en la naturaleza, ha demostrado una importante infraestructura natural, destacando un potencial relevante para la mitigación de la erosión como también en la protección de las costas. Por su parte las macroalgas en Chile poseen relevancia social, ecológica y económica. Es un componente clave de los ecosistemas marinos proporcionando hábitat, soporte, captura de carbono azul, además de sustentar una importante actividad extractiva. En la Región de Coquimbo, la explotación del Huiro Palo alcanza volúmenes significativos, siendo una fuente de sustento para miles de personas, lo que se aproxima a un estado de sobre explotación. En este contexto, este piloto de revegetación nace como una iniciativa aplicable y escalable, para hacer frente a esta inminente sobre explotación, identificando ventajas y desventajas. Se observa que un piloto de estas características es factible desde una mirada técnica ambiental y regulatoria.

Palabras clave: *Lessonia trabeculata*; Carbono azul; Restauración costera;

1. Introducción

Las macroalgas son un recurso de amplia distribución en el mundo, siendo beneficioso como fuente alimentaria como para diversos usos productivos y económicos. (Durán-Hernández et al., 2022). Ecológicamente hablando, las algas son organismos fotoautótrofos fundamentales para los sistemas acuáticos, sosteniendo redes tróficas que contribuyen a la producción de oxígeno y desempeñan un rol importante en el secuestro de carbono (Peña-Salamanca et al., 2005; Mediterranean Algae, 2022; Luo et al., 2024). Por otro lado, económicamente hablando, sus beneficios se han diversificado en los últimos años, pasando por el rubro alimentario, farmacéutico y químico, consolidando su valor estratégico alrededor del mundo.

Chile alberga una de las mas importantes extensiones de macroalgas del mundo, concentrando cerca de un tercio de la superficie global de macroalgas costeras (Rehbein et al., 2020). Estos ecosistemas, están dominadas por macroalgas del género *Macrocystis* y *Lessonia*, ambos capaces de formar hábitats biodiversos, amortiguando la energía del oleaje,

estabilizando sedimentos y contribuyendo significativamente a la fijación y almacenamiento de carbono azul (Chung et al., 2011; Manninen et al., 2016)

El Huiro palo destaca por su amplia distribución submareal, su relevancia ecológica como también una especie formadora de hábitat, y posee una alta importancia comercial como materia prima en la producción de alginatos. Su aumento en la demanda internacional, ha ocasionado una intensiva extracción especialmente en el norte de nuestro país, lo que ha generado una presión significativa en las poblaciones y en consecuencia los ecosistemas. Se asocia una disminución de estos bosques a la sobreexplotación pesquera como también a su lenta tasa de crecimiento y su baja capacidad de recuperación tras la cosecha (Bularz et al., 2022; Westermeier et al., 2017; Gouraguine et al., 2021). A su vez, esta degradación se ve acrecentada por factores como el cambio climático y la acción del ser humano, que intensifican la erosión costera, donde se encuentra bastante documentado la degradación de las costas en el norte de Chile. Al tener pérdida de bosques de macroalgas se reduce la capacidad natural de la costa para el oleaje favoreciendo el deterioro de playas, en específico en la

Región de Coquimbo se proyecta un aumento en la altura del oleaje en las próximas décadas. (Gobierno Regional de Coquimbo, 2025). Es por tanto, la restauración de algas pardas una estrategia clave para la adaptación al cambio climático, ya que estos ecosistemas pueden reducir la energía del oleaje entre un 30% a un 70% (Narayan et al., 2016; Morris et al., 2019).

El repoblamiento de macroalgas, definido como el conjunto de acciones orientadas a recuperar poblaciones hidrobiológicas dentro de su rango natural de distribución (Ley 18.892) surge como una herramienta fundamental para revertir la degradación de estos ecosistemas, como una solución basada en la naturaleza.

Este trabajo se orienta a analizar la dinámica costera en sectores de la Región de Coquimbo, proponiendo y diseñando un piloto de revegetación con *Lessonia trabeculata*, evaluando su factibilidad como estrategia de recuperación ecológica, protección costera y contribución al secuestro de carbono azul.

2. Metodología

Este documento posee un enfoque cuantitativo para la caracterización del entorno y la estimación de captura de carbono, asociado al alga *Lessonia trabeculata*, orientada a establecer soluciones sustentables y prácticas, con el objetivo de recuperar el área específica del estudio.

3. Discusión de resultados

Las costas de Coquimbo, que forman parte de este estudio (La Serena, Coquimbo, La Herradura y Guanaqueros), se identifica un aumento del potencial erosivo, con tasas negativas de retroceso de la línea de costa que varían entre $-0,30$ y $-0,45$ m/año (Ministerio del Medio Ambiente, s. f.). Esto, además del aumento proyectado en la cota de inundación, fomentan la necesidad en implementar estrategias que faciliten reducir la vulnerabilidad de estos sistemas ante amenazas climáticas

La presencia de vegetación como las algas reduce la velocidad de la corriente de las olas, observándose una reducción hasta 3 veces en la velocidad de la corriente (Krumhansl et al., 2017). Por su parte, *Lessonia trabeculata*, al ser una especie ingeniera y estructuradora, entrega amortiguación contra las corrientes marinas, albergue, y protección. Es una alga que posee gran distribución a lo largo de Chile, a su vez que posee mayor soporte a los cambios del Medio

Ambiente, a diferencia de *Macrocystis pyrifera* o *Lessonia berteroana*. Este proyecto fomenta la gobernanza colaborativa, como también utiliza técnicas de fijación innovadoras para dar solución y continuidad en el desarrollo de una especie (huirto palo) contribuyendo una solución basada en la naturaleza, replicable en gran parte del territorio nacional. A su vez, resulta necesario avanzar en la cuantificación específica y robusta de los beneficios económicos y ambientales de los bosques de *L.trabeculata*. Por otro lado, el piloto de revegetación resulta una herramienta innovadora, estructurada y replicable, que permitirá generar resultados apuntados a una nueva comunidad ecosistémica, captura de carbono azul, y reducción de erosión costera. Sus altos costos de implementación a largo plazo, son desafíos por desarrollar para nuevos estudios futuros.

4. Conclusiones

La revegetación con *Lessonia trabeculata* es una alternativa para restaurar ecosistemas. Su implementación requiere fortalecer evidencia científica sobre su efectividad. Los resultados destacan la importancia y necesidad para avanzar en soluciones de esta naturaleza que contribuyan al desarrollo sostenible de recursos marinos.

5. Referencias

- Bularz, B., Fernández, M., Subida, M. D., Wieters, E. A., & Pérez-Matus, A. (2022). Effects of harvesting on subtidal kelp forests (*Lessonia trabeculata*) in central Chile. *Ecosphere*, 13(3), e3958. <https://doi.org/10.1002/ecs2.3958>
- Chung, I. K., Beardall, J., Mehta, S., Sahoo, D., & Stojkovic, S. (2011). Using marine seaweed for carbon sequestration: A critical appraisal. *Journal of Applied Phycology*, 23(5), 877–886. <https://doi.org/10.1007/s10811-010-9604-1>
- Durán-Hernández, D., Uribe-Orozco, M. E., Mateo-Cid, L. E., & González-Mendoza, D. (2022). Potencial biotecnológico de las macroalgas en la agricultura. *Idesia*, 40(3), 81–88.

<https://doi.org/10.4067/S0718-34292022000300081>

Gouraguine, A., Moore, P., Burrows, M. T., Velasco, E., Ariz, L., Figueroa-Fábrega, L., Muñoz-Cordovez, R., Fernández-Cisternas, I., Smale, D. A., & Pérez-Matus, A. (2021). The intensity of kelp harvesting shapes the population structure of the foundation species *Lessonia trabeculata* along the Chilean coastline. *Marine Biology*, 168, Article 66. <https://doi.org/10.1007/s00227-021-03870-7>

Luo, H., Li, J., Xie, S., & Yang, Y. (2024). Understanding and estimating the role of large-scale seaweed cultivation for carbon sequestration on a global scale over the past two decades. *Science of the Total Environment*, 955, 176966. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176966>

Manninen, K., Huttunen, S., Seppälä, J., Laitinen, J., & Spilling, K. (2016). Resource recycling with algal cultivation: Environmental and social perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 124, 495–505. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.109>

Mediterranean Algae. (2022, 7 de noviembre). La importancia de las algas marinas en el ecosistema marino. <https://www.mediterraneanalgae.com/la-importancia-de-las-algas-marinas-en-el-ecosistema-marino/>

Ministerio del Medio Ambiente, 2019. Volumen 4: Vulnerabilidad y riesgos en playas, en "Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile", Documento preparado por: Winckler, P.; Contreras-López, M.; Vicuña, S.; Larraguibel, C.; Mora, J.; Esparza, C.; Salcedo, J.; Gelcich, S.; Fariña, J. M.; Martínez, C.; Agredano, R.; Melo, O.; Bambach, N.; Morales, D., Marinkovic, C.; Pica, A., Santiago, Chile.

Peña-Salamanca, E. J., Palacios Peñaranda, M. L., & Ospina-Álvarez, N. (2005). *Algas como indicadores de contaminación*. Editorial Universidad del Valle.

https://www.researchgate.net/publication/257297411_Algas_como_indicadores_de_contaminacion

Rehbein, J. A., Encalada, G., & Barbosa, J. (2020). Propuesta de hoja de ruta para el carbono azul en Chile (Reporte técnico). Banco Mundial. <https://chile.un.org/sites/default/files/2020-11/Propuesta-de-Hoja-de-Ruta-para-el-Carbono-Azul-en-Chile.pdf>

Westermeier, R., Murúa, P., Patiño, D. J., & Müller, D. G. (2017). Population biology and long-term mariculture studies in the brown alga *Lessonia trabeculata* in Atacama, Chile. *Journal of Applied Phycology*, 29(5), 2267–2275. <https://doi.org/10.1007/s10811-016-1019-9>

4 CONCLUSIONES GENERALES

A medida que el cambio climático impulsa un mayor riesgo de peligros costeros para una población costera en proliferación, existe un creciente cuerpo de evidencia que respalda el uso de infraestructura natural y basada en la naturaleza como herramientas de defensa costera sostenibles y rentables (p. ej., Shepard et al., 2011; Ferrario et al., 2014; Narayan et al., 2016; Reguero et al., 2018). Sin embargo, para los bancos de algas a nivel mundial, hay escasez de datos que respalden su recomendación como infraestructura natural de protección costera certera (Morris et al., 2020).

Chile se posiciona como uno de los principales exportadores de huiro del mundo proveniente de poblaciones naturales, sustentando directa e indirectamente a miles de personas y generando ingresos superiores a los US\$ 100 millones anuales (Contreras-Porcía et al., 2025).. En los últimos 10 años (2013–2023), se extrajeron un promedio 471.989 toneladas anuales de algas pardas. De estas, aproximadamente el 60% provienen de los reportes de desembarques portuarios (283.075 tons/ año), el 4,9% de las Áreas de Manejo (AMERBs) (23.146 tons/año), y el 35,1% de zonas libres mediante recolección directa (165.768 tons/año). Es por tanto, que el manejo apropiado de bosques de grandes algas pardas, como *Lessonia trabeculata*, puede tener importantes impactos, tanto económicos como ecológicos.

Las macroalgas en Chile tienen gran importancia ecológica, económica y social. Son la base de numerosas tramas tróficas y cumplen una amplia gama de funciones ecológicas en las comunidades marinas, proporcionando estructura y diversidad de hábitats (Velez, 2017). Su extracción constituye una importante fuente de ingresos para muchas personas en Chile y la pesquería de algas pardas es particularmente relevante. En la región de Coquimbo se extraen cerca de 38.000 toneladas de macroalgas al año (2016), de las cuales el huiro constituye alrededor del 88%. Su recolección comienza en los años 60, y hoy cerca del 90% de la actividad productiva

está concentrada en el norte de Chile. Se ha estimado que, para esta zona del país, cerca de 11 mil personas dependen directa o indirectamente de la extracción de algas como los huiros. (Macaya Horta, 2022). Para el caso del huiro palo, la evolución de los desembarques en las áreas de libre acceso sigue en aumento, sugiriendo que la pesquería se encuentra en el límite del estado de plena explotación, con riesgo de encontrarse en estado de sobre-explotación (SUBPESCA, 2017). Si bien en las Playas de La Serena-Coquimbo, Guanaqueros y La Herradura no existen AMERB vigentes, este piloto puede ser replicable en las zonas de estudio.

A su vez, recientes estudios han demostrado que los bosques de algas están disminuyendo rápidamente en Chile (Krumhansl et al., 2016). Es evidente que la extracción de algas adultas como método de cosecha debe revisarse y es urgente impulsar estrategias de gestión (Campos et al., 2021). La presión pesquera aumenta únicamente en función de las fluctuaciones del precio de los alginatos de algas, lo que incrementa el esfuerzo pesquero. El aumento del esfuerzo pesquero conlleva un mayor volumen de extracción, lo que genera una mayor presión sobre las poblaciones locales de algas (Campos et al., 2021). La cosecha de algas puede provocar cambios duraderos (al menos tres años) debido a la falta de recuperación y a la alteración de las comunidades asociadas, lo que influye en diferentes componentes del ecosistema (Bularz et al., 2022). La cosecha por motivos económicos de la macroalga *Lessonia trabeculata* genera un disturbio, alterando su estabilidad ecológica, transformando un bosque submarino complejo ecosistémicamente, en un área degradada cuya recuperación funcional es incierta en el corto plazo (Bularz et al., 2022). Es por esto una solución urgente, desarrollar y promover repoblamiento de algas en nuestras costas, con el fin de revertir esta situación en el corto y mediano plazo.

Durante las últimas tres décadas, se han implementado diversas estrategias para restaurar las poblaciones de algas marinas. Las tasas de éxito han variado, pero se

ha demostrado la viabilidad biológica de dichas estrategias para varias especies. Sin embargo, es necesario lograr mejoras tecnológicas para pasar de experimentos piloto a pequeña escala a estrategias de repoblación rentables, fáciles de transferir a las comunidades de pescadores y a otros usuarios finales, escalables a las condiciones del campo marino y socio ecológicamente sostenibles (Oyarzo-Miranda et al., 2023).

En cuanto al potencial secuestro de carbono (carbono azul) de las algas marinas, este es un tema que ha ganado atención recientemente. Existe una falta de métodos y sistemas de evaluación estandarizados y científicamente rigurosos para determinar el valor del secuestro de carbono, que también es un problema común en la investigación internacional sobre secuestro de carbono, como se ve en las estimaciones ampliamente variables para el almacenamiento de carbono en la vegetación forestal. (Luo et al., 2024). Estas discrepancias se deben principalmente a diferencias en los métodos de medición y las fuentes de datos. Es evidente que se necesita más investigación para estimar con precisión y rigor científico el efecto de las algas como sumidero de carbono. Las estimaciones actuales del sumidero de carbono marino suelen estar subestimadas, basándose en la distribución global del ciclo del carbono. (Luo et al., 2024). Es entonces imperioso acelerar las acciones del gobierno y la sociedad civil asociadas al manejo sustentable de otros ecosistemas marinos como las macroalgas; Escocia es una referencia relevante para Chile por el parecido biogeográfico: Con financiamiento estatal, llevan ocho años trabajando con doce proyectos de doctorado y tres postdoctorados enfocados en cuantificar los inventarios y flujos de carbono marino para alimentar un catastro nacional de carbono azul. (Rehbein, Encalada, & Barbosa, 2020)

4.1 Propuesta para trabajos futuros

Se ha identificado una brecha significativa en la investigación sobre los servicios ecosistémicos que brindan los bancos de algas. Es necesario comprender mejor qué especies de algas pueden brindar protección costera y en qué condiciones. Esta investigación futura es esencial para proporcionar a los gestores y responsables políticos información práctica sobre soluciones sostenibles y rentables para la defensa costera ante el cambio climático. (Morris et al., 2019)

Por otro lado, para el alga *Lessonia trabeculata*, se detectó un desconocimiento de los aspectos poblacionales y sus comunidades asociadas; en consecuencia, esta alga ha sido mal gestionada sin un enfoque específico en esta especie. La ausencia de evaluaciones periódicas de la dinámica poblacional de *Lessonia trabeculata* y sus comunidades asociadas podría comprometer seriamente la sostenibilidad a largo plazo de la pesquería de este recurso (Campos et al., 2021). Además, aún no se han evaluado las consecuencias de los altos niveles de explotación de esta alga, ni sus efectos en los ecosistemas que sustenta; por lo tanto, se requiere un monitoreo regular de las poblaciones de algas pardas, incluyendo otras especies de importancia comercial que las habitan, las comunidades bentónicas de retención y la evaluación de los ecosistemas. (Campos et al., 2021).

5 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Arif, S., Graham, N. A. J., Wilson, S., & MacNeil, M. A. (2022). Causal drivers of climate-mediated coral reef regime shifts. *Ecosphere*, 13(3), e3956. <https://doi.org/10.1002/ecs2.3956>

Ávila, M., Merino, C., Guissen, K., & Piel, M. I. (2010). Manual de cultivo de macroalgas pardas: Desde el laboratorio al océano. Universidad Arturo Prat. https://sembrandoelmar.cl/web/wp-content/uploads/2021/02/manual_cultivo_pardas_UArturo_Pratt.pdf

Barbier, E. B., Hacker, S. D., Kennedy, C., Koch, E. W., Stier, A. C., & Silliman, B. R. (2011). The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs*, 81(2), 169–193. <https://doi.org/10.1890/10-1510.1>

Berríos, M., Pacheco, A., & Olivares, J. (1985). Análisis de refracción de olas en sistema de bahías de la IV Región (Informe final). Departamento de Biología Marina, Universidad del Norte, Sede Coquimbo.

Bularz, B., Fernández, M., Subida, M. D., Wieters, E. A., & Pérez-Matus, A. (2022). Effects of harvesting on subtidal kelp forests (*Lessonia trabeculata*) in central Chile. *Ecosphere*, 13(3), e3958. <https://doi.org/10.1002/ecs2.3958>

Buschmann, A. H., Camus, C., Infante, J., Neori, A., Israel, A., Hernández-González, M. C., Pereda, S. V., & Gómez-Pinchetti, J. L. (2014). The status of kelp exploitation and marine agronomy, with emphasis on *Lessonia trabeculata*. *Journal of Applied Phycology*, 26(6), 2345–2355. <https://doi.org/10.1007/s10811-014-0304-8>

Campos, L., Berríos, F., Oses, R., González, J. E., & Bonnail, E. (2021). Unravelling *Lessonia trabeculata* management in coastal areas of the Atacama Region of northern Chile through a DPSIR approach: Insights for sustainable plans. *Marine Policy*, 133, 104737. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2021.104737>

Campos, P. W. (2017). Determinación de los impactos asociados a los cultivos de macroalgas y moluscos filtradores y su interacción con cultivos salmónidos (Informe FIP-2014-45). Fondo de Investigación Pesquera.

Centro de Investigación Aplicada del Mar. (2024). Informe técnico 3: Monitoreo de praderas de macroalgas – Febrero 2024: El Niño 2023–2024 (Informe técnico). CIAM. https://www.ciamchile.cl/wp-content/uploads/2024/03/Monitoreo-3-Praderas-Macroalgas_Febrero-2024_El-Nino-2023-24.CIAM_.pdf

Cevallos, B., Aller-Rojas, O., Aponte, H., & Moreno, B. (2024). Carbon capture by stipitate kelp forests in Peru: Insights from population assessment of *Lessonia trabeculata* at 15° S. *Journal of Applied Phycology*, 36(5), 3057–3076. <https://doi.org/10.1007/s10811-024-03269-z>

Chung, I. K., Beardall, J., Mehta, S., Sahoo, D., & Stojkovic, S. (2011). Using marine seaweed for carbon sequestration: A critical appraisal. *Journal of Applied Phycology*, 23(5), 877–886. <https://doi.org/10.1007/s10811-010-9604-1>

Contreras-Porcía, L., Broitman, B., Meynard, A., Pinilla-Rojas, B., Bulboa, C., Tala, F., Otaíza, R., Pedrini, C., Rosson, A., Núñez, M., Vera-Duarte, J., Véliz, G., Oyarzún, F. X., González, D., Lagos, N., Mora, A. M., & Segovia, N. I. (2025). Manual de buenas prácticas para el repoblamiento de algas pardas (72 pp.). Santiago de Chile. https://www.broitman.cl/PUBS/ManualRepoblamiento_paginaindividual_final03062025.pd

Dayton, P. K. (1985). Ecology of kelp communities. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 16, 215–245. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.16.110185.001243>

Durán-Hernández, D., Uribe-Orozco, M. E., Mateo-Cid, L. E., & González-Mendoza, D. (2022). Potencial biotecnológico de las macroalgas en la agricultura. *Idesia*, 40(3), 81–88. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292022000300081>

Eger, A. M., Marzinelli, E. M., Baes, R., Blain, C., Brown, M. P., Ceccarelli, D. M., ... Layton, C. (2020). Kelp forest restoration: A global review. *BioScience*, 70(4), 271–282. <https://doi.org/10.1093/biosci/biaa023>

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2010). Gestión del riesgo de sequía y otros eventos climáticos extremos en Chile. FAO. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/f6f53c29-53ef-46a9-aa93-42503700487c/content>

Gaylord, B., Rosman, J. H., Reed, D. C., Jaffee, B. E., & Arkema, K. K. (2007). Spatial patterns of flow and their modification within and around a giant kelp forest. *Limnology and Oceanography*, 52(5), 1838–1852. <https://doi.org/10.4319/lo.2007.52.5.1838>

Gobierno Regional de Coquimbo. (2024, 28 de marzo). Plan de Acción Regional de Cambio Climático (PARCC) – Expediente público. <https://www.gorecoquimbo.cl/parcc/gorecoquimbo/2024-03-28/101226.html>

Gouraguine, A., Moore, P., Burrows, M. T., Velasco, E., Ariz, L., Figueroa-Fábrega, L., Muñoz-Cordovez, R., Fernández-Cisternas, I., Smale, D. A., & Pérez-Matus, A. (2021). The intensity of kelp harvesting shapes the population structure of the foundation species *Lessonia trabeculata* along the Chilean coastline. *Marine Biology*, 168, Article 66. <https://doi.org/10.1007/s00227-021-03870-7>

Guajardo Rubilar, E. A. (2024). Modelamiento de la variabilidad espaciotemporal de bosques submarinos a lo largo de la costa del sistema de corrientes de Humboldt (Tesis doctoral). Pontificia Universidad Católica de Chile. <https://repositorio.uc.cl/handle/11534/104046>

Holman, R. A. (1995). Nearshore processes. *Reviews of Geophysics*, 33(4), 1237–1247. <https://doi.org/10.1029/95RG02818>

Instituto de Fomento Pesquero. (2019, diciembre). Cultivo de macroalgas: Diversificación de la acuicultura de pequeña escala en Chile (Manual técnico). Instituto de Fomento Pesquero. https://www.ifop.cl/wp-content/contenidos/uploads/manuales/Manual_Macroalgas_IFOP.pdf

Kittinger, J. N., & Ayers, A. L. (2010). Shoreline armoring, risk management, and coastal resilience under rising seas. *Coastal Management*, 38(6), 634–653. <https://doi.org/10.1080/08920753.2010.526122>

Kitzing, J. (2020). Huireros: Sistema de control extractivo y reforestación del alga huiro palo mediante un cultivo vertical orquestado por una pieza incubadora (Memoria para optar al título profesional). Universidad del Desarrollo. <https://repositorio.udd.cl/items/b1461912-9ab4-495c-9fcc-92070b411be0>

Krumhansl, K. A., Bergman, J. N., & Salomon, A. K. (2017). Assessing the ecosystem-level consequences of a small-scale artisanal kelp fishery within the context of climate change. *Ecological Applications*, 27(3), 799–813. <https://doi.org/10.1002/eap.1484>

Lindsey, R. (2022, 29 de septiembre). Understanding blue carbon. Climate.gov. <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/understanding-blue-carbon>

Lope Sosa, F. (2021). Cultivo de *Lessonia trabeculata* (Villouta & Santelices 1986) en medio controlado y ambiente natural en la región Moquegua (Tesis de maestría). Universidad Nacional del Altiplano. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/17229>

Lovelock, C. E., & Duarte, C. M. (2019). Dimensions of blue carbon and emerging perspectives. *Biology Letters*, 15, 20180781. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2018.0781>

Luo, H., Li, J., Xie, S., & Yang, Y. (2024). Understanding and estimating the role of large-scale seaweed cultivation for carbon sequestration on a global scale over the past two decades. *Science of the Total Environment*, 955, 176966. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176966>

Macaya Horta, E. (2022, 4 de febrero). Las algas y su importancia social, ecológica y económica. Museo de Historia Natural de Concepción. <https://www.mhnconcepcion.gob.cl/noticias/las-algas-y-su-importancia-social-ecologica-y-economica>

Manninen, K., Huttunen, S., Seppälä, J., Laitinen, J., & Spilling, K. (2016). Resource recycling with algal cultivation: Environmental and social perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 124, 495–505. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.109>

Mansilla, A., & Alveal, K. (2004). Generalidades sobre las macroalgas. En C. W. I. Camilo (Ed.), *Biología marina y oceanografía: Conceptos y procesos* (Tomo 1, pp. 349–359). Trama Impresores S.A.

Márquez, R., & Vásquez, J. A. (2020). El extractivismo de las algas pardas en el norte de Chile. *European Review of Latin American and Caribbean Studies*, (110), 101–121. <https://doi.org/10.32992/erlacs.10590>

Martínez, C., Cienfuegos, R., Barragán, J. M., Navarrete, S., Hidalgo, R., Arenas, F., & Fuentes, L. (Eds.). (2022). *Hacia una Ley de Costas en Chile: Bases para una gestión integrada de áreas costeras* (GeoLibro N.º 30). Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Maza, M., Lara, J. L., Losada, I. J., Ondiviela, B., Trinogga, J., & Bouma, T. J. (2015). Large-scale 3-D experiments of wave and current interaction with real vegetation. Part 2: Experimental analysis. *Coastal Engineering*, 106, 73–86. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.09.010>

Mediterranean Algae. (2022, 7 de noviembre). La importancia de las algas marinas en el ecosistema marino. <https://www.mediterraneanalgae.com/la-importancia-de-las-algas-marinas-en-el-ecosistema-marino/>

Mentaschi, L., Vousedoukas, M. I., Pekel, J.-F., Voukouvalas, E., & Feyen, L. (2018). Global long-term observations of coastal erosion and accretion. *Scientific Reports*, 8, Article 12876. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30904-w>

Ministerio del Medio Ambiente, 2019. Volumen 4: Vulnerabilidad y riesgos en playas, en “Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile”, Documento preparado por: Winckler, P.; Contreras-López, M.; Vicuña, S.; Larraguibel, C.; Mora, J.; Esparza, C.; Salcedo, J.; Gelcich, S.; Fariña, J. M.; Martínez, C.; Agredano, R.; Melo, O.; Bambach, N.; Morales, D., Marinkovic, C.; Pica, A., Santiago, Chile.

Mora-Soto, A., et al. (2020). A high-resolution global map of giant kelp (*Macrocystis pyrifera*) forests and intertidal green algae (*Ulvophyceae*) with Sentinel-2 imagery. *Remote Sensing*, 12, 694. <https://doi.org/10.3390/rs12040694>

Morris, R. L., Graham, T. D. J., Kelvin, J., Ghisalberti, M., & Swearer, S. E. (2019). Kelp beds as coastal protection: Wave attenuation of *Ecklonia radiata* in a shallow coastal bay. *Annals of Botany*, 125(2), 235–246. <https://doi.org/10.1093/aob/mcz127>

Narayan, S., Beck, M. W., Reguero, B. G., Losada, I. J., van Wesenbeeck, B., Pontee, N., Sanchirico, J. N., Ingram, J. C., Lange, G.-M., & Burks-Copes, K. A. (2016). The effectiveness, costs and coastal protection benefits of natural and nature-based defences. *Nature Climate Change*, 6(7), 1–6. <https://doi.org/10.1038/nclimate2944>

Oyarzo-Miranda, C., Otaíza, R. D., Bellorín, A., Vega, J. M. A., Tala, F., Lagos, N. A., Oyarzún, F. X., Estévez, R. A., Latorre-Padilla, N., Mora Tapia, A. M., Figueroa-Fábrega, L., Jara-Yáñez, R., Bulboa, C., & Contreras-Porcía, L. (2023). Seaweed restocking along

the Chilean coast: History, present, and inspiring recommendations for sustainability. *Frontiers in Marine Science*, 9, 1062481. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1062481>

Pacheco, A. S., González, M. T., Bremner, J., Oliva, M., Heilmayer, O., Laudien, J., & Riascos, J. (2011). Functional diversity of marine macrobenthic communities from sublittoral soft-sediment habitats off northern Chile. *Helgoland Marine Research*, 65, 413–424. <https://doi.org/10.1007/s10152-010-0238-8>

Paredes-Mella, J., Oroz, L., Gutiérrez, A., Zúñiga, A., Martínez, C., Villarroel, A., Varela, D., & Henríquez-Antipa, L. (2024). Experimental transplantation of *Durvillaea incurvata* in southern Chile: Implication for its restocking. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 52(1), 174–180. <http://dx.doi.org/10.3856/vol52-issue1-fulltext-3097>

Peña-Salamanca, E. J., Palacios Peñaranda, M. L., & Ospina-Álvarez, N. (2005). Algas como indicadores de contaminación. Editorial Universidad del Valle. https://www.researchgate.net/publication/257297411_Algas_como_indicadores_de_contaminacion

Pérez Araneda, K., Zevallos, S., Arakaki, N., Gamarra, A. A., Carbajal, P., & Tellier, F. (2021). *Lessonia berteriana* en Perú: Comprobación de la identidad de la especie y diversidad genética en el borde norte de distribución. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 55(3), 270–276. <https://doi.org/10.22370/rbmo.2020.55.3.2591>

Pinheiro, T. F., Chemello, S., Sousa-Pinto, I., & Pereira, T. R. (2025). Laying the foundation: How substrate choice influences kelp reforestation success. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(7), 1274. <https://doi.org/10.3390/jmse13071274>

Rehbein, J. A., Encalada, G., & Barbosa, J. (2020). Propuesta de hoja de ruta para el carbono azul en Chile (Reporte técnico). Banco Mundial. <https://chile.un.org/sites/default/files/2020-11/Propuesta-de-Hoja-de-Ruta-para-el-Carbono-Azul-en-Chile.pdf>

Saavedra, S., Henríquez, L., Leal, P., Galleguillos, F., Cook, S., & Cárcamo, F. (2019). Cultivo de macroalgas: Diversificación de la acuicultura de pequeña escala en Chile (Manual técnico). Instituto de Fomento Pesquero.

Servicio de Evaluación Ambiental. (2015, 28 de mayo). Capítulo 3. Línea base VF. Ministerio del Medio Ambiente, Gobierno de Chile. https://seia.sea.gob.cl/archivos/2015/05/28/Capitulo_3_Linea_Base_VF.pdf

Shepard, C. C., Crain, C. M., & Beck, M. W. (2011). The protective role of coastal marshes: A systematic review and meta-analysis. *PLoS ONE*, 6(11), e27374. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0027374>

Smale, D. A., Burrows, M., Evans, A. J., King, N., Sayer, M. D., Yunnice, A. L., & Moore, P. J. (2016). Linking environmental variables with regional-scale variability in ecological structure and standing stock of carbon within UK kelp forests. *Marine Ecology Progress Series*, 542, 79–95. <https://doi.org/10.3354/meps1154>

Subsecretaría de Pesca y Acuicultura. (s. f.). Alga huiro palo. Gobierno de Chile. <https://www.subpesca.cl/portal/sitio/Institucionalidad/Comites-de-manejo/Comite-de-manejo-de-los-recursos-bentonicos-de-la-region-de-Arica-y-Parinacota/85024:Alga-Huiro-palo>

Tala, F., Edding, M., & Vásquez, J. (2004). Aspects of the reproductive phenology of *Lessonia trabeculata* (Laminariales: Phaeophyceae) from three populations in northern Chile. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 38(2), 255–266. <https://doi.org/10.1080/00288330.2004.9517271>

Temmerman, S., Meire, P., Bouma, T. J., Herman, P. M. J., Ysebaert, T., & De Vriend, H. J. (2013). Ecosystem-based coastal defence in the face of global change. *Nature*, 504(7478), 79–83. <https://doi.org/10.1038/nature12859>

UNESCO. (2012). Coastal management approaches for sea level related hazards: Case studies and good practices. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. (2012). Report of the 36th session of the Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC-UNESCO). UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000378081>

United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (s. f.). Coastal erosion and accretion (GH0405). UNDRR Hazard Information Profiles. <https://www.undrr.org/understanding-disaster-risk/terminology/hips/gh0405>

Universidad Arturo Prat. (2021, febrero). Manual de cultivo de macroalgas pardas: Desde el laboratorio al océano (Manual técnico). Sembrando el Mar. https://sembrandoelmar.cl/web/wp-content/uploads/2021/02/manual_cultivo_pardas_UArturo_Prato.pdf

Vásquez Castro, J. (1989). Estructura y organización de huirales submareales de *Lessonia trabeculata* (Tesis de pregrado). Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/187029>

Vélez, A. (2019). Catastro de recursos marinos presentes en la Región de Coquimbo, 2017 (Informe técnico). Fundación Chile. <https://fch.cl/wp-content/uploads/2019/12/informe-catastro-recursos-marinos.pdf>

Vergés, A., Cruz, D., Langley, M., Wood, G., Bolton, D., Campbell, A. H., Coleman, M. A., Steinberg, P. D., & Marzinelli, E. M. (2025). *Operation Crayweed: Restoring Sydney's missing underwater forests and engaging local communities*. En *Kelp Restoration Guidebook: Lessons learned from kelp restoration projects around the world* (Proyecto 02). Kelp Forest Alliance. <https://kelpforestalliance.com/kelp-restoration-guidebook/ch-09-9-0-restoration-in-practice-projects-from-around-the-world-summary/ch-11-p-2-operation-crayweed>

Villagrán Colina, J. (2007). *Dinámica costera en el sistema de bahías comprendidas entre Ensenada Los Choros y Bahía Tongoy* (Tesis de pregrado). Universidad de Chile.

https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/101118/0627_villagran_c.pdf

Westermeier, R., Murúa, P., Patiño, D. J., & Müller, D. G. (2017). Population biology and long-term mariculture studies in the brown alga *Lessonia trabeculata* in Atacama, Chile. *Journal of Applied Phycology*, 29(5), 2267–2275. <https://doi.org/10.1007/s10811-016-1019-9>

Young, I. R., Zieger, S., & Babanin, A. V. (2011). Global trends in wind speed and wave height. *Science*, 332(6028), 451–455. <https://doi.org/10.1126/science.1197219>

6 ANEXO: REPORTE DE PLAGIO