

A diver is seen swimming through a dark underwater cave. The cave walls are covered in vibrant, colorful coral and sea anemones in shades of green, yellow, and red. Light filters in from an opening at the top, creating a dramatic, high-contrast scene. The diver is positioned in the center, looking towards the light.

**Especies foráneas en el mar de Chile.
Primer caso reportado de cultivo de un alga exótica,
un contexto emergente en la investigación criminalística
medio ambiental**

*Alien Species in the Chilean Sea. First Reported Case of Exotic Algae Cultivation,
an Emerging Context in Environmental Criminal Investigation*

Rodrigo López Leal

RESUMEN

La invasión de ecosistemas por especies exóticas se sitúa en el segundo lugar entre las causas que más merman la biodiversidad a nivel planetario, solo antecedido por la pérdida del hábitat. Antiguamente, grandes barreras naturales eran límites a la propagación de especies. Hoy, esos límites han permeado frente al extensivo tránsito comercial global y tasas de inmigración históricas. La propagación descontrolada, la importación de nuevas enfermedades y la alteración del ecosistema receptor, son algunas consecuencias de la internación de estas especies exóticas. El año 2021, la Policía de Investigaciones de Chile recibió una orden de investigar por el supuesto cultivo, en la costa del sur de Chile, de un alga exótica. Esta revisión bibliográfica recopila antecedentes relevantes de las posibles consecuencias de la introducción en mar abierto de este tipo de algas, tanto para los ecosistemas del mar chileno, como también las posibles mermas económicas y para la salud de las personas.

ABSTRACT

The invasion of ecosystems by alien exotic species is in second place among the causes that most reduce biodiversity on a planetary level, only preceded by the loss of habitat. In early times, great natural barriers were limits to the propagation of species around the world. Today those limits have permeated in the face of extensive global commercial traffic and historic immigration rates. The uncontrolled spread, the importation of new diseases and the alteration of the receiving ecosystem are some of the consequences of the entry of these exotic species. In 2021, the Chilean Investigative Police received an order to investigate the alleged cultivation, on the coast of southern Chile, of an exotic alga. This bibliographic review compiles relevant information on the possible consequences of the introduction of this type of algae into the open sea, both for the ecosystems of the Chilean sea, as well as possible economic losses and for people's health.

PALABRAS CLAVE;

Especies invasoras, saccharina japónica, protección del medioambiente, acuicultura, algas exóticas, delitos medio ambientales.

KEYWORDS;

Alien species, saccharina japónica, environmental protection, aquaculture, exotic algae, environmental crimes.

Fecha de recepción: 15 de septiembre de 2022.

Fecha de aceptación: 30 de octubre de 2022.



Introducción

La globalización y el extensivo uso de rutas marítimas, terrestres y aéreas, trae como consecuencia la transferencia de especies animales, vegetales, hongos, insectos, bacterias y virus, con el potencial de generar un efecto negativo en la estabilidad tanto del ecosistema de origen como también en el receptor.

Motivos tan diversos como la extracción de productos activos, industria alimenticia, ornamentación, animales de compañía, control de plagas, etc., movilizan especies de un ecosistema a otro. Muchas veces sin prever que el descuido, mal manejo o accidentes, llevan a que estas especies sean liberadas en nuevos ecosistemas. Estas especies, ahora exótica, tienen la capacidad de asentarse, competir, depredar y hasta desplazar especies endémicas. Es así como, la invasión de ecosistemas por especies exóticas, es la segunda causa de pérdida de biodiversidad, solo antecedido por la pérdida de hábitat a nivel planetario, principalmente impulsado por la expansión humana. La introducción de especies foráneas ha llevado a la extinción de muchas especies y pone en peligro de conservación a un sin número adicional de especies. Muchos casos alrededor del planeta han sido reportados (Lowe y otros, 2000; Ballard y otros, 2016; Courchamp y otros, 2003).

El asentamiento y proliferación de una especie exótica en un ecosistema está determinado por diversos factores. Muchos de estos factores son específicos de la especie invasora y del ecosistema receptor en cuestión. Entre ellos podemos encontrar, la semejanza entre el ecosistema de origen y destino, condiciones de propagación, presencia o no de depredadores, presencia de plagas, presión de propágulos (cantidad de individuos de la especie exótica que invade), entre otras.

En respuesta a la identificación de la presencia de una especie invasora exótica, las principales medidas que deben ser tomadas son: contención, control, erradicación, restauración y monitoreo.

Hoy la normativa del Estado de Chile, respecto a la gestión de especies exóticas invasoras, es insuficiente, ya que ha sido orientada principalmente al tratamiento de plagas, desde un enfoque sanitario y de sus efectos negativos sobre los sectores productivos, con normas que tienden al resguardo de estos. Sin embargo, autoridades competentes como Subsecretaría de Pesca y Acuicultura (Subpesca), Servicio Nacional de Aduanas, Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura (Sernapesca) y el Servicio Nacional de Agrícola y Ganadero (SAG), intervienen solicitando documentación para autorizar la internación y cultivo de especies exóticas.

El servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas, SBAP, fue creado por el proyecto de ley 20.417 de 2010, aprobado por el Senado el año 2019, el cual se encuentra en tramitación final para su aprobación como ley de la República. Este servicio, el cual será dependiente del Ministerio del Medio Ambiente, busca cubrir los vacíos de gestión existentes respecto a la conservación de la biodiversidad de Chile. Entre las contribuciones más importantes, este servicio plantea consolidar la gestión de todas las áreas protegidas del país en un único Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP), incluyendo todos los ecosistemas, tanto marino como terrestre, público o privado.

Actualmente, las áreas protegidas se encuentran dispersas en cinco ministerios distintos:

- El Ministerio de Agricultura administra áreas protegidas a través de Conaf.
- El Ministerio de Economía administra los parques y reservas marinas a través de la

Subsecretaría de Pesca y el Servicio Nacional de Pesca.

- El Ministerio de las Culturas gestiona los santuarios de la naturaleza a través del Consejo de Monumentos Nacionales.
- El Ministerio de Bienes Nacionales administra los bienes nacionales protegidos.
- El Ministerio del Medio Ambiente administra las áreas marinas costero-protegidas de múltiples usos, custodia los santuarios de la naturaleza y supervigila todo el sistema.¹

¿Qué ocurre cuando una especie es introducida dentro de un ecosistema que no le pertenece?

Una posible respuesta ya se vive en nuestro territorio nacional. En 1946, la liberación de veinte castores desde la porción argentina de Tierra del Fuego, fue suficiente para que, en este caso, estos animales se adaptaran y profleraran sin control. El castor, especie nativa de norte América, hoy se ha distribuido ampliamente en Tierra del Fuego, la totalidad de la isla Navarino y archipiélago aledaño, alcanzando una población estimada el año 2006, de 61.000 ejemplares. Esta especie ha sido declarada como dañina o perjudicial en la ley de caza 19.473, debido al alto impacto que ha generado en la estructura de bosques ribereños de *Nothofagus*, alteración de la función y estructura de los ecosistemas dulceacuicolas, daños económicos por destrucción de caminos y puentes, e inundaciones que afectan la actividad ganadera y forestal. (Shewes y otros, 2006; Molina y otros, 2018).

A principios del año 2021, la Policía de Investigaciones de Chile recibió una orden de investigar por el supuesto cultivo en la costa del sur de Chile de una macroalga introducida de la especie *Saccharina japonica*, cuyo cultivo es altamente cotizado en los mercados internacionales.

A partir de esta denuncia, oficiales policiales, peritos y profesionales aunaron esfuerzos para contribuir al esclarecimiento de la investigación y más aún, tomar las medidas necesarias.

Esta revisión bibliográfica busca recopilar antecedentes relevantes y posibles consecuencias de la introducción en mar abierto de este tipo de especies, tanto para los ecosistemas del mar chileno, como también las posibles mermas económicas y para la salud de las personas.

Operaciones realizadas

A principios del año 2021, oficiales de la Brigada Investigadora de Delitos contra el Medio Ambiente y Patrimonio Cultural (Bidema) Valdivia, en su rol institucional de investigar los delitos que atentan contra la salud pública, el medio ambiente y el patrimonio cultural, reciben orden de investigar por el cultivo irregular de un tipo de alga en la costa de la región de Los Lagos.

Es así que, oficiales de la Bidema Valdivia, en conjunto con peritos del Laboratorio de Criminalística Puerto Montt, buzos criminalistas del equipo de Operaciones Subacuáticas, EOS, de la Policía de Investigaciones de Chile, además de autoridad marítima, concurrieron al sitio del suceso en las costas de la región de los Lagos. Luego de la inspección preliminar, tomaron conocimiento de la existencia de al menos 10 líneas de cultivo de macroalgas. Buzos criminalistas, de acuerdo a su experiencia en el levantamiento de evidencia subacuática, procedieron a la toma de muestras del alga en cuestión. La evidencia, luego de ser fijada, embalada adecuadamente en bolsas de plástico y preservadas a baja temperatura, fue derivada a una autoridad competente para la realización de análisis macroscópico y también genético,

¹ *Especies exóticas invasoras en Chile*. Ministerio del Medio Ambiente Chile. Disponible en <https://bit.ly/3Vj25rz>.

con la intención de establecer el tipo de especie de alga correspondiente a la evidencia dubitada y de esta forma contribuir a la investigación.

Los análisis realizados resultaron en la confirmación de las sospechas, la cual corresponde a una macroalga exótica del tipo laminaria, nativa en las costas de Japón (Saccharina japónica), además el representante legal de la empresa en cuestión, no contaba con autorización de internación ni tampoco para su cultivo, encontrándose en una situación irregular.²

En adelante, en esta revisión se procede a profundizar en las características del alga, cualidades, potencial económico e impacto de su cultivo como especie exótica en las costas del sur de Chile.

Características generales del alga

La macroalga Saccharina japónica es conocida por una variedad de nombres alrededor del mundo, entre ellos encontramos:

- **Chino:** kunbu, Hai Dai, Hai Tai, Kunpu.
- **Japónes:** Makombu, Shinori-Kombu, Hababiro-Kombu, Oki-Kombu, Uchi Kombu, Moto-Kombu, Minmaya-Kombu, Ebisume, Kombu, Hirome, Umiyama-Kombu, Hoiro-kombu.
- **Coreano:** Hae tae, Tasima.
- **Inglés:** kelp, Brown algae, Royal Kombu.
- **Español:** alga parda, laminaria del Japón. (Tseng, 1987)

Es relevante conocer la clasificación taxonómica de esta especie, ya que esto determinará, entre varios aspectos, su capacidad de crecimiento, características reproductivas y la posible transferencia de material genético entre especies exóticas y nativas.

En su clasificación taxonómica la macroalga *Saccharina japónica* se clasifica como: Reino, *Chromista*; Filum, *Ochrophyta*; Clase, *Phaeophycidae*; Subclase, *Fucophycidae*; Orden, *Laminariales*; Familia, *Laminariaceae*; Género, *Saccharina*; Especie, *Japónica* (Tseng, 1987).

El orden *Laminariales*, comúnmente denominadas solo como algas (*Kelp*), incluye las algas más grandes del mundo, algunas alcanzando los 50 metros de largo. Este grupo de algas se encuentra presente en las costas de aguas frías desde el ártico hasta la antártica y su tamaño y biomasa, capaz de formar verdaderos bosques, establece un hábitat nativo único y esencial para cientos de especies. En su gran mayoría las *Laminariales* están presentes en el hemisferio norte, agrupando alrededor de 100 especies, en particular en el océano pacífico norte. En el hemisferio sur, las *Laminariales* se limitan a alrededor de ocho especies, dos de ellas de la familia *Laminariaceae*, tres *Macrocystic*, la especie introducida *Undaria pinnatifida*, *Ecklonia* y *Lessonia*. Entre los miembros del orden *Laminariales* existe una gran diversidad de morfología, sin embargo, comparten un sistema de anclaje al sustrato común, además de compartir otras características morfológicas y fisiológicas.

Dentro del género *Saccharina* se han identificado 16 especies alrededor del mundo. En este grupo encontramos la especie *japónica*.³

² Para conocer más sobre el rol y el trabajo del equipo de operaciones subacuáticas de la Policía de Investigaciones de Chile, revisar Verdugo, 2021.

³ Disponible en <https://bit.ly/3jokTHK>.

En las costas de Chile no hay presencia nativa de la especie *Saccharina* japónica, por lo que su presencia en estas latitudes puede considerarse como especie introducida y/o especie exótica. Por otra parte, en las costas de Chile (continental) existe presencia de algas nativas taxonómicamente cercanas a *Saccharina* japónica. *Macrocystis pyrifera*, más conocida como huiro, es miembro de la familia *Laminariaceae*. Otros tipos de huiros como *Lessonia spicata* (huiro negro) o *Lessonia trabeculata* (huiro palo) son parte del orden *Laminariales*. El cochayuyo, *Durvillaea* antártica, es parte de la misma subclase *Fucophycidae*, pero fuera del orden *Laminariales*. Esta similitud taxonómica tiene relevancia en el impacto genético-ecológico que el cultivo de especies exóticas pueda tener sobre las algas nativas, como también a la susceptibilidad a enfermedades de especies nativas que coexisten con especies exóticas, esto más adelante será analizado en detalle.

Características reproductivas

Dentro de las características que definen al orden *Laminariales* encontramos que comparten una reproducción sexual (unión de gametos femeninos y masculinos) y un ciclo de vida Haplodiplóntico heteromórfico, donde se alterna una generación macroscópica diploide (esporofito adulto) con una etapa microscópica haploide (gametofito). Ambas generaciones son independientes una de otra. El esporofito adulto es de gran tamaño (> 2 metros). En la época fértil, los esporofitos adultos presentan áreas de coloración oscura, donde se encuentran los soros (meiosporangio). Desde esos soros se liberan las esporas (microscópicas y haploides) al medio, que después de asentarse al sustrato, dan origen a gametofitos femeninos y masculinos fértiles (microscópicos y haploides) que mediante el proceso de fecundación originan un esporofito (microscópico y diploide) que posteriormente crece hasta alcanzar el tamaño adulto, completando el ciclo de vida (**figura 1**). Muchas especies del orden *Laminariales* tiene un ciclo de vida anual, sin embargo, algunas como *Laminaria hyperborea* ha sido visto por vivir hasta veinte años (Lane y otros, 2006; Saavedra y otros, 2019).

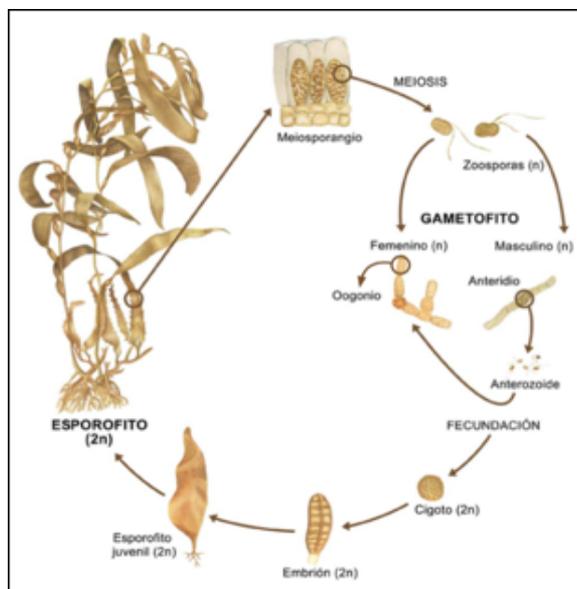


Figura 1. Ciclo de vida del orden *Laminariales*. Se caracteriza por poseer una fase macroscópica y una fase de generación de gametos femeninos y masculinos los que, en la etapa fértil, son liberados como esporas microscópicas. La fecundación que da lugar a la unión de la espora femenina y masculina genera el esporofito, que al crecer produce un nuevo organismo adulto fértil (Fuente: Saavedra y otros, 2019).

Ecosistema nativo y condiciones ambientales donde se desarrolla naturalmente

La laminaria del Japón se desarrolla naturalmente en zonas de aguas frío-templadas. Su disco adhesivo se fija firmemente a las rocas u otros substratos sólidos en la zona sublitoral. Su distribución en profundidad alcanza a unos 10 metros o más, dependiendo de la turbiedad del agua del mar. En la región Asia-Pacífico, la especie es nativa de las costas noroeste del Océano Pacífico. Se le encuentra a lo largo de la costa norte del Mar de Japón desde el norte de la Isla de Hokkaido y las regiones costeras cerca de las montañas Kinkazan de la Isla Honshu, a través de la cadena de las Islas Kuriles hasta la Península Yamchatka en la Federación Rusa, a lo largo de la costa norte del Mar Okhotsk, al sur de la Isla Sakhalin y al sudeste hasta el Canal Tartar, cerca de Wonsan, en la Península Coreana. Como se mencionó antes, la Laminaria del Japón es una especie de aguas frío-empladas, así, cuando la temperatura del agua del mar alcanza sobre 23 °C, la mayoría de sus hojas se descomponen y solo la parte basal es retenida para pasar el verano. Cuando la temperatura del agua del mar disminuye bajo los 23 °C, la parte basal de la lámina reasume el crecimiento hasta el otoño y forma esporangios; después de liberar las zoosporas, la lámina vieja muere. Así, el lapso natural de vida de la laminaria del Japón es dos años a través de dos inviernos; sin embargo, en condiciones de acuicultura, la laminaria se cría solo a través de un invierno (Tseng, 1987). Entre los factores fisicoquímicos críticos para el crecimiento de *Laminaria japonica* tenemos la temperatura del agua y la concentración de nitrógeno. La temperatura del agua en su ecosistema nativo fluctúa entre 5 y 10 °C, y en condiciones experimentales se ha observado un crecimiento óptimo hasta 13 °C. En relación al nitrógeno, la concentración calculada para su crecimiento óptimo es 20 mg/m³, pudiendo crecer de forma óptima a concentraciones superiores a esta (Tseng, 1987).

China es por lejos el mayor productor, pero la laminaria del Japón no es nativa ahí. Se propagó a las costas chinas desde Japón en 1927, estableciéndose primero sobre rocas sublitorales en Dalian en la costa norte del Mar Amarillo en la Provincia de Liaoning. Los arrecifes de agua fría en Dalian, proporcionó condiciones ideales de crecimiento (Tseng, 1987; Hu y otros, 2021).

Aunque esta especie de alga no existe en Chile, cabe hacer notar que las zonas costeras submareales de la zona Sur-Austral de Chile presentan excelentes condiciones para su cultivo comercial, debido a su similitud con la principal zona de cultivo en Japón, las costas de Hokkaido, donde es nativa y esta especie es cultivada.⁴

Condiciones de cultivo y utilización comercial

Por interés comercial, *Saccharina japonica* y los distintos tipos de huiro y el cochayuyo, son clasificados dentro del grupo de las macroalgas alginófitas. Esto, debido al alto contenido de un polisacárido llamado ácido algínico, altamente demandado en la industria alimenticia, cosméticos, producción de detergentes y tintas textiles entre otros usos.

En 2014, aproximadamente un tercio de la producción global de algas marinas se generó a partir de dos especies, *Laminaria japonica* y *Undaria pinnatifida*, con China y Corea como los principales países productores de estas algas. La vasta mayoría de la cosecha global de algas proviene de la producción en granjas marinas con menos de un 2% del total proveniente de la cosecha de alga silvestre (FAO, 2018).

⁴ Investigación y desarrollo de tecnología para el cultivo de laminaria japónica en la macro-región sur-austral de Chile. Disponible en <https://bit.ly/3PLvubS>.

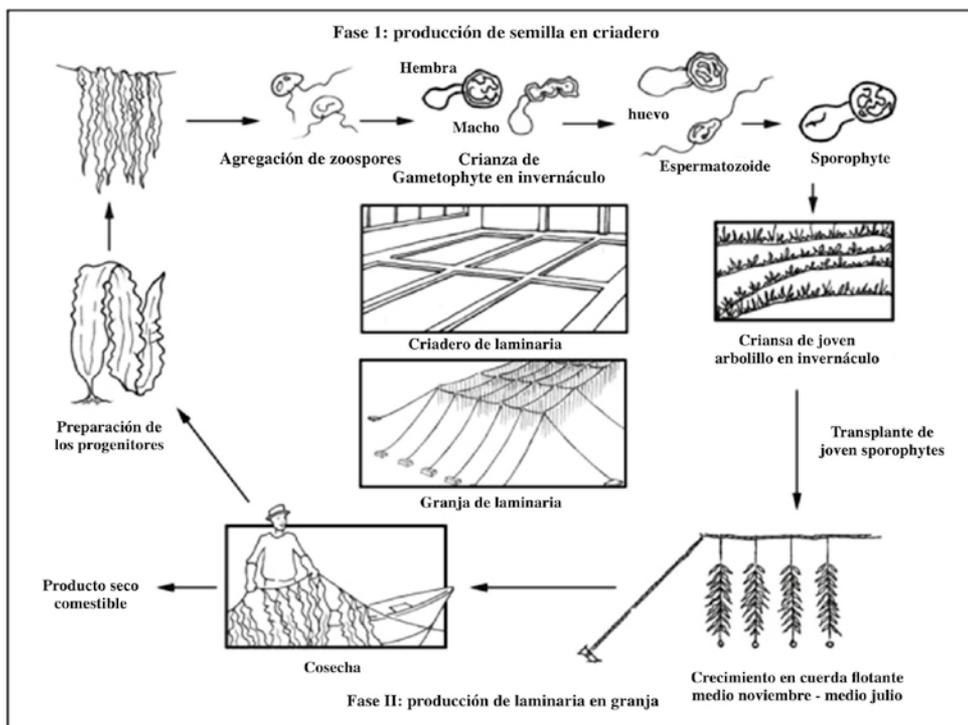


Figura 2. Se describe el método chino de cultivo de especies de algas pardas (*Laminarias*), método utilizado para *Saccharina japónica*, *Saccharina latissima* y *Undaria pinnatifida*, Tseng, 1987; Scoggan y otros, 1989; FAO, 2022 (Fuente: Campbell y otros, 2019).

La producción del alga comienza en el laboratorio durante otoño, cuando el material reproductivo de la planta o gametofitos son inducidos a ser liberados mediante estímulos de temperatura o cambios osmóticos. Luego, los gametofitos son cultivados en recipientes para inducir la fecundación, son llevados a piletas o piscinas de crecimiento hasta el estado de plántula, antes de ser transferidos al mar. Alternativamente, los esporofitos pueden ser sembrados directamente sobre un sustrato, con la ayuda de un aglutinante, antes de ser desplegados en el mar. Posteriormente, el material sembrado, sobre cuerdas, redes o cualquier material rugoso resistente, es suspendido de un amarre a una profundidad donde la intensidad de la luz solar sea óptima para el crecimiento del alga. Dependiendo de las características del agua esto puede ir de una profundidad de 1 a 5 metros. La cosecha se realiza a finales de primavera o comienzos de verano donde el alga es extraída y llevada a la costa para su procesamiento. El sistema de cultivo puede ser con líneas horizontales, verticales o un sistema alternativo denominado el sistema chino (figuras 2, 3, 4 y 5) (Tseng, 1987).

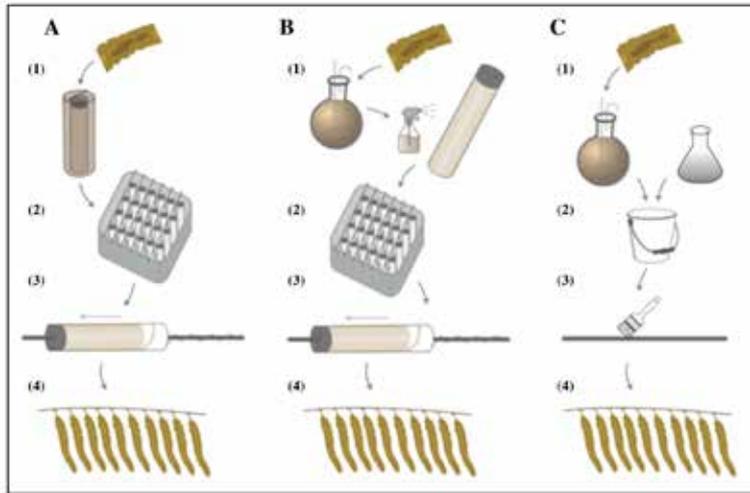


Figura 3. Tipos de Propagación del alga in vitro y fijación al sustrato, previo a su crecimiento en aguas abiertas (Fuente: Visch, 2019).

Respecto a la Figura 3, en **A**, se estimula la liberación de gametos y se facilita la fijación directamente al sustrato (paso 1). Luego se estimula el crecimiento in vitro hasta obtener plántulas (paso 2), se fija el sustrato al soporte (paso 3), el cual finalmente es desplegado en aguas abiertas hasta la cosecha (paso 4). En **B**, la liberación de los gametos es estimulada en un recipiente, luego estos gametos son fijados a un sustrato con la ayuda de un atomizador y un aglomerante que facilita la adhesión de los gametos al sustrato (paso 1). Luego (pasos 2 a 4) son idénticos al procedimiento en **A**. En **C**, al igual que en **B**, se estimula la liberación de gametos en un recipiente (paso 1), estos se mezclan con un aglomerante (paso 2), que facilita la fecundación y posterior adhesión a un sustrato que a la vez funciona como soporte (paso 3), el cual finalmente es desplegado en aguas abiertas hasta la cosecha (paso 4)

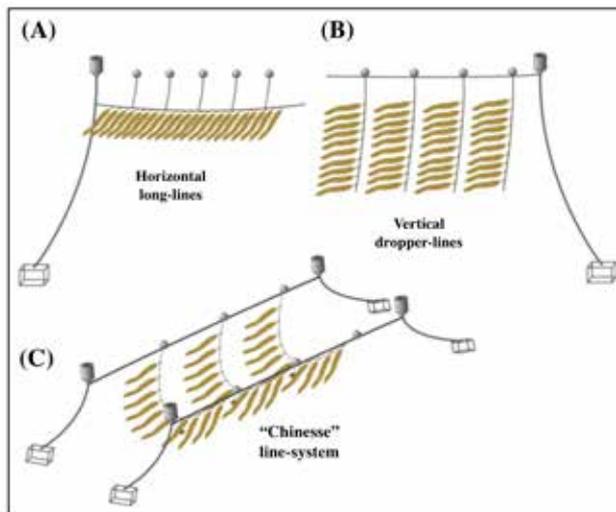


Figura 4. Representación esquemática de métodos de cultivo en aguas abiertas. A, muestra cultivo en líneas horizontales. B, despliegue de cultivo en líneas verticales. C, el sistema chino (Fuente: Visch, 2019).

A nivel comercial, esta alga es una excelente fuente de yodo, por lo que en países como China, Japón y Corea es consumida como alimento suplementario. Además, se emplea en la industria para la producción de manitol, agar, alginatos, yodo y harinas. Cabe destacar que es un excelente alimento para abalones. En China, la mayor parte de la producción de *Laminaria japonica* es secada y consumida directamente como sopas, ensaladas, té y secundariamente es utilizada para preparar aliños.



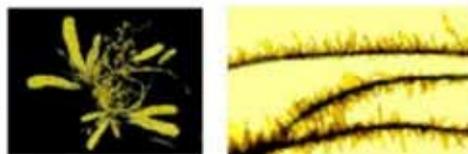
Laminaria japonica



Invernadero para germinación de esporas



Cortinas de plántulas en un tanque de crianza



Plantulas jóvenes fijadas a sustratos (cuerdas de fibra de palma)



Granjeros manejando las laminarias cultivadas



Método de procesamiento por secado al sol

Figura 5. Galería de imágenes presentando la morfología de *Saccharina japonica*, arriba izquierda (Fuente: FAO, 2022).

La figura muestra un invernadero aislado para la germinación de esporas utilizadas para el cultivo extensivo de esta alga en aguas abiertas (arriba derecha). La etapa de crecimiento temprana también se realiza en tanques aislados (centro izquierda). También se muestran las plántulas ya fijadas al sustrato (centro derecha). Abajo izquierda y derecha se muestran las laminarias ya adultas siendo trabajadas por granjeros y el método de secado por exposición al sol luego de la cosecha.

Antecedentes de modificaciones genéticas

Las cruza, hibridaciones y endogamia de diversas Laminarias, entre ellas la especie *japónica*, han sido comunes, generando ventajas para su cultivo intensivo/extensivo y, por consiguiente, grandes beneficios económicos. De esta forma, ha sido posible enriquecer compuestos de interés, aumentar resistencia a condiciones climáticas y a enfermedades, entre otras características (Tseng, 1987; Wang y otros, 2020). La gran mayoría de estas nuevas variantes han sido obtenidas por hibridación entre distintas variedades de *Saccharina japónica*. Otras variedades de *Saccharina japónica*, aunque en mucha menor medida, han sido generadas por tratamiento con rayos X, esto con el objetivo de provocar mutaciones genéticas al azar, desde las cuales se obtienen variantes fenotípicas que luego son seleccionadas en condiciones de laboratorio, de acuerdo a las características buscadas. De esta técnica derivaron las variantes 1170, *Zaohoucheng* y *Dongfang* número 2. Dentro de las características fenotípicas buscadas están, tamaño, velocidad de crecimiento, resistencia a altas temperaturas del agua o contenido de yodo. Esta selección de variedades genéticas en *Saccharina japónica* se ha realizado desde los años cincuenta. El investigador más productivo en este tipo de investigación revolucionaria para el cultivo de algas, el Doctor Fang (1912–1985), quien lideró la creación y funcionamiento del Instituto de Oceanología, actualmente parte de la Universidad China del Océano (*Ocean University of China*). La hibridación entre variantes seleccionadas cambia la frecuencia de alelos ya existentes, y no crea nuevos alelos, siendo más amigable con el medio ambiente con respecto a variantes experimentales genéticamente modificadas (Hu y otros, 2021). El Doctor Fang y sus colegas diseñaron varias estrategias experimentales para mejorar genéticamente variedades de *Saccharina japónica* a través de la hibridación de esporas de esta especie proveniente de distintas latitudes, sumado a consecutivas cruza endogámicas con la finalidad de estabilizar estas nuevas variantes o cultivares. De esta forma, fue posible obtener nuevos cultivares de alto rendimiento y resistencia como *Rongfu*, *Ailunawan*, *Sanhai* y *Dongfang* número 6 y número 7. A la fecha, cerca de 20 nuevas variedades de *Saccharina japónica* han sido desarrolladas en China, permitiendo la expansión de los cultivos de algas a 451 km² en las costa norte y sur de China al 2018 (Hu y otros, 2021).

Es relevante mencionar que ha sido descrito que, en ambientes naturales, la familia *Laminariaceae* experimenta entrecruzamientos intra e inter-especies, haciendo posible la transmisión de nuevos alelos o características fenotípicas desde especies exóticas a *Laminariales* nativas (Hu y otros, 2021). En Chile, dentro de la familia *Laminariaceae* tenemos a *Macrocystis pyrifera* o huiro como un posible receptor o agente de entrecruzamiento genético con una especie exótica como *Saccharina japónica*.

Análisis moleculares basados en la técnica RAPD (*Random Amplified Polimorphic DNA* o fragmentos polimórficos amplificados al azar), permiten determinar la huella genética de las diferentes variedades de *Saccharinas* comúnmente cultivadas. Estos marcadores genéticos podrían discriminar entre 33 distintas especies de *Saccharinas* (Wang y otros, 2004). Esta técnica es de utilidad para determinar el origen de las variantes cultivadas y el posible entrecruzamiento genético con especies nativas.

Adicionalmente, la ingeniería genética en macroalgas, que se refiere a la edición genética sitio, dirigida para la obtención de variantes con características comerciales mejoradas, ha tenido enormes avances en los últimos años. Este tipo de estudios, se basan en el conocimiento acumulado de la edición genética en plantas terrestres. Dada la naturaleza de las macroalgas, los métodos que permiten la perforación de la pared celular, como el bombardeo de micropartículas han resultado efectivos, obteniendo transformación transiente de algas (no

transmiten modificaciones a la descendencia). Es importante mencionar que recientemente el genoma completo de *Saccharina japonica* ha sido secuenciado (Ye y otros, 2015), lo que se espera, acelere los avances de la investigación científica en esta área. El avance en esta área de la investigación científica en algas transgénicas, está aún en fase experimental y no existe información de su uso a nivel comercial o de su cultivo en aguas abiertas.

La manipulación genética o generación de organismos genéticamente modificados de especies marinas puede ser muy beneficioso en muchos aspectos, sin embargo, una serie de precauciones y resguardos deben ser considerados. Esto contemplan la amenaza a la biodiversidad, el flujo de información genética a especies silvestres y riesgo de resistencia son las principales preocupaciones sobre el uso de estos organismos genéticamente modificados.

Los sistemas de cultivo de algas silvestres convencionales no son aptos para el cultivo de algas genéticamente modificadas, es por esto que medidas de bioseguridad deben ser consideradas. En el presente, las algas transgénicas son cultivadas en el mar solo a nivel experimental en contenedores semiaislados y cosechadas antes de la maduración del esporangio para evitar su propagación (Qin y otros, 2005; Charrier y otros, 2015; Lin y Qin, 2014).

Problemáticas ambientales asociadas al cultivo

La acuicultura es una actividad que interactúa estrechamente con el medio ambiente natural, utilizando recursos e influyendo el entorno donde se localiza. En el océano y otras fuentes de agua, la columna de agua y los sedimentos corresponden a los entornos que son alterados por procesos productivos derivados de la acuicultura de peces, moluscos o algas. En la columna de agua, la eutroficación altera la composición fisicoquímica única del lugar, debido al enriquecimiento con nutrientes solubles como fósforo y nitrógeno, lo que puede desencadenar florecimientos algales potencialmente dañinos, tanto para los organismos silvestres, como para aquellos cultivados. La acumulación de materia orgánica en los sedimentos, producto de la actividad productiva u otros motivos, resulta en efectos ecosistémicos negativos, como consecuencia de la pérdida de oxígeno intersticial, donde este elemento es esencial para mantener los procesos biológicos y la diversidad ecológica del lugar.

La actividad productiva mediante acuicultura, la cual contempla el crecimiento de organismos a una alta densidad, muchas veces requiere para su óptimo crecimiento, la adición de sustancias ajenas al entorno natural, como la aplicación de nutrientes o fármacos que ayudan a asegurar un crecimiento a la mayor tasa posible.

En el caso específico del cultivo intensivo y extensivo de macroalgas en aguas abiertas, estos organismos al ser autótrofos producen su propio alimento a partir de compuestos inorgánicos encontrados en su entorno y generan un impacto mucho menor que, por ejemplo, el cultivo de peces que deben ser alimentados. Además, se ha observado experiencias de cultivos intensivos y extensivos de algas que han impactado positivamente en entornos naturales, previamente alterados por otras actividades productivas. Estos beneficios han sido tanto a nivel medio ambiental como también económicos. Se estima que las algas fijan cinco veces más CO₂ que plantas terrestres, traducándose en un impacto positivo directo en el control del calentamiento global, como también ayudando a paliar la acidificación de los océanos. Las macroalgas además fijan grandes cantidades de nitrógeno disuelto, contribuyendo a evitar procesos de eutroficación. Es así como en China, se ha visto que los «bosques» del alga parda *Laminaria*, tanto naturales como los de cultivo, generan beneficio ecológico, donde las plantas proveen nutrientes y capturan detritus, mejorando el crecimiento del plancton que

sustentan especies de pequeños invertebrados, que a su vez provee de alimento para peces y otros organismos, tales como erizos, abalones, y otras especies de organismos comercialmente importantes (Scoggan y otros, 1989).

En sus inicios, los cultivos desarrollados en localidades del sur de China mostraron alto rendimiento en producción de biomasa como consecuencia de niveles adecuados de nitrógeno en el agua de mar, elemento altamente requerido por *Laminaria*. Sin embargo, cultivos de *Laminaria* desarrollados en localidades del norte de China mostraron escasa producción, principalmente por la severa deficiencia de nitrógeno en esas localidades. Los principales elementos minerales requeridos para el crecimiento de la macroalga *Laminaria* son nitrógeno, fósforo y potasio y se ha demostrado experimentalmente que *Laminaria* requiere niveles de nitrógeno de alrededor de 20 mg/m³ durante la etapa de crecimiento rápido (Tseng, 1987). Un importante efecto positivo de la implementación de granjas de algas es el mantenimiento inalterado de la fuente natural de algas, donde se ha observado que su sobreexplotación produce un considerable impacto ecológico, social y económico (Buschmann y Camus, 2019).

En 1956, un experimento de fertilización a pequeña escala fue llevado a cabo sobre cultivos de *Laminaria* en regiones costeras de la zona norte del mar Amarillo, lo que resultó en un rendimiento en peso húmedo de 2.350 toneladas. A partir de estos resultados se iniciaron, en la misma región, programas de fertilización a gran escala. Luego en 1958, se obtuvo un rendimiento en peso húmedo de 31.604 toneladas. Estos resultados permitieron el cultivo a gran escala en todas las áreas costeras del mar Amarillo, e incluso en localidades en que previamente había sido imposible cultivar *Laminaria* debido a la deficiencia de nitrógeno. Desde entonces se han desarrollado seis métodos básicos para aplicar fertilizantes al agua de mar de los cuales el método más usado desde la década del ochenta es el uso del método del pulverizado (*spraying*) de nitrato de amonio líquido, que se realiza desde un bote con motor fuera de borda, equipado con estanque en donde va el fertilizante y una bomba de alta presión. Esta técnica ha permitido fertilizar en forma eficiente amplias áreas de cultivo. Se ha estimado que *Laminaria* en cultivo solo absorbe un sexto del fertilizante aplicado y generalmente se requiere de 100 a 150 kilogramos de fertilizante para producir una tonelada de esta alga (Tseng, 1987). Hoy en día, no existen antecedentes definitivos que evalúen el impacto ecosistémico del uso de fertilizantes en cultivos de algas a gran escala, convirtiéndose en una necesidad urgente realizar estudios y recopilar datos que permitan abordar esta temática y evitar impactos irreversibles en la flora y fauna de especies nativas.

Aspectos positivos y negativos han sido observados en diferentes experiencias de cultivo intensivo y extensivo de macroalgas alrededor del mundo. Sin embargo, para minimizar el riesgo de alterar el ecosistema marino irreversiblemente, una serie de estrictas consideraciones deben ser analizadas y evaluadas. En la **tabla 1**, se detallan los principales impactos ecosistémicos que pueden generar cambios ambientales entorno a granjas de macroalgas en aguas abiertas.

En el caso particular de *Saccharina japónica*, no fue posible recopilar antecedentes históricos del posible impacto que provocó, a comienzos del siglo XX, la introducción del alga en las costas de China. Esta valiosa información permitiría estimar los costos y/o beneficios de cultivar este tipo de algas en nuevos ecosistemas.

Una revisión extensiva de las principales plantas acuáticas conocidas por su carácter invasivo hasta el año 2016, incluyó más de 300 especies. Dentro de esta extensiva lista de especies,

Saccharina japónica no se incluye en el listado de especies invasivas, lo que no indica que no lo sea (Thomsen y otros, 2016). Adicionalmente, este mismo estudio reporta las regiones del planeta mayormente afectadas por especies de algas invasoras. En orden decreciente de afectación se encuentra el mar mediterráneo con el mayor número de especies de plantas acuáticas invasoras, seguido por el atlántico noreste, islas en general, Australasia, el atlántico noroeste, pacífico noreste, océanos internos, océano índico, pacífico noroeste, atlántico suroeste, pacífico sureste y atlántico sureste. En esta clasificación, el pacífico sureste, que correspondería a costas de Chile, muestra muy baja incidencia de invasión por plantas acuáticas exóticas, considerándose aun ecosistemas libres de este tipo de plagas. En la **tabla 1**, se clasifican los principales cambios e impacto en el ecosistema inducido por la práctica intensiva y extensiva de cultivos de macroalgas en mar abierto, además de medidas de mitigación entre otros aspectos.

Adicionalmente, es importante señalar que 4 especies de plantas acuáticas forman parte de la lista de 100 especies exóticas invasoras más dañinas del mundo. Entre estas especies de plantas acuáticas encontramos el alga caulerpa (*Caulerpa taxifolia*), pasto acuático común (*Spartina anglica*), alga wakame (*Undaria pinnatifida*), Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) (Lowe y otros, 2000).

A nivel de producción mundial al 2016, *Saccharina japónica* se posiciona en el segundo lugar y la especie clasificada como altamente invasora, *Undaria pinnatifida*, se encuentra en el cuarto lugar de producción (Thomsen y otros, 2016). Estos antecedentes son relevantes para establecer la facilidad de comercialización de alguna de ellas, como también para tomar medidas a tiempo considerando su capacidad invasiva. En el caso particular de *Undaria pinnatifida*, ha sido reportado por provocar graves fenómenos de invasión en ecosistemas que contemplan una gran extensión en las costas de Australia, Nueva Zelanda y algunas islas polinésicas (South y otros, 2017). Este fenómeno de invasión hasta el día de hoy ha resultado muy difícil de controlar y erradicar.

La acuicultura de *Saccharina japónica*, al igual que otros cultivos marinos, experimenta eventos de enfermedades que principalmente son producidas por cambios en las condiciones ambientales locales y globales, que son resueltos modificando la exposición a la luz o adicionando fertilizantes como nitrógeno o fósforo. La experiencia en la acuicultura del género *Laminaria* muestra que existen enfermedades causadas por patógenos que ocurren esporádicamente en algunos años y solo en algunas granjas, en algunos casos se han utilizado antibióticos u otros productos farmacéuticos en el tratamiento. Dentro de los microorganismos descritos o conocidos por producir enfermedades a *Saccharina japónica* encontramos a *Macrocooccus spp*; *Pseudomonas spp* y *Micoplasma* (Tseng, 1987).

En relación con esto último, es relevante mencionar que existe un alto riesgo de importar parásitos, bacterias entre otros organismos con potencial patogénico asociados al cultivo de especies exóticas. Generalmente estos patógenos no se encuentran previamente presentes en el ecosistema nativo receptor. Estos organismos, junto con esporas o plántulas, son comúnmente importados de forma accidental y tienen un elevado potencial de generar un impacto mayor que el cultivo de macroalgas propiamente tal, generando enfermedades en especies del ecosistema nativo, con consecuencias desconocidas. Este es un aspecto muy relevante.

Problemáticas económicas y de salud asociadas a la presencia de especies exóticas

Actualmente, no existe un número exacto de especies exóticas asilvestradas (naturalizadas) presentes en el territorio nacional. Una estimación fue realizada recientemente en el marco del Proyecto de especies exóticas invasoras (2013-2017), que desarrolló el Laboratorio de Invasiones Biológicas de la Universidad de Concepción y financiado por el Proyecto Especies Exóticas Invasoras, impulsado por el Fondo para el Medio Ambiente Mundial, el Ministerio del Medio Ambiente de Chile y el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo, PNUD. El catastro contabilizó un total de 1.119 especies exóticas asilvestradas en nuestro país, que representan a todos los grandes grupos taxonómicos. Entre ellas se encuentran 67 animales vertebrados; 21 algas; 71 hongos; 157 animales invertebrados y 864 plantas. Las regiones de Chile con mayor presencia de especies exóticas son: región de Valparaíso, región del Biobío y región Metropolitana (PNUD, 2017).

Como anteriormente fue mencionado, la naturalización de especies exóticas a nuevos ecosistemas, es una de las mayores causas de la extinción de especies endémicas. Más aún, este fenómeno no está libre de provocar mermas económicas adicionales, como también generar problemas para la salud de los ecosistemas y las personas. En este estudio se realizó una valoración económica del impacto de un grupo de especies exóticas sobre la biodiversidad en Chile. La estimación monetaria fue de 87,9 millones de dólares anuales que el país ha desembolsado en los últimos cinco años (2013-2017) a causa de tan solo siete de estas especies invasoras; cinco mamíferos y dos arbustos (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2016), dejando de manifiesto la gran merma económica que generan los programas de control, erradicación y contingencia que anualmente deben ser costeados tanto por el sector público y privado para intentar controlar estas especies exóticas. El cálculo de valoración incluyó los recursos públicos destinados a investigar y controlar las especies, las pérdidas a plantaciones forestales o frutales y el daño económico para la ganadería, apicultura y especies nativas. El top 7 de especies exóticas que más mermas económicas generan en Chile. Estas son (PNUD, 2016):

1. Jabalí (*Sus scrofa*): Pérdida mínima anual = 38.278.724 dólares
2. Avispa chaqueta amarilla (*Vespula germanica*): Pérdida mínima anual equivalente a 21.532.771 dólares
3. Zarzamora (*Rubus ulmifolius*): Pérdida mínima anual = USD \$10.580.010.
4. Visón (*Neovison vison*): Pérdida mínima anual = USD \$9.526.620.
5. Espinillo (*Ulex europaeus*): Pérdida mínima anual = USD \$ 3.953.881.
6. Conejo (*Oryctolagus cuniculus*): Pérdida mínima anual = USD \$3.249.337.
7. Castor (Castor canadienses): Pérdida mínima anual = USD \$733.094.

Con estos antecedentes, es de esperar que la naturalización de una especie exótica de alga como *Saccharina japónica*, genere mermas económicas producto de su control y erradicación de ecosistemas naturales, como también posibles enfermedades derivadas de la importación de esporas o plántulas desde otras latitudes que, como fue mencionado, además tienen el potencial de transmitirse y enfermar especies endémicas de algas como el huiro negro, el huiro palo y el cochayuyo, afectando la salud ecosistémica, y de paso, la fuente de subsistencia económica de cientos de personas.

Si bien ha sido establecido que la mayoría de las especies exóticas provocan un efecto sobre la salud, ya sea directo o indirecto, se han descrito casos en Europa donde especies exóticas generan efectos nocivos directos a la salud de las personas. Por ejemplo, la

ambrosia, *Ambrosia artemisiifolia*, genera no tan solo complicaciones en la agricultura, sino que también esta especie es una de las más alergénicas del mundo, provocando fiebre del heno, asma y dermatitis. Adicionalmente, el mosquito tigre, *Aedes albopictus*, originario del sudeste asiático, ingresó a Europa de forma accidental. Este mosquito es portador de más de veinte patógenos altamente peligrosos para el ser humano, entre ellos el dengue, la fiebre amarilla y el chikungunya, convirtiéndose en un riesgo sanitario importante en el sur y oeste de Europa. Otro caso corresponde al perejil gigante, *Heracleum mantegazzianum*. Esta planta se introdujo en Europa como planta ornamental sin considerar que es una planta altamente tóxica, que puede provocar quemaduras y dermatitis en la piel, e incluso ceguera al contacto con los ojos de personas expuestas (Sundseth, 2014).

Alto riesgo de cambio o impacto ambiental		Potencial impacto en receptores	Escala de riesgo antes de la mitigación	Possible cambio positivo	Principales medidas para mitigar impacto	Escala de riesgo después de la mitigación	Incertidumbre	Monitoreo y requerimiento de investigación
Efactor de cambio ambiental	U liberación de material reproductivo	Altera composición genética de especies locales resultando en la pérdida de características naturales o alterando la composición de la comunidad.	5		Uso de material reproductivo de fuentes locales Producción de material de siembra que mantenga la integridad genética de comunidades locales	3	Alta	Evaluación de estrategia de condiciones de línea base en área de cultivo
	Propagación de enfermedades, parásitos y especies no-nativas	Potencial propagación y consecuencias para comunidades marinas y ecosistemas establecidos	5		Medidas de bioseguridad para manejar el riesgo de introducción Combinar monitoreo e investigación para informar estrategias de manejo	3	Alta	Evidencias de buenas prácticas de bioseguridad por cultivadores
	Absorción de energía cinética	Cambios a gran escala en la hidrodinámica local con muchos potenciales receptores afectados	5	Absorción de la energía de las olas en lugares costeros vulnerables a la erosión	Ubicación para evitar consecuencias negativas para comunidades protegidas o vulnerables Ubicación para mitigar efecto negativo de la erosión de las costas	2	Alta	Acceder o realizar estudios hidrodinámicos para determinar el perfil medic ambiental y acceder a las consecuencias del cultivo proyectado
	Adición del sistema de cultivo al ecosistema	Mortalidad elevada de megafauna debido a enredo en el sistema de cultivo	5		Sistemas de cultivo que minimicen los riesgos de enredo Ubicación que evite los efectos negativos para comunidades protegidas o vulnerables	1	Alta	Reporte obligatorio de la mortalidad de megafauna



Efactor de cambio ambiental	Potencial impacto en receptores	Escala de riesgo antes de la mitigación	Posible cambio positivo	Principales medidas para mitigar impacto	Escala de riesgo después de la mitigación	Incertidumbre	Monitoreos y requerimiento de investigación
Absorción de nutrientes	Absorción del nitrógeno local, resultando en cambios en la composición de las comunidades de fitoplancton	4	Reducción de la contaminación por nutrientes	Ubicar proyectos de cultivo en cuerpos de agua con elevadas fuentes de nitrógeno antropogénico Ajustar la densidad del cultivo	1	Medio-bajo	Entender la asociación entre las fuentes de nutrientes antropogénicos y el proyecto de cultivo.
Riego medio de impacto ambiental							
Creación de hábitat artificiales	Consecuencias de potencial propagación (positivo y negativo) para comunidades marinas y el funcionamiento del ecosistema	3	Incrementa heterogeneidad de hábitat locales, enriquecimiento de especies y productividad Provee refugio para especies	Ubicación para evitar consecuencias negativas para comunidades protegidas o vulnerables	2	Alta	Combinar monitoreo e investigación para acceder al potencial impacto a escala
Absorción de la luz	Sombreado sobre especies benthicas y/o pelágicas resultando en cambios composicional en la comunidad	3	Incrementa heterogeneidad de hábitat locales	Ubicación para evitar comunidades protegidas o vulnerables	1	Bajo	Estudio de referencia de línea de base y posterior evaluación del riesgo para las comunidades asociadas
Riego bajo de impacto ambiental							
Liberación de material orgánico particulado y disuelto.	Potencial enriquecimiento en áreas de deposición y alteración de la química marina local	2	Contribución del secuestro de carbono	Estrategias para minimizar la pérdida de biomasa durante el período de cultivo	1	Medio	Evaluación del destino y consecuencias de la biomasa perdida Potencial contribución positiva de cultivos a gran escala en la fijación de carbono en el océano (carbono azul)

Efactor de cambio ambiental	Potencial impacto en receptores	Escala de riesgo antes de la mitigación	Possible cambio positivo	Principales medidas para mitigar impacto	Escala de riesgo después de la mitigación	Incertidumbre	Monitoreos y requerimiento de investigación
Generación de ruido	Alteraciones en la conducta de la megafauna	2		Ubicación para evitar consecuencias negativas en las comunidades protegidas o vulnerables Reducción del ruido por maquinarias o embarcaciones	1	Bajo	Evaluación de riesgo para especies asociadas
Adición del sistema de cultivo al ecosistema	Polución debido a pérdidas de materiales de cultivo Perturbación de especies bentónicas por líneas de amarre	1		Buen manejo del sibio asegurando que el sistema de cultivo sea adecuado para su propósito Cuando sea apropiado usar materiales biodegradables	1	Bajo	Obligación de reportar pérdida de materiales
Absorción de carbono	No hay consecuencias negativas previstas	0	Contribución a la mitigación del cambio climático		0	Bajo	

Tabla 1. Impacto ecosistémico del cultivo intensivo y extensivo de macroalgas en aguas abiertas.

En **tabla 1** se muestra la clasificación del potencial impacto en el ecosistema de la implementación de sistemas de cultivo de macroalgas en aguas abiertas. Se indica una escala del potencial impacto de cambio en el ecosistema donde 5 (en rojo) corresponde a un alto impacto y 0 (en verde) a un bajo impacto. Además, se señalan medidas de mitigación sugeridas.

Discusión

El impacto ecosistémico en los recursos hidrobiológicos producto del cultivo de especies exóticas, como es el caso de *Saccharina japónica* en las costas australes de Chile, tiene un alto componente de incertidumbre, debido a la falta de estudios y conocimiento disponibles a nivel local.

Si bien, *Saccharina japónica* ha sido establecida como una especie con un bajo potencial de invasión según experiencias en otras latitudes del planeta, se debe considerar el caso específico de las condiciones físico-químicas de las costas australes de Chile, ya que a mayor similitud con las condiciones físico-químicas del ecosistema nativo, mayor será la probabilidad de producirse un fenómeno de invasión o propagación de esta especie exótica. Esto sería producto del escape de plantas desde las granjas de cultivo, liberación de esporas con capacidad de asentarse en la zona sublitoral cercana y por mal manejo u errores accidentales en el tratamiento y trabajo del alga. Adicionalmente, la inexistencia de depredadores naturales puede favorecer la propagación descontrolada de esta alga.

Campbell y otros, 2019, desarrollaron un estudio detallado de los riesgos ambientales del desarrollo de la acuicultura de macroalgas en Europa. Este grupo de investigadores (**tabla 1**), establece como máximo riesgo ambiental, la liberación de material reproductivo y de enfermedades como parásitos y otros organismos no nativos desde las granjas de cultivo. Este fenómeno es de un nivel de preocupación muy alto, ya que el hecho de producirse uno o ambos fenómenos, generaría cambios irreversibles en el ecosistema nativo receptor. Las consecuencias generadas por la liberación de material reproductivo o genético, contempla la propagación descontrolada de la especie exótica, como también la posibilidad de alterar la composición genética de especies locales a través de entrecruzamiento interespecie, resultando en la pérdida de características naturales en especies nativas. En este caso, *Macrocystis pyrifera* (huirón) sería el receptor más probable de la liberación de material reproductivo desde granjas de cultivo de *Saccharina japónica*, como consecuencia de su cercanía taxonómica, aunque no se descartan otras posibles especies receptoras. Adicionalmente, como fue mencionado anteriormente, el trabajo de selección e hibridación, como también el tratamiento con rayos X en alguna de las variedades de *Saccharina japónica* ha sido común, lo que conlleva a un mayor riesgo de introducir alelos seleccionados en las especies nativas, desconociéndose sus consecuencias.

El gran tamaño del espécimen de *Saccharina japónica*, pudiendo alcanzar más de cinco metros, sumado a los cultivos de gran densidad muy comunes en las granjas de algas, resulta en verdaderos bosques submarinos. Esto genera una serie de consecuencias con un impacto a gran escala en la comunidad ecosistémica local. Este impacto provocado, entre otros fenómenos, por la absorción de la energía cinética (alteración de las corrientes marinas), genera cambios en la hidrodinámica local, resultando en muchos receptores locales afectados. Adicionalmente, las grandes áreas de extensión que abarcan las granjas de algas absorben gran cantidad de radiación lumínica, generando sombreado sobre especies benthicas y/o pelágicas, lo que resulta en cambios en la composición ecosistémica local. También, la creación de

nuevos refugios tiene el potencial de modificar el ecosistema, ya que podría favorecer la sobrevida de algunas especies sobre otras, como por ejemplo el aumento de depredadores, afectando la cadena trófica de la comunidad ecosistémica.

Otro aspecto importante a considerar es el uso de fertilizantes en aguas abiertas. Si bien es cierto que el uso de fertilizantes en China ha probado ser efectivo en el desarrollo de la acuicultura de algas en localidades donde el nitrógeno puede ser limitante en el crecimiento del alga, debe ser considerado la carencia de información y estudios que involucren puntos de vista sistémicos y ecológicos, desconociéndose cualquier tipo de impacto ambiental que el uso de este tipo de fertilizantes o fármacos puedan causar en poblaciones y comunidades que coexisten con los cultivos de algas. El uso de estos químicos en un medio acuático silvestre debe ser materia de estudio.

Finalmente, la principal preocupación proviene de la carencia de información y conocimiento del impacto ecosistémico local derivado de la implementación de sistemas de cultivos de algas exóticas. Este tipo de cultivos involucra un componente de gran incertidumbre sobre las posibles consecuencias graves e irreversibles en el equilibrio del ecosistema. Esto podría afectar no solo a los recursos hidrobiológicos aledaños, sino que también a los cientos de ciudadanos que han encontrado una fuente de subsistencia en la extracción de recursos marinos, pudiendo repercutir, en un daño social y económico mayor.

Actualmente no existe información disponible que describa las potenciales consecuencias de la internación de un alga del tipo Saccharina en el ecosistema marino del sur de nuestro país, sin embargo, los antecedentes revelados con especies exóticas en otras latitudes, nos permite especular que las mermas económicas y ecosistémicas podrían ser mayores que los beneficios de su cultivo y comercialización.

El Instituto de Fomento Pesquero junto a centros de investigación y universidades nacionales, han creado mecanismos de fomento para la producción a nivel comercial de algas nativas de las costas de Chile, dando una señal clara del camino futuro a seguir por la acuicultura de macroalgas a nivel nacional (Saavedra y otros, 2019).

Referencias bibliográficas

1. Academia Superior Estudios policiales (2018) Investigación a fondo: Sitio del suceso subacuático. 13.ª ed. Santiago: Policía de Investigaciones de Chile. Disponible en <https://bit.ly/3FGB9eB>.
2. Bellard C, Cassey P y Blackburn T. M. (2016). «Alien species as a driver of recent extinctions». *Biology Letters*, 12(2): 1-4. DOI: 10.1098/rsbl.2015.0623.
3. Buschmann, A. H. y Camus C. (2019). «An introduction to farming and biomass utilization of marine macroalgae». *Phycologia*, 58(5): 443-45.
4. Campbell, I., Macleod, A., Sahlman, C., Neves, L., Funderud, J., Øverland, M., Hughes, A. D. y Stanley, M. (2019). «The environmental risks associated with the development of seaweed farming in Europe: Prioritizing key knowledge gaps». *Frontiers in Marine Science*, 6: 1-22. DOI: 10.3389/fmars.2019.00107.
5. Charrier, B., Rolland E., Gupta V. y Reddy C. R. K. (2015). «Production of genetically and developmentally modified seaweeds: exploiting the potential of artificial selection techniques». *Frontiers in Plant Science*, 6: 1-10. DOI: 10.3389/fpls.2015.00127.
6. Chen, J. (2022). «Laminaria japónica. Cultured aquatic species information programme». Fisheries and Aquaculture Division. Rome: FAO. Disponible en <https://bit.ly/3FJFI7U>.
7. Courchamp, F., Chapuis J. y Pascal M. (2003). «Mammal invaders on islands: impact, control and control impact». *Biological reviews*, 78(3): 347-383. DOI: 10.1017/s1464793102006061.
8. FAO (2018). *The state of world fisheries and aquaculture 2018: Meeting the sustainable development goals*. Rome: FAO.
9. Hu, Z., Shan T., Zhang J., Zhang Q., Critchley A. T., Choi, H., Yotsukura, N., Liu, F. y Duan, D. (2021). «Kelp aquaculture in China: a retrospective and future prospects». *Reviews in Aquacultures*, 13(3): 1324-1351. DOI: <https://doi.org/10.1111/raq.12524>.
10. Lane, C. E., Mayes, C., Druehl, L. D. y Saunders, G. W. (2006). «A multi-gene molecular investigation of the kelp (Laminariales, Phaeophyceae) supports substantial taxonomic re-organization». *Journal of Phycology*, 42(2): 493-512. DOI: 10.1111/j.1529-8817.2006.00204.x.
11. Lin, H y Qin, S. (2014). «Tipping points in seaweed genetic engineering: scaling up opportunities in the next decade». *Marine Drugs*, 12(5):3025-3045. DOI: 10.3390/md12053025.
12. Lowe, S., Browne, M., Boudjelas, S. y De Poorter, M. (2000). 100 of the World's Worst Invasive Alien Species A selection from the Global Invasive Species Database. Auckland: The Invasive Species Specialist Group.
13. Molina, R., Soto, N. y Tapia, A (2018). «Estado actual de la distribución del castor *Castor canadensis* Kuhl 1820 (Rodentia) en el área continental de la región de Magallanes, Chile». *Anales del Instituto de la Patagonia*, 46(3): 7-15.
14. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (2016). *Valoración económica del impacto de siete especies exóticas invasoras sobre los sectores productivos y la biodiversidad en Chile*. Santiago de Chile: PNUD. <https://especies-exoticas.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/12/1.-LIBRO-Valoracion-economica-EEI-FINAL.pdf>
15. Qin, S., Jiang, P. y Tseng C. (2005). «Transforming kelp into a marine bioreactor». *Trends in Biotechnology*, 23(5): 264-8. DOI: 10.1016/j.tibtech.2005.03.010.
16. Saavedra, S., Henríquez, S., Leal, P., Galleguillos, F., Cook, S. y Cárcamo, F. (2019). *Cultivo de Macroalgas: Diversificación de la Acuicultura de Pequeña Escala en Chile*. Valparaíso: Instituto de Fomento Pesquero.
17. Skewes, O., González, F., Olave, R., Avila Campos, A., Vargas Rojas, V., Paulsen, y Eric König, H. (2006). «Abundance and distribution of American Beaver, *Castor canadensis*

- (Kuhl 1820), in Tierra del Fuego and Navarino island, Chile». *European Journal of Wildlife Research*, 52: 292-296.
18. Scoggan, J., Zhuang, Z. y Wang, F. (1989). Culture of Kelp (*Laminaria japónica*) in China. Qingdao: FAO. Disponible en <https://bit.ly/3HSVRdR>.
 19. South, P. M., Floerl, O., Forrest B. M. y Thomsen M. S. (2017). «A review of three decades of research on the invasive kelp *Undaria pinnatifida* in Australasia: An assessment of its success, impacts and status as one of the world's worst invaders». *Marine Environmental Research*, 131: 243-257. DOI: 10.1016/j.marenvres.2017.09.015.
 20. Sundseth, K. (2014). *Especies exóticas invasoras: la respuesta de la Unión Europea*. Bélgica: Union Europea. Disponible en <https://bit.ly/3FLEDMG>.
 21. Thomsen, M. S., Wernberg, T., South, P. M. y Schiel, D. R. (2016). «Non-native Seaweeds Drive Changes in Marine Coastal Communities Around the World». En Zi-Min Hu y Ceridwen Fraser (editores), *Seaweed Phylogeography: Adaptation and evolution of seaweeds under environmental change* (pp. 147-185). Springer.
 22. Tseng, C. K. (1987). «*Laminaria* mariculture in China». En M. S. Doty (editor), *Case Studies of Seven Commercial Seaweed Resources*. Rome: Food and agriculture organization of the United Nations. Disponible en <https://bit.ly/3FIVYWE>.
 23. Verdugo, E. (2021). «Importe de los medios de pruebas criminalísticas recuperadas desde el medio acuático». *Revista de Formación y Desarrollo Policial*, 3: 47.
 24. Visch, W. (2019). *Sustainable Kelp Aquaculture in Sweden*. PhD Thesis. Disponible en <https://bit.ly/3YHDqi8>.
 25. Wang, X. L., Yang, Y. X., Cong, Y. Z. y Duan, D. L. (2004). «DNA fingerprinting of selected *Laminaria* (Phaeophyta) gametophytes by RAPD markers». *Aquaculture*, 238: 143-153.
 26. Wang, X., Yao, J., Zhang, J. y Duan, D. (2020). «Status of genetic studies and breeding of *Saccharina japónica* in China». *Journal of Oceanology and Limnology*, 38: 1064-1079. DOI: 10.1007/s00343-020-0070-1.
 27. Ye, N., Zhang, X., Miao, M., Fan, X., Zheng, Y., Xu, D., Wang, J., Zhou, L., Wang, D., Gao, Y., Wang, Y., Shi, W., Ji, P., Li, D., Guan, Z., Shao, C., Zhuang, Z., Gao, Z., Qi, J. y Zhao, F. (2015). «*Saccharina* genomes provide novel insight into kelp biology». *Nature Communications*, 6: 69-86.

Sobre el autor

Rodrigo López Leal es bioquímico y doctor en Ciencias con mención en Biología Celular y Molecular. Actualmente se desempeña como profesional y asesor científico en el Laboratorio de Criminalística Regional Valdivia de la Policía de Investigaciones de Chile. Es autor de una serie de publicaciones científicas en el área de la genómica y neurobiología molecular. Su correo electrónico es rlopezle@investigaciones.cl.

