

Mapear en el mar: introducción metodológica al mapeo de bosques de kelp y caso de estudio en Patagonia Sur

ALEJANDRA MORA-SOTO¹, MAURICIO PALACIOS², MATHIAS HÜNE³

¹<https://orcid.org/0000-0003-2254-5338>

²<https://orcid.org/0000-0002-5484-8459>

³<https://orcid.org/0000-0003-0089-7623>

OPEN ACCESS

Recibido:

24/11/2025

Revisado:

19/01/2026

Aceptado:

19/05/2026

Publicado en línea:

11/09/2026

Editor jefe:

Dr. Américo Montiel San Martín

Instituto de la Patagonia
Universidad de Magallanes
Punta Arenas, Chile

RESUMEN

El mapeo de bosques de macroalgas formadoras de dosel ha tenido un momento de gran desarrollo científico y tecnológico, coincidente con el aumento del interés en aplicar estas técnicas en diversos casos de estudio. Aquí desarrollamos una revisión introductoria de las bases metodológicas del mapeo de bosques de kelp, abarcando consideraciones sobre la resolución espacial, las condiciones geográficas, la resolución temporal, la clasificación de las imágenes y la organización espacial y temporal de los resultados. Además, incluimos un caso de estudio perteneciente a la futura área de conservación Cabo Froward, en la Región de Magallanes. La utilización de estas técnicas puede ayudar a desarrollar distintas aplicaciones de monitoreo costo-efectivas a distintas escalas espaciales y temporales.

Palabras clave: Mapas, kelp, satélites, *Macrocystis pyrifera*, *Nereocystis luetkeana*.



Mapping at Sea: A methodological introduction to kelp forest mapping and a case study from southern Patagonia

Contribuciones de los autores

AMS: Conceptualización, investigación, redacción borrador original, revisión y edición.

MP: Investigación, redacción, revisión y edición.

MH: Recursos, adquisición de fondos, redacción, revisión y edición.

Declaración de intereses:

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

Financiamiento:

Este trabajo fue posible gracias a la Fundación Rewilding Chile, una organización chilena sin fines de lucro que cuenta con el apoyo financiero de una amplia red filantrópica.

ABSTRACT

The mapping of canopy-forming kelp forests has undergone a period of significant scientific and technological advancement, coinciding with growing interest in applying these techniques across diverse case studies. In this work, we present an introductory review of the methodological foundations of kelp forest mapping, covering considerations related to spatial resolution, geographic conditions, temporal resolution, image classification, and the spatial and temporal organization of results. We also include a case study from the proposed Cabo Froward conservation area in the Magallanes Region. The use of these techniques can help develop various cost-effective monitoring applications across multiple spatial and temporal scales.

Keywords: Maps, kelp, satellites, *Macrocystis pyrifera*, *Nereocystis luetkeana*.

INTRODUCCIÓN

Los bosques de macroalgas son ecosistemas marinos distribuidos a lo largo de las costas templadas de altas latitudes (Wernberg & Filbee-Dexter 2019). Se considera que son especies fundacionales de ecosistemas (Miller *et al.* 2018), dado que su estructura provee de sitios de incubación, refugio y alimentación a innumerables especies, varias de ellas de consumo humano directo o indirecto (Eger *et al.* 2023; Pérez-Matus *et al.* 2025). Se estima que 740 millones de personas viven en un radio de 50 km de cercanía a un bosque de macroalgas (Eger *et al.* 2023), y el vínculo socio-cultural de las macroalgas con las poblaciones humanas se remonta a tiempos inmemoriales (Dillehay *et al.* 2008; Erlandson *et al.* 2007).

Debido a la triple crisis planetaria (cambio climático, pérdida de ecosistemas y contaminación), el monitoreo y la protección de los bosques de macroalgas se han convertido en una necesidad ante el declive global de sus poblaciones naturales en las últimas décadas (Krumhansl *et al.* 2016). Dado su rol como indicador de la salud del mar y de su biodiversidad asociada, un reporte de Naciones Unidas recomienda que los países cuantifiquen su superficie de bosques de macroalgas para monitorear sus cambios y proponer estrategias de manejo y conservación, haciendo necesario desarrollar sistemas de mapeo a distintas escalas (United Nations Environment Programme & Norwegian Blue Forests Network, 2023).

En paralelo, las técnicas de mapeo del dosel de los bosques de macroalgas han experimentado un notable auge en los últimos 15 años. Gracias a la operación de nuevos satélites, imágenes obtenidas con drones y posibilidades extendidas para el escalamiento de datos, se han logrado realizar mapeos detallados de la cobertura de

estos bosques en la superficie del mar, generando bases de datos que sirven como indicadores del ecosistema que, a la vez, facilitan el diseño e implementación de áreas de manejo marino-costero (Cavanaugh *et al.* 2021a; Schroeder *et al.* 2019).

El objetivo de este artículo es brindar un marco metodológico para el mapeo de bosques de macroalgas, que abarque las bases teóricas y prácticas, desde una breve revisión histórica hasta las tendencias metodológicas actuales, y proporcionar un marco de referencia acorde con los objetivos y recursos del mapeo. Con esta revisión, se busca facilitar el acceso a nuevos colegas interesados e incentivar nuevas preguntas científicas. También incluiremos un caso de estudio sobre el mapeo de un bosque de *Macrocystis pyrifera* en el Estrecho de Magallanes en la Patagonia chilena. Este reporte se enfocará en metodologías de mapeo de bosques de macroalgas pardas formadores de dosel que flotan en superficie (kelp de ahora en adelante), compuestos por las especies *M. pyrifera* y *Nereocystis luetkeana*, la primera con extensión a lo largo de la costa occidental de Norteamérica y Sudamérica (desde Alaska hasta la Patagonia), y la segunda solo en Norteamérica (Estados Unidos y Canadá).

Este artículo intenta deliberadamente ser de carácter introductorio; si los lectores necesitan profundizar más, se recomiendan los excelentes trabajos de Cavanaugh *et al.* (2021a), Gendall *et al.* (2023) y Schroeder *et al.* (2019), donde se abarcan varios aspectos metodológicos en profundidad, y la guía en español de Reshitnyk *et al.* (2023) para tomadores de decisiones y profesionales.

Registros históricos

Los primeros registros conocidos de mapas donde se advierten bosques de kelp provienen de cartas náuticas elaboradas en expediciones hidrográficas del siglo XIX y de principios del XX. En ellas se señalaba la presencia de macroalgas flotantes en la superficie como indicadores de arrecifes poco profundos que podían suponer peligros para la navegación (FitzRoy, 1839). Estas cartas, elaboradas con alta precisión desde los inicios del siglo XIX hasta mediados del siglo XX, sirven hoy como una línea de base histórica para comparar la extensión de los bosques de kelp a largo plazo (Costa *et al.* 2020; Mora-Soto *et al.* 2021).

En los primeros años del siglo XX, aparecieron estudios mucho más detallados sobre la cuantificación del recurso macroalgal en busca de fuentes de nitrato y potasio. En particular, los estudios realizados por Cameron (1915) son notables por la extensión y el detalle de sus mapas, que indican con gran precisión la ubicación y la densidad de los bosques de kelp a lo largo de la costa del Pacífico Norte. Estos registros han sido de referencia para el análisis de persistencia en Alaska (Hollarsmith *et al.* 2024), en el estrecho de Juan de Fuca (Pfister *et al.* 2017) y en la costa de California (Nicholson *et al.* 2024).

La llegada de la cartografía satelital comenzó en la década de 1970 con los satélites Landsat. La resolución espacial de la primera constelación de Landsat 1 a 3 (sensor MSS) era de 60 metros por píxel, lo que sólo permitía mapear bosques de kelp muy grandes y visibles. En 1980, se publicaron los primeros estudios que demostraron que era posible mapear bosques de kelp usando imágenes satelitales, y se identificó que la firma espectral infrarroja permite identificar el bosque en la superficie (Jensen *et al.* 1980). Sin embargo, a pesar de este y otros resultados prometedores (p.ej., Deysher, 1993), el verdadero salto en estos estudios ocurrió a partir de 2010. En ese año, una investigación clave permitió escalar la detección de bosques de kelp a través de imágenes del satélite SPOT, combinando esos datos con mediciones de biomasa obtenidas por buceo (Cavanaugh *et al.* 2010). La base de ese estudio, combinada con el método

de clasificación espectral MESMA (multiple endmember spectral mixture analysis; Roberts *et al.* 1998) para clasificar imágenes Landsat, ayudó a estimar la fracción de cobertura de kelp por píxel de los satélites Landsat 5 a 9 de 30 m de resolución y mapear series de tiempo robustas de área y biomasa para bosques de kelp (Bell *et al.* 2015, 2020; Cavanaugh *et al.* 2011; Hamilton *et al.* 2020; Houskeeper *et al.* 2022).

Esta línea metodológica ha sido escalada globalmente en la plataforma Kelpwatch (<https://kelpwatch.org/>), ampliamente utilizada para estudios de todo tipo relacionados con los bosques de kelp, que cuantifica la presencia, extensión y cambios de estos ecosistemas a partir de datos abiertos para su descarga y análisis (Bell *et al.* 2023). Debido a la relativamente baja resolución de píxel (30 m), esta plataforma presenta cobertura en ecorregiones con extensiones grandes y notorias de macroalgas, como en la costa de California y en las Islas Malvinas (Bell *et al.* 2023; Houskeeper *et al.* 2022).

Esos estudios han encendido una revolución en la investigación sobre el uso de imágenes satelitales, aéreas y de drones para mapear macroalgas en distintas escalas y condiciones geográficas. Sus bases metodológicas, aún en curso, se detallarán en la siguiente sección.

Aspectos metodológicos iniciales

La base de la identificación y clasificación de bosques de kelp en una imagen satelital subyace en la reflectancia de los pigmentos de las frondas en las bandas de borde rojo e infrarrojo cercano, que contrasta con la escasa reflectancia del agua en ese rango de ondas (Schroeder *et al.* 2019; Fig. 1). Eso permite delimitarlos; sin embargo, tiene sus desafíos técnicos.

En primer lugar, los objetivos del mapeo y los recursos disponibles definirán el tipo de datos a utilizar. Por ejemplo, si se necesita mapear detalles muy finos, como la salud del dosel y el número de frondas, se requiere el uso de drones, que proporcionan imágenes de muy alta resolución, pero solo cubren áreas pequeñas y requieren situarse en el sitio de monitoreo (Reshitnyk *et al.* 2023; Cavanaugh *et al.* 2021a). Otra opción para obtener alta resolución en áreas más amplias es mediante aerofotogrametría con vuelos chárter, aunque conlleva un costo que puede ser considerable (Schroeder *et al.* 2019; Reshitnyk *et al.* 2023). Una tercera alternativa es comprar imágenes satelitales de alta resolución ($\leq 3\text{m}$, como WorldView, DigitalGlobe o PlanetScope), pero esas imágenes a menudo no son continuas ni frecuentes en el tiempo y en el espacio, lo que dificulta un muestreo exhaustivo (Schroeder *et al.* 2019; Reshitnyk *et al.* 2023). En cambio, el uso de satélites, como Sentinel (10 o 20 m) o Landsat (30 m), puede ayudar a obtener una cobertura amplia y regular de forma gratuita, pero a costa de no identificar los detalles finos que pueden lograrse con drones o cámaras aéreas (Cavanaugh *et al.* 2021a; Gendall *et al.* 2023; Reshitnyk *et al.* 2023).

Por otra parte, la geografía también va a marcar el tipo de datos a utilizar. En zonas donde los bosques de kelp forman solo un borde muy delgado y muy cercano a la costa, como fiordos o canales con alta pendiente, todas las precauciones antes mencionadas se vuelven aún más complejas. Incluso con buena detectabilidad, si el satélite tiene baja resolución y los doseles están muy cerca de la costa, es difícil distinguir bien el borde entre mar y tierra, lo cual requiere de máscaras de mar de alta precisión para diferenciar bien la vegetación terrestre de la marina (Cavanaugh *et al.* 2021a; Gendall *et al.* 2023; Reshitnyk *et al.* 2023). Por lo tanto, los mapeos satelitales funcionan mejor en áreas más abiertas y con pendientes suaves (Mora-Soto *et al.* 2021), mientras que pendientes submarinas mayores de 11 grados requieren ser excluidas del análisis para evitar errores de omisión y comisión (Gendall *et al.* 2023). También la marea influye; con marea baja es más fácil identificar las macroalgas porque su extensión aumenta; adicionalmente, en zonas de altas corrientes el agua

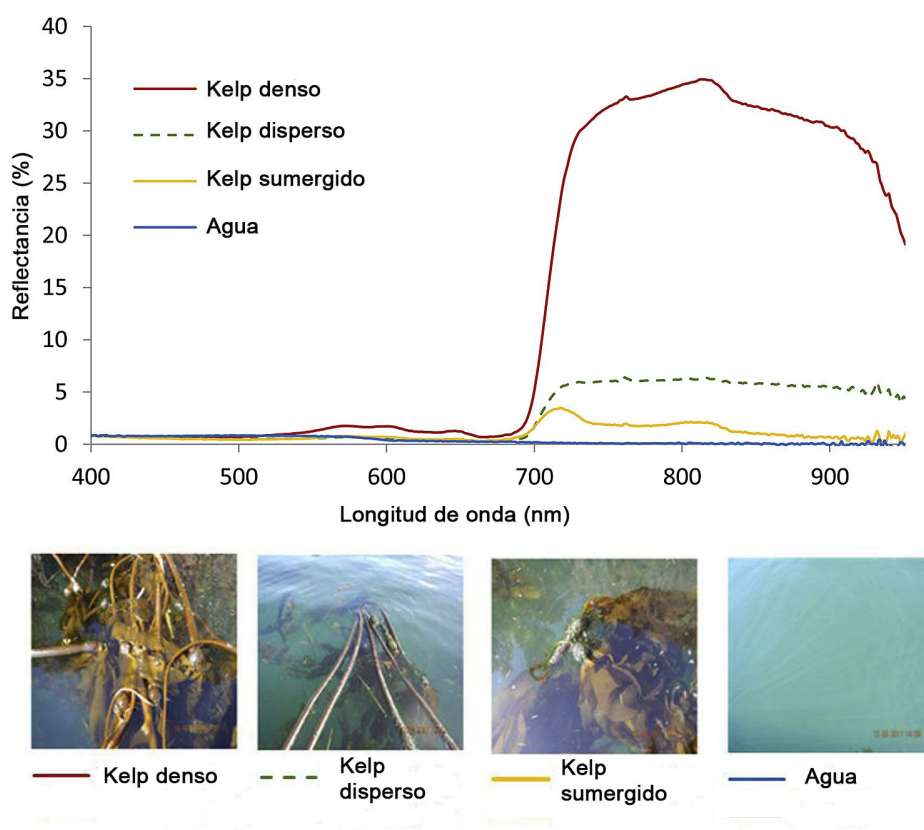


Fig. 1. Reflectancia espectral del dosel del kelp *N. luetkeana* (denso, disperso, sumergido) versus la reflectancia del agua. Este ejemplo proviene de Columbia Británica. Adaptado de Schroeder *et al.* (2019).

puede esconder las frondas, incrementando los errores de omisión (Timmer *et al.* 2024). Y además, en altas latitudes hay que considerar la nubosidad, que es un problema común que oculta la gran mayoría de las imágenes disponibles (Cavanaugh *et al.* 2021a). Por eso, muchas veces se buscan imágenes limpias en primavera y verano (Cavanaugh *et al.* 2021a; Gendall *et al.* 2023; Reshitnyk *et al.* 2023) o se integran múltiples imágenes limpias de nubes en un mosaico que representa las mejores condiciones de la estación o del año (Mora-Soto *et al.* 2020, 2024b).

Otro elemento a tener en consideración son las limitaciones temporales de muestreo y las posibilidades de obtener series de tiempo continuas. Para estudios a nivel local a distintos tiempos del día (p. ej., observar diferencias en el tamaño del dosel a distintas alturas de marea y a distintas velocidades de corriente), las imágenes de dron son herramientas ideales para monitorear más de una vez al día (Reshitnyk *et al.* 2023; Timmer *et al.* 2024). El uso de imágenes satelitales de alta resolución tiene una frecuencia relativamente irregular, dado que se obtienen por encargo, por lo que para trabajar con ellas es mejor usar un grupo de años representando condiciones generales del océano (Cavanaugh *et al.* 2021a; Cavanaugh *et al.* 2021b; Gendall *et al.* 2023; Mora-Soto *et al.* 2024a, 2024b; Reshitnyk *et al.* 2023). Para bosques de kelp medianos, superiores a 500 m² las imágenes Sentinel-2 son más adecuadas (Gendall *et al.* 2023; Mora-Soto *et al.* 2020; Schroeder *et al.* 2019), pero con la limitación temporal de que ese satélite comenzó a operar a partir de 2015. Y en bosques de kelp grandes (2 hectáreas o más) se pueden mapear incluso con imágenes Landsat, logrando series de tiempo de hasta 50 años si existen imágenes disponibles sobre el área (Gendall *et al.* 2025; Mora-Soto *et al.* 2024a).

Métodos de clasificación de imágenes

En una imagen donde solo se vea un bosque de kelp rodeado por agua, se puede realizar una clasificación supervisada sencilla en base en la separación espectral de ambas clases usando, por ejemplo, el índice de diferencia de vegetación normalizado o NDVI (Kriegler 1969). Sin embargo, una imagen satelital habitualmente incluye otras categorías, tales como vegetación estuarina, terrazas intermareales, arrecifes costeros, playas arenosas, nubes y espuma de olas, por lo que se necesita un poco de entrenamiento para poder clasificar una imagen (Gendall *et al.* 2023; Reshitnyk *et al.* 2023; Schroeder *et al.* 2019). En sensores remotos, la clasificación de las imágenes se desarrolla usando una o varias subsecciones de la imagen; en ellas se definen clases espectrales para entrenar al modelo, y luego se aplica un algoritmo que se basa en los datos de entrenamiento para clasificar la imagen completa (Schroeder *et al.* 2019). Un método ampliamente usado para imágenes Landsat es el del cálculo de mezcla espectral entre agua y kelp (MESMA; Roberts *et al.* 1998), usado en múltiples estudios (Bell *et al.* 2015, 2020, 2023; Cavanaugh *et al.* 2019; Hamilton *et al.* 2020; Houskeeper *et al.* 2022). Otra alternativa es usar filtros en base a los valores de las bandas que demuestren la mejor separabilidad entre clases, ya sea un filtro estático (Mora-Soto *et al.* 2020) o dinámico, a partir del histograma de la imagen (Cavanaugh *et al.* 2021b; González-Aragón *et al.* 2025). Otra alternativa de clasificación está en la segmentación basada en objetos. Esta técnica agrupa patrones de reflectancia similares en polígonos, que son reclasificados posteriormente en clases de kelp y no kelp (Gendall *et al.* 2023, 2025; Man *et al.* 2025; Mora-Soto *et al.* 2024a; Schroeder *et al.* 2019; Wachmann *et al.* 2026). Finalmente, la clasificación basada en análisis visual, que consiste en delimitar manualmente áreas de dosel; ese trabajo puede ser efectivo pero con un alto coste de tiempo (Schroeder *et al.* 2019).

Con respecto a las bandas espectrales para la clasificación, la banda infrarroja es bastante precisa para detectar frondas en superficie, mientras que las bandas de borde rojo son más sensibles para detectar frondas en superficie y semisumergidas, lo cual contribuye a detectar un área total de bosque con más exactitud (Cavanaugh *et al.* 2021a; Mora-Soto *et al.* 2020; Timmer *et al.* 2022; Reshitnyk *et al.* 2023; Schroeder *et al.* 2019). Con las bandas disponibles, se pueden usar índices de diferencia normalizada para poder separar las clases de kelp en superficie y semisumergido versus agua (Cavanaugh *et al.* 2021a; Gendall *et al.* 2023; Mora-Soto *et al.* 2020; Timmer *et al.* 2022; Reshitnyk *et al.* 2023; Schroeder *et al.* 2019). En caso de que se tenga solo imágenes en color real (RGB), en especial con imágenes de dron, una alternativa es usar la diferencia normalizada entre las bandas rojo y azul (Cavanaugh *et al.* 2021b; Saccomanno *et al.* 2022), o el uso del modelo de segmentación automatizado Kelp-o-matic que automatiza el dibujo del contorno del bosque de kelp resultando en polígonos georreferenciados (Denouden & Reshitnyk 2023).

Organización de resultados en dimensiones temporales y espaciales

Después del proceso de clasificación, el resultado obtenido es un archivo vectorial de tipo polígono que representa una "instantánea" de la superficie del bosque de kelp en un tiempo y espacio. Existen distintas alternativas para integrar y analizar esas distribuciones a lo largo de una costa y cada solución es solo una de las posibles.

En los trabajos desarrollados en el Spectral Lab de la Universidad de Victoria en Canadá se ha privilegiado la clasificación del espacio marino-costero con condiciones similares según características abióticas como la temperatura superficial del mar cerca de la costa, la energía del viento, distancia de arrastre del viento (fetch), la materia en suspensión en la columna de agua y las corrientes de marea (Man *et al.* 2025; Gendall *et al.* 2025; Mora-Soto *et al.* 2024a, 2024b;

Wachmann *et al.* 2026). Así, la costa se divide en ecorregiones abióticas, las cuales se dividen en segmentos de 1 km en longitud. Posteriormente, para cada segmento se integran todos los polígonos de kelp anuales para obtener una superficie total, y luego cada año representa un porcentaje de cobertura normalizado al total, para su análisis a nivel de segmento y de ecorregión (Man *et al.* 2025; Gendall *et al.* 2025; Mora-Soto *et al.* 2024a, 2024b; Wachmann *et al.* 2026).

Otras regiones, como en Puget Sound en el estado de Washington (Estados Unidos), tienen otro tipo de divisiones subregionales que se basan más en características geográficas locales, también subdivididas en segmentos normalizados (Berry *et al.* 2021; Pfister *et al.* 2017). Y en la costa de California, se analizan las series de tiempo a través de polígonos de libre elección en la plataforma Kelpwatch, las cuales también se normalizan al total de cobertura mapeada (Bell *et al.* 2023).

Para analizar los datos temporalmente, se pueden tomar distintas alternativas. Una de ellas es el análisis de persistencia: básicamente, ver si la cobertura del ecosistema se ha mantenido o ha cambiado con el tiempo. Para eso comparamos registros como las cartas náuticas del siglo pasado o muestreos históricos con la extensión actual de los bosques de kelp. Así podemos ver qué segmentos de la costa han cambiado. Ese tipo de trabajos nos han podido indicar, por ejemplo, que los bosques de kelp se han mantenido altamente persistentes en las latitudes subantárticas de Sudamérica (Friedlander *et al.* 2020; Mora-Soto *et al.* 2021) y subárticas, como Alaska (Hollarsmith *et al.* 2024) y Columbia Británica (Mora-Soto *et al.* 2024b; Wachmann *et al.* 2026).

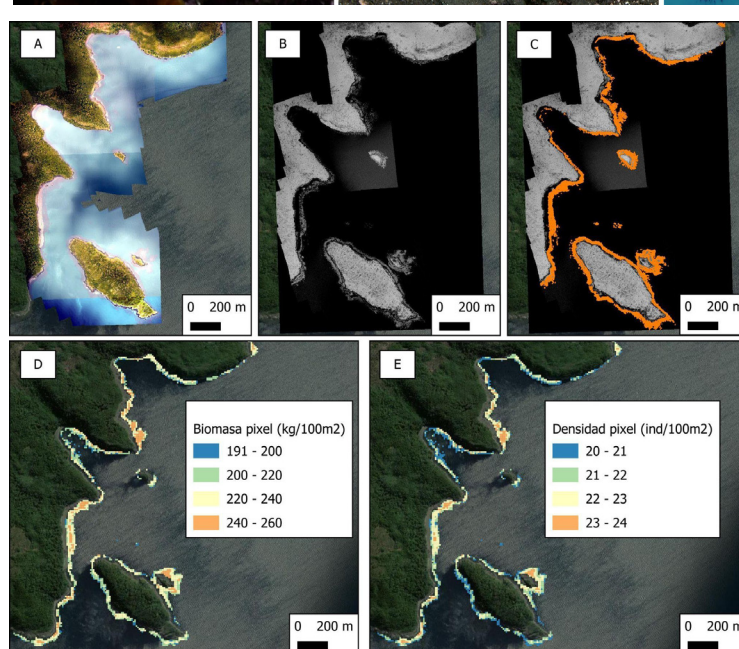
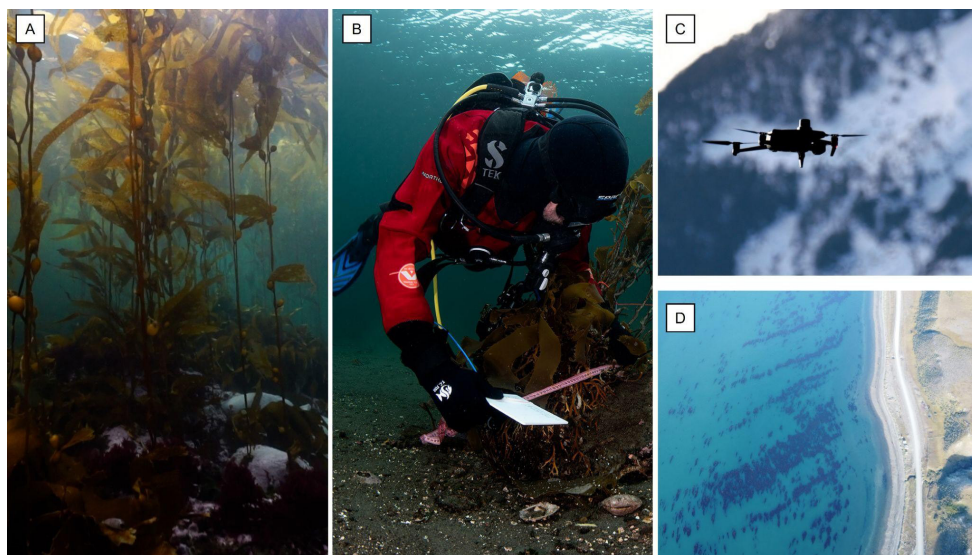
Para analizar series de tiempo dinámicas y ver las fluctuaciones del bosque de kelp a lo largo de patrones oceánicos (p.ej., periodos Niño versus Niña), es necesario seleccionar sitios “centinela” para representar los porcentajes de cobertura del bosque de kelp con el tiempo a lo largo de distintas ecorregiones. Esto es muy útil para estudiar los efectos de eventos como la gran ola de calor marina de 2014-2016, conocida como el “Blob”, en bosques muy monitoreados a lo largo de la costa del Pacífico Norte, y sus causales asociadas con temperatura o nutrientes (Bell *et al.* 2020; Cavanaugh *et al.* 2019; Gendall *et al.* 2025; Mora-Soto *et al.* 2024a). También se pueden utilizar test estadísticos para detectar tendencias significativas por segmento, ya sea de aumento, disminución o estabilidad de los bosques de kelp (González-Aragón *et al.* 2025; Man *et al.* 2025) o usar un enfoque bayesiano para identificar tendencias estacionales, anuales e interanuales (Guajardo-Rubilar *et al.* 2026).

Estos datos permiten no solo analizar cambios históricos, sino también proyectar escenarios futuros y evaluar en qué nivel de protección se encuentran los bosques frente a distintos tipos de amenazas ambientales y antropogénicas. Por ejemplo, se puede identificar la presencia del bosque de kelp para estimar un modelo de distribución actual, para luego modelar distintos escenarios climáticos y evaluar cómo cambiaría su distribución (González-Aragón *et al.* 2024), o calcular el porcentaje en el cual cada país protege a sus bosques de kelp frente al aumento actual y proyectado de olas de calor marinas (Arafeh-Dalmau *et al.* 2025). También con los resultados se pueden hacer recomendaciones de monitoreo y restauración (Mora-Soto *et al.* 2024b).

Caso de estudio: bosques del kelp gigante *M. pyrifera* de los ecosistemas costeros de Cabo Froward, Estrecho de Magallanes

En el extremo sur del continente americano, la zona conocida como Cabo Froward se encuentra en proceso de convertirse en un parque nacional, a través del compromiso establecido en el Protocolo de Acuerdo firmado el 28 de marzo de 2024 para la creación del Parque Nacional Cabo Froward, suscrito por el Ministerio del Medio Ambiente, Ministerio de Bienes Nacionales,

Ministerio de Agricultura y la Corporación Nacional Forestal, junto con la Fundación Rewilding Chile. Contiguo a esta futura área de conservación, uno de los ecosistemas clave a proteger y monitorear son los bosques de *M. pyrifera*. Para poder evaluar su estatus, en el mes de noviembre de 2024 una expedición científica de la Fundación Rewilding Chile realizó una serie de transectas submareales donde se estimó la biomasa (kg/m^2) y densidad ($\text{ind.}/\text{m}^2$) (Fig. 2A-B) georreferenciadas con imágenes de un dron modelo DJI Mavic 3 Multiespectral (Fig. 2C-D). La correlación entre la biomasa y densidad obtenidas en terreno con el Índice de Vegetación Normalizado en base a borde rojo (NDVI_{re}) del dron, versus el mismo índice (NDVI_{re} con Banda 6) realizado con el satélite Sentinel 2 (10 m resolución), permitió un escalamiento de datos de campo a nivel de sitio y para toda la extensión costera de la futura área de conservación (Mora-Soto *et al.* en revisión; Fig. 3).



La implementación de métodos de seguimiento de ecosistemas extensos que se ubican en Áreas Marinas Protegidas aisladas y/o remotas permite el diseño de planes de monitoreo costo-efectivo, los cuales deberían ser alimentados constantemente con datos de campo, con métodos estandarizados y considerando la amplia variación espacio-temporal que ocurre en las costas de la región de Magallanes. Estos datos permitirán mantener un registro de las condiciones del bosque de kelp en una ecorregión considerada uno de los pocos refugios climáticos (Pliscoff 2022) para este tipo de macroalgas pertenecientes al orden Laminariales a nivel global (Mora-Soto *et al.* 2022).

Proyecciones a futuro

Hasta ahora, la mayoría de los estudios se han centrado en la extensión o cobertura de los bosques de kelp, pero las perspectivas a futuro indican que los nuevos avances tecnológicos permitirían mapear con mayor certidumbre datos de salud (como briozoos incrustados en el kelp; Jordanna Bergman, comunicación personal), biodiversidad, densidad, biomasa, captura y exportación de carbono. Estos aspectos a menudo se basan en modelos con distintos grados de incertidumbre, especialmente en temas como el secuestro de carbono, ya que los bosques de kelp crecen en rocas y el camino hacia el secuestro de carbono en sedimentos es complejo (Pessarrodona *et al.* 2023). El mapeo usando sensores activos SAR puede ayudar a entender los aspectos fenológicos del crecimiento subsuperficial en especies submareales como *N. luetkeana*. Adicionalmente, el uso de modelos de Machine Learning tiene altas posibilidades de escalar un mapeo automatizado y accesible para múltiples usuarios.

Desde el punto de vista de la conservación, Chile ha establecido una importante red de Áreas Marinas Protegidas (AMP) con más del 43% de su zona económica exclusiva bajo alguna figura de conservación marina (Fondo Naturaleza Chile 2022), incluyendo Santuarios de la Naturaleza (SN), Áreas de Conservación de Múltiples Usos (AC-MU), Parques Nacionales y Reservas (PN-RN). En estas áreas protegidas, cuando son gestionadas eficientemente, es posible demostrar que su establecimiento es capaz de mitigar amenazas como la sobrepesca (Gell & Roberts, 2003), además de lograr la conservación de la biodiversidad a largo plazo, evitando la destrucción de hábitats (IUCN 2018) y mejorando la salud y la eficiencia en la captura de carbono (Roberts *et al.* 2017). A pesar de este escenario favorable en términos generales, cuando hablamos de la gestión efectiva de las AMP en Chile, la cobertura en términos de implementación es solo del 8,2% (Chile Marine Protection en Arafeh-Dalmau *et al.* 2025). En la conservación marina en Chile, los bosques de kelp constituyen los objetivos de conservación más transversales en las AMP (costeras y oceánicas). Sin embargo, a pesar de ser componentes importantes de la conservación en nuestro país, solo el 0,02% de estos ecosistemas cuenta con una protección efectiva (Arafeh-Dalmau *et al.* 2025). En este sentido, aunque contamos con suficiente información sobre el rol ecosistémico de estos bosques de kelp a lo largo de Chile y en parte de la Patagonia, aún existen vacíos relacionados con su cobertura espacial y temporal dentro de las AMP. Por tal motivo, las herramientas de teledetección ofrecen un gran potencial para operativizar monitoreos costo-efectivos, facilitando el seguimiento del estado de salud de estos hábitats clave como reservorios de biodiversidad, y más aún, en el contexto de cambio climático, donde la mayor parte de estos ecosistemas están desapareciendo (Krumhansl *et al.* 2016).

Finalmente, el actual momento histórico de mapeo de kelp se caracteriza por el aprendizaje colectivo para establecer acuerdos sobre las posibilidades y limitaciones de distintas técnicas. Desde 2019, equipos de mapeadores de macroalgas de distintos países angloparlantes se han reunido anualmente para compartir avances y alcanzar criterios metodológicos (Reshitnyk *et al.* 2023). Su contraparte en español ha comenzado en el año 2024, con encuentros anuales

con colegas sudamericanos y españoles (Encuentros de Mapeadores de Macroalgas), los cuales han tenido un gran impacto a nivel internacional (p. ej., Arafeh-Dalmau *et al.* 2024). El creciente interés por estas técnicas y sus aplicaciones promete que el mapeo de bosques de kelp puede ser una puerta de entrada para nuevos estudios en biología marina, oceanografía, geografía y antropología, entre otros.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el aporte en terreno de Nicolás Muñoz y Jonathan Poblete, el apoyo en el monitoreo submarino de Jaime Loaiza de la Universidad Austral de Chile, y al Capitán y tripulación de la motonave Steel Magnolia, por el terreno a Cabo Froward en noviembre de 2024.

LITERATURA CITADA

- Arafeh-Dalmau, N., Olguín-Jacobson, C., Earle, S., Bello, M., Lagger, C., Mora-Soto, A., et al. (2024). Protect kelp forests. *Science*, 386 (6722), 629–629. <https://doi.org/10.1126/science.adr4814>
- Arafeh-Dalmau, N., Villaseñor-Derbez, J. C., Schoeman, D. S., Mora-Soto, A., Bell, T. W., Butler, C. L., et al. (2025). Global floating kelp forests have limited protection despite intensifying marine heatwave threats. *Nature Communications*, 16(1), 3173. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-58054-4>
- Bell, T. W., Cavanaugh, K. C., Reed, D. C., & Siegel, D. A. (2015). Geographical variability in the controls of giant kelp biomass dynamics. *Journal of Biogeography*, 42(10), 2010–2021.
- Bell, T.W., Allen, J.G., Cavanaugh, K.C., & Siegel, D.A. (2020). Three decades of variability in California's giant kelp forests from the Landsat satellites. *Remote Sensing of Environment*, 238, 110811.
- Bell, T. W., Cavanaugh, K. C., Saccomanno, V. R., Cavanaugh, K. C., Houskeeper, H. F., Eddy, N., ... & Gleason, M. (2023). Kelpwatch: A new visualization and analysis tool to explore kelp canopy dynamics reveals variable response to and recovery from marine heatwaves. *Plos one*, 18(3), e0271477.
- Berry, H. D., Mumford, T. F., Christiaen, B., Dowty, P., Calloway, M., Ferrier, L., ... & VanArendonk, N. R. (2021). Long-term changes in kelp forests in an inner basin of the Salish Sea. *PLoS one*, 16(2), e0229703.
- Cameron F. 1915. *Potash from kelp*. United States Department of Agriculture, Office of the Secretary. Report No. 100.
- Cavanaugh, K. C., Siegel, D. A., Kinlan, B. P., & Reed, D. C. (2010). Scaling giant kelp field measurements to regional scales using satellite observations. *Marine Ecology Progress Series*, 403, 13–27.
- Cavanaugh, K. C., Siegel, D. A., Reed, D. C., & Dennison, P. E. (2011). Environmental controls of giant-kelp biomass in the Santa Barbara Channel, California. *Marine Ecology Progress Series*, 429, 1–17.
- Cavanaugh, K. C., Reed, D. C., Bell, T. W., Castorani, M. C., & Beas-Luna, R. (2019). Spatial variability in the resistance and resilience of giant kelp in southern and Baja California to a multiyear heatwave. *Frontiers in Marine Science*, 6, 413.
- Cavanaugh, K.C., Bell, T., Costa, M., Eddy, N.E., Gendall, L., Gleason, M.G. et al. (2021a) A review of the opportunities and challenges for using remote sensing for management of surface-canopy forming kelps. *Frontiers in Marine Science*, 8, 1536. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.753531>
- Cavanaugh, K. C., Cavanaugh, K. C., Bell, T. W., & Hockridge, E. G. (2021b). An automated method for mapping giant kelp canopy dynamics from UAV. *Frontiers in Environmental Science*, 8, 587354.
- Costa, M., Le Baron, N., Tenhunen, K., Nephin, J., Willis, P., Mortimer, J. P., Dudas, S., & Rubidge, E. (2020). Historical distribution of kelp forests on the coast of British Columbia: 1858–1956. *Applied Geography*, 120, 102230. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2020.102230>
- Denouden, T., & Reshitnyk, L. (2023). Kelp-O-Matic (0.5.2). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7672167>
- Deysheer, L.E. (1993). Evaluation of remote sensing techniques for monitoring giant kelp populations. *Hydrobiologia*, 260/261 (1993), pp. 307–312
- Dillehay, T. D., Ramirez, C., Pino, M., Collins, M. B., Rossen, J., and Pino-Navarro, J. D. (2008). Monte Verde: seaweed, food, medicine, and the peopling of South America. *Science* 320, 784–786. doi: 10.1126/science.1156533

- Eger, A. M., Marzinelli, E. M., Beas-Luna, R., Blain, C. O., Blamey, L. K., Byrnes, J. E. K., Carnell, P. E., Choi, C. G., HESSING-Lewis, M., Kim, K. Y., Kumagai, N. H., Lorda, J., Moore, P., Nakamura, Y., Pérez-Matus, A., Pontier, O., Smale, D., Steinberg, P. D., & Vergés, A. (2023). The value of ecosystem services in global marine kelp forests. *Nature Communications*, 14(1), 1894. doi.org/10.1038/s41467-023-37385-0
- Erlandson, J. M., Graham, M. H., Bourque, B. J., Corbett, D., Estes, J. A., & Steneck, R. S. (2007). The kelp highway hypothesis: marine ecology, the coastal migration theory, and the peopling of the Americas. *The Journal of Island and Coastal Archaeology*, 2(2), 161–174.
- FitzRoy, R. (1839). *Narrative of the surveying voyages of His Majesty's Ships Adventure and Beagle between the years 1826 and 1836: describing their examination of the southern shores of South America, and the Beagle's circumnavigation of the globe (Vol. 2)*. London: H. Colburn.
- Fondo Naturaleza Chile, Programa de Áreas Marinas Protegidas. (2022). Síntesis: Plan de Gestión Efectiva de Áreas Marinas Protegidas. Ministerio del Medio Ambiente, Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura, Oceana, World Wildlife Fund & Wildlife Conservation Society. 16 páginas.
- Friedlander, A. M., Ballesteros, E., Bell, T. W., Caselle, J. E., Campagna, C., Goodell, W., ... & Dayton, P. K. (2020). Kelp forests at the end of the earth: 45 years later. *Plos one*, 15(3), e0229259.
- Gendall, L., Schroeder, S. B., Wills, P., HESSING-Lewis, M., & Costa, M. (2023). A multi-satellite mapping framework for floating kelp forests. *Remote Sensing*, 15(5), 1276.
- Gendall, L., HESSING-Lewis, M., Wachmann, A., Schroeder, S., Reshitnyk, L., Crawford, S., ... & Costa, M. (2025). From archives to satellites: uncovering loss and resilience in the kelp forests of Haida Gwaii. *Frontiers in Marine Science*, 12, 1504701.
- Gell, F. R., & Roberts, C. M. (2003). Benefits beyond boundaries: The fishery effects of marine reserves. *Trends in Ecology & Evolution* 18 (9): 448–55. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(03\)00189-7](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(03)00189-7)
- González-Aragón, D., Rivadeneira, M. M., Lara, C., Torres, F. I., Vásquez, J. A., & Broitman, B. R. (2024). A species distribution model of the giant kelp *Macrocystis pyrifera*: Worldwide changes and a focus on the Southeast Pacific. *Ecology and Evolution*, 14(3), e10901.
- González-Aragón, D., Muñoz, R., Houskeeper, H., Cavanaugh, K., García-Tuñón, W., Farias, L., ... & Broitman, B. R. (2025). Seasonal and inter-annual dynamics of a *Macrocystis pyrifera* forest in Concepcion Bay, Chile. *Ecological Informatics*, 87, 103103.
- Guajardo-Rubilar, E., Mora-Soto, A., Buschmann, A., Faugeton, S. (2026) Spatio-temporal dynamics of giant kelp forests in the Humboldt current system revealed by satellite data and hierarchical Bayesian modeling. *Ecological Informatics*, Volume 95, 103746.
- Hamilton, S. L., Bell, T. W., Watson, J. R., Grorud-Colvert, K. A., & Menge, B. A. (2020). Remote sensing: generation of long-term kelp bed data sets for evaluation of impacts of climatic variation. *Ecology*, 101(7), e03031.
- Hollarsmith, J. A., Cornett, J. C., Evenson, E., & Tugaw, A. (2024). A century of canopy kelp persistence and recovery in the Gulf of Alaska. *Annals of Botany*, 133(1), 105–116.
- Houskeeper, H.F., Rosenthal, I.S., Cavanaugh, K.A., Pawlak, C., Trouille, L., Byrnes, J.E.K., Bell, T.W., and Cavanaugh, K.C. (2022). Automated satellite remote sensing of giant kelp at the Falkland Islands (Islas Malvinas). *PLoS ONE*, 17(1): e0257933.
- IUCN 2018. Applying IUCN's Global Conservation Standards to Marine Protected Areas (MPA). https://www.iucn.org/sites/dev/files/content/documents/applying_mpa_global_standards_final_version_050418.pdf
- Jensen, J. R., Estes, J. E., & Tinney, L. (1980). Remote sensing techniques for kelp surveys. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 46(6), 743–755.
- Kriegler, F. J. (1969). Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition. In *Proceedings of the sixth international symposium on remote sensing of environment* (pp. 97–131).
- Krumhansl, K.A., Okamoto, D.K., Rassweiler, A., Novak, M., Bolton, J.J., Cavanaugh, K.C. et al. (2016). Global patterns of kelp forest change over the past half-century. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113(48), 13785–13790.

- Man, L., Barbosa, R. V., Reshitnyk, L. Y., Gendall, L., Wachmann, A., Dedeluk, N., ... & Costa, M. (2025). Canopy-forming kelp forests persist in the dynamic subregion of the Broughton Archipelago, British Columbia, Canada. *Frontiers in Marine Science*, 12, 1537498.
- Mora-Soto, A., Palacios, M., Macaya, E. C., Gómez, I., Huovinen, P., Pérez-Matus, A., ... & Macías-Fauria, M. (2020). A high-resolution global map of giant kelp (*Macrocystis pyrifera*) forests and intertidal green algae (Ulvothyceae) with Sentinel-2 imagery. *Remote Sensing*, 12(4), 694.
- Mora-Soto, A., Capsey, A., Friedlander, A. M., Palacios, M., Brewin, P. E., Golding, N., Dayton, P., Van Tussenbroek, B., Montiel, A., Goodell, W., Velasco-Charpentier, C., Hart, T., Macaya, E. C., Pérez-Matus, A., & Macías-Fauria, M. (2021). One of the least disturbed marine coastal ecosystems on Earth: Spatial and temporal persistence of Darwin's sub-Antarctic giant kelp forests. *Journal of Biogeography*, 48(10), 2562–2577.
- Mora-Soto, A., Aguirre, C., Iriarte, J. L., Palacios, M., Macaya, E. C., & Macías-Fauria, M. (2022). A Song of Wind and Ice: Increased Frequency of Marine Cold-Spells in Southwestern Patagonia and Their Possible Effects on Giant Kelp Forests. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 127(6), e2021JC017801.
- Mora-Soto, A., Schroeder, S., Gendall, L., Wachmann, A., Narayan, G. R., Read, S., ... & Costa, M. (2024a). Kelp dynamics and environmental drivers in the southern Salish Sea, British Columbia, Canada. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1323448.
- Mora-Soto, A., Schroeder, S., Gendall, L., Wachmann, A., Narayan, G., Read, S., ... & Costa, M. (2024b). Back to the past: long-term persistence of bull kelp forests in the Strait of Georgia, Salish Sea, Canada. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1446380.
- Miller RJ, Lafferty KD, Lamy T, Kui L, Rassweiler A, & Reed DC (2018). Giant kelp, *Macrocystis pyrifera*, increases faunal diversity through physical engineering. *Proc R Soc B* 285: 20172571. <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2017.257>
- Nicholson, T. E., McClenachan, L., Tanaka, K. R., & Van Houtan, K. S. (2024). Sea otter recovery buffers century-scale declines in California kelp forests. *PLoS Climate*, 3(1), e0000290.
- Pérez-Matus, A., Micheli, F., Konar, B., Shears, N., Low, N. H. N., Okamoto, D. K., Wernberg, T., Krumhansl, K. A., Ling, S. D., Kingsford, M., Navarrete-Fernandez, T., Ruz, C. S., & Byrnes, J. E. K. (2025). Kelp forests as nursery and foundational habitat for reef fishes. *Ecology*, 106(2), e70007. <https://doi.org/10.1002/ecy.70007>
- Pessarrodona, A., Franco-Santos, R. M., Wright, L. S., Vanderklift, M. A., Howard, J., Pidgeon, E., ... & Filbee-Dexter, K. (2023). Carbon sequestration and climate change mitigation using macroalgae: a state of knowledge review. *Biological Reviews*, 98(6), 1945–1971.
- Pfister, C. A., Berry, H. D., & Mumford, T. (2017). The dynamics of kelp forests in the Northeast Pacific Ocean and the relationship with environmental drivers. *Journal of Ecology*, 106(4), 1520–1533.
- Pliscoff, P. (2022) Identificación de refugios climáticos terrestres y marinos en la Patagonia. Programa Austral Patagonia de la Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile. 26 pp.
- Reshitnyk, L., Saccomanno, V., Bell, T.W., & Cavanaugh, K.C. (2023). *Mapeo de kelp formador de dosel en el Océano Pacífico nororiental: Guía para responsables de tomar decisiones y profesionales*. The Hakai Institute, Heriot Bay, BC, Canada. doi: 10.21966/7ze4-x883
- Roberts, D.A., Gardner, M., Church, R., Ustin, S., Scheer, G., & Green, R. (1998). Mapping chaparral in the Santa Monica Mountains using multiple endmember spectral mixture models. *Remote Sensing of Environment*, 65(3), 267–279.
- Roberts, C.M., O'Leary, B.C., McCauley, D.J., Cury, P.M., Duarte, C.M., Lubchenco, J. et al. (2017). Marine reserves can mitigate and promote adaptation to climate change, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 114 (24) 6167–6175. <https://doi.org/10.1073/pnas.1701262114>
- Saccomanno, V. R., Bell, T., Pawlak, C., Stanley, C. K., Cavanaugh, K. C., Hohman, R., ... & Gleason, M. (2022). Using unoccupied aerial vehicles to map and monitor changes in emergent kelp canopy after an ecological regime shift. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 9(1), 62–75.
- Schroeder, S. B., Dupont, C., Boyer, L., Juanes, F., & Costa, M. (2019). Passive remote sensing technology for mapping bull kelp (*Nereocystis luetkeana*): A review of techniques and regional case study. *Global Ecology and Conservation*, 19, e00683.

Timmer, B., Reshitnyk, L. Y., Hessing-Lewis, M., Juanes, F., & Costa, M. (2022). Comparing the use of red-edge and near-infrared wavelength ranges for detecting submerged kelp canopy. *Remote Sensing*, 14(9), 2241.

Timmer, B., Reshitnyk, L. Y., Hessing-Lewis, M., Juanes, F., Gendall, L., & Costa, M. (2024). Capturing accurate kelp canopy extent: integrating tides, currents, and species-level morphology in kelp remote sensing. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1338483.

United Nations Environment Programme & Norwegian Blue Forests Network. (2023). *Into the Blue: Securing a Sustainable Future for Kelp Forests*. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/42255>

Wachmann, A., Mora-Soto, A., Yakimishyn, J., Bohlen, K., Fulton, E., & Costa, M. (2026). Centennial persistence of kelp forests on the West Coast of Vancouver Island, Canada. *Frontiers in Marine Science*, 13, 1720284.

Wernberg, T., & Filbee-Dexter, K. (2019). Missing the marine forest for the trees. *Marine Ecology Progress Series* 612: 209-215. <https://doi.org/10.3354/meps12867>

Número afiliación	Nombre de la institución y/u organización
1	Spectral Lab, Department of Geography, University of Victoria. Victoria, BC, Canada. Autora de correspondencia: Alejandra Mora-Soto autor de correspondencia (alemoras@uvic.ca)
2	IUCN Seaweed Specialist Group. Gland, Suiza.
3	Fundación Rewilding Chile. Puerto Varas, Chile.
4	Scott Polar Research Institute. Cambridge, Reino Unido.
5	Centro de Investigación de Ecosistemas de la Patagonia (CIEP). Coyhaique, Chile.

Autor	Afiliación
ALEJANDRA MORA-SOTO	1, 2, 3, 4*
MAURICIO PALACIOS	3, 5
MATHIAS HÜNE	3