

# Eventos extremos en ambientes marinos del PNACC BIO

Camila Fernández I\*., Leonardo Nuñez M, Ricardo Norambuena C, Francisca Rojas M, Fernanda Pino D,

Miguel Angel Penna D.

\*camilafernandez@oceanografia.udec.cl



## Índice

1	Resumen ejecutivo.....	3
2	Introducción .....	3
2.1	Contexto general .....	3
2.2	Relación cambio climático, acoplamiento atmósfera – océano .....	5
2.3	Concepto de eventos extremos.....	5
2.4	Interacción entre eventos extremos atmosféricos y el océano .....	6
3	Aproximación al estado del arte a nivel nacional e internacional .....	6
3.1	Plataformas con datos y simulaciones climáticas utilizadas .....	7
3.2	Talleres con expertos .....	8
4	Resultados .....	8
4.1	Eventos extremos marinos.....	8
4.1.1	Marejadas, aumento del nivel del mar, inundaciones y erosión costera registrados en Chile .....	8
4.1.2	Surgencia, floraciones algales nocivas e hipoxia .....	18
4.1.3	Olas de calor marinas.....	22
4.1.4	Olas de frío marinas.....	28
4.1.5	Ríos atmosféricos.....	31
4.2	Mapa de priorización de macrozonas geográficas según vulnerabilidad .....	32
4.3	Conclusiones del panel de expertos.....	33
5	Discusión.....	35
5.1	Panorama general - Evolución general de las proyecciones climáticas .....	35
5.2	Balance entre olas de frío y olas de calor en Patagonia .....	36
5.3	Oportunidades .....	36
5.4	Consideración de los modos de variabilidad natural.....	37
5.5	Falta de información en ciertos temas e inexactitudes .....	37
5.6	Inexactitudes y posibles errores en la plataforma ARCLIM.....	38
5.7	Falta de simulaciones RCP.....	38
5.8	Alcance de esta investigación.....	39
6	Conclusiones .....	39
7	Análisis de brechas .....	40
7.1	Falta de estudios en temas de relevancia .....	40
7.1.1	Olas de calor marinas.....	40
7.1.2	Olas de frío marinas.....	41

7.1.3	Ríos atmosféricos.....	41
7.1.4	Simulaciones RCPs .....	41
8	Glosario.....	41
9	Acrónimos y abreviaciones .....	43
10	Bibliografía .....	43

## 1 Resumen ejecutivo

El presente informe ofrece un análisis sobre el impacto del cambio climático en los sistemas costeros, particularmente enfocado a eventos extremos. Se examinaron las amenazas climáticas extremas que pueden provocar respuestas extremas en el océano, como marejadas, inundaciones, erosión costera, surgencia, floraciones algales nocivas, olas de calor, olas de frío marinas y ríos atmosféricos. Mediante el uso de plataformas con datos y simulaciones climáticas, y la participación de expertos en talleres, se han obtenido valiosos resultados para comprender las proyecciones climáticas y la vulnerabilidad de las macrozonas geográficas estudiadas. A pesar de ciertas limitaciones identificadas, este estudio proporciona una visión integral de los efectos del cambio climático y sienta las bases para futuras investigaciones y acciones de adaptación y mitigación, enfocado en las proyecciones climáticas que puedan servir a los tomadores de decisiones en la planificación de políticas y estrategias. Finalmente, se analizaron brechas que delatan la necesidad de seguir investigando, mejorar las herramientas y modelos utilizados, y aumentar la disponibilidad de datos y simulaciones específicas para el territorio nacional.

## 2 Introducción

El océano desempeña un papel fundamental en nuestro planeta, abarcando el 70% de su superficie. Su rol no solo es social y económico, sino también esencial para la regulación del clima global y el mantenimiento de la biosfera. Las alteraciones en los patrones climáticos y la elevación de las temperaturas están ejerciendo una presión sin precedentes sobre los ecosistemas marinos estableciéndose la necesidad de crear y actualizar patrones de previsión y escenarios de adaptación.

En este informe, se realiza un análisis del estado del arte de la literatura científica en cuanto a la incidencia y posibles consecuencias de eventos extremos marinos y su impacto a nivel nacional. El objetivo principal es proporcionar al lector una visión integral y actualizada del estado del arte acerca del impacto del cambio climático en el océano y las costas chilenas, así como de los eventos extremos y las proyecciones a futuro. Asimismo, se identificaron zonas del territorio nacional que presentan mayor vulnerabilidad frente a estos fenómenos, brindando una visión holística de los desafíos que enfrenta Chile en términos de adaptación, políticas públicas y gestión de riesgos.

### 2.1 Contexto general

El informe de síntesis (SYR) del sexto AR6 del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (**IPCC**) (2023) reconoce la interdependencia del clima, exosistemas y biodiversidad junto con la dimensión humana societal. Reconoce además la Asociación entre adaptación al cambio climático, mitigación, salud ecosistémica, desarrollo sustentable y conocimiento científico (IPCC 2023).

El informe SROCC (Special report on The Ocean and Cryosphere in a changing climate, 2019) apunta hacia una tasa de calentamiento global natural (es decir, de las temperaturas superficiales medias a nivel global) durante el período posterior a la última glaciación de 1°C a 1,5°C por cada 1.000 años. Actualmente, se reconoce la temperatura superficial a nivel global a alcanzado un alza de 1.1°C por sobre la media 1850-1900 en el periodo 2011-2020 con una alza más significativa en tierra que en el océano.

La variabilidad en atmósfera oceánica, criosfera y biosfera con una componente humana en su causalidad tiene ya un efecto en el sistema climático y de extremos climáticos en variadas regiones del globo (IPCC 2023). El aumento de nivel del mar, acentuado desde 1971 registra tasas de 3,7 mm año hasta 2006. Evidencia de eventos extremos observados como olas de calor, precipitaciones, sequías y ciclones tropicales se ha fortalecido desde el AR5 indicándose que la actividad humana podría con alta probabilidad haber incrementado la posibilidad de ocurrencia de eventos extremos desde 1950 en frecuencia al menos de olas de calor y sequías (IPCC 2023).

Para medir el cambio en la temperatura promedio actual, se utilizan datos de mediciones de temperatura recopilados de diversas fuentes, como mediciones de la temperatura del aire por radio sondeos, satélites y estaciones meteorológicas. En el caso de la temperatura superficial del mar, que está estrechamente relacionada con la temperatura del aire, se utilizan mediciones de boyas e instrumental oceanográfico autónomo, datos satelitales y mediciones *in situ* realizadas por barcos.

Estos datos se utilizan como entrada en **modelos climáticos**, los que se alimentan con datos observacionales y supuestos sobre las emisiones futuras de gases de efecto invernadero (**GEI**) y otros factores. A través de estas simulaciones computacionales se realizan las proyecciones del cambio climático, que pueden tener infinitas combinaciones de parámetros y escenarios posibles dependiendo de las simplificaciones o concentraciones de gases utilizados como datos de entrada, por lo que para estudiar el futuro del cambio climático se estandarizaron cuatro escenarios principales posibles para este siglo con valores fijos de concentración de gases. Estos se conocen como **Senderos Representativos de Concentración (RCP)**, por sus siglas en inglés), y representan diferentes trayectorias posibles de emisiones y se utilizan como base para modelos climáticos y evaluaciones de impacto. Los RCP más comunes son RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5. Estos números se refieren a la radiación radiativa forzada adicional estimada en vatios por metro cuadrado ( $W/m^2$ ) para el año 2100 en comparación con los niveles preindustriales. Cuanto mayor sea el número, mayor será la radiación solar y, por lo tanto, mayor será el calentamiento global proyectado y el cambio climático que conlleva ese aumento de energía.

En este contexto, el RCP2.6 representa un escenario de mitigación, donde se toman medidas significativas para reducir las emisiones de GEI y limitar el calentamiento global a menos de 2°C. Por otro lado, el RCP8.5 representa un escenario de alto crecimiento de emisiones, donde no se toman medidas significativas y las emisiones continúan aumentando a tasas elevadas. Estos escenarios RCP se utilizan para examinar una amplia gama de impactos del cambio climático, como el aumento de la temperatura global, los cambios en los patrones de precipitación, el aumento del nivel del mar y los efectos en los ecosistemas y la biodiversidad.

## 2.2 Relación cambio climático, acoplamiento atmósfera – océano

La atmósfera y el océano están interconectados como un **sistema acoplado** a través del cual intercambian energía, calor y diferentes gases, como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), oxígeno (O<sub>2</sub>) y vapor de agua (H<sub>2</sub>O). La atmósfera recibe calor y agua del océano a través de la evaporación, lo que da lugar a la formación de nubes y la posterior precipitación. A su vez, el océano absorbe la radiación solar y regula la temperatura atmosférica a través de corrientes oceánicas y la circulación profunda. A su vez, los cambios en la temperatura y los vientos en la atmósfera pueden afectar las corrientes oceánicas y la distribución de nutrientes en el agua a través de procesos de surgencia entre otros.

El océano juega un rol fundamental en la regulación del clima de acuerdo con los siguientes aspectos:

- i. absorbe el 93% del calor que se mantiene en la atmósfera retenido por el dióxido de carbono de origen antropogénico (Hoegh-Guldberg et al 2019), participando así en la regulación de las temperaturas globales,
- ii. captura entre el 25 y el 30% de las emisiones antropogénicas de CO<sub>2</sub>.

La tendencia que se observa es un aumento de temperatura a nivel global y en particular a nivel oceánico junto con una disminución del pH hacia valores más ácidos (Cheng et al., 2022). Consecuencias, que, a su vez, generan sus propias cadenas de impactos en diversas las escalas, afectando desde las propiedades físicas intrínsecas del agua como a los componentes (especies) de los ecosistemas. La vida marina se enfrenta a desafíos sin precedentes para su supervivencia, reproducción y crecimiento, comprometiendo la capacidad del océano para proporcionar alimentos por la pérdida de hábitats costeros (IPCC 2014, 2018, 2019).

Debido al cambio climático ya se han observados diversos impactos en el océano, tales como cambios en la temperatura, cambios en patrones de viento a gran escala y escala regional, olas de calor atmosféricas y marinas, disminución en la cobertura del hielo marino, aumento del nivel del mar, acidificación y desoxigenación de las aguas, aumento de marejadas y erosión costera, aumento en frecuencia de floramientos algales nocivos y pérdida de biodiversidad marina, junto con disminuciones en la productividad y cantidad de biomasa a nivel global. Algunos de estos fenómenos avanzan a baja velocidad, mientras que otros son esporádicos, rápidos e intensos. A continuación se concentrará la atención en **eventos extremos**, definidos como eventos meteorológicos, oceanográficos o geofísicos anómalos en alguna de sus características (extensión temporal, frecuencia o intensidad). Se pondrá especial atención en eventos extremos oceanográficos.

## 2.3 Concepto de eventos extremos

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (**IPCC, 2023**) define como **evento climático extremo** a un evento que es poco común en un lugar y momento del año en particular cuyas características (intensidad, magnitud etc.) alcanza niveles anómalos, considerándose parte del 10% de los fenómenos más intensos registrados en los últimos 30 años.

Además, los eventos extremos están asociados a perjuicios en la salud tanto de los humanos como de la flora y fauna, además de graves daños monetarios por medio de daños a infraestructura o a servicios básicos, como la producción de energía, la provisión de agua dulce y la alimentación.

Dichos eventos pueden ser atmosféricos (olas de calor, sequía, precipitaciones, ráfagas de viento, tormentas), oceanográficos (olas de calor marinas, eutrofización extrema, hipoxia, blanqueamiento de corales etc) y geofísicos (e.g. erupciones volcánicas). En todos los casos se trata de manifestaciones de largo alcance de fenómenos con impacto societal.

## 2.4 Interacción entre eventos extremos atmosféricos y el océano

Los eventos extremos ocurren por la capacidad del cambio climático de modificar los extremos de ciertos fenómenos meteorológicos naturales. Como el océano y la atmósfera forman un sistema acoplado, condiciones anormales en uno generarán una respuesta anormal en el otro. Por ejemplo, el paso de ciclones genera marejadas sostenidas y un aumento temporal del nivel del mar. En medio terrestre, el paso de ríos atmosféricos puede generar inundaciones que, posterior a periodos de sequías tienen efectos aditivos en la franja costera y daños a infraestructura, afectando la calidad de vida de las personas que viven en la costa y poniendo su integridad física en peligro. Estos extremos combinados o “compund events” son objeto de una atención reforzada debido a la intensidad de los efectos materiales que generan. Los eventos extremos marinos incluyen olas de calor marinas, tsunamis y subducciones masivas, las que pueden interactuar con otros factores degradando la oxigenación y provocando picos de acidificación. En la sección 3 se describirán eventos marinos y su contexto nacional e internacional.

## 3 Aproximación al estado del arte a nivel nacional e internacional

La presente investigación se basa en una revisión bibliográfica, que implica la recopilación y análisis exhaustivo de una amplia gama de fuentes secundarias de información. A través del examen crítico y sistemático de la literatura científica y de los informes provenientes de fuentes oficiales expertas en el tema del cambio climático, tales como el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, la Organización Meteorológica Mundial, el Panel Intergubernamental de Cambio Climático y el Ministerio del Medio Ambiente de Chile disponible, se identificaron las principales teorías, conceptos y descubrimientos relacionados al cambio climático en Chile y cómo este afecta a los océanos provocando eventos extremos, obteniendo una visión panorámica actualizada que dé cuenta del estado del arte respecto del tema de estudio.

En adición a la revisión bibliográfica, se realizó una investigación complementaria para enriquecer la metodología del presente estudio. Esta consistió en una exhaustiva búsqueda y revisión de bases de datos con información sobre eventos extremos atmosféricos y marinos ocurridos en Chile en el pasado y sus proyecciones a futuro. Esta búsqueda permitió recopilar datos relevantes y actualizados sobre la frecuencia y características de dichos eventos en la región, como las áreas afectadas y su duración característica. Además, se exploraron diversas plataformas y trabajos científicos sobre proyecciones del cambio climático para el futuro cercano y medio, considerando diferentes escenarios de concentración de gases de efecto invernadero. Se consideró el escenario más pesimista, en el cual las emisiones de gases de efecto invernadero continúan aumentando sin restricciones (RCP 8.5).

Para obtener información adicional y enriquecer el análisis, se recopiló información desde fuentes primarias, a través de la consulta con expertos. Esta consulta se realizó a través de la organización de un taller con especialistas en paneles dedicados a temas como variabilidad térmica (olas de frío y de calor), ríos atmosféricos, surgencia, marejadas, habitabilidad y pérdida de terreno costero. Este taller

proporcionó un espacio para la discusión y el intercambio de conocimientos con profesionales altamente calificados que han liderado estudios sobre estos temas, permitiendo obtener información actualizada, perspectivas especializadas y posibles recomendaciones para abordar los desafíos identificados en el informe.

El área de estudio corresponde a todo el territorio costero continental nacional, desde la Región de Arica y Parinacota hasta la Región de Magallanes, como se muestra en los mapas de cada sección. No se consideraron los territorios extra marítimos de Chile como Juan Fernández, Rapa Nui y la Antártica.

A nivel internacional se consideran los siguientes puntos críticos en el estudio de eventos extremos meteorológicos:

- La duración limitada de series de tiempo permitiendo documentar la evolución de eventos extremos.
- Limitaciones instrumentales para automatizar la observación de eventos extremos
- Limitaciones en la comprensión de los fenómenos físicos que generan extremos combinados
- Límites de sistemas de modelación

### 3.1 Plataformas con datos y simulaciones climáticas utilizadas

Se trabajó con datos de simulaciones climáticas provenientes de dos fuentes, que son las únicas enfocadas en Chile: el Atlas de Riesgos Climáticos ([ARCLIM](#)) del Ministerio del Medio Ambiente y la Plataforma de Simulaciones Climáticas ([PSC](#)) del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia. Posteriormente estos datos fueron graficados en cartografías con proyección espacial WGS84 UTM19S.

En la Tabla 3.1.1 se muestran las características de las simulaciones climáticas que contempla cada página. Cabe destacar que PSC cuenta con 18 variables netamente físicas, mientras que ARCLIM cuenta con 59 variables físicas y 12 cadenas de impactos (es decir, las consecuencias del cambio en esas variables físicas), que en total muestran 63 mapas con amenazas, exposición, sensibilidad y riesgo.

Tabla 3.1.1: Características de las plataformas de simulación utilizadas en este estudio.

Plataforma	Dirección web	Escenarios de concentración contemplados (RCP)	Periodo considerado como pasado-presente	Periodo considerado como futuro
ARCLIM	<a href="https://arclim.mma.gob.cl">https://arclim.mma.gob.cl</a>	RCP 8.5	1980 a 2010	“futuro mediano”: 2035 a 2065
PSC	<a href="https://simulaciones.cr2.cl">https://simulaciones.cr2.cl</a>	RCP 8.5 y RCP 2.6	1985 a 2005	“futuro cercano”: 2020 a 2044
				“futuro intermedio”: 2045 a 2069
				“futuro lejano”: 2070 a 2094

## 3.2 Talleres con expertos

Se estableció un panel de expertos compuesto por tres destacados profesionales en el campo de la geofísica, oceanografía y biología marina. Los expertos participantes fueron Martín Jacques Coper, geofísico de la Universidad de Chile y doctor en ciencias del clima de la Universidad de Berna; Diego Narváez, oceanógrafo de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso y doctor en oceanografía de la Universidad Old Dominion; y Fabián Tapia, biólogo marino de la Universidad de Concepción y doctor en oceanografía biológica del Massachusetts Institute of Technology. La colaboración con este panel permitió enriquecer y contextualizar los hallazgos obtenidos a través de un enfoque multidisciplinario y riguroso, garantizando la robustez de las conclusiones presentadas en este informe.

## 4 Resultados

A continuación, se muestran los resultados de la investigación. Se inicia mostrando en subsecciones cada evento extremo registrado, comentando en palabras simples en qué consisten, a qué áreas afectan, a qué consecuencias se les asocian, qué los provoca, ocurrencia en los últimos años en Chile y por último sus proyecciones a futuro. Posteriormente se muestra el mapa de priorización de macrozonas geográficas con índices de vulnerabilidad.

### 4.1 Eventos extremos marinos

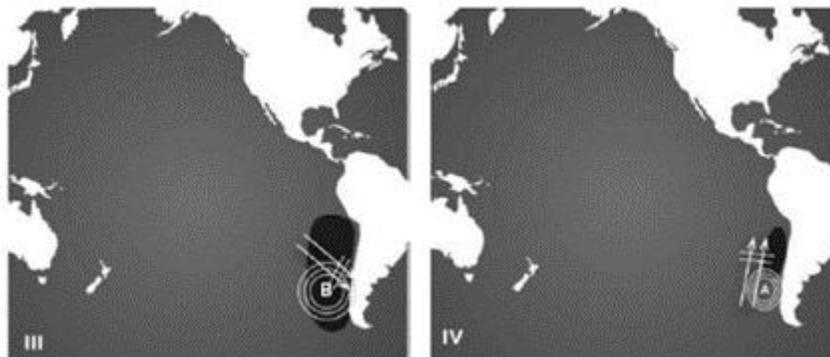
#### 4.1.1 Marejadas, aumento del nivel del mar, inundaciones y erosión costera registrados en Chile

Se le llama marejada al fenómeno de oleaje extremo en el cual las olas del mar aumentan su altura y fuerza, llegando más allá de los bordes naturales en los que las olas se suelen delimitar. La duración de una marejada puede variar, ya que depende de la intensidad y la persistencia de los factores que la generan. En algunos casos, las marejadas pueden durar solo unas horas, así como varios días. Si bien son el tercer desastre natural que más provoca daños en el país ([EM-DAT, 2017](#)), la ocurrencia de marejadas en Chile ha sido poco documentada (Ministerio del Medio Ambiente, 2019).

El impacto de una marejada en la zona costera está determinado por su intensidad, la cual a su vez depende de su origen. En el caso de las marejadas en Chile, se han observado numerosos impactos, tales como inundaciones en áreas bajas cercanas a la costa, erosión del lecho marino, pérdida y erosión de playas, daños en infraestructuras costeras, graves afectaciones en puertos, caletas y embarcaciones, alteraciones en los ecosistemas de humedales, intrusión de agua salina en fuentes de agua dulce, pérdida de cultivos costeros y cambios en la morfología de desembocaduras, entre otros efectos materiales (Beyá y Winckler, 2013; Winckler et al., 2017; Ibaceta et al., 2017; Molteni et al., 2017; Ministerio del Medio Ambiente, 2019). Además, las marejadas son responsables de sensibles fallecimientos y ahogamientos cada año entre bañistas y curiosos. Como se comentó anteriormente, son el tercer desastre natural que más provoca daños en el país, después de terremotos y tsunamis ([EM-DAT, 2017](#)).

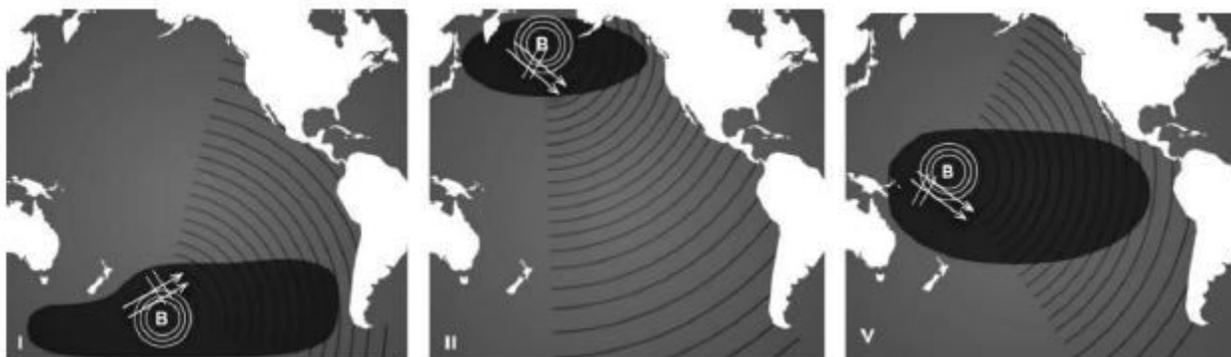
En cuanto a las causas de las marejadas, existen diversos factores que juegan un rol en el nacimiento, desarrollo y mantención de la ola. Entre los factores que comienzan a generar la ola, estos pueden tener un origen tanto en áreas cercanas a la costa como a grandes distancias, del otro lado del océano Pacífico. En el primer caso, son marejadas provocadas por vientos, que pueden ser provocados tanto por centros de alta presión como por centros de baja presión ubicados cerca de la costa, que generan

ráfagas poderosas que empujan el agua circundante hacia el este (o sureste, noreste), de modo que las olas se mueven hacia la costa. Un esquema de esto puede observarse en la Figura 4.1.1. Notar que los centros de baja presión (ciclones, esquematizados con un círculo y una letra B) se asocian con tormentas, mientras que los centros de alta presión (anticiclones, esquematizados por un círculo y una letra A) se asocian con días despejados.



*Figura 4.1.1: Esquema que muestra el nacimiento de las olas que terminarán en marejadas. A la izquierda, un centro de baja presión (ciclón) que mueve las olas hacia el suroeste en un contexto de tormenta. A la derecha, un centro de alta presión (anticiclón) que mueve las olas hacia el noreste en un contexto de día despejado. Obtenido de Ministerio del Medio Ambiente (2019).*

En el segundo caso, son marejadas provocadas por sistemas de baja presión en zonas alejadas, del otro lado del océano Pacífico (ver Figura 4.1.2). A la izquierda, se muestra un núcleo de baja presión en el océano Pacífico sur, el cual es más probable que llegue a nuestras costas durante nuestro invierno. Al centro, un núcleo de baja presión en el Pacífico norte. A la derecha, un centro de baja presión en el Pacífico ecuatorial asociado a una tormenta tropical, el cual es más probable que se forme durante nuestro verano.



*Figura 4.1.2: Esquema que muestra el nacimiento de las olas que terminarán en marejadas en la costa chilena. A la izquierda, un núcleo de baja presión en el océano Pacífico sur, el cual es más probable que llegue a las costas durante nuestro invierno. Al centro, un núcleo de baja presión en el Pacífico norte. A la derecha, un centro de baja presión en el ecuador asociado a una tormenta tropical, el cual es más probable que se forme durante nuestro verano. Obtenido de Ministerio del Medio Ambiente (2019).*

Además de los sistemas de altas y bajas presiones que provocan vientos que terminan en marejadas, también hay otros aspectos que influyen hasta dónde alcanzará la ola. Estos son: el aumento del nivel del mar provocado por el cambio climático y los ciclos naturales que siguen las mareas (como la

presencia de la pleamar, ver Figura 4.1.3). El aumento del nivel del mar hace que las olas de las marejadas lleguen más lejos y por lo tanto puedan generar más daños.

La Organización Meteorológica Mundial determinó las principales causas antropogénicas que provocan el aumento del nivel del mar, siendo la principal el calentamiento oceánico que genera expansión térmica de las moléculas (provocando el 55% del aumento registrado), seguido por el derretimiento de las capas de hielo de Groenlandia y Antártida (36% del aumento) y finalmente los cambios en el almacenamiento del agua terrestre (10% del aumento) (WMO, 2022). Cabe destacar que tanto el calentamiento oceánico como el derretimiento de los hielos están directamente provocados por el aumento de la temperatura del aire generados por el efecto invernadero que proviene de las emisiones antropogénicas. Cuanto más aumente el nivel del mar debido al calentamiento de la Tierra, más lejos llegarán las marejadas.

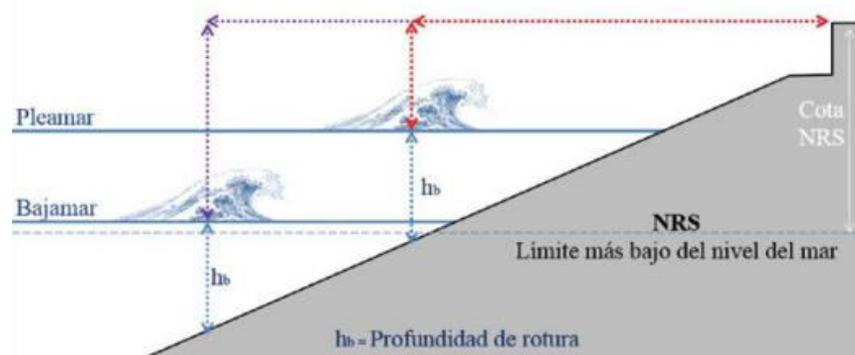


Figura 4.1.3: Influencia de la marea en la posición de la rompiente del oleaje respecto a un punto en la costa. Obtenido de Molina et al. (2022).

Sobre la ocurrencia de marejadas en Chile, se reporta que este es un fenómeno que ocurre decenas de veces al año y que cada vez ocurren una mayor cantidad de eventos y más intensos. Si bien diversas fuentes muestran discrepancias en cuanto al número de marejadas reportado año a año, todas están de acuerdo en que la tendencia al aumento es notable y segura. Según un informe del Ministerio del Medio Ambiente (2019), la tendencia de la ocurrencia de este fenómeno ha pasado de ser de 5 eventos por año a mediados del siglo XX a aproximadamente 20 eventos por año en el siglo XXI. Otra fuente muestra que se pasó de 5 eventos destructivos por año en la década de los 90 a aproximadamente 7 por año en la década de los 2010 (Campos-Caba, 2016, ver Figura 4.1.4). En la Figura 4.1.5 se muestran los avisos de marejadas emitidos por el Servicio Meteorológico de la Armada entre 2006 y 2020, en la que se aprecia una notoria tendencia al alza a medida que pasan los años, pasando de entre 20 a 30 avisos por año a comienzo de siglo a entre 40 a 50 avisos por año desde el año 2015 (CAMPORT, 2021). Cabe destacar que cada uno de los avisos de marejada lleva consigo un cese de la operación portuaria, que solo en el año 2020 provocaron pérdidas evaluadas en 345 millones de dólares (CAMPORT, 2021).

Además, se ha reportado un cambio tanto en la dirección del oleaje (de  $20^\circ$  hacia el sur), como un aumento significativo de la altura máxima de las olas y en la época del año en que ocurren. Si bien hace un par de décadas atrás las marejadas se asociaban a tormentas de invierno, en la última década se han registrado marejadas en todas las estaciones del año, incluyendo el verano (Martínez et al., 2018), aunque aquellas que han causado mayor daño siguen siendo durante el invierno (1965, 1968, 1986, 1987) (Campos-Caba, 2016).

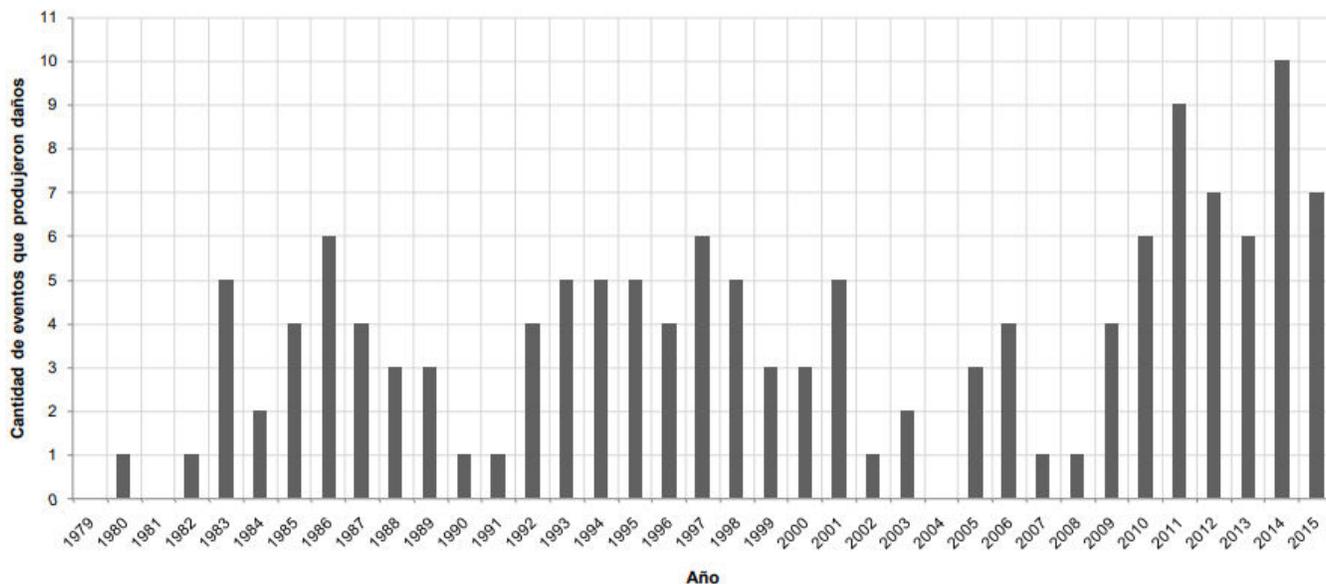


Figura 4.1.4: Cantidad de marejadas que provocaron daños en las costas de Chile por año, 1979-2015. Extraído de Campos-Caba (2016).

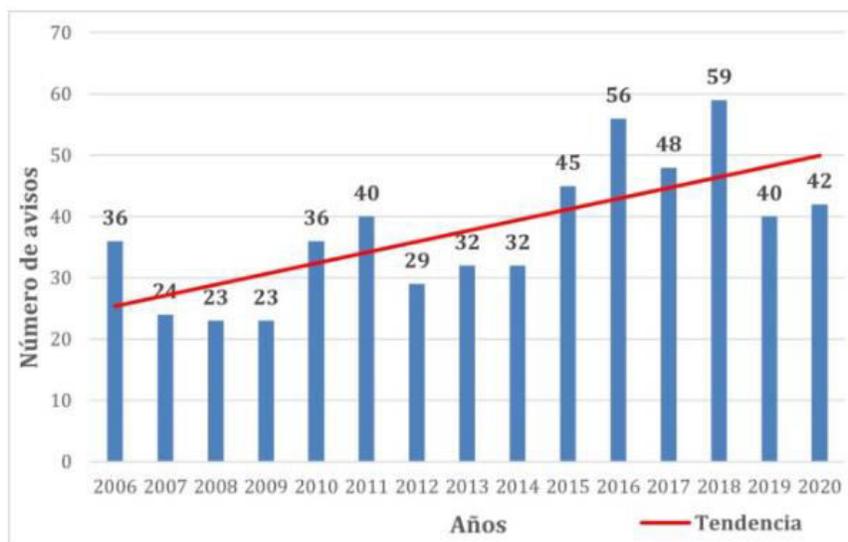


Figura 4.1.5: Avisos de marejadas emitidos por el Servicio Meteorológico de la Armada entre 2006 y 2020. Obtenido de CAMPORT (2021).

Durante las últimas tres décadas, se ha observado un aumento promedio del nivel medio del mar global de aproximadamente 3,4 mm por año<sup>1</sup>. Sin embargo, en la última década (2013-2022), esta tasa ha superado los 4 mm por año, evidenciando que la tendencia al aumento también aumenta, a una razón de 0,12 mm más cada año (WMO, 2022). De todas formas, esta es una cifra a nivel global, y el aumento del nivel del mar no es parejo para todo el planeta por cambios en la gravedad y la temperatura del océano, por lo que hay zonas que registran un aumento de 10 mm por año mientras que otras apenas registran aumento, o incluso una ligera disminución. En la Figura 4.1.6 se puede apreciar cuáles son los

<sup>1</sup> Con una incertidumbre de  $\pm 0,3$  mm.

lugares en los que el nivel del mar aumenta más a nivel global. Se observa que la zona del océano Pacífico frente a las costas de Chile es el lugar del mundo en que menos aumenta el nivel del mar fuera del océano Austral, registrando una tasa de entre 1 y 3 mm por año, salvo para la zona de Patagonia Norte en que la cifra llega hasta 4 mm por año. En la Figura 4.1.7 se muestra la evolución del nivel medio del mar global desde 1993 a 2022, demostrando que desde 1993 hasta la fecha el promedio global del nivel del mar ha aumentado alrededor de 103 mm.

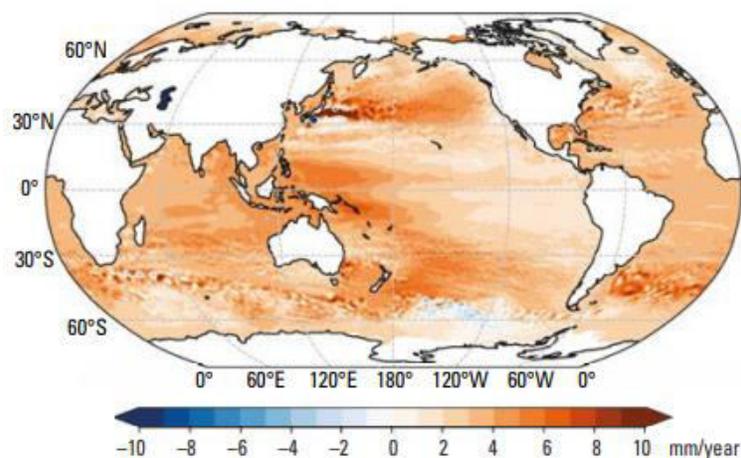


Figura 4.1.6: Tendencias mundiales del aumento del nivel del mar en milímetros por año para el período 1993-2022. Obtenido de WMO (2022).

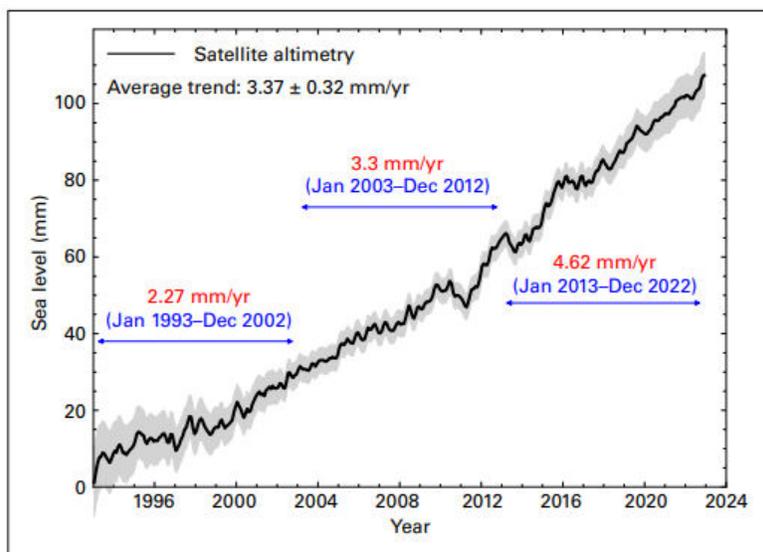
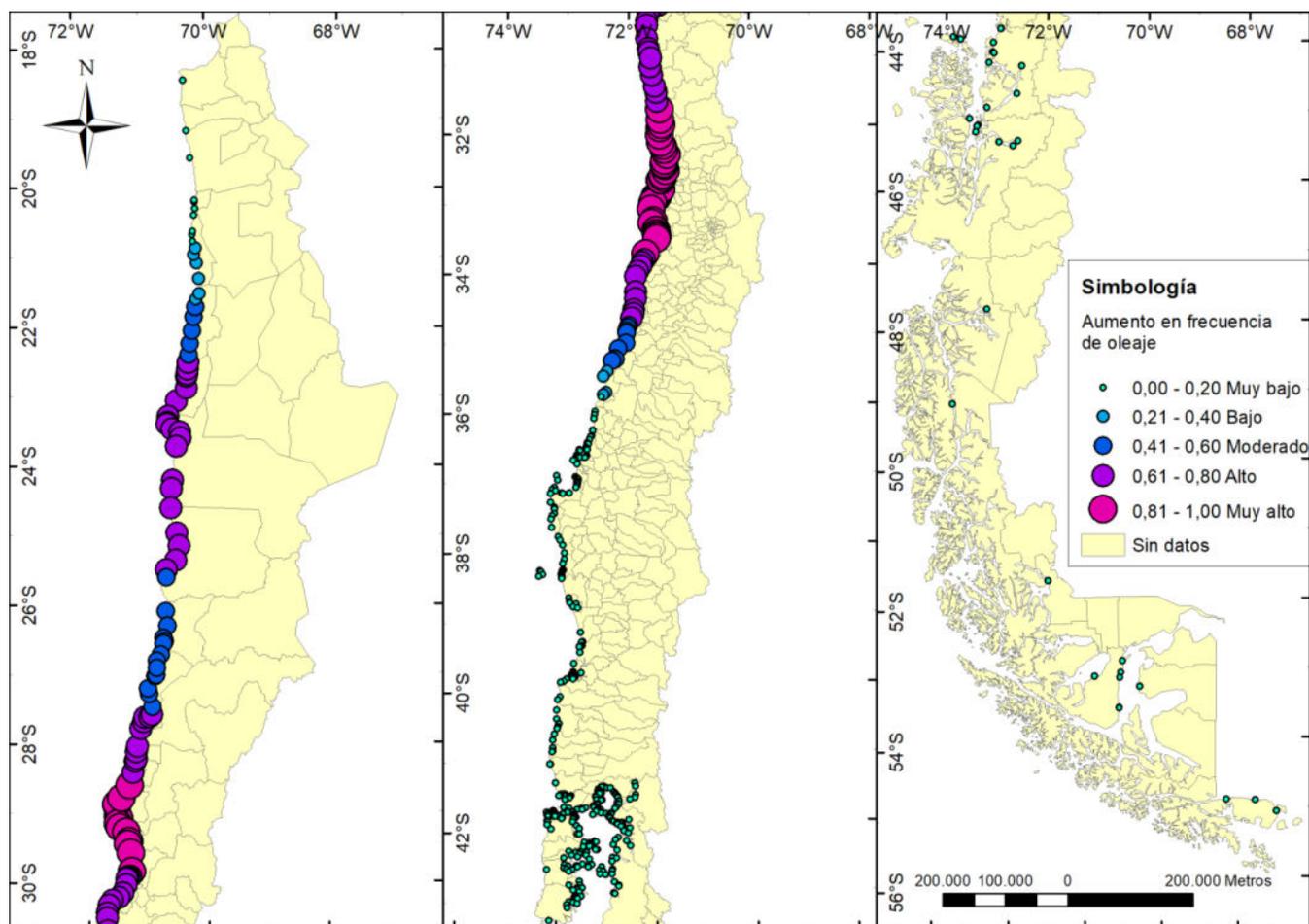


Figura 4.1.7: Evolución del nivel medio del mar global (1993-2022). La curva negra representa el nivel medio del mar global, mientras que el área achurada en gris muestra la incertidumbre asociada. También se muestran las tendencias por década escritas en la figura. Obtenido de WMO (2022).

En cuanto a las tendencias futuras y las simulaciones climáticas para marejadas, aumento del nivel del mar e inundaciones costeras, todas concuerdan en que se espera un incremento en la frecuencia e intensidad de estos fenómenos en todo el territorio nacional. La plataforma de simulaciones climáticas ARCLIM presenta diferentes probabilidades de aumento del oleaje según la zona de interés, basados

en el aumento del nivel del mar. Aunque no especifica el incremento exacto en la altura de las olas, estos índices resultan útiles para identificar las áreas con mayor riesgo y tomar precauciones correspondientes. Cabe destacar que estos modelos no toman en cuenta la tendencia hacia la intensificación de los vientos superficiales que se prevén para el hemisferio norte y sur, el cual es un factor importante que provocará marejadas de mayor tamaño y energía (Lobeto et al., 2021). En la Figura 4.1.8, se muestra un índice que indica las zonas con mayor amenaza de aumento en la frecuencia de las marejadas, lo cual podría generar condiciones no operativas para las actividades pesqueras de embarcaciones menores en el futuro (2035-2065). Según estos datos, las regiones costeras más amenazadas se encuentran entre la Región de Antofagasta y la Región del Maule, siendo particularmente críticas las zonas al sur de la Región de Atacama, al norte de la Región de Coquimbo y toda la Región de Valparaíso.

En la Figura 4.1.9, se presenta un mapa con la probabilidad de aumento de la cota de inundación para el futuro medio (2035-2065). De aquí se aprecian áreas de alta amenaza, como la Península de Mejillones y sus alrededores, así como todas las regiones desde la mitad de la Región de Coquimbo hasta la mitad de la Región de Los Lagos.



*Figura 4.1.8: Cambio en el régimen de oleaje que provocará condiciones no operativas en las actividades pesqueras de embarcaciones menores, basado en el aumento en frecuencia del oleaje. Entre más cercano a 1 es el valor, mayor es la amenaza de aumento de oleaje que provoque condiciones no operativas. Este aumento en frecuencia se realiza comparando un escenario futuro*

(2035-2065, bajo un escenario RCP 8.5) y el clima histórico (1980-2010). Elaboración propia a partir de los datos de [ARCLIM](#).

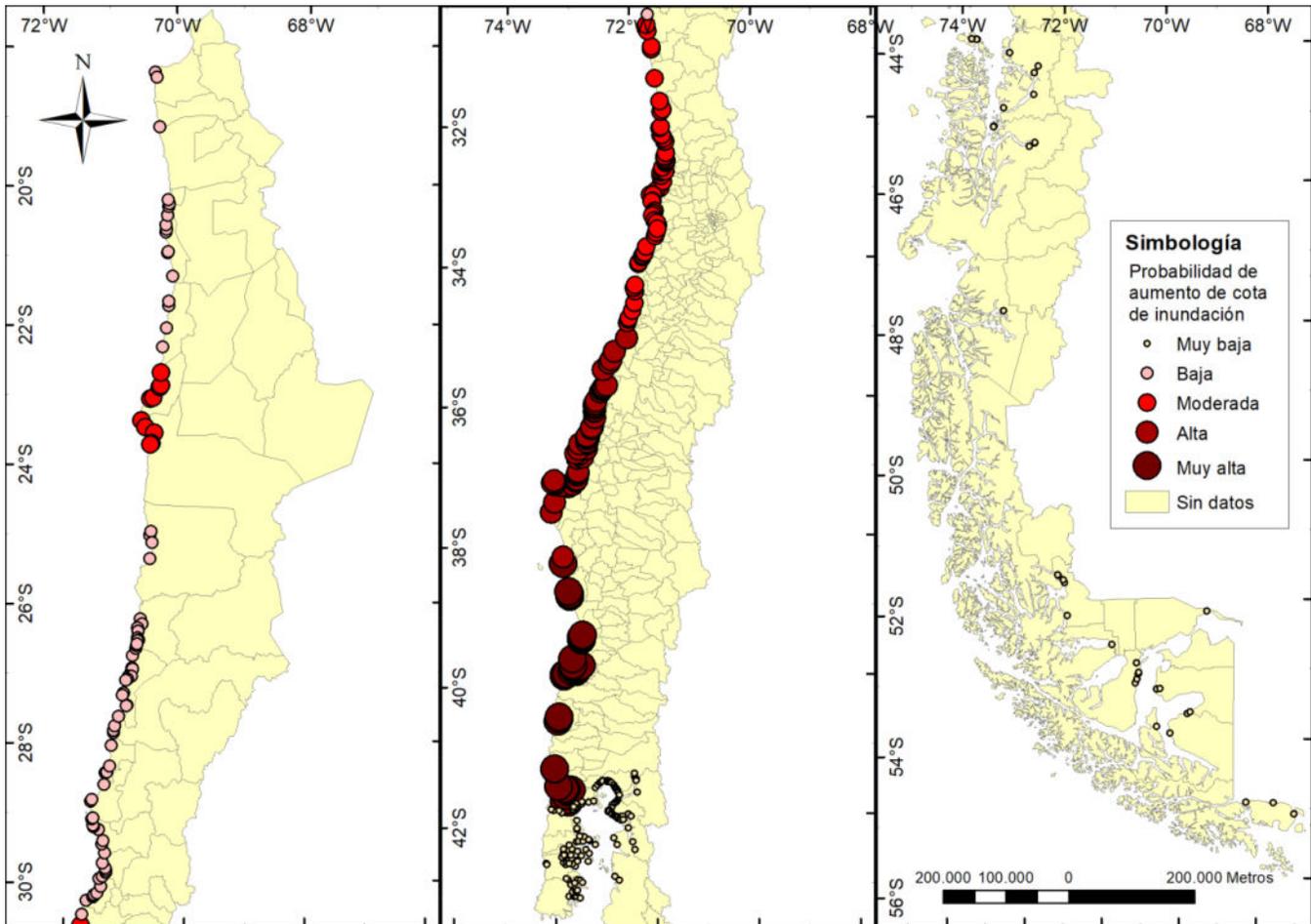


Figura 4.1.9: Cambio en la cota de inundación (por una combinación de aumento del nivel de mar y aumento de intensidad de las marejadas), expresado en términos de probabilidad. El cambio corresponde a la diferencia entre el clima futuro (2035-2065, bajo el escenario RCP 8.5) y el clima histórico (1980-2010). Elaboración propia a partir de los datos de [ARCLIM](#).

En la Figura 4.1.10 se representa la amenaza de erosión de playas causada por inundaciones debido al aumento en la intensidad de las marejadas y el incremento del nivel del mar para el futuro medio (2035-2065). Aunque los datos disponibles son limitados, se observa en este mapa que la costa de la Región del BioBío, incluyendo la zona de la Península de Arauco, presenta la mayor probabilidad de sufrir erosión de playas debido al aumento en la altura de inundación. Es importante destacar que todas las áreas representadas en esta cartografía muestran probabilidades altas, superando los 0.7 puntos en una escala máxima de 1, por lo que es altamente probable que todas las zonas aquí señaladas sufran los efectos de la erosión de playas.

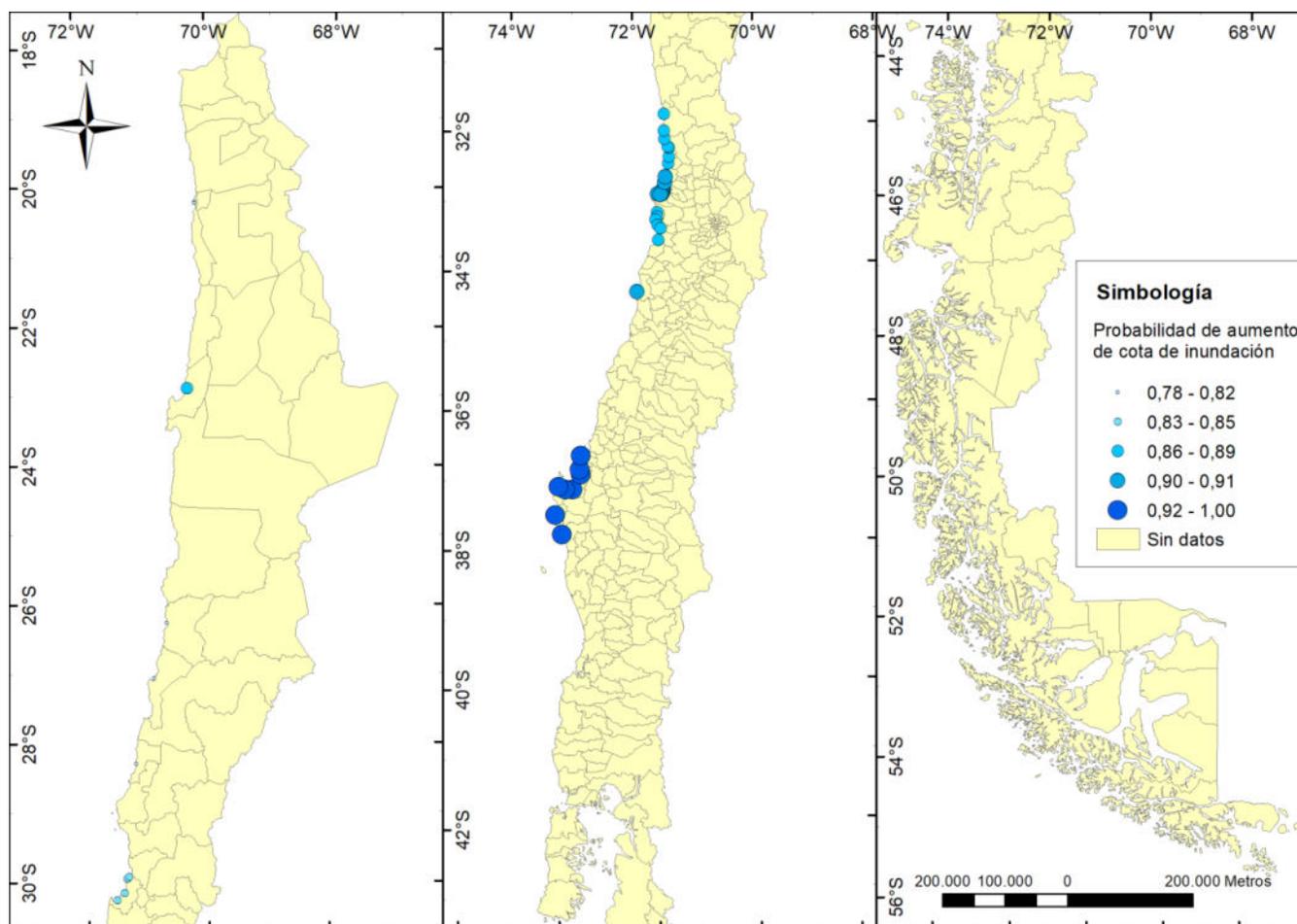


Figura 4.1.10: Amenaza de erosión de playas. Probabilidad de cambio en la cota de inundación debido a la combinación de aumento del nivel de mar y aumento en la intensidad de las marejadas. El cambio corresponde a la diferencia entre el clima futuro (2035-2065, bajo el escenario RCP 8.5) y el clima histórico (1980-2010). Elaboración propia a partir de los datos de [ARCLIM](#).

En la Figura 4.1.11 se presenta un índice que evalúa la amenaza del aumento de las cotas de inundación marítima, lo cual puede impactar los ecosistemas de humedales costeros, debido al incremento del nivel del mar y los cambios en el oleaje previstos para el futuro medio (2035-2065). Se destaca que todas las comunas costeras muestran un índice de amenaza elevado (superando los 0.7 puntos en una escala máxima de 1), siendo las comunas con mayor amenaza aquellas ubicadas dentro de las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá y Magallanes, en los extremos norte y sur del país.

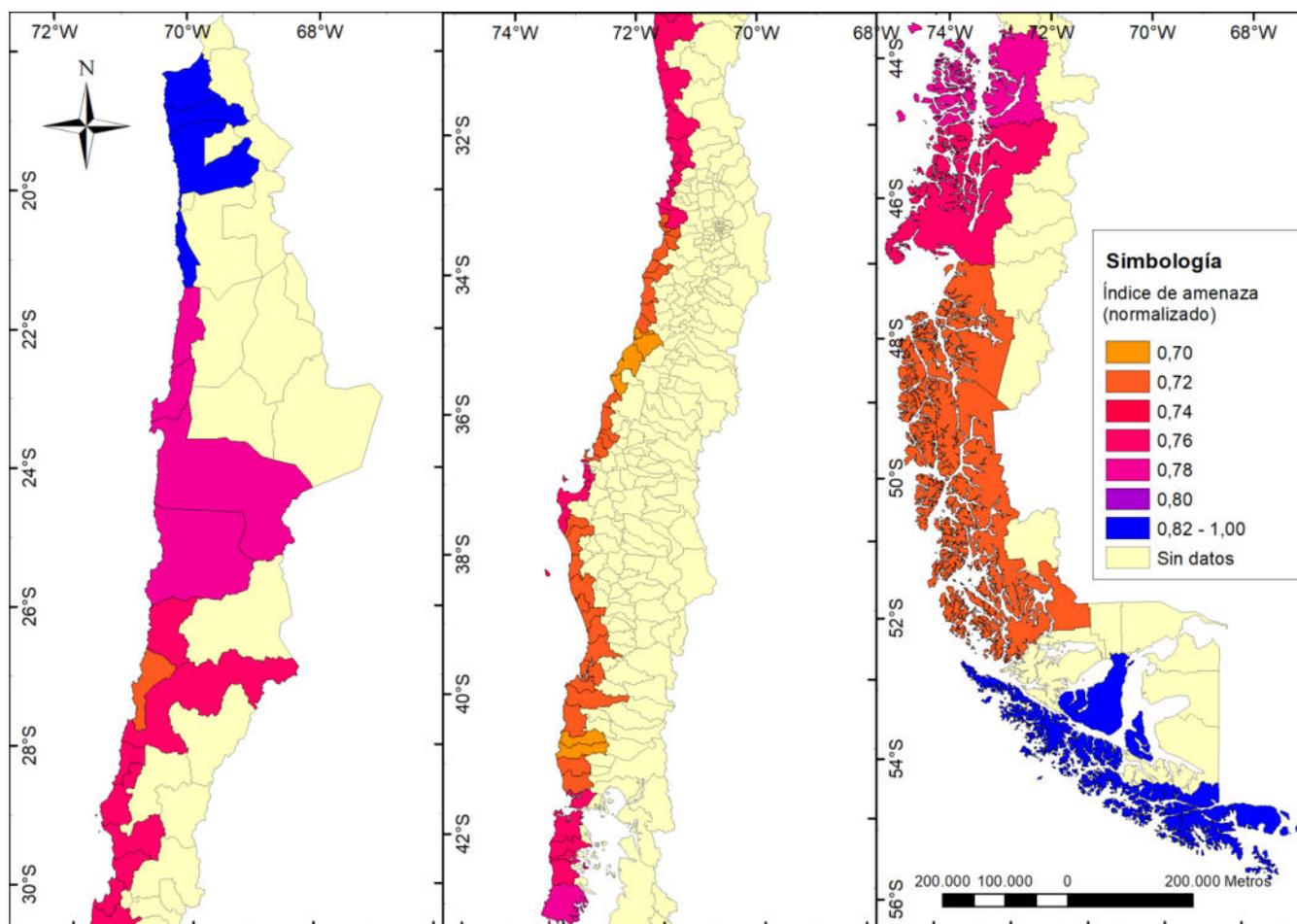


Figura 4.1.11: Índice de amenaza del aumento de las cotas marítimas de inundación que pueden alterar los ecosistemas de humedales costeros, producto del aumento del nivel del mar y los cambios en la disposición del oleaje. El índice considera la amenaza como el cambio que habrá en la frecuencia de este fenómeno en el futuro para cada comuna costera, para el periodo 2035-2065 bajo un escenario RCP 8.5, comparándolo con el clima histórico de 1980-2010. Elaboración propia a partir de los datos de [ARCLIM](#).

Pasando a estimaciones cuantitativas sobre cuánto aumentará el nivel del mar en las costas chilenas, en la Figura 4.1.12 se muestra el aumento esperado para los puertos de la mitad norte de Chile. En ella, se ve que el aumento en todos estos puertos (Arica, Iquique, Mejillones, Antofagasta, Coquimbo, Quintero, Valparaíso, San Antonio y San Vicente) es bastante parejo, por lo que se esperan cifras similares para cada uno de ellos. Notar que la curva sigue una forma exponencial, lo que significa que cada vez el aumento será más rápido. Para el año 2030 el aumento esperado es en promedio de 0,1 metros respecto de lo considerado normal (periodo 1986-2005); para el año 2050 es de 0,2 metros, para el año 2070 es de 0,35 metros y para el año 2100 es de 0,65 metros. Notar que, de acuerdo a la Figura 4.1.6, la mitad norte de Chile será aquella con menor aumento del nivel del mar, y que para la zona sur de Chile el aumento proyectado es de cerca del doble que para la zona norte.

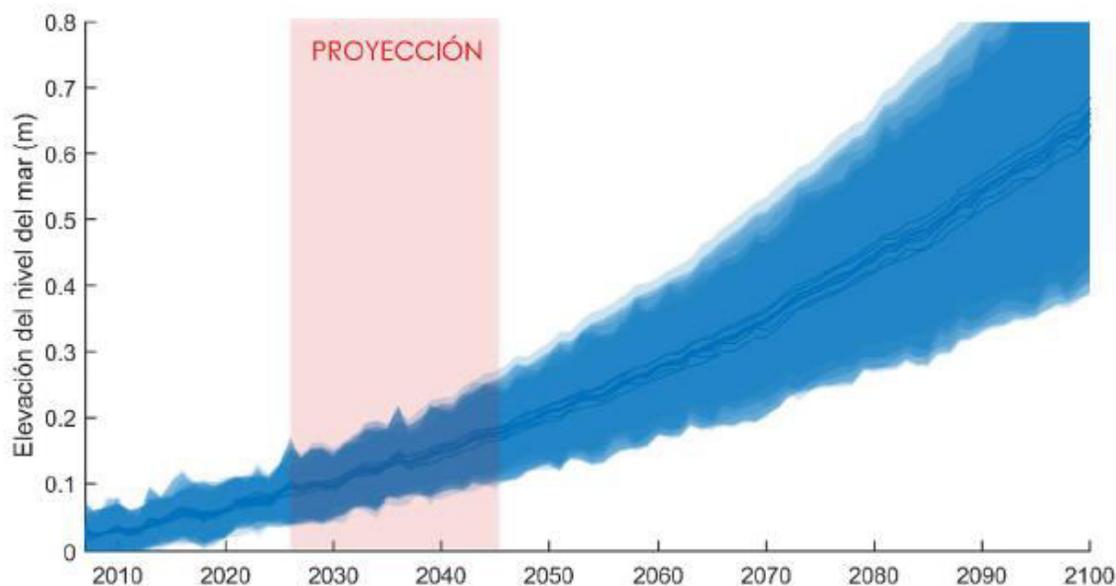
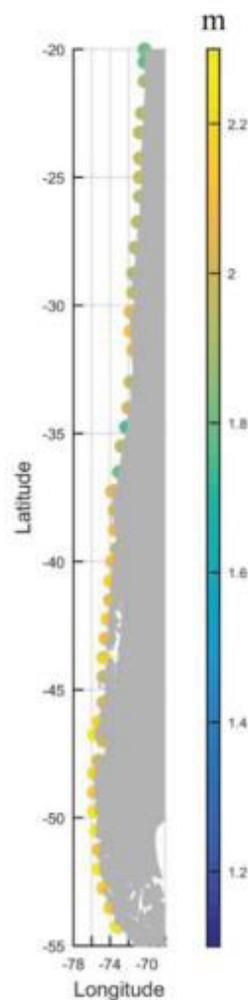


Figura 4.1.12: Elevación del nivel del mar proyectada para el futuro (en metros), considerando el NMM promedio de 1986–2005 como referencia, para distintos puertos de la mitad norte del país. Cada línea azul corresponde a la proyección del nivel medio del mar para Arica, Iquique, Mejillones, Antofagasta, Coquimbo, Quintero, Valparaíso, San Antonio y San Vicente, mientras que el área azul de fondo muestra la incertidumbre o error asociado. Obtenido de Ministerio del Medio Ambiente (2019).

En la Figura 4.1.13 se muestra un cálculo con el aumento esperado de la cota de inundación proyectada para el periodo 2070–2099 para todo el territorio continental, considerando tanto la marea meteorológica, el aumento del nivel del mar y el oleaje. En promedio los valores oscilan entre un aumento de 1,9 a 2,1 metros para las costas de casi todo el territorio, siendo las zonas Sur y Austral aquellas más comprometidas.

Figura 4.1.13: Cota de inundación proyectada (periodo 2070–2099) considerando oleaje, marea meteorológica y aumento del nivel del mar para el escenario RCP8.5. Extraído de Camus (2017).



#### 4.1.2 Surgencia, floraciones algales nocivas e hipoxia

La surgencia es un fenómeno en el océano donde las aguas frías y profundas emergen hacia la superficie. Para entender mejor este proceso, podemos imaginar una piscina profunda. En esta piscina, la luz solar calienta el agua cercana a la superficie, pero no llega hasta las profundidades. Esto crea una diferencia de temperatura entre las aguas superficiales (cálidas) y profundas (frías). A menos que algo externo perturbe este equilibrio, la piscina permanecerá así todo el día. Sin embargo, llega un momento en el que soplan vientos fuertes. Estos vientos empujan el agua de la superficie hacia los lados y hacia afuera, y es entonces cuando el agua fría y quieta que estaba en el fondo aprovecha esta oportunidad para subir hacia la superficie. En palabras simples, este es el fenómeno de surgencia.

En el océano, este suceso es importante porque las aguas frías del fondo contienen sedimentos y nutrientes disueltos que normalmente se depositan en el fondo marino. La surgencia trae de vuelta estos nutrientes y sedimentos a la superficie. Este es un proceso natural y común en las costas chilenas, provocado por la interacción de varios factores, incluyendo los vientos, la rotación de la Tierra, la topografía submarina y la corriente de Humboldt, y es muy importante para el desarrollo del fitoplancton y otros organismos marinos base de la cadena trófica por los nutrientes que contiene. De hecho, la surgencia se relaciona a momentos de alta producción pesquera, por lo que por lo general se tiene una buena noción de ella. Sin embargo, debido al cambio climático, los ciclos de surgencia se han visto alterados, volviéndose más frecuentes de lo habitual y teniendo consecuencias negativas cuando se combinan con otros fenómenos atmosféricos inusuales. Esto puede resultar en un crecimiento excesivo de fitoplancton, conocido como **bloom**, que a su vez puede dar lugar a floraciones algales nocivas y, en casos extremos, incluso a mareas rojas. Estas condiciones pueden provocar **hipoxia**, es decir, una disminución de los niveles de oxígeno disuelto en el agua, y también pueden ocasionar varazones masivas de organismos marinos.

En la Figura 4.1.14 se muestran las zonas principales de surgencia en Chile. Notar que existen corrientes que provocan surgencia a lo largo de toda la costa del país.



Figura 4.1.14: Zonas de surgencia en Chile. Las flechas naranjas corresponden a zonas menos frecuentes y/o intensas de surgencia, mientras que las flechas rojas corresponden a zonas principales de surgencia. Recuperado de Sapag & Gorny (2020).

Un evento de surgencia benigna está asociado con un aumento en la productividad biológica al llevar aguas frías y ricas en nutrientes hacia la superficie del océano. Estos nutrientes, combinados con la luz solar que alcanza la superficie, estimulan el crecimiento del fitoplancton, que es la base de la cadena alimentaria marina. Como resultado, se produce un incremento en la disponibilidad de alimentos para peces, aves marinas y otros organismos. Esto crea condiciones altamente favorables para el crecimiento de las poblaciones de peces y beneficia a las comunidades costeras que dependen de la pesca como fuente de sustento y comercio.

No obstante, algunos eventos de surgencia muy intensos o duraderos con condiciones atmosféricas específicas traerán consecuencias negativas: el exceso de nutrientes contribuirá a la proliferación de algas nocivas que producen toxinas perjudiciales tanto para la vida marina como para el consumo humano, como la temida marea roja. A medida que estas floraciones algales nocivas se multiplican descontroladamente, van consumiendo el oxígeno disuelto presente en el mar, provocando hipoxia. Cuando ocurre esta última, se asocia a varazones de especies marinas y mortalidad masiva en peces (Hernández-Miranda et al., 2010, 2012). Asimismo, un evento hipóxico importante puede dejar efectos crónicos, como migraciones de especies y cambios en los ciclos de vida y dinámicas poblacionales (Hernández-Miranda et al., 2012), alterando el ecosistema.

El estudio de De La Maza y Farías (2023) encontró que, durante la temporada de surgencia, el porcentaje de la columna de agua con hipoxia alcanzó un 87% para aguas debajo de los 12 metros de profundidad, y un 81% para aguas por debajo de los 17 metros. Además, los autores encontraron que existe una fuerte correlación entre el volumen de agua marina que presenta hipoxia y los vientos de surgencia.

En cuanto a las causas de las surgencias que se han tornado en nocivas, se ha registrado un aumento en la cantidad de días despejados durante las últimas dos décadas en las regiones de Los Lagos y Aysén, favoreciendo la actividad fotosintética de los microorganismos marinos en superficie, y en conjunto con el aumento de la temperatura superficial del mar por el calentamiento global y el aumento de nutrientes por la surgencia se crean condiciones propicias para la proliferación de algas nocivas (Ugarte et al., 2022).

También influye la cantidad de agua dulce que llega desde los ríos a los mares. Una disminución de la precipitación (como la que se espera para todo el país salvo la Región de Magallanes) que derive en una menor intrusión de agua dulce al mar puede favorecer las FAN<sup>2</sup> de especies como *Alexandrium catenella* (Ugarte et al., 2020). La Figura 4.1.15 muestra un mapa con las proyecciones para el futuro medio (2035-2065) con un índice que muestra la amenaza de producirse una FAN en las regiones de Los Lagos, Aysén y Magallanes producto del aumento de días soleados y falta de precipitaciones. Se ve que las zonas con mayor amenaza (índice “4,1 – 5 Muy alto”) corresponden al Seno de Reloncaví, Golfo de Ancud y Golfo de Corcovado. Le sigue con un índice de alta amenaza (índice “3,1 – 4”) es la provincia de Aysén, en la región de Aysén.

El aumento de la temperatura superficial del mar en las regiones de Los Lagos y Aysén ha mostrado un incremento sostenido de 0,5°C por década, mientras que en la Región de Magallanes se ha presentado una disminución de 0,1°C por década. Sin embargo, para finales de siglo (cerca del año 2100), se espera un aumento de 3°C en la temperatura superficial de todo el país, incluida la Región de Magallanes (Ugarte et al., 2022).

---

<sup>2</sup> De acuerdo a Ugarte et al. (2022), se desconoce la razón por la que los años secos favorecen la floración de ciertas algas. Se especula que está ligado a la menor estratificación que implica el no tener una descarga de agua dulce.

Estudios recientes que han analizado el cambio en la temperatura superficial del mar en las zonas de surgencia de Chile, han descubierto que los vientos a lo largo de la costa se están fortaleciendo, lo que provocará más surgencia a futuro<sup>3</sup> (Jebri et al., 2020).

En conclusión, los cambios observados desde el año 2000 en adelante, así como también los cambios proyectados para fines de siglo (año 2100), modifican las condiciones ambientales de modo que favorecen todos los aspectos propicios para el desarrollo de episodios de FAN. Ugarte et al. (2020) confirma esto particularmente para la Patagonia chilena en sus ecosistemas de canales y fiordos.

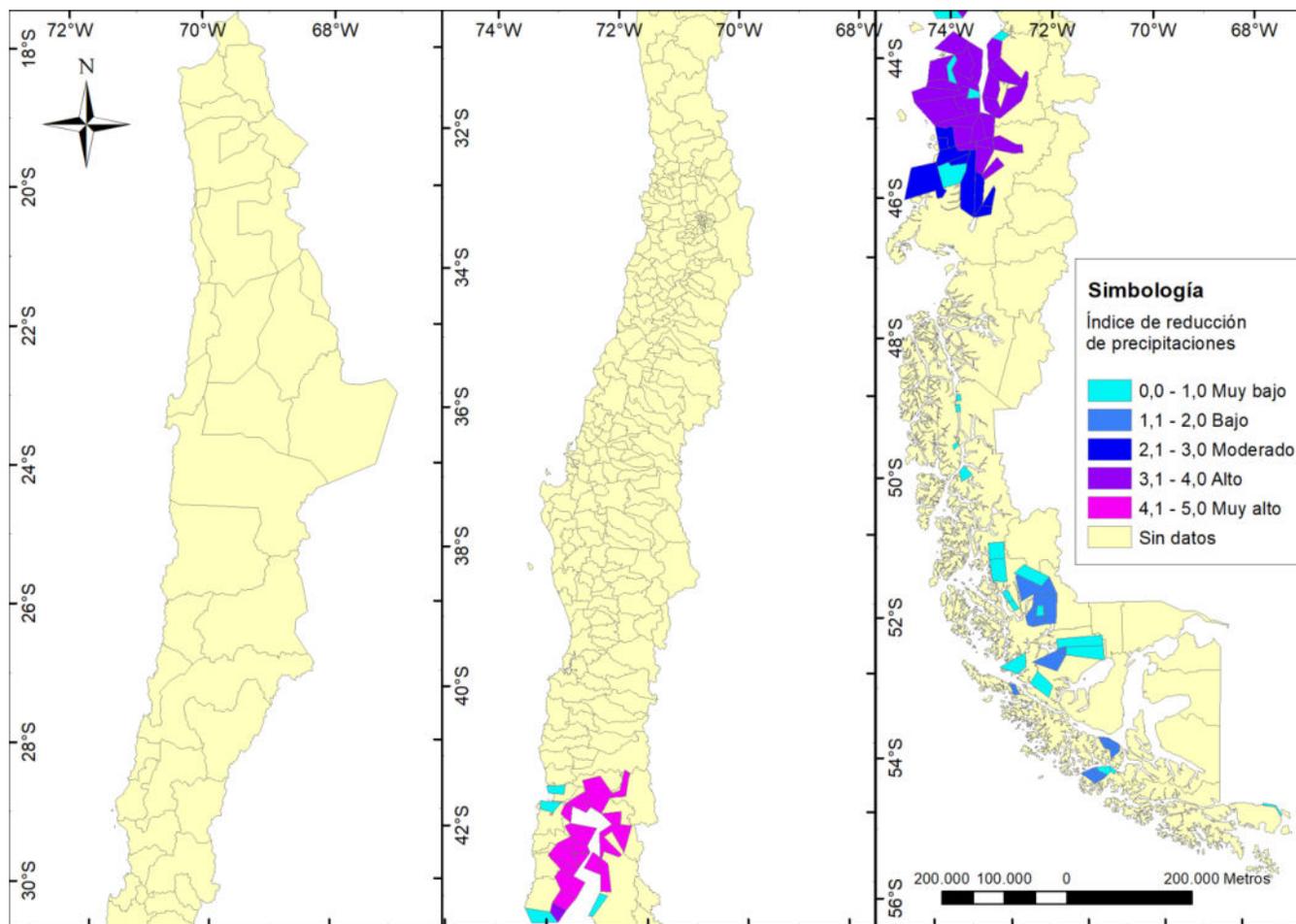


Figura 4.1.15: Reducción de las precipitaciones entre el clima histórico (1980-2010) y el futuro (2035-2065 bajo el escenario RCP8.5) produciendo un incremento de días secos y mayor disponibilidad de luz lo cual facilitarían la ocurrencia de FAN, para las regiones de Los Lagos, Aysén y Magallanes. Elaboración propia a partir de datos de [ARCLIM](#).

<sup>3</sup> Particularmente, descubrieron que los vientos a lo largo de la costa se están fortaleciendo debido a un mayor gradiente de presión relacionado al aumento en la concentración de GEI y el daño en la capa de ozono, que están desplazando la Celda de Hadley hacia los polos.

### 4.1.3 Olas de calor marinas

Una ola de calor marina se define como un período continuo en que la temperatura superficial del mar de una zona extensa es anormalmente cálida, durante un periodo superior a cinco días consecutivos. Para poder hablar de ola de calor marina, la temperatura observada debe ser mayor al 90% de las temperaturas registradas en ese lugar y para esa estación del año, considerando los últimos 30 años. Esta definición fue propuesta por Hobday et al. (2016) y es la que ha estado utilizando la comunidad científica en los últimos años (anterior al año 2016 no existía un consenso claro sobre la definición de ola de calor marina). Estos eventos pueden durar desde 5 días hasta varios meses. Además, estos fenómenos se dividen en categorías según su magnitud, para facilitar la evaluación de la intensidad y severidad de estos. Existen cuatro categorías (I-IV), dependiendo de cuántos grados Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ) exceda la temperatura superficial del mar al promedio registrado para esa zona y esa fecha (es decir, en cuántos grados Celsius la temperatura observada supera a la **climatología** local; Hobday et al., 2018). Con anomalías en superficie de hasta  $5^{\circ}\text{C}$ , tienen consecuencias en los ecosistemas oceánicos y costeros en particular para la proliferación de algas y la actividad acuícola a través de la pérdida de oxígeno disuelto.

Los cambios en circulación oceánica o en los flujos atmosfera-oceano (modos climáticos) originan olas de calor marinas. Si bien la predicción a más de dos semanas e identificación de olas de calor marinas en datos recientes pueden ejecutarse, la evolución futura limita en la falta de comprensión sobre la secuencia subyacente de procesos y los flujos de pequeña escala.

Si bien hasta ahora se ha hablado de la temperatura superficial del mar, es erróneo creer que el aumento de la temperatura se refiere solo a la superficie. Las olas de calor marinas pueden extenderse hasta una profundidad de 100 metros (por ejemplo, Pearce y Feng, 2013; Jackson et al., 2018; Su et al., 2021), lo que significa una gran cantidad de energía para calentar tal cantidad de agua tanto en extensión como en profundidad.

En cuanto a las zonas geográficas que pueden ser afectadas por una ola de calor marina, en realidad todo el océano es susceptible de sucumbir a una. Es más, ha aumentado la evidencia que muestra que el océano a nivel mundial ha estado sufriendo olas de calor marinas más frecuentes e intensas en la última década (Mora-Soto et al., 2022). Centrándonos en Chile, el estudio de Pujol et al. (2022) encontró que desde la década de 1980 que la duración e intensidad de estos fenómenos ha aumentado en el territorio nacional, especialmente durante el período 2012-2020 con eventos récord. Sin embargo, la temperatura superficial del mar en el norte de Chile aumenta a un ritmo más lento que el promedio global desde hace varias décadas (es decir, se enfría en comparación al promedio global según Jebri et al. (2020)) gracias al paso de la corriente marina de Humboldt, que aporta aguas profundas frías y ricas en nutrientes y mantiene la temperatura del mar constante. Es así como el estudio de Pujol et al. (2022) encuentra que la zona de Patagonia Norte, ubicada entre los  $38^{\circ}\text{S}$  y  $46^{\circ}\text{S}$  es la única área costera de Chile donde se observa una tendencia positiva a largo plazo en la frecuencia de las olas de calor marinas (ver Figura 4.1.16). Es decir, esta zona es la única a nivel nacional en que se pronostica que la frecuencia de estos fenómenos seguirá aumentando de forma significativa, junto con su temperatura superficial del mar promedio. De hecho, esa área representa el 45% de los eventos de olas de calor marinas desde 1982 a 2020 en todo Chile Central y Sur.

Por practicidad y puesto que no toda la costa de Chile se comporta de la misma forma, se dividirá a la Patagonia de la misma forma que lo hizo el estudio de estudio de Pujol et al. (2022): en tres zonas (ver Figura 4.1.16). En rojo, se muestra la Zona Norte ( $-82^{\circ}\text{E}$  a  $-71^{\circ}\text{E}$ ;  $38^{\circ}\text{S}$  a  $29^{\circ}\text{S}$ ); en verde la Zona de Transición ( $-86^{\circ}\text{E}$  a  $-72^{\circ}\text{E}$ ;  $46^{\circ}\text{S}$  a  $38^{\circ}\text{S}$ ); y en azul la Zona Sur ( $-89^{\circ}\text{E}$  a  $-74^{\circ}\text{E}$ ;  $55^{\circ}\text{S}$  a  $46^{\circ}\text{S}$ ).

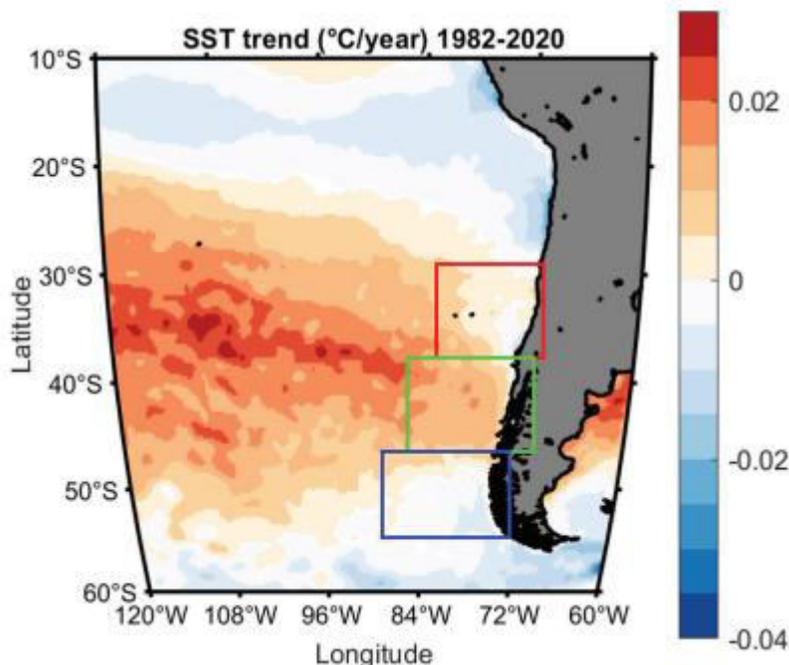


Figura 4.1.16: Tendencias significativas de la temperatura superficial del mar en grados Celsius por año para el periodo 1982 a 2020, tomada del estudio de Pujol et al. (2022). Los cuadrados de colores muestran las áreas que el estudio contempló: en rojo, se muestra la Zona Norte ( $-82^{\circ}\text{E}$  a  $-71^{\circ}\text{E}$ ;  $38^{\circ}\text{S}$  a  $29^{\circ}\text{S}$ ); en verde la Zona de Transición ( $-86^{\circ}\text{E}$  a  $-72^{\circ}\text{E}$ ;  $46^{\circ}\text{S}$  a  $38^{\circ}\text{S}$ ); y en azul la Zona Sur ( $-89^{\circ}\text{E}$  a  $-74^{\circ}\text{E}$ ;  $55^{\circ}\text{S}$  a  $46^{\circ}\text{S}$ ). Notar que la Zona de Transición es la única con tendencia marcada al calentamiento en la costa.

En cuanto a las consecuencias que dejan las olas de calor marinas, es reconocido que sus impactos biológicos pueden variar drásticamente dependiendo del contexto de cada ecosistema (Hobday et al., 2018). En cuanto a la modificación de las propiedades del océano, se encuentran consecuencias como reducción de la concentración de oxígeno disuelto, cambios en la densidad del agua, disminución de la mezcla entre las distintas capas del océano (lo que disminuye la cantidad de nutrientes que llegan entre estas, afectando toda la cadena trófica incluyendo peces), estratificación de la columna de agua, alteraciones del ciclo del carbono y evitación de la formación de hielo marino (Brauko et al., 2020; Hu et al., 2020; Carvalho et al., 2021; Mignot et al., 2021). Estos cambios en las propiedades físicas pueden provocar, a su vez, cambios drásticos en los ecosistemas, desde migración de especies hasta mortalidad masiva (Smale et al., 2019), reduciendo la producción pesquera y acuícola. En general, es común que producto de una ola de calor marina se produzcan floraciones algales nocivas (por ejemplo, Roberts et al., 2019).

El estudio de Pujol et al. (2022) menciona que, a pesar de que los ecosistemas de la Patagonia sean extremadamente vulnerables al calentamiento global (Yáñez et al., 2017), se han realizado muy pocos estudios sobre las consecuencias de las olas de calor marinas en los ecosistemas de los fiordos y ninguno en los fiordos patagónicos.

Para tener una idea del impacto monetario que podría significar una ola de calor marina en Patagonia que termine en una floración algal nociva (**FAN**), se puede hacer el paralelismo con un evento del tipo que ocurrió a principios del año 2016, que resultó en pérdidas monetarias de varios cientos de millones de dólares (Armijo et al., 2020; Garreaud, 2018; León-Muñoz et al., 2018; Díaz et al., 2019).

Pujol et al. (2022) también menciona que la presencia de una ola de calor marina prolongada y severa como la que se observó durante el invierno de 2016 podría empeorar las condiciones hipóxicas (es decir, disminuir la concentración de oxígeno) al aumentar la estratificación térmica y reducir la disolución de oxígeno (Breitburg et al., 2018), como ya se ha observado en fiordos profundos de Noruega (Aksnes et al., 2019).

En cuanto a qué provoca una ola de calor marina, existen diversos factores, tanto de origen atmosférico como de origen oceánico. De acuerdo con Pujol et al. (2022), los factores de origen atmosférico incluyen altas temperaturas del aire y ausencia de vientos (o vientos reducidos). Los factores de origen oceánico contemplan inyecciones de aguas más cálidas por procesos naturales (lo que se conoce como **advección de aguas cálidas**) o artificiales y debilitamiento de la surgencia<sup>4</sup> habitual (que también podría producirse por la ausencia de vientos, lo que nos vuelve a llevar al origen atmosférico). El estudio de Holbrook et al. (2019) indagó en las causas de las olas de calor y encontró motivos similares. En tanto, Mora-Soto et al. (2022) asegura que también influyen sistemas atmosféricos tales como sistemas de alta presión (anticiclones, como el que suele haber frente a las costas de Chile Central) bloqueantes y modos de variabilidad climática natural, como el fenómeno de El Niño en su fase positiva (es decir, el calentamiento natural y periódico del océano Pacífico a nivel ecuatorial).

Además, Frölicher et al. (2018) mencionan que las tendencias al aumento de la temperatura superficial del mar están altamente relacionadas al aumento de olas de calor marinas en todo el mundo.

Para terminar con las causas e influencias que modulan las olas de calor marinas, el estudio de Pujol et al. (2022) encontró que cuando ocurrieron las olas de calor marinas más intensas y prolongadas (2016-2017), coincidió con las fases positivas de varios modos de variabilidad climática, como el Modo Anular del Sur, el Niño Oscilación del Sur y eventos de El Niño costero. La fase activa de estos modos intensificaría las condiciones descritas en los párrafos anteriores. Esta es una observación importante, puesto que se las fases de estos modos de variabilidad se pueden prever con algo de anticipación y así saber con antelación que es probable la ocurrencia de estos fenómenos.

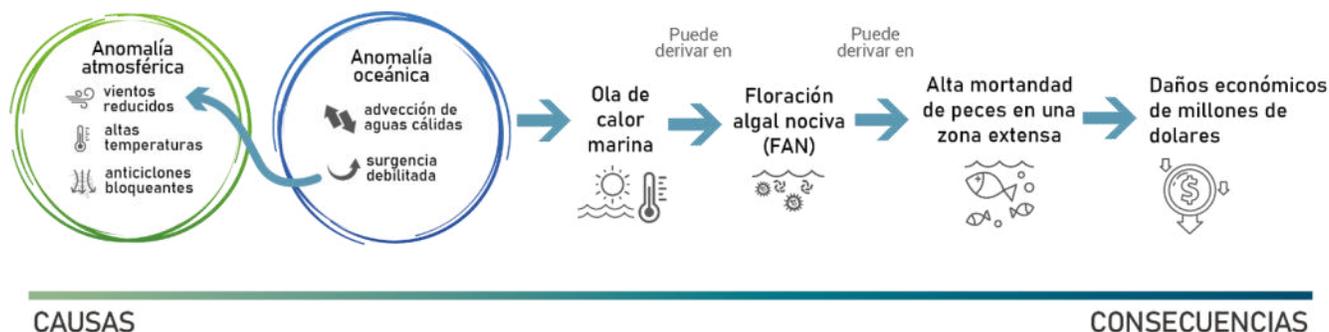


Figura 4.1.17: Esquema del impacto monetario de las olas de calor marinas.

En cuanto a la ocurrencia de olas de calor marinas en Chile, en la Figura 4.1.18 se muestra la cantidad de olas de calor reportadas desde 1982 al año 2020, divididas por intensidad. Se observa que, si bien toda la zona comprendida ha sido víctima de olas de calor, solo el Estrecho de Magallanes ha sufrido

<sup>4</sup> Surgencia: fenómeno en el cual aguas profundas y frías ascienden hacia la superficie del océano. Esto suele ocurrir cuando el viento sopla paralelo a la costa y empuja las aguas superficiales alejándolas de la costa, permitiendo que el agua fría que se encuentra en capas más profundas ascienda para reemplazar el vacío dejado por el agua superficial que se aleja. Estas aguas frías, además, suelen venir cargadas en nutrientes que normalmente reposan en el fondo marino.

una ola de calor de intensidad IV. Se destaca que la zona marítima a la altura del Parque Nacional Laguna San Rafael (~47°S, ~48°S) es aquella con más incidencia de olas de calor de categoría II, presentando 18 eventos de olas de calor en un periodo de 38 años, seguida por la zona marítima al sur del Parque Nacional Alberto de Agostini que presentó 15 eventos. En tercer lugar, se encuentra Bahía Inútil que presentó 14 eventos de categoría II. Además, la zona marítima a la altura del Parque Nacional Laguna San Rafael fue también aquella zona con mayor cantidad de olas de calor de categoría III, presentando 3 eventos.

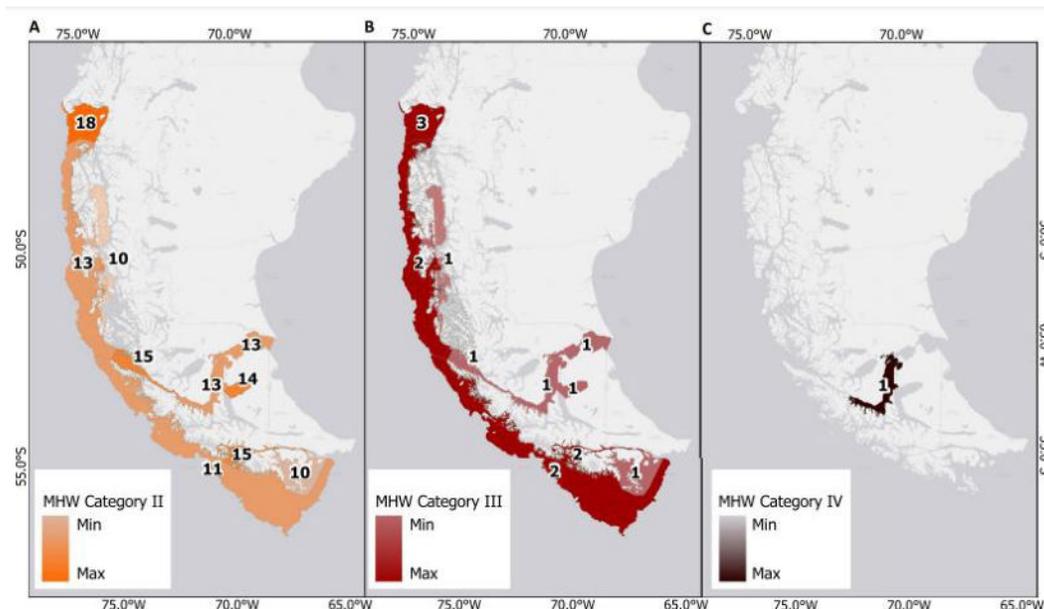


Figura 4.1.18: Ocurrencia de olas de calor marinas, divididas en categorías y por ecosistemas, para el periodo 1982-2020. Extraído de Mora-Soto et al. (2022).

En la Figura 4.1.19 se muestra un gráfico de barras que muestra cuántos eventos ocurrieron por año para las distintas zonas de la Patagonia. Pujol et al. (2022) encontró que la década de 2012 a 2020 fue particularmente activa en términos de número de eventos de olas de calor marinas para el área de Transición, totalizando en promedio el doble de eventos que durante la década de 1982 a 1991. Es notable que a principios del siglo XXI no se registraron eventos en ninguna de las 3 áreas.

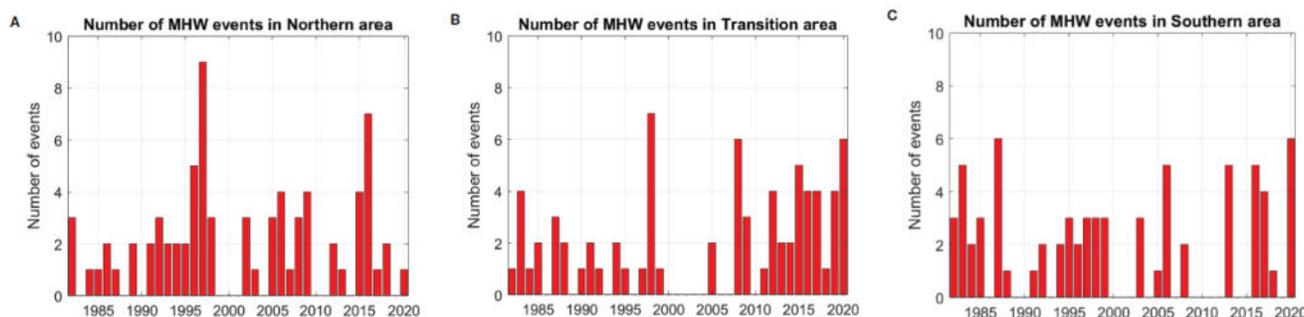


Figura 4.1.19: Número de olas de calor marinas que han ocurrido entre 1982 y 2020, para tres zonas de la Patagonia: la Zona Norte (-82°E a -71°E; 38°S a 29°S), Zona de Transición (-86°E a -72°E; 46°S a 38°S) y Zona Sur (-89°E a -74°E; 55°S a 46°S). Extraído de Pujol et al. (2022).

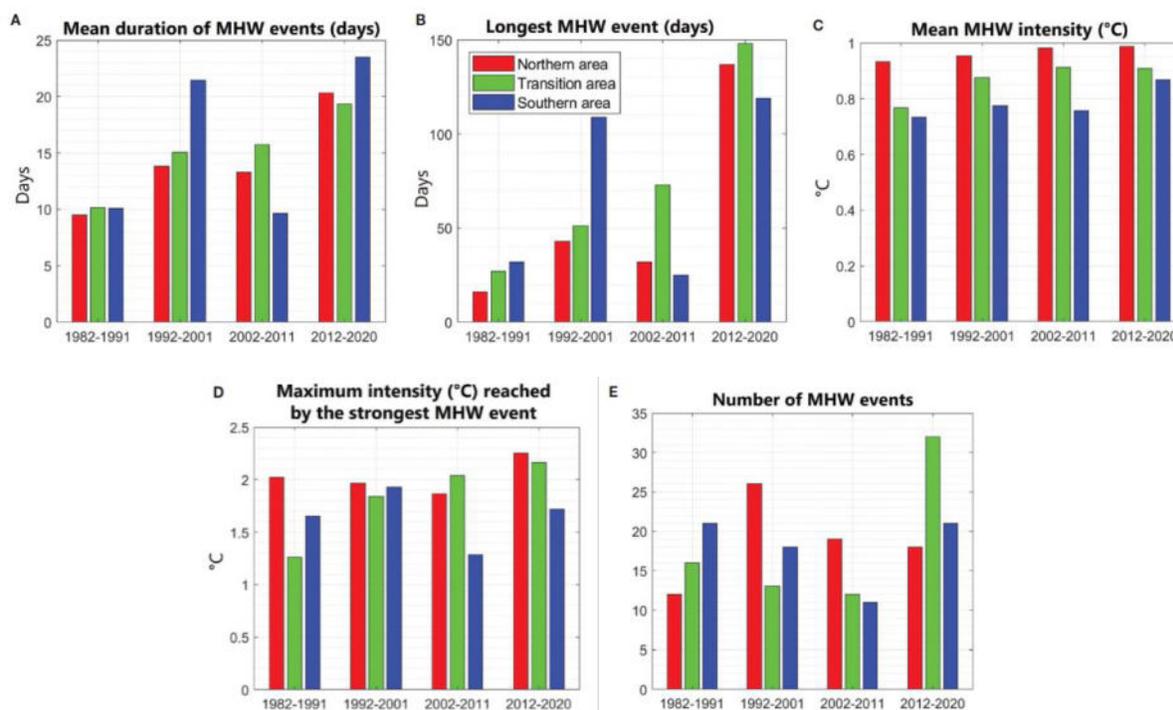


Figura 4.1.20: Tendencias decadales (1982-1991, 1992-2001, 2002-2012, 2012-2020) para la Zona Norte de la Patagonia (en rojo), la Zona de Transición (en verde), y la Zona Sur (en azul). Los parámetros analizados sobre las diferentes décadas son: (A) duración promedio de la ola marina, en días, (B) duración del evento más largo de la década, en días, (C) intensidad media, en grados Celsius (°C), (D) intensidad máxima, en grados Celsius (°C), alcanzada por el evento más fuerte de la década, (E) número de olas de calor marinas que ocurrieron en la década. Extraído de Pujol et al. (2022).

En cuanto a las tendencias, se observa un aumento notable en la frecuencia de las MHWs en latitudes medias, especialmente en latitudes inferiores a 46°S. A lo largo de las costas del área de Transición, también se presenta una tendencia positiva pero no significativa. En la última década se registró un alza en tanto la duración media de las olas de calor, como la duración máxima de estas, así como en la intensidad media y máxima.

Hablando de la proyección a futuro de estos eventos, los eventos de calentamiento extremo en los océanos a nivel mundial se han vuelto más frecuentes a lo largo de los años (Oliver et al., 2018), en parte debido al calentamiento global antropogénico (Laufkötter et al., 2020). Lima y Wethey (2012) estimaron que entre la década de 1980 y la de 2010, el 38% de las zonas costeras del mundo sufrió un aumento en los eventos de temperaturas superficiales del mar extremadamente cálidas. Más recientemente, el IPCC estimó en 2021 que la frecuencia de las olas de calor marinas se ha duplicado desde la década de 1980 y se espera que siga aumentando, especialmente en las zonas costeras (IPCC, 2021).

Según Oliver et al. (2018), los cambios en la temperatura superficial del mar fueron la principal razón del crecimiento de las olas marinas, y, por lo tanto, el aumento futuro de la temperatura en los océanos debido al cambio climático podría provocar un aumento continuo de estos eventos extremos.

Sin embargo, gran parte de la costa chilena se salva de estas tendencias tan rápidas al alza de la temperatura superficial del mar (salvo en la zona de Patagonia Norte), y los modelos climáticos muestran que la zona chilena experimentará una intensidad de calor menor que otras áreas del océano en el

próximo siglo (Oliver et al., 2019) gracias a las corrientes frías que circulan por el territorio. Jebri et al. (2020) también apoya esta afirmación, mencionando que las costas del norte de Chile se enfrían en comparación al promedio global, y Lima y Wethey (2012) encontraron tendencias de enfriamiento para las áreas del norte de Chile y Perú. Sin embargo, cabe destacar que eso no implica que esas aguas puedan ser víctimas de olas de calor marinas transitorias. Es más, se pronostica que ocurrirán cada vez más incluso para Chile, pero a una menor tasa que para el resto del mundo, incluso si comparamos con otras zonas de corrientes frías como California (Varela et al., 2021).

Pujol et al. (2022) encontraron en su estudio que, en la década más reciente, 2012-2020, se marcaron numerosos eventos de récord en Chile, y que Patagonia Norte (38°S a 46°S) es la única área costera de Chile donde se observa una tendencia hacia una mayor frecuencia de estos eventos, probablemente relacionada con las tendencias de calentamiento de la temperatura superficial del mar a largo plazo. Esa área representa el 45% de los eventos de olas de calor marinas y el 40% de los eventos que tuvieron una intensidad superior a 1°C durante el período 2012-2020, lo que demuestra el impacto significativo que ha sufrido la región en la última década. En particular, desde mayo de 2016 hasta mayo de 2017, la Patagonia Norte experimentó aproximadamente 300 días bajo condiciones de ola de calor.

La Figura 4.1.21 muestra un mapa con un índice de amenaza que muestra los lugares que serán más susceptibles de sufrir aumentos de la temperatura del mar a partir de aumentos en la temperatura del aire en el periodo 2035 a 2065, comparándolo con las condiciones climáticas del pasado cercano (1980-2010). El aumento de la temperatura del aire es obtenido a partir de simulaciones climáticas que siguen el escenario RCP 8.5. Estos datos fueron obtenidos del Atlas de Riesgos Climáticos del Ministerio del Medio Ambiente (ARCLIM). Cabe destacar que este mapa solo consideró uno de los muchos factores que provocan olas de calor, asumiendo que las tendencias al aumento en la temperatura del aire se traducirían directamente en un aumento en la temperatura del mar, lo cual no es necesariamente cierto. Es más, este mapa muestra que la zona de Patagonia Norte tiene una amenaza cercana a cero, mientras que el norte de Chile tiene una amenaza cercana al máximo, lo cual contrasta con todos los estudios presentados en esta sección que señalan exactamente lo contrario. Mayor análisis sobre esta discrepancia se aborda en la Discusión, en la sección 5. No existe una simulación en la Plataforma de Simulaciones Climáticas sobre la temperatura superficial del mar ni sobre las posibles olas de calor, por lo que no hay otra fuente con la que contrastar este mapa ni una fuente que señale lo esperado en un RCP distinto del RCP 8.5.

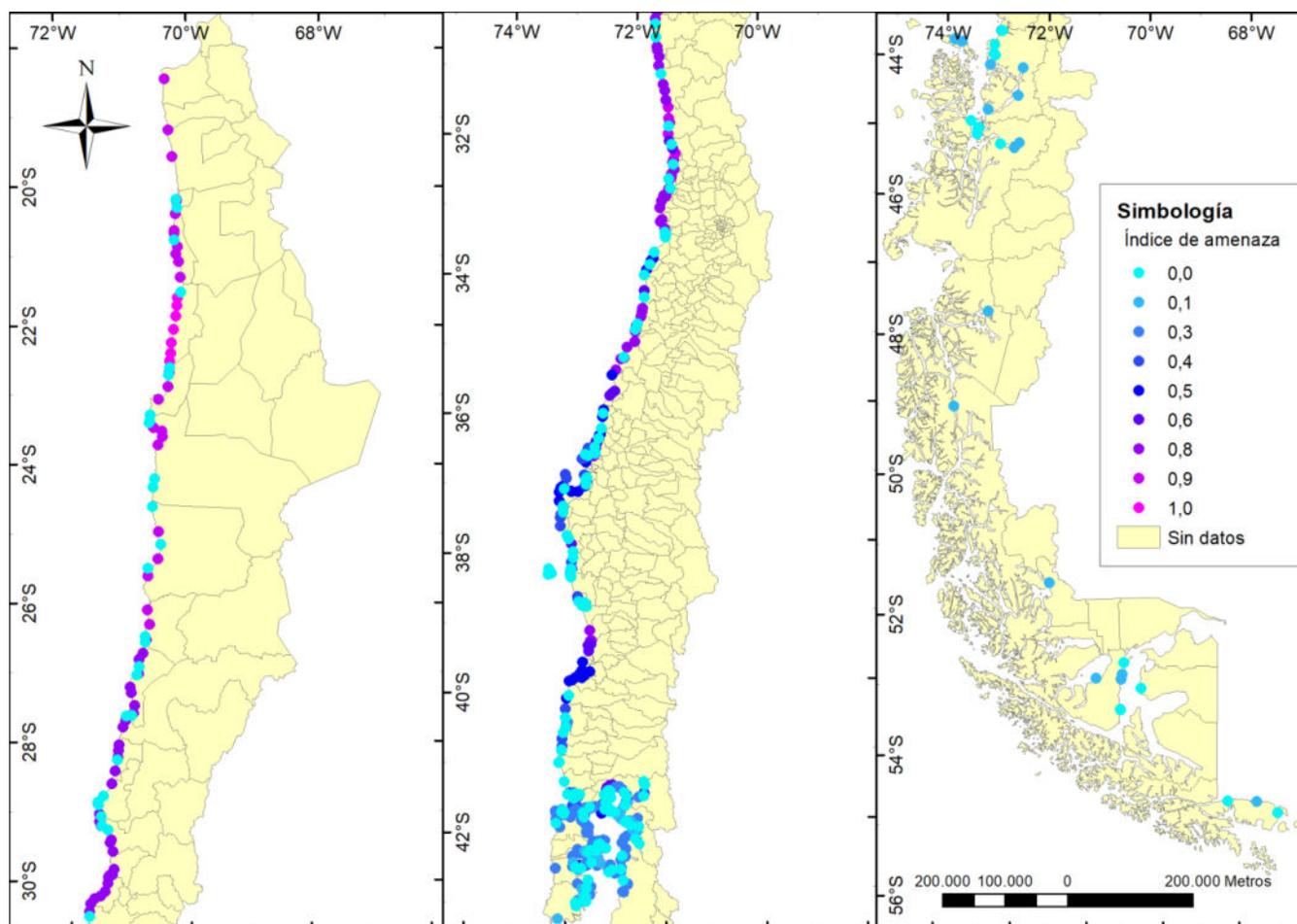


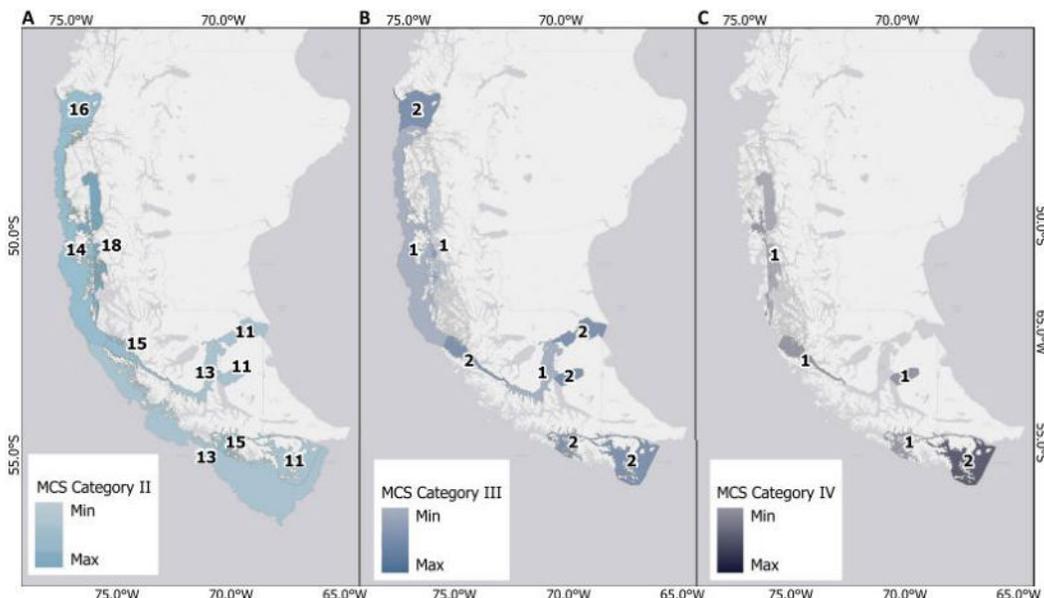
Figura 4.1.21: Cambios en la temperatura del mar para el futuro, estimados a partir del cambio proyectado en la temperatura del aire, comparando el periodo histórico (1980-2010) al futuro (2035-2065) para todo el territorio nacional salvo Rapa Nui y Juan Fernández. Elaboración propia a partir de los datos de [ARCLIM](#).

#### 4.1.4 Olas de frío marinas

Una ola de frío marina (conocidas como *cold spell* en inglés) se define como un periodo de temperaturas anormalmente bajas de la temperatura superficial del mar (bajo el percentil 10 de los eventos más fríos para esa zona en ese periodo del año) que persiste durante al menos cinco días. Actualmente, existe solo un artículo científico que evalúe olas de frío marinas para Chile, del año 2022. Es por eso por lo que en toda esta sección se comentarán los resultados de ese estudio en particular: aquel de Mora-Soto et al. (2022). Este, además, divide las olas de calor marinas por categoría: la categoría II correspondería a un evento cuya temperatura registrada fue 2°C menor a la que normalmente se esperaría para esa zona en esa época del año, la categoría III correspondería a un evento con temperaturas de 3°C menores a lo normal y la categoría IV correspondería a un evento con temperaturas de 4°C menores, o menores aún.

En cuanto a las zonas que se ven afectadas por olas de frío marinas, como solo existe un estudio al respecto, nuestro conocimiento sobre su extensión espacial se acota a las zonas que este estudio

abordó. Es decir, no se tienen mayores conocimientos sobre otras zonas al exterior del área abarcada por Mora-Soto et al. (2022). El estudio en cuestión se centra en la zona de la costa patagónica chilena que es habitada por bosques de algas gigantes: desde los 47°S a los 56°S, partiendo desde el Golfo de Penas en la Región de Aysén y llegando hasta el Cabo de Hornos en la Región de Magallanes. En la Figura 4.1.22 se aprecia el área de estudio.



*Figura 4.1.22: Olas de frío marinas registradas en la costa de la Patagonia en que se centró el estudio de Mora-Soto et al. (2022), para el periodo 1982-2020. Se muestran las olas de frío según categoría y por ecosistema.*

Respecto de las consecuencias de las olas de frío marinas, este estudio no profundiza en ellas. Solo se menciona que estas no han supuesto un riesgo para los bosques de algas gigantes de la Patagonia, y que es probable que supongan un aumento en la productividad primaria en el océano.

Sin embargo, artículos de otras partes del mundo mencionan que las olas de frío marinas impactan principalmente a aquellos organismos marinos que son sensibles a los cambios de temperatura que no pueden migrar o desplazarse por el océano, como los moluscos con concha (Masanja et al., 2023). Los moluscos desempeñan un papel crucial en los ecosistemas marinos como filtradores, depredadores y contribuyentes a la cadena alimentaria.

Es necesario investigar las implicaciones de las olas de frío marinas en la vida marina y en las propiedades del agua en las costas chilenas. Es probable que los factores desencadenantes de estas olas de frío marinas, como tormentas intensas o el derretimiento de glaciares, generen un aumento en la turbulencia del océano y aumentar la turbidez del agua y bloquear la luz, lo cual requiere un análisis exhaustivo de sus posibles repercusiones, sobre todo en las costas patagónicas que poseen una biodiversidad marina única entre sus fiordos, incluyendo hidrocorales de aguas frías (Häussermann & Försterra, 2007).

Para entender las causas de las olas de frío marinas, es necesario primero comprender la geomorfología de la Patagonia: esta se caracteriza por la presencia de fiordos, canales, estrechos y bahías, pero también por la presencia de numerosos cerros y montañas con abundantes glaciares. Es así que Mora-Soto et al. (2022) discute tres causas posibles para la ocurrencia de olas de frío marinas, siendo la

primera de ellas originada por el derretimiento de los glaciares circundantes. La segunda causa posible es debido a frentes polares acompañados de vientos extremos, y la tercera causa está dada por anomalías en la temperatura superficial del mar externas a nuestro territorio, como el fenómeno de La Niña, que se caracteriza por el desarrollo de aguas anormalmente frías en el océano Pacífico a nivel ecuatorial. Un esquema simple que contempla el desarrollo de una ola de frío marina se muestra en la Figura 4.1.23.

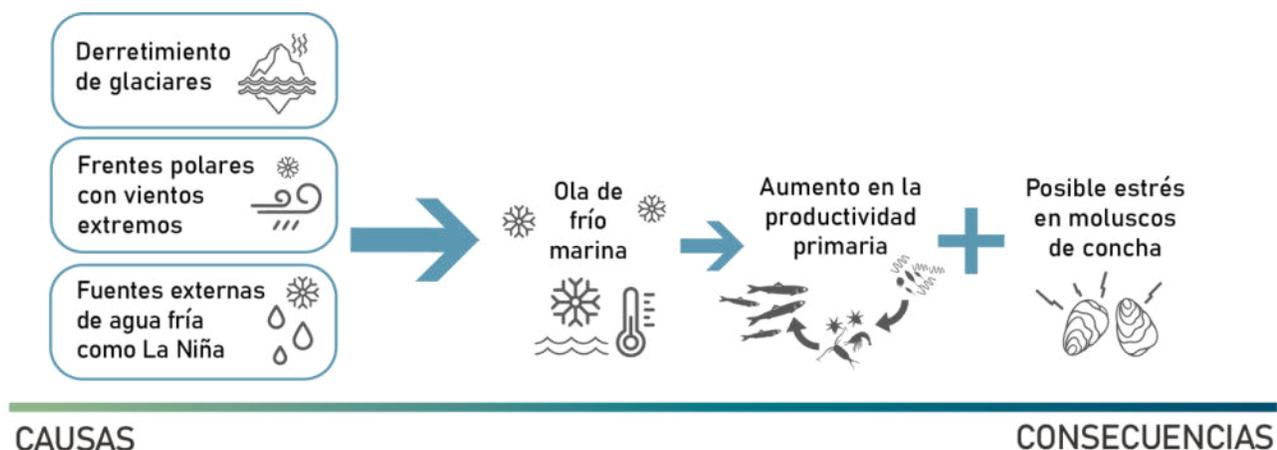


Figura 4.1.23: Esquema del contexto de las olas de frío marinas según lo propuesto por Mora-Soto et al (2022).

Respecto de la ocurrencia de olas de frío marinas en nuestro territorio, el estudio de Schlegel et al. (2021) muestra que, a nivel mundial, las olas de frío marinas han disminuido en frecuencia e intensidad en las últimas décadas, excepto justamente en la zona del Océano Austral que engloba a la Patagonia, donde el número de olas de frío marinas ha aumentado. El estudio de Mora-Soto et al. (2022) menciona que la Patagonia chilena ha experimentado una alta frecuencia de eventos de frío extremos en la década de 2010-2020, principalmente por aportes de aguas frías en el área de los fiordos, así como por vientos anormalmente fuertes que transportan aguas frías cercanas a los polos a nuestra región. También menciona que en el periodo 2014-2019 hubo un pico en la severidad de los eventos de frío marinos, en comparación a décadas anteriores.

Más detalladamente, Mora-Soto et al. (2022) demuestra que hubo 158 olas de frío marinas durante el período 1982-2020 en Patagonia; 137 de categoría II (fuertes), 15 de categoría III (severas) y 6 de categoría IV (extremas). El año con mayor frecuencia de olas de frío marinas fue 1984 (20), seguido de 1982 (13), 2011 (13), 2009 (12) y 2002 (10). Los años con eventos más severos fueron 1982 (5) y 2019 (4) (ver Figura 4.1.24). Los años 1982, 2014, 2015, 2016, 2017 y 2018 registraron eventos extremos, a pesar de la tendencia a calentamiento que tiene el planeta. Entre ellos, el evento de 1982 ocurrió en Bahía Inútil y los eventos de 2014 a 2018 fueron en Nassau-Hornos (2) y uno en cada uno en Nearshore Kawésqar, Beagle Ballenero y Estrecho de Magallanes Occidental, este último con el evento de máxima intensidad ( $-6.01^{\circ}\text{C}$ ) en un período relativamente corto (16 días). Todos estos eventos ocurrieron entre el otoño y el invierno.

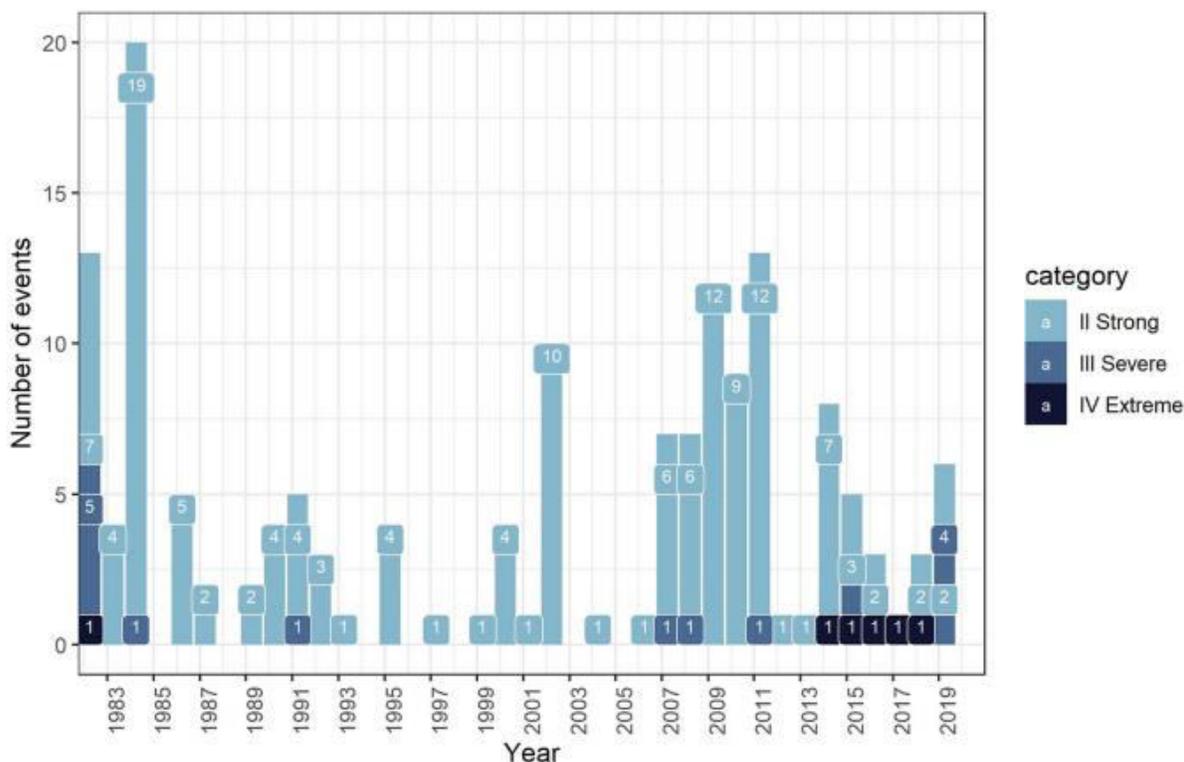


Figura 4.1.24: Número de eventos de olas de frío marinas en el área de estudio cada año (1982-2020), divididas por categoría: fuertes (en celeste), severas (en azul marino) y extremas (en negro). Extraído de Mora-Soto et al. (2022).

No se han realizado simulaciones específicas de un RCP para el territorio nacional que permitan predecir con certeza si las olas de frío marinas aumentarán o disminuirán en frecuencia e intensidad. Sin embargo, considerando las tendencias actuales, es probable que en el futuro cercano se observe un aumento en el número promedio de olas de frío marinas por década, presentando también una mayor intensidad. Esto se evidencia en el hecho de que desde el año 2014 se han registrado olas de frío marinas de categoría IV todos los años, a excepción de 2019 (2020 en adelante sin estudios), comparando con que la última vez que se registró de una ola de esta magnitud fue en 1982.

#### 4.1.5 Ríos atmosféricos

Aunque no existen investigaciones publicadas sobre la interacción entre ríos atmosféricos y sus efectos en el mar y las áreas costeras de Chile, se recopiló información directamente de expertos investigadores involucrados en el estudio de este fenómeno.

Un río atmosférico es una corriente estrecha y alargada que contiene cientos de kilos de vapor de agua, que se desplaza por la atmósfera terrestre. Estos ríos de vapor de agua transportan grandes cantidades de humedad desde las regiones tropicales y subtropicales hacia latitudes más altas, y se asocian con eventos de lluvia intensa y nevadas en la cordillera.

El Dr. Martín Jacques Coper, investigador de la Universidad de Concepción, señala que los impactos de los ríos atmosféricos varían según su forma y orientación. Aunque aún se encuentran en estudio, el

experto destaca que durante el paso de un río atmosférico se observan cambios en la estratificación del mar debido al aporte de agua dulce, lo que genera una fuerte estratificación. Además, las precipitaciones significativas en tierra firme producen un aumento explosivo en el caudal de los ríos en las áreas afectadas por los ríos atmosféricos, lo que conlleva un mayor flujo de sedimentos y nutrientes hacia el mar, así como una mayor intrusión de agua dulce.

Los impactos de los ríos atmosféricos en los ecosistemas marinos han demostrado una modulación en la actividad biológica unos días después de su paso, especialmente cuando hay exposición solar. Esto se debe a la mayor disponibilidad de nutrientes y la intensa mezcla generada por el viento que se produce durante el paso del río, lo cual puede considerarse como un beneficio para las comunidades costeras. No obstante, también se han observado daños significativos en la infraestructura debido a las marejadas y los desbordes de los ríos, lo cual representa un desafío considerable. Hasta el momento, se desconoce si existe una relación directa entre la presencia de un río atmosférico y la proliferación de algas nocivas.

Sin ir más lejos, el Dr. Martín Jacques Coper destaca que el paso de un río atmosférico puede ser perjudicial si se reporta en conjunto con otro evento extremo, como la presencia de una isoterma 0°C muy elevada a causa de las altas temperaturas provocadas por el cambio climático.

#### 4.2 Mapa de priorización de macrozonas geográficas según vulnerabilidad

El análisis integral de los eventos extremos marinos abordados en este informe permitió identificar patrones geográficos de vulnerabilidad en las costas de Chile. La infografía presentada en la Figura 4.2.1 muestra un mapa que sintetiza estas conclusiones, destacando las zonas del país que presentan mayor susceptibilidad a la ocurrencia de eventos como marejadas que pueden dar lugar a inundaciones, episodios de surgencia y floraciones algales nocivas, olas de calor y de frío marinas, así como la influencia de ríos atmosféricos. Este mapa refleja la combinación de factores atmosféricos y oceánicos que convergen en áreas específicas, exponiendo una visión estratégica para la gestión de riesgos y la planificación ante estos fenómenos climáticos extremos.

## Distribución geográfica y caracterización de eventos extremos en la costa de Chile

Simbología	Tipo	Impacto oceánico / costera	Zonas críticas
	Marejadas	Inundaciones en áreas bajas cercanas a la costa, erosión del lecho marino, pérdida y erosión de playas, daños en infraestructuras costeras.	Regiones de Atacama - Valparaíso
	Surgencia y floraciones algales nocivas	Puede llegar a provocar proliferación de algas nocivas que producen toxinas perjudiciales tanto para la vida marina como para el consumo humano.	Regiones de Los Lagos - Aysén y Magallanes.
	Ríos atmosféricos	Deslizamientos de tierra, desbordes de ríos, inundaciones, daños en infraestructura, turbidez del agua.	Regiones de Atacama - Bio Bio
	Ondas de calor marinas	Reducción de oxígeno disuelto, cambios en la densidad del agua, disminución de la mezcla, estratificación columna de agua, alteraciones del ciclo del carbono. Puede producir floraciones algales nocivas, hipoxia y mortalidad masiva, reduciendo la producción pesquera y acuícola.	Mar Patagónico hasta estrecho de Magallanes
	Ondas de frío marinas	Estrés de los moluscos con concha y de fauna marina no migratoria → disminución de filtración de agua y desbalance en la cadena trófica.	Mar Patagónico hasta Cabo de Hornos

### Referencias:

(Beyá y Winckler, 2013; Winckler et al., 2017; Ibaceta et al., 2017; Molteni et al., 2017; Ministerio del Medio Ambiente, 2019; ARCLIM)  
 (Hernández-Miranda et al., 2010, 2012)  
 (Roberts et al., 2019; Smale et al., 2019; Brauko et al., 2020; Hu et al., 2020; Carvalho et al., 2021; Mignot et al., 2021; Mora-Soto et al., 2022).  
 (Mora-Soto et al., 2022)  
 Viate & Nuñez, 2011.

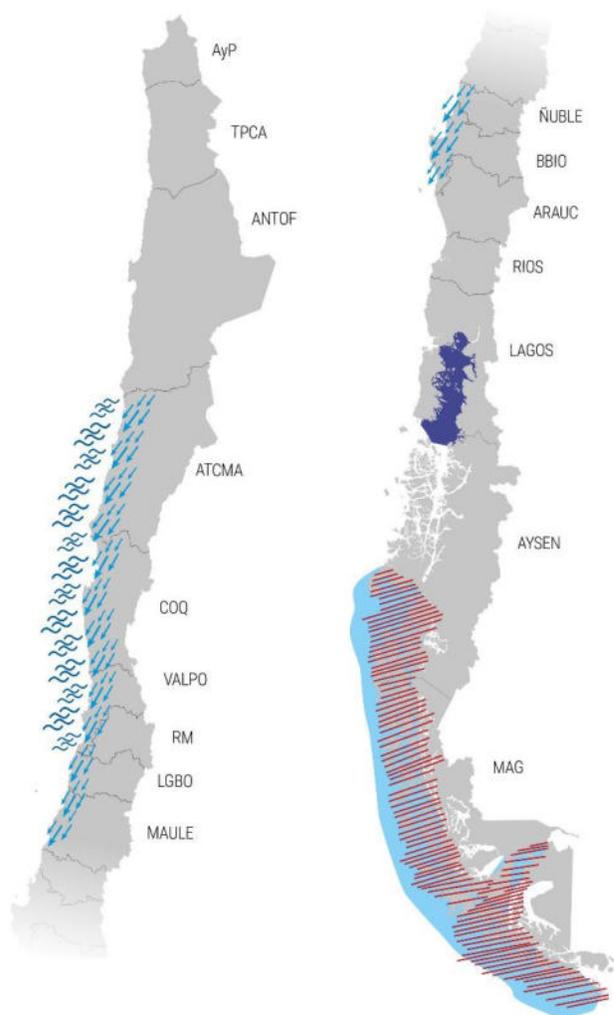


Figura 4.2.1: Distribución geográfica y caracterización de eventos extremos en la costa de Chile.

### 4.3 Conclusiones del panel de expertos

A continuación, se presenta la tabla detallada con las contribuciones de cada experto en función de los temas discutidos. Esta tabla ofrece una visión concisa de lo conversado por los expertos durante la consulta, permitiendo una comprensión más clara de las perspectivas dominantes y las áreas de divergencia.

Tema	Respuesta del panel
<b>Ríos atmosféricos: ¿cómo afecta un río atmosférico al océano? ¿Se espera que aumente</b>	Los ríos atmosféricos incrementan la cantidad de agua que llega al océano, lo que a su vez lleva más sedimentos y nutrientes. Esto es como si trajeran consigo un montón de elementos esenciales para el océano. Con el tiempo, la gran cantidad de agua dulce que llega desde los ríos atmosféricos (que a primera no se mezcla con el agua salada del mar) puede alterar cómo está organizada la

<p><b>disminuya la frecuencia de estos productos del cambio climático?</b></p>	<p>capa superior del océano, alterando la distribución normal de las temperaturas en formas que aún están en estudio. Además, el fuerte viento que acompaña los ríos atmosféricos también puede causar mezcla de las aguas superficiales.</p> <p>Estos fenómenos también pueden influir en la vida marina. El aumento de nutrientes debido a los sedimentos y las aguas dulces puede afectar a los organismos que viven en la capa superior del océano, de formas que también continúan en estudio. Finalmente, los ríos atmosféricos pueden traer vientos que soplan desde el norte en algunas zonas. Esto puede tener un efecto especial en ciertas regiones costeras, promoviendo el hundimiento del agua a lo largo de la costa y afectando cómo se mueven las corrientes en la superficie del océano.</p> <p>Sobre la frecuencia esperada de estos fenómenos en el futuro, existen estudios que estiman que en un mundo más cálido y húmedo aumente la intensidad y frecuencia de ríos atmosféricos (Wang et al., 2023; Shields et al., 2023). Sin embargo, es un tópico en desarrollo y las proyecciones para Sudamérica, en particular las costas de Chile, pueden mostrar diferencias.</p>
<p><b>Olas de calor marinas: ¿cuáles son las implicancias de las olas de calor marinas y atmosféricas para la dinámica y la hidrografía costera? ¿Se producirá un aumento de las olas de calor marinas y atmosféricas con el cambio climático a lo largo de la costa sudoriental del Pacífico? ¿Cómo afectarán al deshielo de los glaciares en la Patagonia?</b></p>	<p>Holbrook et al. (2020) menciona que en sistemas costeros, a raíz de una ola de calor marina se registran pérdidas de hábitats de algas –lo que impacta en la cadena trófica–, posibles colapsos de bosques de algas, cambios en la distribución espacial (notoriamente latitudinal) de especies y ecosistemas, afectación en la pesca artesanal, acuicultura y piscicultura, etc. Oliver et al. (2019) muestran que la costa de Chile exhibe efectivamente un aumento de olas de calor marinas en proyecciones para un futuro cercano (2031-2060). Sin embargo, en el contexto global el aumento regional es prácticamente el más leve. Esto puede deberse a la proyección de intensificación del Anticiclón del Pacífico Sureste, que es también un fenómeno asociado al cambio climático antropogénico. Respecto a las olas de calor atmosféricas, los expertos expresaron que debería esperarse un aumento, pero regionalmente ligero en términos relativos, por el mismo argumento expuesto.</p> <p>Respecto de la interacción con glaciares, es de esperar que los eventos de olas de calor marinas aumenten el proceso de desprendimiento de hielo de glaciares en contacto con el agua.</p>
<p><b>El Niño Oscilación del Sur (ENOS): ¿qué eventos extremos que afectan al océano</b></p>	<p>El Niño Oscilación del Sur modula la temperatura superficial del mar en la zona costera de Chile. Particularmente, en el norte de Chile, eventos de El Niño están vinculados a olas de calor atmosféricas muy prolongadas en el tiempo, llegando a abarcar meses. Como muestran Montecinos &amp; Aceituno (2003), este</p>

<p><b>están relacionados a ENOS en las costas chilenas? ¿Qué se proyecta de ENOS para el futuro, en cuanto a recurrencia e intensidad?</b></p>	<p>fenómeno modula la precipitación de Chile centro y sur, de forma tal que la precipitación aumenta en verano y primavera durante eventos de El Niño, y disminuye en los eventos de La Niña. Eso tiene implicancias en los caudales de los ríos y en el transporte de nutrientes y sedimentos hacia la costa. En el caso de ríos atmosféricos, el estudio de Campos &amp; Rondanelli (2023) muestran que estos eventos suelen ser más duraderos durante El Niño, y menos duraderos durante La Niña.</p>
--	--

## 5 Discusión

### 5.1 Panorama general - Evolución general de las proyecciones climáticas

En general, para cada uno de los eventos extremos reportados en Chile se registra una tendencia hacia una mayor frecuencia e intensidad. Las proyecciones a futuro muestran que esta tendencia al alza continuará en el futuro cercano y medio (hasta al menos el año 2065). Sin embargo, al ser nuestro país tan extenso geográficamente y poseer diversos climas, las tendencias no serán iguales para todo el territorio marítimo-costero. En general, los estudios publicados que analizan un evento se enfocan en zonas geográficas de acotada extensión, es decir, zonas pequeñas que no abarcan al país entero. Muchas macrozonas no son consideradas en los estudios de varios de los eventos extremos, o son consideradas con poco detalle. Para una conclusión certera sobre cómo evolucionará cada evento extremo en cada macrozona, todavía se requieren más estudios que abarquen las zonas que no han sido tomadas por los estudios que hay hasta la fecha. De todas maneras, con la información existente hasta el día de hoy, se puede llegar al siguiente panorama general para el futuro medio (2035-2065).

- **Marejadas, aumento del nivel del mar y erosión costera:** se espera un aumento del nivel del mar para todo el territorio nacional continental. Se espera que la mitad norte del país presente un aumento leve en la temperatura del mar, por lo que el aumento del nivel del mar para este territorio no será tanto como para la mitad sur (donde se espera el doble). Sin embargo, se espera una intensificación en los vientos, por lo que se prevé un aumento en los eventos de marejada y un aumento en la altura de las olas para el norte y sur, lo que conlleva un aumento en la cota de inundación y de erosión costera. Las playas de la zona centro-sur de Chile son las que tienen una mayor amenaza de ser erosionadas gravemente en el futuro cercano si se considera un balance entre estos factores.
- **Surgencia, floraciones algales nocivas e hipoxia:** se espera un aumento en la frecuencia e intensidad de las surgencias, debido al aumento esperado en los vientos costeros. Si bien el fenómeno de surgencia no es considerado dañino de por sí, se debe tener en consideración que también se prevé un aumento en las condiciones atmosféricas que favorecen que un evento de surgencia se torne en una floración algal nociva, como el aumento de días despejados, la falta de lluvias y el aumento de la temperatura del mar. Las zonas más propensas a generar eventos de FAN dadas estas condiciones son el mar interior de Chiloé y Patagonia Norte.
- **Olas de calor marinas:** se espera un aumento en la frecuencia de las olas de calor marinas para todo el territorio marítimo nacional, aunque gracias a la corriente de Humboldt, en la zona norte del país el incremento esperado es mucho menor que el que se espera para el resto del planeta. De todas formas, se ha registrado un aumento tanto en la duración como en la intensidad y el número de eventos para todo el territorio continental en la última década. Las zonas más

propensas a tener olas de calor marinas corresponden al sur de la Región de Los Lagos y en la Región de Aysén, notoriamente el territorio marítimo frente a la comuna de Tortel.

- **Olas de frío marinas:** se espera un aumento en la severidad de las olas de frío marinas en Patagonia, debido al aumento de los frentes polares y el derretimiento de glaciares. Sus consecuencias no han sido estudiadas para Chile, pero en otras zonas del mundo estos fenómenos se relacionan con estrés en los moluscos de concha. Notar que solo existe un estudio para Chile, y que solo tomó en consideración la Patagonia. No se tiene información sobre proyecciones climáticas de este fenómeno.
- **Ríos atmosféricos:** se espera que los ríos atmosféricos sean más perjudiciales debido a la superposición con otros fenómenos atmosféricos que se volverán más frecuentes, como la elevación de la isoterma 0°C producto del aumento en las temperaturas.

## 5.2 Balance entre olas de frío y olas de calor en Patagonia

Puesto que tanto la tendencia a la ocurrencia de olas de frío y olas de calor se muestran al alza, puede surgir la confusión sobre cómo esto es posible, ya que ambos son eventos opuestos y mutuamente excluyentes. El estudio de Mora-Soto et al. (2022) demuestra que, al menos en Patagonia, las olas de calor marinas y las olas de frío marinas ocurren en las mismas zonas, pero en diferentes momentos.

Para evitar posibles malinterpretaciones y brindar una mayor claridad sobre el asunto, es necesario realizar una aclaración respecto del balance entre las olas de frío y de calor. Cuando se realiza el promedio anual de la temperatura superficial del mar en la región afectada por estos dos fenómenos, se muestra una tendencia a que las temperaturas se mantengan más o menos constantes (salvo en Patagonia Norte, 46°S a 38°S). Sin embargo, en este informe se expuso la creciente frecuencia de fenómenos extremos de variabilidad térmica, lo que aparentemente no coincidiría con la tendencia a unas temperaturas constantes. Esta aparente contradicción se explica porque al promediar eventos de altas temperaturas con eventos de bajas temperaturas, estos se contrarrestan y da un resultado cercano a cero. Es decir, que si uno observara únicamente las tendencias de la temperatura superficial del mar por año, no verá mayor variación de esta, pudiendo interpretar erróneamente que la temperatura no presenta mayor variación en estas zonas, cuando esto no es así.

Dicho esto, el mar de la Patagonia chilena entre los 41° a 56°S es de las zonas del mundo menos afectadas por olas de calor marinas de alta magnitud en el mundo. Además, el bosque de algas gigantes patagónico es considerado el bosque más prístino de su tipo (Dayton, 1985; Mora-Soto et al., 2021). El estudio de Mora-Soto et al. (2022) determinó que esta región podría ser el refugio climático más importante para los ecosistemas de algas gigantes en el futuro debido a la temperatura que se espera de sus aguas.

## 5.3 Oportunidades

Parte de los desafíos para la comprensión y adaptación a eventos extremos incluye los siguientes aspectos

- Establecer aproximaciones y definiciones que caractericen correctamente eventos extremos y compuestos extremos para diversas aplicaciones oceánicas y costeras.
- Caracterizar la expresión subsuperficial de estos eventos y la relación de esta señal con la señal superficial

- Estudiar los mecanismos responsables de la aparición de eventos extremos en diferentes regiones y estacionalidad.

-

#### 5.4 Consideración de los modos de variabilidad natural

Si bien este informe se enfocó en los eventos extremos marinos causados por fenómenos atmosféricos extremos inducidos por el cambio climático, se observó que muchos de estos eventos marinos fueron aún más intensos cuando se combinaron con los efectos de patrones climáticos naturales de larga duración, como el llamado fenómeno de El Niño (en realidad llamado El Niño Oscilación del Sur). Estos patrones climáticos modifican las condiciones meteorológicas y oceanográficas a nivel mundial, afectando la temperatura, la radiación solar, la presión atmosférica, las precipitaciones y el viento. En Chile, los patrones más relevantes son la Oscilación de Madden-Julian (MJO), el Modo Anular del Sur (SAM), el Niño Oscilación del Sur (ENOS) y la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO). Es crucial monitorear no solo los eventos atmosféricos extremos, sino también estos patrones climáticos que actúan como “condiciones de fondo” o “condiciones de base” del tiempo, a fin de prevenir impactos humanitarios y económicos.

Directamente, se sugiere que junto con el monitoreo de los eventos atmosféricos extremos que puedan desencadenar un evento extremo marino, se establezcan alertas estacionales que adviertan a, por ejemplo, las comunidades de pescadores, de que durante toda la temporada habrán condiciones naturales favorables a eventos extremos que pueden poner en riesgo sus vidas o provocar escasez de alimento por un periodo prolongado.

Por ejemplo, en el estudio de Mora-Soto et al. (2022), se comenta que las olas de frío marinas fueron más intensas cuando La Niña estuvo presente a la vez, y que las olas de calor fueron más intensas cuando estuvo El Niño presente a la vez (que llegó a provocar una ola de calor de 181 días en el Estrecho de Magallanes, una cifra no menor considerando una migración tan larga de una fuente de alimento).

De La Maza y Farías (2023) encontraron una relación con la cantidad de oxígeno disuelto y El Niño Oscilación del Sur, sugiriendo que este fenómeno periódico de variabilidad climática tiene efectos en la hipoxia marina en nuestras costas. La hipoxia puede provocar migraciones de peses durante meses.

Sin ir más lejos, el reciente río atmosférico del 23 de junio de 2023 en la zona central de Chile ocurrió mientras que se reportaba un fuerte El Niño, además de la ocurrencia de una isoterma 0°C muy alta que provocó que la lluvia cayera sobre la cordillera bajo forma de agua y no de nieve, lo que significó aluviones, desbordes de ríos, la sensible pérdida de dos personas y más de 4.000 damnificados.

#### 5.5 Falta de información en ciertos temas e inexactitudes

Durante la presente investigación, se constataron vacíos de conocimiento en diversas temáticas. Se atestiguó de una falta grave de información sobre la interacción de ríos atmosféricos con el océano y sobre las olas de frío marinas en el territorio nacional. Estas faltas son abordadas en mayor profundidad en la sección 7: Análisis de brechas. Estas faltas provocan incertidumbre en el estado del cambio climático en el país y su futuro.

Además, se observó que diversos estudios y plataformas climáticas calculan de diversas formas la amenaza de marejadas, oleaje y aumento de la cota de inundación, obteniendo resultados muy

diferentes según el método que se utilizara. Es necesario un consenso sobre cómo calcular estos parámetros con exactitud para poder dar un pronóstico certero.

## 5.6 Inexactitudes y posibles errores en la plataforma ARCLIM

Se reportan dos plataformas de simulaciones climáticas nacionales: PSC, del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, y ARCLIM, del Ministerio del Medio Ambiente. ARCLIM es la página web con simulaciones climáticas más utilizada del país, y fue la escogida para basar las proyecciones de este informe.

En el caso de las olas de calor marinas, ARCLIM calculó índices de amenaza que arrojan resultados que no coinciden con aquellos de los numerosos estudios que han realizado proyecciones y análisis detallados de la temperatura superficial del mar. Esto es muy probablemente debido a la forma en que ARCLIM los calculó, asumiendo que la ocurrencia del aumento de la temperatura superficial del mar está solamente ligada al aumento de la temperatura del aire. No considera los vientos ni los factores oceánicos (como las corrientes marinas), que son la mitad de los contribuyentes en causar los eventos extremos.

Además, las simulaciones climáticas para marejadas de ARCLIM no toman en cuenta la tendencia hacia la intensificación de los vientos superficiales que se prevén, el cual es un factor importante que provocará marejadas de mayor tamaño y energía.

Sin embargo, es importante mencionar que esta plataforma brinda una advertencia al lector acerca de posibles inexactitudes. Esta dice: “ADVERTENCIA: Estos datos provienen de diversas fuentes. En términos generales, la información se considera como correcta, pero puede tener algunos errores o estar desactualizada. La responsabilidad del uso e interpretación del contenido de este mapa es del usuario. No podemos responsabilizarnos por la naturaleza de los datos climáticos que han sido generados por Modelos de Circulación Global. En relación a ellos, las series de tiempo corresponden a secuencias que muestran el comportamiento promedio del clima en cada punto, pero no constituyen un pronóstico específico para un momento determinado. No existe garantía alguna de que la meteorología, en un momento determinado en el futuro, guarde correspondencia con los datos aquí entregados”, demostrando una gran incerteza en la calidad de la proyección.

## 5.7 Falta de simulaciones RCP

Durante el desarrollo de esta investigación, se ha constatado una notable carencia de acceso a simulaciones climáticas enfocadas específicamente en el territorio nacional. En este sentido, se ha observado que actualmente solo existen dos plataformas que ofrecen simulaciones climáticas siguiendo los escenarios de concentración representativa (RCP), siendo estos los RCP 2.6 y 8.5.

Lamentablemente, los escenarios RCP 4.5 y 6.0, ampliamente recomendados por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), no se encuentran disponibles en ninguna plataforma nacional. Esta limitación es especialmente relevante, ya que la consideración de diversos escenarios de concentración de gases de efecto invernadero es fundamental para una evaluación completa de los posibles impactos climáticos en diferentes períodos y variables.

Esta falta de disponibilidad de simulaciones climáticas basadas en los RCP 4.5 y 6.0 resalta la necesidad imperante de contar con una plataforma nacional que no solo abarque estos escenarios, sino que

también considere distintas fechas y variables relevantes. Una plataforma de este tipo permitiría una mejor comprensión de los posibles futuros cambios climáticos y una toma de decisiones más informada y precisa en el ámbito nacional.

## 5.8 Alcance de esta investigación

Esta investigación se enfocó principalmente en las áreas marítimas y costeras de Chile continental, excluyendo específicamente las zonas extramarítimas como Rapa Nui, Juan Fernández y la Antártica. Es importante resaltar que la omisión de estos territorios en el análisis puede generar limitaciones en la comprensión completa del panorama general del cambio climático en el país. A pesar de esto, se espera que los hallazgos y conclusiones obtenidos en el presente estudio proporcionen una base sólida para futuras investigaciones que aborden de manera integral y exhaustiva estos territorios insulares y polares, en aras de obtener una visión más completa y precisa de los efectos del cambio climático en Chile.

## 6 Conclusiones

En este estudio, se ha realizado una amplia exploración de los diferentes aspectos relacionados con el cambio climático y su impacto en el sistema oceánico. Se ha analizado la interacción entre eventos extremos atmosféricos y el territorio costero, estudiando el aumento del nivel del mar, las inundaciones y la erosión costera asociados a las marejadas, la surgencia, las floraciones algales nocivas, las olas de calor, las olas de frío marinas y los ríos atmosféricos.

Mediante el uso de plataformas con datos y simulaciones climáticas, así como la realización de talleres con expertos, se obtuvieron resultados significativos que contribuyen a comprender mejor las proyecciones climáticas y la vulnerabilidad de las macrozonas geográficas estudiadas. Sin embargo, se han identificado algunas inexactitudes y posibles errores en la plataforma ARCLIM, así como la falta de simulaciones específicas para el territorio nacional bajo el escenario de RCP y una falta grave de información sobre la interacción de ríos atmosféricos con el mar y sobre olas de frío marinas en nuestro territorio.

A pesar de las limitaciones y brechas identificadas, este estudio ha proporcionado una visión integral de los efectos del cambio climático en el territorio costero de Chile Continental y ha sentado las bases para futuras investigaciones y acciones de adaptación y mitigación. Se destaca la importancia de considerar tanto los modos de variabilidad natural como las proyecciones climáticas y ocurrencia de eventos extremos en la toma de decisiones y la planificación de políticas y estrategias.

Los aspectos más relevantes en cuanto a la ocurrencia esperada de cada evento extremo son:

- **Marejadas, aumento del nivel del mar y erosión costera:** se espera un aumento del nivel del mar para todo el territorio nacional continental y un aumento en la cota de inundación y en la erosión costera. Las playas de la zona centro-sur de Chile son las que tienen una mayor amenaza de ser erosionadas gravemente en el futuro cercano si se considera un balance entre estos factores.
- **Surgencia, floraciones algales nocivas e hipoxia:** se espera un aumento en la frecuencia e intensidad de las surgencias. En conjunto con otros factores provocados por el cambio climático, habrá más probabilidades de que las surgencias terminen en floraciones algales nocivas. Las

zonas más propensas a generar eventos de FAN dadas estas condiciones son el mar interior de Chiloé y Patagonia Norte.

- **Olas de calor marinas:** se espera un aumento en la frecuencia de las olas de calor marinas para todo el territorio marítimo nacional. Las zonas más propensas a tener olas de calor marinas corresponden al sur de la Región de Los Lagos y en la Región de Aysén, notoriamente el territorio marítimo frente a la comuna de Tortel.
- **Olas de frío marinas:** se espera un aumento en la severidad de las olas de frío marinas en Patagonia, debido al aumento de los frentes polares y el derretimiento de glaciares. No existe información con más detalles.
- **Ríos atmosféricos:** se espera que los ríos atmosféricos sean más perjudiciales debido a la superposición con otros fenómenos atmosféricos que se volverán más frecuentes, como la elevación de la isoterma 0°C producto del aumento en las temperaturas. No existe información más detallada sobre el impacto de los ríos atmosféricos en el territorio costero.

## 7 Análisis de brechas

En esta sección se analizan las brechas encontradas al realizar la revisión bibliográfica. Estas brechas fueron evidenciadas tanto por los autores de los estudios a través de los artículos revisados, como por los expertos consultados en el taller, como por los autores del informe.

### 7.1 Falta de estudios en temas de relevancia

Además de la falta de estudios individuales para cada evento extremo, también se ha evidenciado la necesidad de una evaluación más profunda sobre cómo estos eventos pueden estar interconectados y cómo sus consecuencias pueden manifestarse de manera acumulativa en una región determinada. A menudo, estos eventos extremos no ocurren de manera aislada, sino que pueden estar interrelacionados de formas complejas y a veces inesperadas. Por lo tanto, resulta esencial comprender no solo las singularidades de cada evento, sino también cómo pueden influirse mutuamente y cómo sus efectos pueden potenciarse en una sinergia que amplifique su impacto en el entorno. Esta falta de análisis holístico de la interacción entre eventos extremos y sus consecuencias podría limitar nuestra comprensión completa de su impacto en la región y, por ende, nuestras estrategias de adaptación y mitigación.

A continuación, se detalla qué faltas se evidenciaron en cada evento en particular.

#### 7.1.1 Olas de calor marinas

El estudio de Pujol et al. (2022) menciona que, a pesar de que los ecosistemas de la Patagonia sean extremadamente vulnerables al calentamiento global (Yáñez et al., 2017), se han realizado muy pocos estudios sobre las consecuencias de las olas de calor marinas en ecosistemas de los fiordos y ninguno en los fiordos patagónicos.

### 7.1.2 Olas de frío marinas

Solo existe un estudio sobre olas de frío marinas en Chile. Aún quedan muchas preguntas sin respuesta sobre los mecanismos detrás de la ocurrencia de estos eventos, especialmente a escalas más finas que aquel abordado por Mora-Soto et al. (2022). Asimismo, no se tienen estudios sobre los impactos que estas generan en la flora y fauna marina chilena. Sumado a esto, al existir solo un estudio, se desconoce si estos eventos se restringen a la zona de la Patagonia o si también han alcanzado otras latitudes del territorio costero nacional. Se requieren más estudios al respecto.

### 7.1.3 Ríos atmosféricos

No existe ningún estudio publicado que dé cuenta del efecto de los ríos atmosféricos y su paso por el mar. Sin embargo, se conoce dentro de la comunidad científica que existe un estudio en curso liderado por el centro COPAS-COASTAL de la Universidad de Concepción que espera establecer las primeras relaciones. De todas formas, en el futuro se tendrán que realizar estudios periódicos para monitorear la respuesta de la vida marina al cambio climático.

### 7.1.4 Simulaciones RCPs

No existe una simulación que contemple el futuro de la temperatura superficial del mar en ninguna de las dos plataformas climáticas nacionales, siendo que esta es una variable fundamental para la comprensión no solo de los eventos extremos marinos, sino que también de los atmosféricos. Así, no se puede tener una visión lo suficientemente detallada como para comprender el devenir de las olas de calor ni las olas de frío marinas.

Además, no existe información sobre las cadenas de impactos para el RCP 2.6. Los RCP 4.5 (el más realista) y el RCP 6.0 ni siquiera son considerados en ninguna de las plataformas climáticas. Se necesitan más estudios y/o plataformas que contemplen los cuatro escenarios propuestos por el IPCC para una mejor comprensión del devenir climático y poder realizar políticas de adaptación y mitigación adecuadas.

Así, se destaca la ausencia de una plataforma prospectiva de simulaciones oceánicas que represente de forma adecuada la física del mar, limitando la capacidad de comprender y prever los posibles escenarios en el ámbito marino, lo cual es fundamental para el desarrollo de planes de adaptación y mitigación.

## 8 Glosario

**Advección de aguas cálidas:** se refiere al proceso en el cual masas de agua con temperaturas superiores a las presentes en una determinada área son transportadas hacia esa área por corrientes oceánicas.

**Bloom:** rápido y abundante crecimiento de microorganismos acuáticos, notoriamente de fitoplancton, en un cuerpo de agua. Este fenómeno suele darse cuando ocurren condiciones favorables, como aguas a altas temperaturas, alta disponibilidad de nutrientes y luz solar adecuada, como un día despejado.

**Climatología:** una climatología establece cuál es el valor promedio para cierta variable (como temperatura, precipitación, etc) para cierta zona particular en cierto momento del año. Se espera que los

valores registrados en una zona durante el año sean cercanos a la climatología (vale decir, al promedio para esa zona y por época del año). Si se alejan significativamente de la climatología, es posible que sea un evento extremo.

**Floración algal nociva (FAN):** son eventos naturales que ocurren cuando determinadas especies del fitoplancton que habita en los ecosistemas acuáticos, lagos u océanos, aumentan rápidamente su abundancia, pudiendo afectar la salud humana, a los organismos que allí habitan, y a múltiples actividades económicas o sociales (por ejemplo, la acuicultura y el turismo). Este fenómeno es muy reconocible a simple vista, ya que los pigmentos de las microalgas tiñen las aguas de diferentes colores, como verde, café o rojo, entre otros, siendo este último el que más se asocia a las FAN; de ahí que coloquialmente se hable de “marea roja” y se utilice este concepto como sinónimo de FAN, aunque no sean exactamente lo mismo.

**Hipoxia:** fenómeno en el que el oxígeno disuelto en el mar se reduce a niveles lo suficientemente bajos como para afectar negativamente los procesos ecológicos y biogeoquímicos (De La Maza & Farías, 2023).

**Sistema acoplado atmósfera-océano:** es un conjunto complejo de interacciones y retroalimentaciones entre la atmósfera y los océanos, en que intercambian energía, gases y agua. El equilibrio de este sistema influye en el clima y el tiempo en escalas temporales diversas.

**Modelos climáticos:** representación numérica del sistema climático basada en las propiedades físicas, químicas y biológicas de sus componentes, en sus interacciones y en sus procesos de retroalimentación, y que recoge todas o algunas de sus propiedades conocidas. El sistema climático se puede representar mediante modelos de diverso grado de complejidad; en otras palabras, para cada componente o conjunto de componentes es posible identificar un espectro o jerarquía de modelos que difieren en aspectos tales como el número de dimensiones espaciales, el grado en que aparecen representados explícitamente los procesos físicos, químicos o biológicos, o el grado de utilización de parametrizaciones empíricas. Los modelos de circulación general atmósfera-océano acoplados proporcionan la más completa representación del sistema climático actualmente disponible. Se está evolucionando hacia modelos más complejos que incorporan química y biología interactivas. Los modelos climáticos se utilizan como herramienta de investigación para estudiar y simular el clima y para fines operativos, en particular predicciones climáticas mensuales, estacionales e interanuales (IPCC, 2014).

**Proyección climática:** respuesta simulada del sistema climático a diversos escenarios de emisiones o de concentraciones futuras de gases de efecto invernadero y aerosoles, frecuentemente basada en simulaciones mediante modelos climáticos. Las proyecciones climáticas se diferencian de las predicciones climáticas por su dependencia del escenario de emisiones, concentraciones, forzamiento radiativo utilizado, basado en supuestos relativos, por ejemplo, a un devenir socioeconómico y tecnológico que puede o no materializarse (IPCC, 2014).

**Surgencia:** fenómeno oceanográfico en el cual aguas profundas y frías ascienden hacia la superficie del océano. Esto suele ocurrir cuando el viento sopla paralelo a la costa y empuja las aguas superficiales alejándolas de la costa, permitiendo que el agua fría que se encuentra en capas más profundas ascienda para reemplazar el vacío dejado por el agua superficial que se aleja. Estas aguas frías, además, suelen venir cargadas en nutrientes que normalmente reposan en el fondo marino.

**Trayectorias Representativos de Concentración (RCP):** representación plausible de la evolución futura de las emisiones de sustancias que podrían ser radiativamente activas (por ejemplo, gases de efecto invernadero y aerosoles), basada en un conjunto coherente de supuestos sobre los factores que

las impulsan (por ejemplo, el desarrollo demográfico y socioeconómico, el cambio tecnológico, la energía y el uso del suelo) y las principales relaciones entre ellos. Los escenarios de concentraciones, obtenidos a partir de los escenarios de emisiones, se introducen en un modelo climático para obtener proyecciones climáticas (IPCC, 2014).

## 9 Acrónimos y abreviaciones

**FAN:** abreviación de floración algal nociva.

**GEI:** abreviación de gases de efecto invernadero.

**IPCC:** siglas de Panel Intergubernamental de Cambio Climático (de sus siglas en inglés, *Intergovernmental Panel on Climate Change*).

**NMM:** abreviación de nivel medio del mar.

**RCP:** abreviación de Trayectorias Representativas de Concentración (de sus siglas en inglés, *Representative Concentration Pathways*).

**TSM:** abreviación de temperatura superficial del mar.

## 10 Bibliografía

Aksnes, D. L., Aure, J., Johansen, P.-O., Johnsen, G. H., and Veia Salvanes, A. G. (2019). Multi-Decadal Warming of Atlantic Water and Associated Decline of Dissolved Oxygen in a Deep Fjord. *Estua. Coast. Shelf. Sci.* 228, 106392. doi: 10.1016/j.ecss.2019.106392

Armijo, J., Oerder, V., Auger, P.-A., Bravo, A., and Molina, E. (2020). The 2016 Red Tide Crisis in Southern Chile: Possible Influence of the Mass Oceanic Dumping of Dead Salmon. *Mar. Poll. Bull.* 150, 110603. doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.110603

Beyá, J., P. Winckler, and M. Molina. "Inundaciones costeras, más allá de los tsunamis." *An. Inst. Ing. Chile* 125.2 (2013): 63-81.

Brauko, K. M., Cabral, A., Costa, N. V., Hayden, J., Dias, C. E. P., Leite, E. S., et al. (2020). Marine Heatwaves, Sewage and Eutrophication Combine to Trigger Deoxygenation and Biodiversity Loss: A SW Atlantic Case Study. *Front. Mar. Sci.* 7. doi: 10.3389/fmars.2020.590258

Breitburg, D., Levin, L. A., Oschlies, A., Grégoire, M., Chavez, F. P., Conley, D. J., et al. (2018). Declining Oxygen in the Global Ocean and Coastal Waters. *Science* 359 (6371). doi: 10.1126/science.aam7240

CAMPORT. (2021). Reporte N°12. Las marejadas llegaron para quedarse ¿Qué estamos haciendo?. Cámara Marítima y Portuaria de Chile A.G. <https://docplayer.es/218278968-Que-estamos-haciendo.html>

Campos-Caba, R. V. (2016). Análisis de marejadas históricas y recientes en las costas de Chile.

Camus, P., Losada, I. J., Izaguirre, C., Espejo, A., Menéndez, M., & Pérez, J. (2017). Statistical wave climate projections for coastal impact assessments. *Earth's Future*, 5(9), 918-933.

- Carvalho, K. S., Smith, T. E., and Wang, S. (2021). Bering Sea Marine Heatwaves: Patterns, Trends and Connections With the Arctic. *J. Hydrol.* 600, 126462. doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126462
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2 (FONDAP 15110009) "Simulaciones climáticas regionales". Proyecto "Simulaciones climáticas regionales y marco de evaluación de la vulnerabilidad" mandado por el Ministerio del Medio Ambiente. Julio de 2018. Disponible en [www.cr2.cl](http://www.cr2.cl).
- Cheng, L., von Schuckmann, K., Abraham, J. P., Trenberth, K. E., Mann, M. E., Zanna, L., ... & Lin, X. (2022). Past and future ocean warming. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1-19.
- Dayton, P. K. (1985). The structure and regulation of some South American kelp communities. *Ecological Monographs*, 55(4), 447–468. <https://doi.org/10.2307/2937131>
- De La Maza L and Farías L (2023), The intensification of coastal hypoxia off central Chile: Long term and high frequency variability. *Front. Earth Sci.* 10:929271. doi: 10.3389/feart.2022.929271
- Díaz, P. A., Álvarez, G., Varela, D., Pérez-Santos, I., Díaz, M., Molinet, C., et al. (2019). Impacts of Harmful Algal Blooms on the Aquaculture Industry: Chile as a Case Study. *Perspect. Phycol.* 6 (1–2), 39–50. doi: 10.1127/pip/2019/0081
- Frölicher, T. L., Fischer, E. M., & Gruber, N. (2018). Marine heatwaves under global warming. *Nature*, 560(7718), 360-364.
- Garreaud, R. (2018). Record-Breaking Climate Anomalies Lead to Severe Drought and Environmental Disruption in Western Patagonia in 2016. *Climate Res.* 74 (3), 217–229. doi: 10.3354/cr01505
- Häussermann, V., & Försterra, G. (2007). Extraordinary abundance of hydrocorals (Cnidaria, Hydrozoa, Stylasteridae) in shallow water of the Patagonian fjord region. *Polar Biology*, 30(4), 487–492. <https://doi.org/10.1007/s00300-006-0207-5>.
- Hernández-Miranda, E., et al. "A major fish stranding caused by a natural hypoxic event in a shallow bay of the eastern South Pacific Ocean." *Journal of Fish Biology* 76.7 (2010): 1543-1564.
- Hernandez-Miranda, E., Veas, R., Labra, F. A., Salamanca, M., and Quiñones, R.A. (2012). Response of the epibenthic macrofaunal community to a strong upwelling-driven hypoxic event in a shallow bay of the southern Humboldt Current System. *Mar. Environm. Res.* 79, 16–28. doi:10.1016/j.marenvres.2012.04.004
- Hobday, A. J., Alexander, L. V., Perkins, S. E., Smale, D. A., Straub, S. C., Oliver, E. C., ... & Wernberg, T. (2016). A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Progress in Oceanography*, 141, 227-238.
- Hobday, A. J., Oliver, E. C., Gupta, A. S., Benthuyssen, J. A., Burrows, M. T., Donat, M. G., ... & Smale, D. A. (2018). Categorizing and naming marine heatwaves. *Oceanography*, 31(2), 162-173.
- Hoegh-Guldberg, O., Lovelock, C., Caldeira, K., Howard, J., Chopin, T., & Gaines, S. (2019). The ocean as a solution to climate change: five opportunities for action.
- Holbrook, N. J., Scannell, H. A., Sen Gupta, A., Benthuyssen, J. A., Feng, M., Oliver, E. C. J., et al. (2019). A Global Assessment of Marine Heatwaves and Their Drivers. *Nat. Commun.* 10, 2624. doi: 10.1038/s41467-019-10206-z

Hu, S., Zhang, L., and Qian, S. (2020). Marine Heatwaves in the Arctic Region: Variation in Different Ice Covers. *Geophys. Res. Lett.* 47 (16). doi: 10.1029/2020GL089329

Ibaceta, I., Díaz, H., Winckler, P., Catalán, P., Agredano, R., Molteni, F. Y Campos-Caba, R. (2017). Evolución morfológica de playas en la escala de tormentas. Aplicación del modelo Xbeach en la Playa Reñaca. En: XXIII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, SOCHID. Valparaíso: Universidad Técnica Federico Santa María.

IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

IPCC, 2023: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 36 pages. (in press).

Jebri, B., Khodri, M., Echevin, V., Gastineau, G., Thiria, S., Vialard, J., & Lebas, N. (2020). Contributions of internal variability and external forcing to the recent trends in the Southeastern Pacific and Peru–Chile upwelling system. *Journal of Climate*, 33(24), 10555-10578.

Laufkötter, C., Zscheischler, J., and Frölicher, T. L. (2020). High-Impact Marine Heatwaves Attributable to Human-Induced Global Warming. *Science* 369 (6511), 1621–1625. doi: 10.1126/science.aba0690

León-Muñoz, J., Urbina, M. A., Garreaud, R., and Iriarte, J. L. (2018). Hydroclimatic Conditions Trigger Record Harmful Algal Bloom in Western Patagonia (Summer 2016). *Sci. Rep.* 8 (1), 1330. doi: 10.1038/s41598-018-19461-4

Lima, F. P., and Wethey, D. S. (2012). Three Decades of High-Resolution Coastal Sea Surface Temperatures Reveal More Than Warming. *Nat. Commun.* 3, 704. doi: 10.1038/ncomms1713

Lobeto, Hector, Melisa Menendez, and Iñigo J. Losada. "Future behavior of wind wave extremes due to climate change." *Scientific reports* 11.1 (2021): 1-12.

Martínez, C., Contreras-López, M., Winckler, P., Hidalgo, H., Godoy, E. Y Agredano, R. (2018). Coastal erosion in central Chile: A new hazard?, *Ocean & Coastal Management*, 156: 141-155.

Masanja, F., Xu, Y., Yang, K., Mkuye, R., Deng, Y., & Zhao, L. (2023). Surviving the cold: a review of the effects of cold spells on bivalves and mitigation measures. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1158649.

Mignot, A., Von Schuckmann, K., Gasparin, F., van Gennip, S., Landschützer, P., Perruche, C., et al. (2021). Decrease in Air-Sea CO<sub>2</sub> Fluxes Caused by Persistent Marine Heatwaves. doi: 10.31223/X5JG7V

Ministerio del Medio Ambiente, 2019. Volumen 1: Amenazas en “Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile”, Documento preparado por: Winckler, P.; Contreras-López, M.; Vicuña, S.; Larraguibel, C.; Mora, J.; Esparza, C.; Salcedo, J.; Gelcich, S.; Fariña, J. M.; Martínez, C.; Agredano, R.; Melo, O.; Bambach, N.; Morales, D., Marinkovic, C.; Pica, A., Santiago, Chile.

Molina, M. (2022). Marejadas en Chile: características, avances y desafíos pendientes. En Martínez, C., Cienfuegos, R., Barragán, J., Navarrete, S., Hidalgo, R., Arenas, F. & Fuentes, L. (Eds.), *Hacia una ley de costas en Chile: bases para una gestión integrada de áreas costeras* (pp. 207–224). Serie GEOLIBRO, Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago.

Molteni, F., Winckler, P. Y Ibaceta, R. (2017). Análisis morfodinámico simplificado de playa ante forzantes oceanográficos y tectónicos. En: XXIII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, SOCHID. Valparaíso: Universidad Técnica Federico Santa María.

Mora-Soto, A., Aguirre, C., Iriarte, J. L., Palacios, M., Macaya, E. C., & Macias-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., Capsey, A., Friedlander, A. M., Palacios, M., Brewin, P. E., Golding, N., et al. (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.

Oliver, E. C. J., Donat, M. G., Burrows, M. T., Moore, P. J., Smale, D. A., Alexander, L. V., et al. (2018). Longer and More Frequent Marine Heatwaves Over the Past Century. *Nat. Commun.* 9, 1324. doi: 10.1038/s41467-018-03732-9

Oliver, E. C., Burrows, M. T., Donat, M. G., Sen Gupta, A., Alexander, L. V., Perkins-Kirkpatrick, S. E., et al. (2019). Projected marine heat waves in the 21st century and the potential for ecological impact. *Frontiers in Marine Science*, 6, 734. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00734>

Pica-Téllez, A., Garreaud, R., Meza, F., Bustos, S., Falvey, M., Ibarra, M., ... & Silva, I. (2020). Informe Proyecto ARCLim: Atlas de Riesgos Climáticos para Chile. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, Centro de Cambio Global UC and Meteodata for the Ministerio del Medio Ambiente via La Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ): Santiago, Chile.

Pujol C, Pérez-Santos I, Barth A y Alvera-Azcaráte A (2022) Marine Heatwaves Offshore Central and South Chile: Understanding Forcing Mechanisms During the Years 2016-2017. *Front. Mar. Sci.* 9:800325. doi: 10.3389/fmars.2022.800325.

Roberts, S. D., Van Ruth, P. D., Wilkinson, C., Bastianello, S. S., and Bansemer, M. S. (2019). Marine Heatwave, Harmful Algae Blooms and an Extensive Fish Kill Event During 2013 in South Australia. *Front. Mar. Sci.* 6. doi: 10.3389/fmars.2019.00610

Sapag, C., & Gorny, M. (2020). ¿Qué es la surgencia? Recuperado el 27 de junio de 2023, de OCEANA website: <https://chile.oceana.org/blog/que-es-la-surgencia/>

Schlegel, R. W., and Smit, A. J. (2018). Heatwaver: A Central Algorithm for the Detection of Heatwaves and Cold-Spells. *J. Open Source Software* 3 (27), 821. doi: 10.21105/joss.00821

Schlegel, R. W., Darmaraki, S., Benthuyssen, J. A., Filbee-Dexter, K., & Oliver, E. C. (2021). Marine cold-spells. *Progress in Oceanography*, 198, 102684. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2021.102684>

Smale, D. A., Wernberg, T., Oliver, E. C. J., Thomsen, M., Harvey, B. P., Straub, S. C., et al. (2019). Marine Heatwaves Threaten Global Biodiversity and the Provision of Ecosystem Services. *Nat. Climate Change* 9 (4), 306–312. doi: 10.1038/s41558-019-0412-1

Ugarte, A., Romero, J., Farías, L., Sapiains, R., Aparicio-Rizzo, P., Ramajo, L., Aguirre, C., Masotti, I., Jacques, M., Barrera, F., Billi, M., Boisier, J., Carbonell, P., De la Maza, L., De la Torre, M., Espinoza-González, O., Faúndez, J., Muñoz, F., Garreaud, R., Guevara, G., González, M., Guzmán, L., Ibáñez, J., Ibarra, C., Marín, A., Mitchell, R., Moraga, P., Narváez, D., O'Ryan, R., Pérez, C., Pilgrin, A., Pinilla, E., Rondanelli, R., Salinas, M., Sánchez, R., Sanzana, K., Segura, C., Valdebenito, P., Valenzuela, D., Vásquez S., & Williams, C. (2022). "Marea roja" y cambio global: elementos para la construcción de una gobernanza integrada de las Floraciones de Algas Nocivas (FAN). Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, (ANID/FONDAP/15110009), 84 pp. Disponible en [www.cr2.cl/fan](http://www.cr2.cl/fan)

Varela, R., Rodríguez-Díaz, L., de Castro, M., & Gómez-Gesteira, M. (2021). Influence of Eastern Upwelling systems on marine heatwaves occurrence. *Global and Planetary Change*, 196, 103379.

Winckler, P., Contreras-López, M., Campos-Caba, R., Beyá, J. Y Molina, M. (2017) El temporal del 8 de agosto de 2015 en las regiones de Valparaíso y Coquimbo, Chile Central. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 45(4): 622-648. DOI: 10.3856/vol45-issue4-fulltext-1.

World Meteorological Association. (2023). State of the Global Climate 2022.

Yáñez, E., Lagos, N. A., Norambuena, R., Silva, C., Letelier, J., Muck, K.-P., et al. (2017). "Impacts of Climate Change on Marine Fisheries and Aquaculture in Chile," in *Climate Change Impacts on Fisheries and Aquaculture*, vol. 1 . Eds. B. F. Phillips and M. Pérez-Ramírez (Hoboken New Jersey, USA: John Wiley&Sons Ltd), 239–332. doi: 10.1002/9781119154051.ch10