

Informe
Proyecto
ARCLIM

Zonas Costeras



ARCLIM
Atlas de Riesgo Climático
Chile



Equipo realizador:

Patricio Winckler

Universidad de Valparaíso / CIGIDEN

Manuel Contreras-López

Universidad de Valparaíso

Cristián Larraguibel González

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

Javiera Mora

César Esparza

Pontificia Universidad Católica de Chile

Roberto Agredano

Universidad Católica del Maule

Carolina Martínez

Pontificia Universidad Católica de Chile / CIGIDEN

Iván Torres

Pontificia Universidad Católica de Chile

Valparaíso, Chile - 2020



Este informe debe citarse de la siguiente manera:

Winckler, P.; Contreras - López, M.; Larraguibel, C.; Mora, J.; Esparza, C.; Agredano, R. Martínez, C. & Torres, I., 2020. Informe Proyecto ARClim: Zonas Costeras. Universidad de Valparaíso, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Pontificia Universidad Católica de Chile, coordinado por Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia y Centro de Cambio Global UC para el Ministerio del Medio Ambiente a través de La Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). Valparaíso.

Preparado para:



ARClim es un proyecto del Ministerio del Medio Ambiente del Gobierno de Chile, financiado por la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH por encargo del Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ) de Alemania.

Coordinado por:



Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2
ANID/FONDAP/15110009



Centro Interdisciplinario de Cambio Global UC
de la Pontificia Universidad Católica de Chile

Desarrollado por:



Informe
Proyecto
ARCLIM

Zonas Costeras

ARCLIM
Atlas de Riesgo Climático
Chile



ÍNDICE DE CONTENIDOS

Pág.		Pág.	
1	1. Resumen Ejecutivo	24	3.3 Playas.
5	2. Introducción	24	3.3.1 Contexto.
6	2.1 Impactos del cambio climático en la costa.	24	3.3.2 Cadena de impacto.
7	2.2 Caracterización de la Amenaza.	25	3.3.3 Exposición.
8	2.2.1 Nivel medio del mar.	25	3.3.4 Amenaza.
8	2.2.2 Marejadas.	25	3.3.5 Sensibilidad.
10	2.2.3 Cota de inundación.	26	3.3.6 Riesgo.
12	3. Metodología	26	3.4 Asentamientos costeros.
12	3.1 Caletas de pesca artesanal.	26	3.4.1 Contexto.
12	3.1.1 Contexto.	27	3.4.2 Cadena de impacto.
13	3.1.2 Cadena de impacto.	28	3.4.3 Exposición.
13	3.1.3 Exposición.	28	3.4.4 Amenaza.
14	3.1.4 Amenaza.	28	3.4.5 Sensibilidad.
16	3.1.5 Sensibilidad.	30	3.4.6 Riesgo.
21	3.1.6 Riesgo.	34	4. Resultados
22	3.2 Puertos estatales.	34	4.1 Caletas de pesca artesanal.
22	3.2.1 Contexto.	34	4.2 Puertos estatales.
23	3.2.2 Cadena de impacto.	36	4.3 Playas.
23	3.2.3 Exposición.	38	4.4 Asentamientos costeros.
23	3.2.4 Amenaza.	41	5. Brechas
24	3.2.5 Sensibilidad.	41	5.1 Caletas de pesca artesanal.
24	3.2.6 Riesgo.	41	5.2 Puertos.

Pág.

- 42 5.3 Playas.
- 42 5.4 Asentamientos costeros.
- 42 5.5 Mejoras al análisis de Amenaza.
- 42 5.6 Otros impactos asociados a amenazas físicas.
 - 45 5.6.1 Infraestructura energética.
 - 45 5.6.2 Sistema natural.
 - 45 5.6.3 Redes de comunicación y transporte.
- 47 5.7 Otros impactos asociados a amenazas físico-químicas.

48 6. Bibliografía

51 7. Anexo:

Resultados complementarios al estudio de playas.

- 51 7.1 Análisis general de cambios históricos de la línea litoral.
- 54 7.2 Análisis de cambios históricos de la línea litoral por playa.
 - 54 7.2.1 Región de Tarapacá.
 - 55 7.2.2 Región de Atacama.
 - 56 7.2.3 Región de Coquimbo.
 - 57 7.2.4 Región de Valparaíso.

ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.	Pág.
2	18
Figura 1. Esquema de cálculo del Riesgo para el sistema puertos.	Figura 10. Caletas artesanales urbanas/rurales, con/sin AMERB, entre las regiones de O'Higgins y del Biobío.
6	18
Figura 2. Definición de la cota de inundación, a partir de las constituyentes que la definen.	Figura 11. Caletas artesanales urbanas/rurales con/sin AMERB entre las regiones de La Araucanía y Los Lagos
7	19
Figura 3. Esquema general del cálculo del efecto del cambio climático para la proyección del escenario RCP 8.5 (2026 - 2045) respecto del período histórico (1985 - 2004).	Figura 12. Caletas artesanales con/sin obras de abrigo y con/sin obras de atraque entre las regiones de Arica y Parinacota, y Valparaíso.
8	19
Figura 4. a) Aumento del nivel medio del mar para la proyección del escenario RCP 8.5 (2026 -2045) respecto del período histórico (1985 - 2004). b) Nivel medio del mar para las localidades costeras de Antofagasta, Valparaíso, Concepción e insulares de Rapa Nui (Isla de Pascua) y el archipiélago Juan Fernández.	Figura 13. Caletas artesanales con/sin obras de abrigo y con/sin obras de atraque entre las regiones de O'Higgins y Biobío.
9	20
Figura 5. a) Número de marejadas por año en nodos ubicados cada 2° costa afuera del litoral chileno. b) Tasa de aumento del número de marejadas por año en nodos ubicados cada 2° de latitud.	Figura 14. Caletas artesanales, con/sin obras de abrigo y con/sin obras de atraque, entre las regiones de La Araucanía y de Los Lagos.
10	22
Figura 6. Cota de inundación entre Arica y el canal Chacao	Figura 15. Cantidad de cierres de puerto por año en 19 capitánías expuestas al océano Pacífico.
14	29
Figura 7. Distribución porcentual de caletas, pescadores y embarcaciones por región.	Figura 16. Localidad de Puerto Viejo en la Región de Atacama.
16	30
Figura 8. Ejemplos de caletas de pescadores artesanales a lo largo de la costa de Chile.	Figura 17. Localidad de Laguna Verde en la Región de Valparaíso.
17	30
Figura 9. Caletas artesanales urbanas/rurales, con/sin AMERB, entre las regiones de Arica y Parinacota y de Valparaíso.	Figura 18. Localidad de Cartagena en la Región de Valparaíso.
	31
	Figura 19. Asentamientos costeros entre las regiones de Arica y Parinacota y de Valparaíso.
	31
	Figura 20. Asentamientos costeros entre O'Higgins y Biobío.

ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.	
32	Figura 21. Asentamientos costeros entre las regiones de La Araucanía y de Los Lagos.
32	Figura 22. Asentamientos costeros entre las regiones de Aysén y de Magallanes.
35	Figura 23. Visualización de Amenaza, Exposición, Vulnerabilidad y Riesgo para caletas artesanales en la plataforma ARCLim.
35	Figura 24. Visualización de Amenaza, Exposición, Vulnerabilidad y Riesgo para puertos en la plataforma ARCLim.
37	Figura 25. Visualización de la Amenaza, Exposición, Vulnerabilidad y Riesgo para playas en la plataforma ARCLim.
37	Figura 26. Cambios en la línea litoral para playas de Iquique, Región de Atacama.
38	Figura 27. Tasas de cambio (m/año) en las 45 playas analizadas.
39	Figura 28. Índice de Sensibilidad en las 45 playas analizadas.
39	Figura 29. Visualización de la Amenaza, Exposición, Vulnerabilidad y Riesgo para asentamientos costeros en la plataforma ARCLim.
43	Figura 30. Ejemplo de las diferencias y mal ajuste al borde costero de las líneas de costa de SUBPESCA e INE en la zona sur-austral del país. Fuente: MMA (2019b).
46	Figura 31. Ejemplos de caminos costeros ubicados bajo los 10 msnm. Fuente MMA (2019b).

Pág.	
52	Figura 32. Playas analizadas en este estudio.
53	Figura 33. Estado de erosión, estabilidad o acreción para las playas analizadas.
53	Figura 34. Cambios en la línea litoral para playas de la Región de Tarapacá.
53	Figura 35. Cambios en la línea litoral para playas de la Región de Valparaíso.
54	Figura 36. Cambios en la línea litoral para playas de la Región de Coquimbo.
54	Figura 37. Cambios en la línea litoral para playas de la Región de Valparaíso.
55	Figura 38. Cambios espaciotemporales de la línea litoral, playa Cavanha, Iquique (Región de Tarapacá), período 1974 - 2018.
55	Figura 39. Cambios espaciotemporales de la línea litoral, playa Brava, Iquique (Región de Tarapacá), período 1978 - 2018.
56	Figura 40. Cambios espaciotemporales de la línea litoral, bahía de Chañaral (Región de Atacama), período 1974 - 2018.
56	Figura 41. Cambios espaciotemporales de la línea litoral, Caldera (Región de Atacama), período 1964 - 2018.

ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

- 57 Figura 42.**
Cambios espaciotemporales de la línea litoral, bahía de Huasco (Región de Atacama), período 1964 - 2016.
- 57 Figura 43.**
Cambios espaciotemporales de la línea litoral, playa Pichidanguí (Región de Coquimbo), período 1975 - 2018.
- 58 Figura 44.**
Cambios espaciotemporales de la línea litoral, playa Grande, Tongoy (Región de Coquimbo), período 1964 - 2018.
- 58 Figura 45.**
Cambios espaciotemporales de la línea litoral, playa Amarilla (Bahía de Conchalí), Los Vilos (Región de Coquimbo), período 1964 - 2018.
- 59 Figura 46.**
Cambios espaciotemporales de la línea litoral, playa La Ligua (Región de Valparaíso), período 1975 - 2018.
- 59 Figura 47.**
Cambios espaciotemporales de la línea litoral, playa Papudo (Región de Valparaíso), período 1975 - 2018.

ÍNDICE DE TABLAS

Pág.

- 5 Tabla 1.**
Ubicación de los mapas de cadenas de impacto en la costa.
- 13 Tabla 2.**
Ficha de cadena de impactos de caletas de pesca artesanal.
- 15 Tabla 3.**
Proyecciones a mediados de siglo del cambio en el número de horas en que puede operar la flota de pesca artesanal.
- 23 Tabla 4.**
Ficha de cadena de impactos de puertos estatales.
- 24 Tabla 5.**
Ficha de cadena de impactos de playas.
- 26 Tabla 6.**
Listado de playas analizadas en este estudio.
- 27 Tabla 7.**
Categorías que dividen en entidades urbanas y rurales.
- 27 Tabla 8.**
Ficha de cadena de impactos de asentamientos costeros.
- 29 Tabla 9.**
Asentamientos costeros con menor número de personas que viviendas entre las regiones de Atacama y de O'Higgins.
- 36 Tabla 10.**
Amenaza y Sensibilidad en principales puertos expuestos a cierres por marejadas.
- 36 Tabla 11.**
Exposición y Riesgo en principales puertos expuestos a cierres por marejadas.

Pág.

- 38** **Tabla 12.**
Tasas de cambio (m/año), según período considerado, para playas de Chile.
- 44** **Tabla 13.**
Identificación de Brechas asociadas a sistemas naturales.
- 44** **Tabla 14.**
Identificación de brechas asociadas a sistemas humanos.
- 47** **Tabla 15.**
Brechas de impactos asociados a amenazas físico-químicas.
- 52** **Tabla 16.**
Tasa media de erosión (m/año) según período, para playas analizadas.
- 53** **Tabla 17.**
Categorías de erosión/acreción para playas de Chile.





1

RESUMEN EJECUTIVO

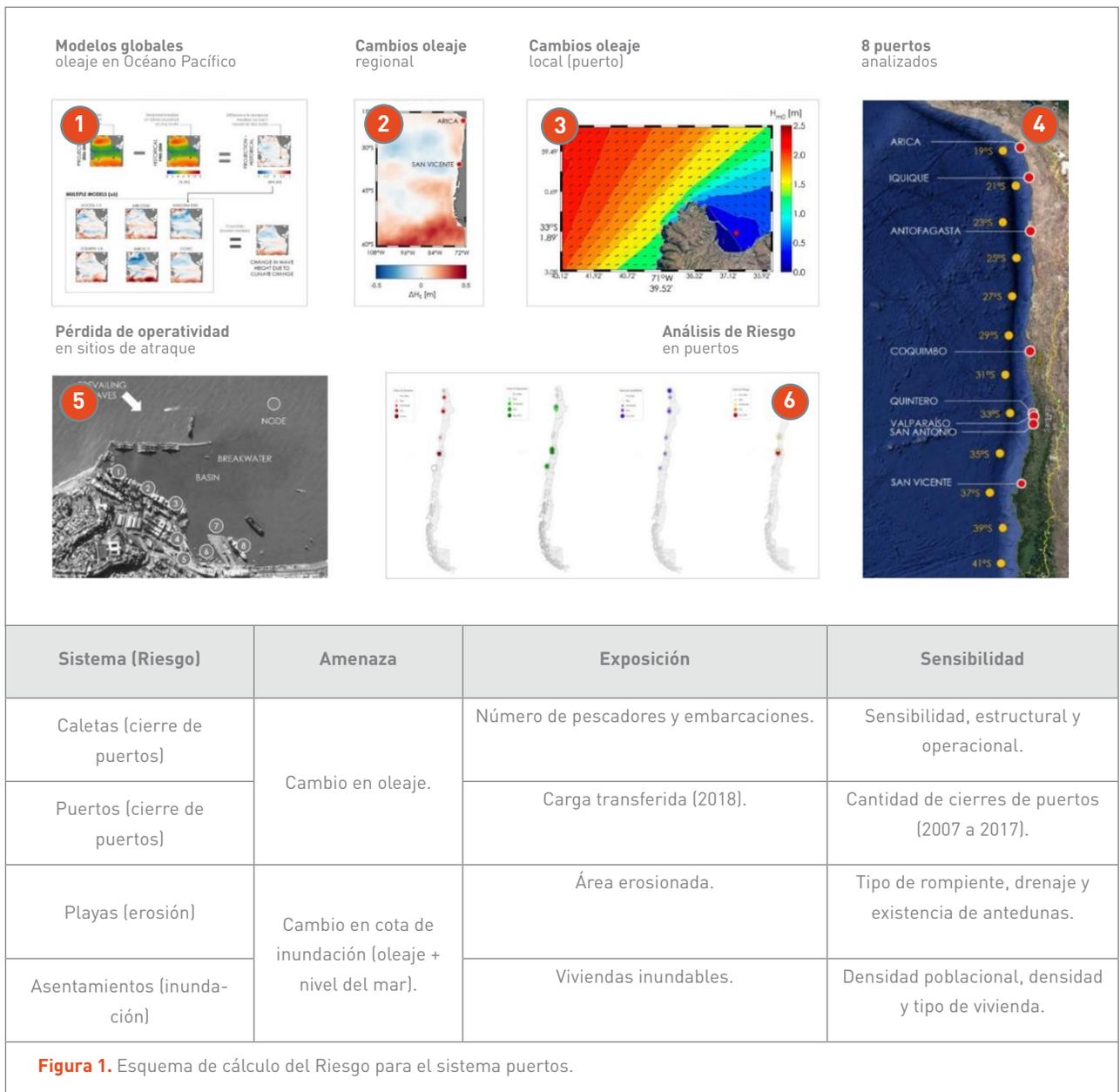
Se reportan los resultados para los siguientes sistemas emplazados en la zona costera: 545 caletas de pesca artesanal, ocho puertos estatales, 45 playas y 433 asentamientos costeros. El cálculo de los impactos se realiza comparando las Amenazas calculadas para un período histórico (1985 - 2004) y una proyección asociada al escenario RCP 8.5 a mediados de siglo (2026 - 2045).

La **Figura 1** sintetiza el procedimiento de cálculo del Riesgo a partir de las estimaciones de Amenaza, Exposición y Sensibilidad, usando como ejemplo el sistema Puertos. Los otros tres sistemas (caletas de pesca artesanal, playas y asentamientos costeros) siguen la misma lógica. Los factores mencionados se presentan mediante escalas normalizadas, cuyo objetivo es detectar el Riesgo relativo entre cada unidad y permitir la comparación con otros sistemas. En la **Figura 1**, la Amenaza se estima a partir de la generación de modelos de oleaje y de nivel del mar para el período histórico y la proyección en el océano Pacífico (1), el análisis de estas variables frente a las costas de Chile (2) y la propagación del oleaje a los sitios de interés (3), a partir del cual se calcula la cota de inundación. La

Exposición y Sensibilidad dependen de cada sistema analizado (4,5) y el Riesgo se construye como el producto de Amenaza, Exposición y Sensibilidad (6). En cada sistema, los resultados se analizan por unidad. El análisis para los cuatro sistemas se incluye a continuación.

Inundación de asentamientos costeros

El cambio climático supone importantes aumentos en el sobrepaso de obras marítimas e inundación de zonas bajas litorales de los asentamientos costeros. El sobrepaso puede significar un Riesgo a la seguridad de las personas y vehículos, como es frecuente observar en las avenidas costeras de grandes ciudades, o asentamientos emergentes o informales, durante los temporales de invierno. Conjuntamente, el cambio climático puede acarrear consecuencias en la estabilidad de los rompeolas y defensas costeras. El Riesgo asociado a la inundación costera se concentra en poblados ubicados en el centro y Norte Chico, siendo algo menor -salvo algunas ciudades grandes- en el Norte Grande y sur del país.



Aumento de *downtime* en puertos

Durante los episodios de mal tiempo, los puertos se cierran para garantizar la seguridad de las naves, carga y operadores, incluyendo la suspensión total o parcial del tránsito o actividades marítimas, de remolcadores y de los botes salvavidas, resultando en pérdidas económicas del orden de millones de dólares a los actores de la cadena logística. En esta cadena se analiza el impacto asociado a la pérdida de disponibilidad de sitios de atraque, debido a oleaje en los puertos chilenos en aguas expuestas, en

el contexto del cambio climático. Se observa que algunos puertos mejorarán sus condiciones operacionales (San Vicente), otros las empeorarán (Arica, Iquique, Antofagasta, Coquimbo y San Antonio) y otros no experimentarán cambios sustantivos (Mejillones, Valparaíso).

Aumento de *downtime* en caletas de pescadores

Durante los episodios de mal tiempo, con fuerte oleaje y marejadas, las actividades de la pesca artesanal se detienen. Las horas o días en que la actividad extractiva no

se desarrolla pueden significar pérdidas importantes en el ingreso de los pescadores. El Riesgo se analiza como el impacto asociado a la pérdida de desembarque de las caletas de pescadores a lo largo de Chile, debido a las marejadas. Se aprecia que la Amenaza se concentra en el centro-norte del país. Las caletas más expuestas se encuentran donde la Amenaza es baja o en el mar interior de Chiloé, que no está expuesto a marejadas. La Vulnerabilidad tiene una distribución geográfica homogénea a lo largo del país y como resultado, el Riesgo más alto se concentra en Chile central.

Erosión de playas

Las playas actúan como un sistema de protección natural, donde la acción conjunta del oleaje, de la marea astronómica y de otros fenómenos climáticos erosiona y/o deposita el sedimento disponible. El potencial erosivo de estos procesos puede causar consecuencias dramáticas,

tanto para playas como para la infraestructura costera, lo cual ha sido evidenciado en los últimos años en el territorio nacional. En esta cadena se cuantifica el aumento del potencial erosivo debido a los cambios de la cota de inundación en el clima del futuro. Los resultados muestran que el 80% de las playas presentaron tasas de erosión y erosión alta en el período histórico, y que a futuro el proceso erosivo continuará por el efecto conjunto del aumento del nivel medio del mar y de la frecuencia e intensidad de las marejadas.

Esos cuatro sistemas son una muestra de diversos impactos en sistemas naturales y humanos en la costa, que debieran estudiarse en lo sucesivo. Entre los primeros, aparecen los cambios en la dinámica de humedales, estuarios, deltas, dunas, acantilados, acuíferos y zonas con patrimonio natural. En los segundos, destacan los futuros daños más frecuentes sobre obras portuarias, costeras e industriales y zonas con patrimonio cultural.





2

INTRO- DUCCIÓN

En este capítulo se reportan los resultados del estudio “Climate Change Risk Maps for Chile” (en adelante ARCLim) para los siguientes sistemas emplazados en la zona costera:

- **Caletas de pesca artesanal.**
- **Puertos estatales.**
- **Playas.**
- **Asentamientos costeros.**

El cálculo de los impactos se realiza comparando las Amenazas calculadas para un período histórico (1985 - 2004) y una proyección asociada al escenario RCP 8.5 para

mediados de siglo (2026 - 2045), que fueron calculadas en el estudio “Determinación del Riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile” (MMA, 2019a). La ubicación de los mapas de estos sistemas se presenta en la **Tabla 1**.

Cabe mencionar que, a diferencia de gran parte de los mapas de Riesgo de ARCLim, que se presentan a escala comunal, los cuatro correspondientes a costas son analizados por unidad. A continuación, se justifica la selección de estos sistemas entre muchos expuestos y que se caracterizan detalladamente en MMA (2019b).

CDI	Ruta
Caletas de pesca artesanal	http://arclim.meteodata.cl/atlas/view/caletas_pescadores/
Puertos estatales	http://arclim.meteodata.cl/atlas/view/puertos/
Playas	http://arclim.meteodata.cl/atlas/view/playas/
Asentamientos costeros	http://arclim.meteodata.cl/atlas/view/asentamientos_costeros/

Tabla 1. Ubicación de los mapas de cadenas de impacto en la costa.



2.1 IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA

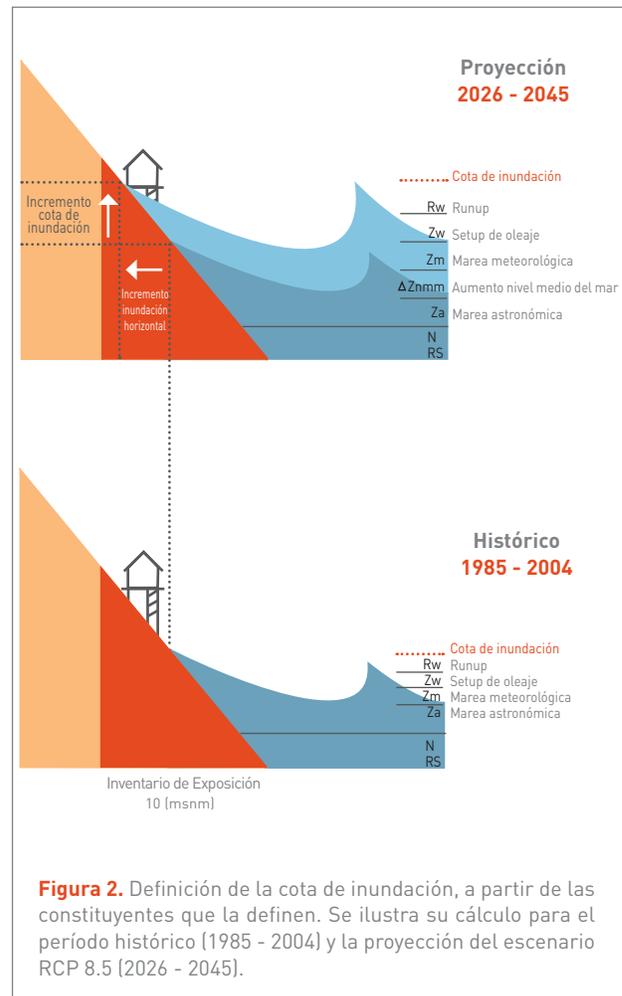
Como consecuencia del cambio climático antropogénico, el aumento de la temperatura del planeta está impactando en los océanos y costas, generando alza del nivel del mar, cambios en los patrones de oleaje, en el potencial de hidrógeno (pH), en la temperatura de la columna de agua, entre otros efectos (Winckler *et al.* 2019). En este capítulo se abordan algunos de los potenciales efectos asociados a cambios en las siguientes variables físicas del océano costero: nivel medio del mar, marejadas y cota de inundación (Figura 2). Los posibles impactos del cambio climático en los sistemas físicos naturales ubicados en la costa, como consecuencia de los cambios en estas variables, son:

- Cambios en la dinámica de humedales.
- Cambios en la dinámica de estuarios.
- Cambios en la dinámica de deltas.
- Cambios en la dinámica de dunas.
- Erosión de playas.
- Erosión de acantilados.
- Afectaciones de zonas con patrimonio natural.

Por otra parte, los impactos sobre los sistemas humanos abarcan:

- Inundación de asentamientos humanos.
- Efectos sobre la operación de puertos.
- Efectos sobre la operación de caletas.
- Daños más frecuentes sobre obras portuarias (obras de abrigo, muelles, otros).
- Daños más frecuentes sobre obras costeras (protección).
- Daños más frecuentes sobre obras industriales (energía, minería, otros).
- Intrusión salina en acuíferos.
- Afectaciones de zonas con patrimonio cultural (e.g. ahus, en Rapa Nui).

Debido a restricciones de tiempo, recursos y registros instrumentales disponibles, en este capítulo se reportan los resultados para los siguientes sistemas:



- Caletas artesanales.
- Puertos estatales.
- Playas.
- Asentamientos costeros.

Estos resultados deben considerarse *proxys*, derivados de la mejor información disponible, pero de ninguna manera reproducciones fieles de las condiciones de Vulnerabilidad y Riesgo climático de las costas de Chile. Por ejemplo, en los casos de puertos y caletas, se utilizan los cierres por marejadas como una medida de la vulnerabilidad operacional.

Cabe mencionar que los resultados presentados en este estudio constituyen una síntesis y adaptación de los resultados del estudio “Determinación del Riesgo de los impactos del cambio climático en las costas de Chile” (MMA, 2019), que se presenta mediante nueve volúmenes

disponibles en el sitio de cambio climático del MMA¹ y una base de datos disponible en el portal del SINIA².

2.2 CARACTERIZACIÓN DE LA AMENAZA

El cálculo de la Amenaza se efectúa modelando las variables de interés (nivel del mar, oleaje y cota de inundación)

para el período histórico (1985 - 2004) y la proyección del escenario RCP 8.5 (2026 - 2045). Los detalles se presentan en MMA (2019a) y el esquema de cálculo se ilustra en la **Figura 3**. Arriba se muestra el cálculo de la mediana temporal de un modelo para ambos períodos y la diferencia atribuida al cambio climático. Abajo se muestra la diferencia entre medianas para los seis modelos utilizados en oleaje (21 modelos para nivel del mar), a partir de la cual se calcula la mediana entre modelos.

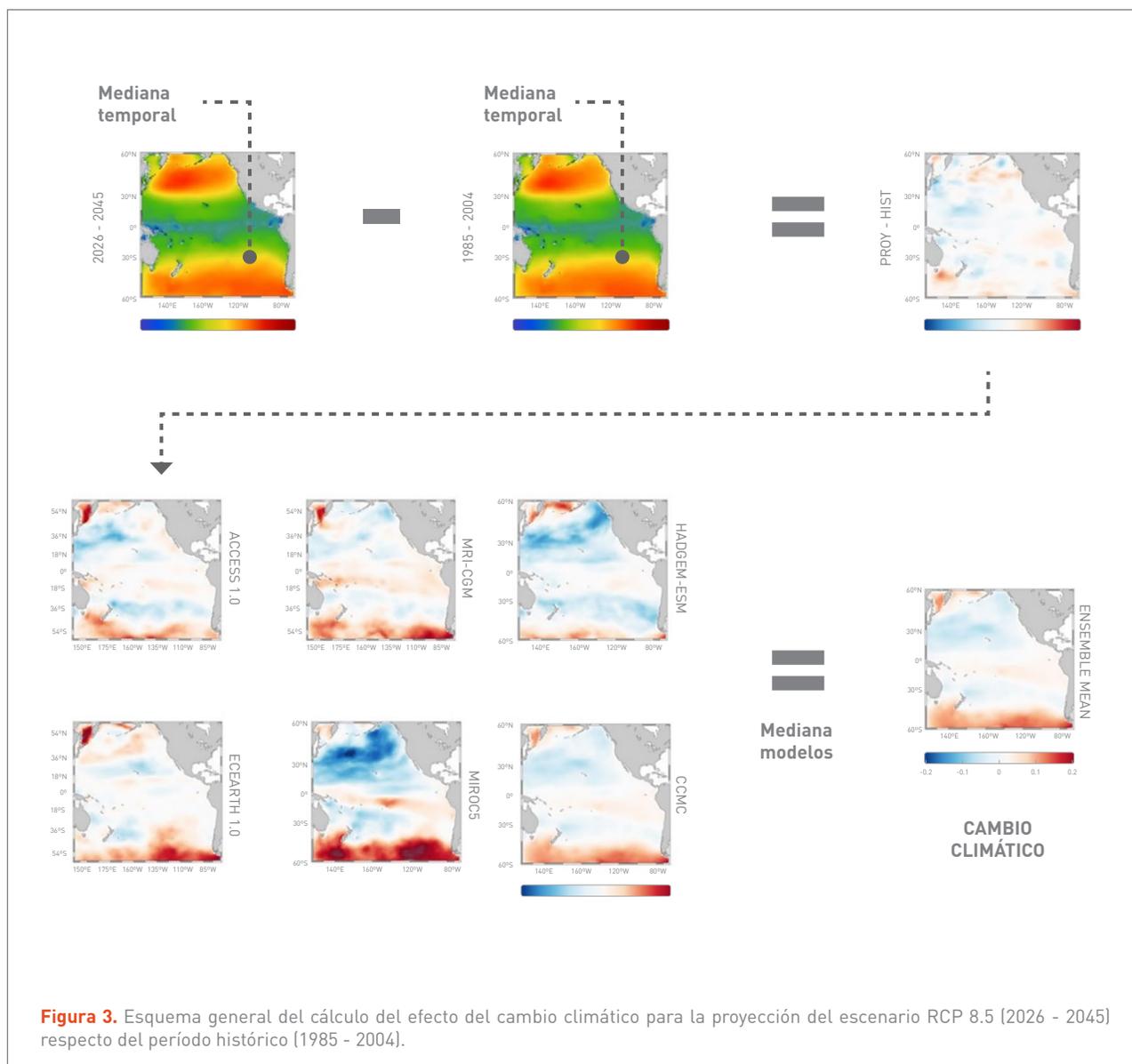


Figura 3. Esquema general del cálculo del efecto del cambio climático para la proyección del escenario RCP 8.5 (2026 - 2045) respecto del período histórico (1985 - 2004).

1 <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/publicaciones-destacadas/>

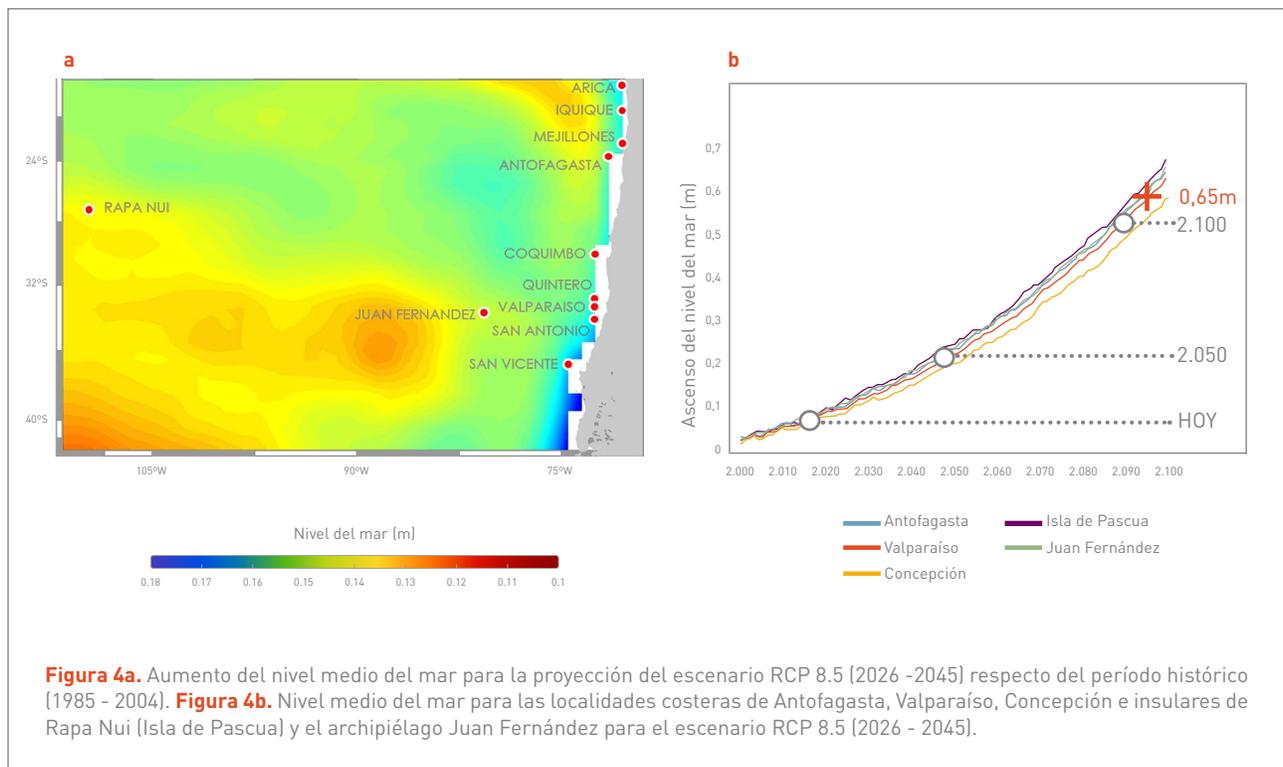
2 <http://ide.mma.gob.cl/>



2.2.1 NIVEL MEDIO DEL MAR

Existen dos estudios que realizan proyecciones para mediados de siglo (MMA 2019a) y para fines de siglo (Albrecht & Shaffer, 2016). Aunque ambos no son metodológicamente comparables, sus resultados son coherentes entre sí. Según MMA (2019a), para mediados de siglo se proyecta un ascenso de entre 0.18 y 0.2 m (**Figura 4a**); aumento que crecerá exponencialmente a medida que avance el siglo (**Figura 4b**). Sin embargo, a nivel local las tasas de

cambio del nivel relativo del mar, estimadas a partir de los registros instrumentales extensos existentes, muestran descensos en algunos sitios litorales del país, producto de deformaciones corticales del terreno, que pudieren manifestarse en el futuro. Estos descensos serían una expresión del ciclo sísmico que produce una deformación de la corteza terrestre (Contreras *et al.* 2017; Albrecht & Shaffer, 2016; Montecino *et al.*, 2017). En estos lugares, el litoral se encuentra ascendiendo a tasas más altas que el nivel del mar, dando como resultado un aparente descenso del mar con respecto a la tierra.



2.2.2 MAREJADAS

Se ha demostrado que el cambio climático ha alterado la frecuencia e intensidad de las marejadas en las costas del país (Martínez *et al.* 2018; MMA 2019a), reportándose daños en el litoral durante eventos especialmente extremos (Winckler *et al.*, 2017; Iguait *et al.*, 2019). Con respecto a la altura significativa asociada al clima medio y aquella que caracteriza eventos intensos, pero no extremos, se proyecta que tiende a experimentar cambios menores en todo el

territorio, salvo por el extremo austral (MMA 2019a). El período medio aumenta en todas las costas y la dirección del oleaje presenta un giro moderado al sur, atribuible a la migración al sur del Anticiclón Permanente del Pacífico Sur (Schneider *et al.* 2017) que se asocia a un desplazamiento también al sur de la zona de generación del oleaje. En lo relativo a eventos extremos, o marejadas, MMA (2019a) demuestra que estas han aumentado en frecuencia e intensidad en toda la costa continental de Chile (**Figura 5**) y que lo seguirán haciendo a mediados de siglo.

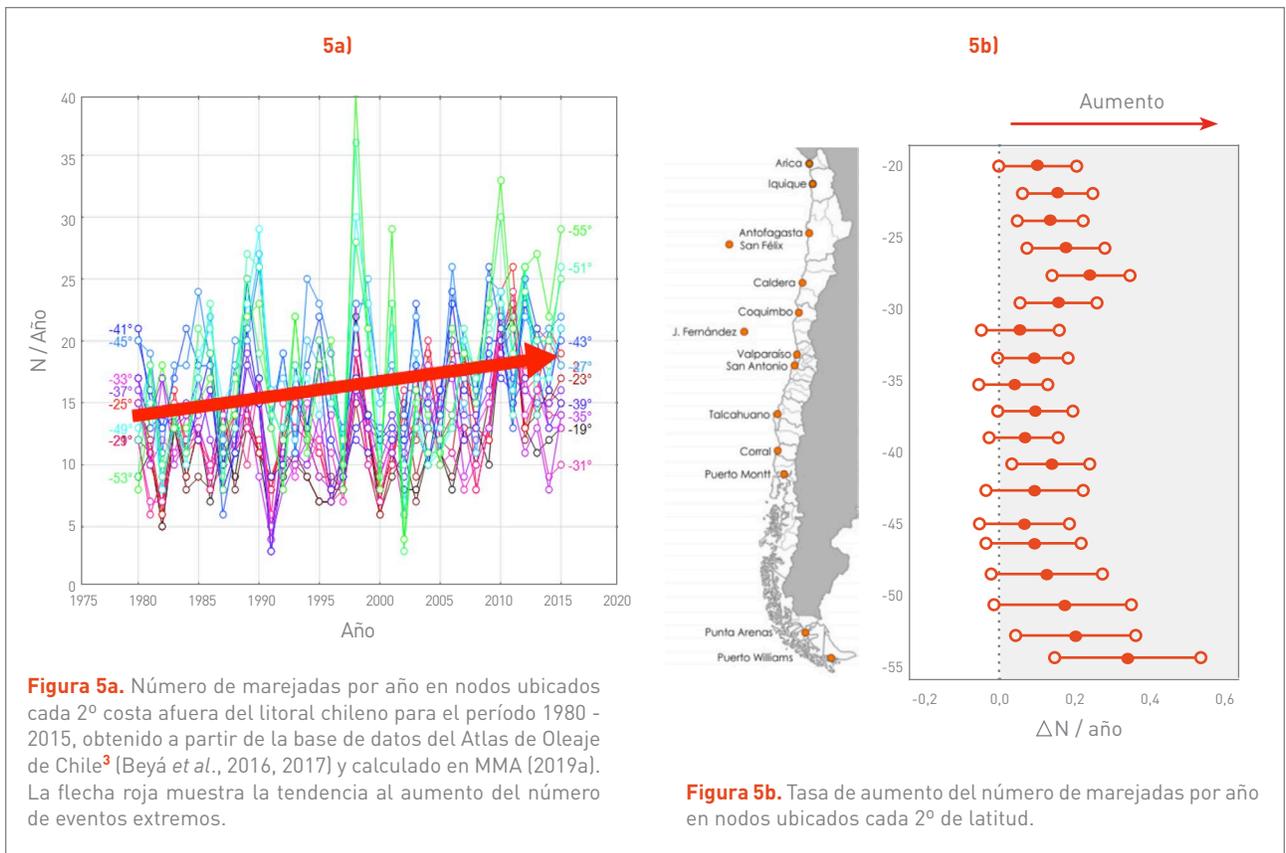


Figura 5a. Número de marejadas por año en nodos ubicados cada 2° costa afuera del litoral chileno para el período 1980 - 2015, obtenido a partir de la base de datos del Atlas de Oleaje de Chile³ [Beyá *et al.*, 2016, 2017] y calculado en MMA (2019a). La flecha roja muestra la tendencia al aumento del número de eventos extremos.

Figura 5b. Tasa de aumento del número de marejadas por año en nodos ubicados cada 2° de latitud.

³ <https://oleaje.uv.cl/>



2.2.3 COTA DE INUNDACIÓN

El estudio de MMA (2019a) indica que el nivel medio del mar aumentará de 0.23 m a 0.29 m entre Arica y el canal Chacao, respectivamente, para la proyección del escenario RCP 8.5 (2026 - 2045) respecto del período histórico (1985 - 2004). Este incremento se debe principalmente al alza en el nivel del mar y, en menor medida, a cambios en la marea meteorológica y el oleaje. La **Figura 6** ilustra la cota de inundación entre Arica y el canal Chacao para ambos períodos.

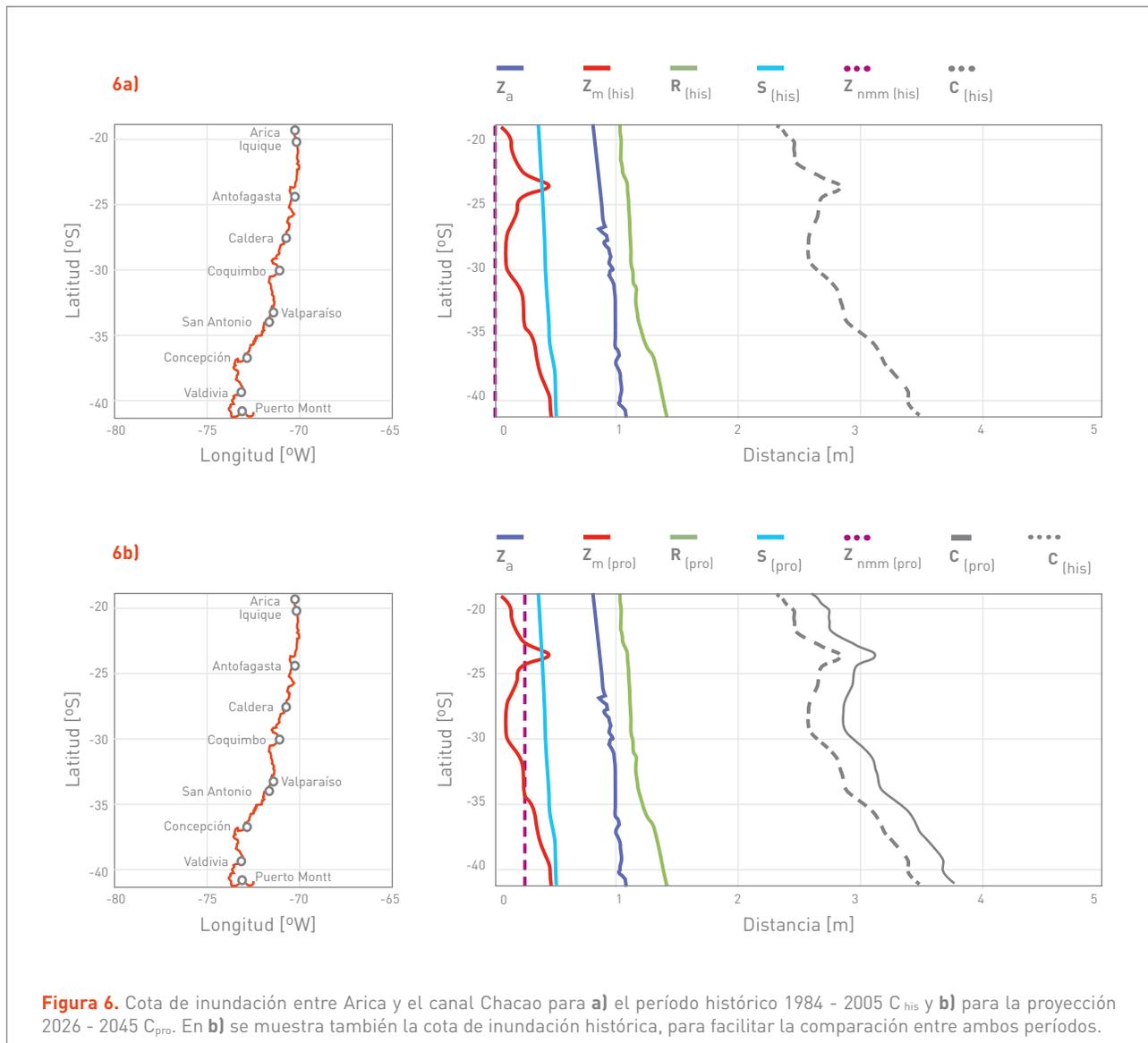


Figura 6. Cota de inundación entre Arica y el canal Chacao para **a)** el período histórico 1984 - 2005 C_{his} y **b)** para la proyección 2026 - 2045 C_{pro} . En **b)** se muestra también la cota de inundación histórica, para facilitar la comparación entre ambos períodos.



1029





3

METODOLOGÍA

En esta sección se presenta la metodología en forma separada para los siguientes sistemas emplazados en la zona costera:

- **Caletas de pesca artesanal.**
- **Puertos estatales.**
- **Playas.**
- **Asentamientos costeros.**

3.1 CALETAS DE PESCA ARTESANAL

3.1.1 CONTEXTO

En Chile, de acuerdo con el registro de pescadores artesanales, existe un total inscrito de 24.806 mujeres y 114.764

hombres en la pesca artesanal⁴, con un desembarque de alrededor de 1,5 millones de toneladas en 546 caletas de pescadores (MMA, 2019b, 2019d)⁵. La pesca artesanal contempla una variedad de actividades extractivas que incluyen el buceo, la recolección y la pesca. Además, la actividad extractiva se puede desarrollar desde la orilla, embarcado en botes de hasta 12 m de eslora o en embarcaciones entre los 12 y 18 m. Debido a su geomorfología costera, gran parte de las caletas de Chile están expuestas a los agentes oceánicos, pues, salvo aquellas ubicadas en las zonas de fiordos y canales, se encuentran abiertas al océano Pacífico.

Durante los episodios de mal tiempo, se detienen las actividades de la pesca artesanal que permiten el desarrollo de faenas pesqueras. Estas horas o días en que la actividad extractiva no se desarrolla pueden significar pérdidas importantes en toneladas capturadas y en el ingreso de los pescadores. El Riesgo se analiza como el impacto

⁴ Debido a que, en el registro, un pescador puede inscribirse en más de una actividad, el número de pescadores artesanales puede ser ligeramente menor.

⁵ SERNAPESCA contabiliza 468 caletas de pescadores artesanales, incluyendo lagos y ríos. En este estudio, además del registro de SERNAPESCA, se revisó el Derrotero de la Costa de Chile (SHOA, 2014), encontrándose caletas adicionales que son usadas por los pescadores artesanales, pero que no se encuentran en el registro de SERNAPESCA.



asociado a la pérdida de desembarque de las caletas de pescadores debido a las marejadas.

3.1.2 CADENA DE IMPACTO

La cadena de impactos se presenta en la **Tabla 2**. A continuación, se detalla la metodología para estimar cada uno de los índices de Amenaza (*A*), Exposición (*E*) y Sensibilidad (*S*), utilizados para estimar el Riesgo (*R*). El Riesgo es estimado como el producto entre estos tres indicadores.

3.1.3 EXPOSICIÓN

La Exposición (*E*) se basa en el inventario de exposición desarrollado en MMA (2019a, 2019d). *E* se define como el

número de pescadores (recolectores, buzos, armadores y pescadores) y de embarcaciones (inferiores a 18 metros de eslora). Para construir el índice de Exposición, se escalan los parámetros del número de pescadores y de embarcaciones por el mayor valor y estos fueron multiplicados⁷, siguiendo la siguiente ecuación:

$$E = N_{pe} \times N_{ee}$$

Donde *N_{pe}* es el número de pescadores por caleta escalados por el mayor valor entre 0 y 1 y *N_{ee}* es el número de embarcaciones escalados por el mayor valor. Sólo se consideran las caletas expuestas al océano Pacífico (en costas abiertas, bahías, desembocaduras e islas). Se descartan las caletas ubicadas en aguas interiores de las regiones de Los Lagos, de Aysén y de Magallanes, y Antártica Chilena.

Subsistema: Caletas (de pesca artesanal)		Referencias
Amenaza	Cambio en el régimen del oleaje (marejadas), expresado en términos de probabilidad.	MMA (2019c)
Impacto/Riesgo	Aumento del <i>downtime</i> por condiciones que no permiten la realización de actividades pesqueras en embarcaciones menores. Los cierres de puertos generan impacto económico por merma en desembarques.	MMA (2019d)
Unidad territorial	545 caletas analizadas en forma individual.	
Exposición	Todos los pescadores (recolectores, buzos, armadores y pescadores) y embarcaciones (inferiores a 18 metros de eslora), escalado por el mayor valor de las 545 caletas analizadas.	
Sensibilidad	Sensibilidad estructural (fracción de navegantes, fracción de embarcaciones mayores y capacidad organizativa, relacionada con existencia de AMERB ⁶). Sensibilidad operacional (ruralidad de la caleta, existencia de obras de abrigo, muelle o rampa, abrigo natural).	MMA (2019d)
Otros aspectos	Se excluyen caletas en lagos y ríos.	No aplica
Tabla 2. Ficha de cadena de impactos de caletas de pesca artesanal..		

⁶ Áreas de Manejo y Explotación de Recursos Bentónicos. Es un régimen de acceso, que asigna derechos de explotación exclusiva a organizaciones de pescadores artesanales, mediante un plan de manejo y explotación basado en la conservación de los recursos bentónicos presentes en sectores geográficos previamente delimitados.

⁷ Se multiplican en vez de promediarse, pues se estima que existe una dependencia entre el número de pescadores y el número de embarcaciones (son variables dependientes). Si se pudiera argumentar la independencia entre ambas variables, un modelo estocástico aditivo sería más apropiado.



La ficha de Exposición incluida en el portal web contiene las siguientes variables (se da como ejemplo a Arica):

- ID : ID001
- Nombre : Arica
- Latitud : -18.47402
- Longitud : -70.321417
- Comuna : Arica
- Región : Arica y Parinacota
- Tipo : Urbana / Rural.
- Abrigo artificial : Si / No.
- Abrigo natural : Si / No.
- Obra de atraque: Si / No (muelle o rampla).
- Np : Número total de pescadores.
- Nr : Número de recolectores.
- Nn : Número de pescadores navegantes.
- Ne : Número total de embarcaciones.
- NeM : Número embarcaciones mayores a 12 metros.
- Nem : Número embarcaciones menores o iguales a 12 metros.
- AMERB : Si / No.

De las 546 caletas de pescadores artesanales consideradas en este estudio, se destaca que:

- 51 caletas no tienen pescadores inscritos.
- 150 no tienen embarcaciones inscritas.
- 46 no tienen embarcaciones ni pescadores incluidos en las categorías anteriores.
- 5 no tienen pescadores, pero si embarcaciones inscritas.

Las regiones del Biobío y de Los Lagos destacan por la concentración de pescadores artesanales (**Figura 7**).

3.1.4 AMENAZA

La Amenaza se evalúa como el período de tiempo durante el cual las condiciones del mar no permiten la realización de actividades pesqueras. El análisis se realiza interpolando estadística de oleaje en aguas profundas, disponible cada 2° de latitud entre Arica y el canal Chacao, y propagando con una metodología simplificada a cada caleta (MMA, 2019a)⁸. Específicamente, se calcula el tiempo anual en que no se pueden realizar actividades pesqueras (*downtime* de pes-

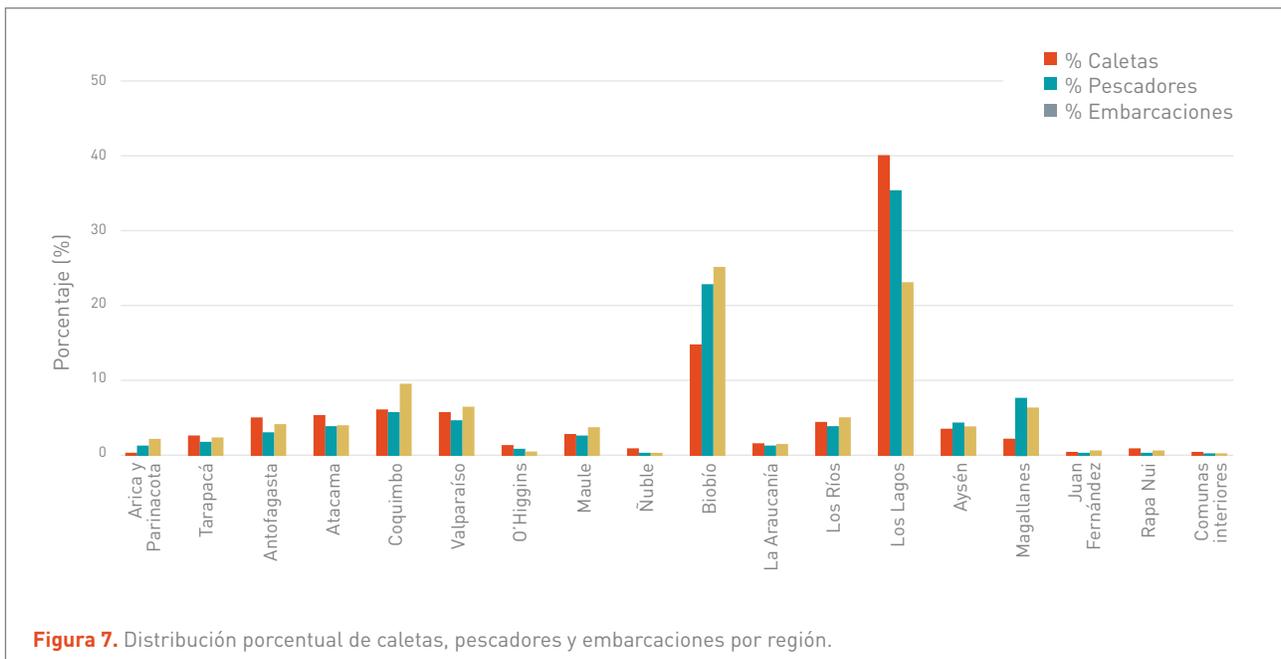


Figura 7. Distribución porcentual de caletas, pescadores y embarcaciones por región.

Fuente: MMA (2019d).

⁸ Cabe mencionar que este cálculo considera estadística de oleaje en aguas profundas, excluyendo las condiciones de abrigo locales que cada caleta pudiera tener.



ca), cruzando la estadística de altura significativa del oleaje para un período histórico (1985 - 2004) y para la proyección (2026 - 2045) con los límites operacionales definidos en base a focus groups efectuados a los pescadores⁹. Para efectos del cálculo, se considera una altura umbral de operación de 2 m y se interpola el *downtime* de pesca obtenido cada 2° de latitud a la latitud correspondiente de cada caleta¹⁰.

El *downtime* de pesca *D* se expresa como la probabilidad de excedencia del límite operacional y su valor va entre 0 (100% de operación) y 1 (0% de operación). La Amenaza (*A*) se calcula como la diferencia entre la probabilidad de *downtime* de la proyección *Pp* y del período histórico *Ph*.

$$A = Pp - Ph, \quad 0 \leq A \leq 1$$

Así, para construir el índice de Amenaza se utilizaron las proyecciones del incremento a mediados de siglo del número de horas en que las embarcaciones menores de los pescadores artesanales no pueden operar cada 2° de latitud (MMA 2019c, 2019d) y que en este estudio fueron interpoladas linealmente de acuerdo con la localización de cada una de las 302 caletas presentes entre Arica y Purranque (en la Región de Los Lagos).

Para las caletas más australes no fue estimada la Amenaza, debido a que las proyecciones de cambio del tiempo operacional se encuentran disponibles sólo para aguas expuestas en el océano Pacífico y no para el mar interior de Chiloé y la zona de fiordos de las regiones de Los Lagos, de Aysén y de Magallanes (Tabla 3).

Latitud	Probabilidad (de <i>downtime</i>)			Horas al año (de <i>downtime</i>)		
	1985 - 2004 <i>Ph</i>	2026 - 2045 <i>Pp</i>	Diferencia <i>A</i> ⁽¹⁾	1985 - 2004	2026 - 2045	Diferencia
17	2,16	1,76	-0,40 ≈ 0	189	154	-35
19	3,49	3,42	-0,07 ≈ 0	306	300	-6
21	4,82	5,08	0,26	422	445	23
23	8,99	9,82	0,83	788	860	73
25	11,46	12,19	0,73	1004	1068	64
27	22,15	22,70	0,55	1940	1989	48
29	21,26	22,28	1,02	1862	1952	89
31	28,65	29,43	0,78	2510	2578	68
33	37,91	39,05	1,14	3321	3421	100
35	43,77	44,40	0,63	3834	3889	55
37	55,50	55,19	-0,31 ≈ 0	4862	4835	-27
39	59,11	58,61	-0,50 ≈ 0	5178	5134	-44
41	71,33	70,89	-0,44 ≈ 0	6249	6210	-39

Tabla 3. Proyecciones a mediados de siglo del cambio en el número de horas en que puede operar la flota de pesca artesanal.

⁽¹⁾ En el caso de que la Amenaza sea negativa (mejora en las condiciones operacionales), se considera que *A*=0, lo que presupone que los pescadores no saldrán a pescar más de lo que lo hacen que actualmente si las condiciones operacionales mejoran.

Fuente: MMA (2019c).

⁹ El análisis de los focus group y encuestas establece que operaciones para embarcaciones de menos de 12 m sin puertos de embarque y para el buceo se ven limitadas con oleaje cuya altura significativa excede los 2 m. En operaciones de pesca con muelle y con embarcaciones mayores, este límite puede llegar a los 2,5 m. Para efectos del informe, sólo se utiliza el primer umbral como *proxy* al fenómeno.

¹⁰ En caso de que el *downtime* de pesca se reduzca en la proyección (respecto del período histórico), no se considera una "ganancia" por mejores condiciones que permitirían más salidas. Ello, porque, en un contexto de escasez en las pesquerías, el tiempo del cual disponen los pescadores para salir es mucho mayor que el necesario para cumplir con las cuotas de extracción. En otras palabras, ante un aviso de marejadas, los pescadores pueden acomodar las salidas a otros días sin el riesgo de no cumplir con la cuota.



3.1.5 SENSIBILIDAD

Para el análisis de caletas pesqueras artesanales se utilizó el catastro proveniente del estudio “Efectos del cambio climático en las costas de Chile” (MMA 2019b), junto con la base de datos de las AMERB’s actualizada a octubre de 2019. Para determinar la capacidad adaptativa de las caletas, se identificaron y asociaron aquellas caletas relacionadas a alguna AMERB (cercana o no), con el objetivo de determinar la capacidad organizativa de estas e incorporarla en el índice de Sensibilidad.

En el litoral chileno existen 546 caletas de pescadores¹¹, que presentan entre sí grandes diferencias operacionales y estructurales frente a la Amenaza considerada (incremento de las marejadas debido al cambio climático). Las caletas más importantes se encuentran en bahías abrigadas, en general, al SW, al igual que las instalaciones portuarias. Es así como las principales ciudades-puerto

del país cuentan con una o varias caletas con un gran número de pescadores y embarcaciones inscritas¹². Sin embargo, en la costa expuesta del país, se encuentra un número importante de caletas rurales, asociadas a pequeños asentamientos costeros (aldeas, caseríos). Por último, en las regiones australes (Los Lagos, Aysén, Magallanes), todas las localidades tienen pescadores y embarcaciones inscritas, aprovechando el abrigo del mar interior de Chiloé y de la extensa zona de fiordos australes (**Figura 8**).

En las **Figuras 9, 10 y 11** se muestran la distribución de las caletas de pescadores artesanales entre las regiones de Arica y Parinacota y de Los Lagos. En las regiones de Arica y Parinacota, de Tarapacá, de Valparaíso, del Biobío y de La Araucanía, la mayoría de las caletas se encuentra asociada a asentamientos costeros urbanos. Se considera que una caleta urbana tiene más herramientas/opciones que una caleta rural para enfrentar la Amenaza del incremento de las marejadas.



Figura 8. Ejemplos de caletas de pescadores artesanales a lo largo de la costa de Chile.

11 Este número excluye las caletas que se encuentran en lagos o en ríos muy alejadas de la desembocadura. Se incluyen caletas que no necesariamente son incluidas en el listado de SERNAPESCA, pero que si aparecen descritas en el “Derrotero de la Costa de Chile” (SHOA 2014) y son utilizadas efectivamente por los pescados. Mayores detalles en MMA (2019b).

12 Por ejemplo, Arica, Iquique, Antofagasta, Coquimbo, Valparaíso, San Antonio, Talcahuano, Coronel, Puerto Montt y Punta Arenas.

Caletas Artesanales

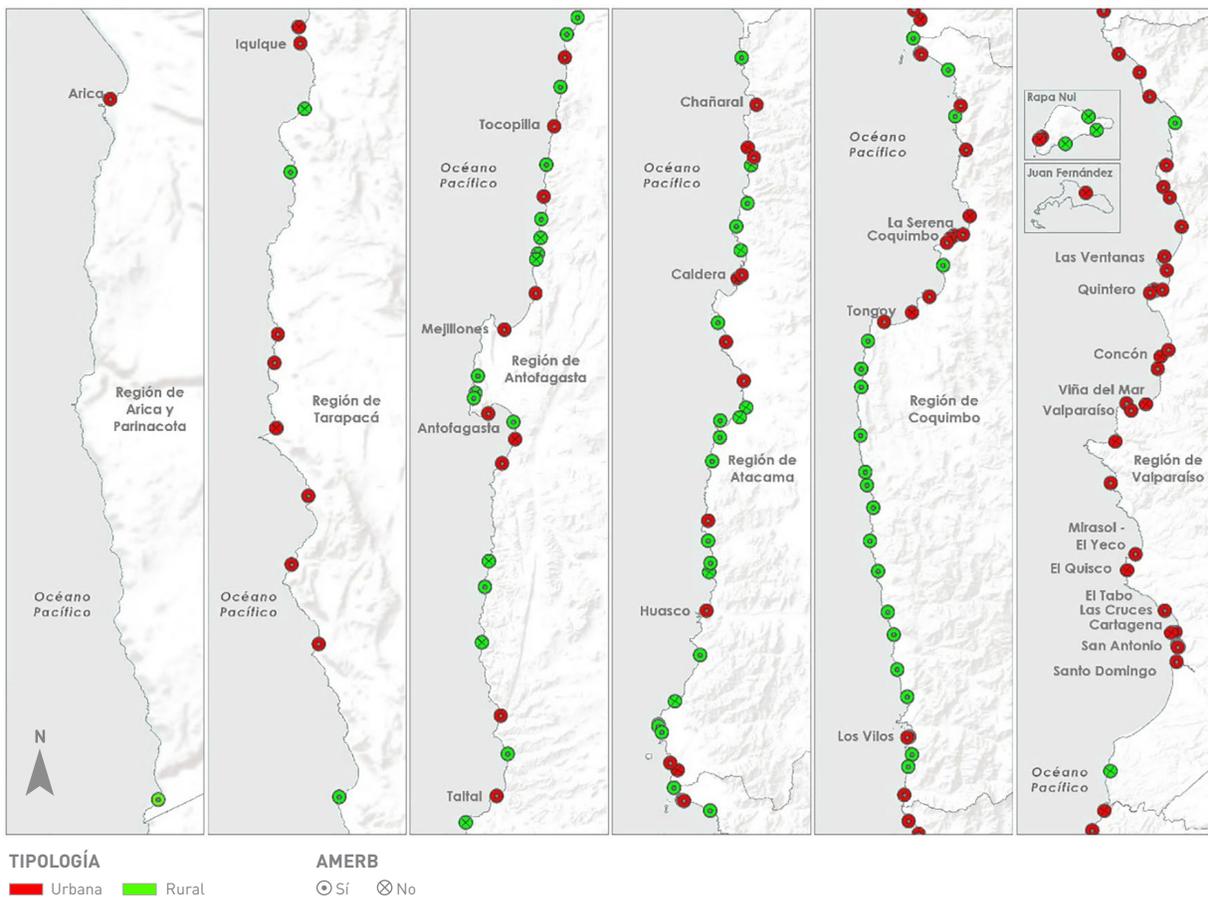


Figura 9. Caletas artesanales urbanas/rurales, con/sin AMERB, entre las regiones de Arica y Parinacota y de Valparaíso.

También, en las caletas urbanas predomina la cantidad de caletas que tienen un AMERB (Área de Manejo de Recursos Bentónicos). Las caletas que poseen un AMERB han mostrado la capacidad de organización suficiente para cumplir con los requisitos que se necesitan para ello. Aun cuando, en estricto rigor, esta capacidad organizativa es un indicador de la capacidad de adaptación de la caleta, en este estudio se consideró como un indicador de la Sensibilidad, asumiendo que una caleta con capacidad de organizarse puede afrontar mejor los efectos del incremento de las marejadas. Las regiones de Atacama, de Coquimbo, de Valparaíso, del Biobío y de Los Lagos concentran la mayor cantidad de caletas de pescadores con AMERB asociadas, independientemente de su condición urbano/rural.

Otro factor relevante a tener en cuenta para medir la Sensibilidad de una caleta es la existencia de obras de abrigo artificial ante la acción del oleaje y las facilidades para acceder a las embarcaciones (muelles o ramblas). En las **Figuras 12, 13 y 14** se muestran la distribución de estos factores.

Por último, también se consideró la existencia de abrigo natural (ubicada en una bahía, en aguas interiores o protegida por una península, roqueríos o islotes), ya que una caleta con abrigo natural es menos sensible que una que no lo posee.



Caletas Artesanales

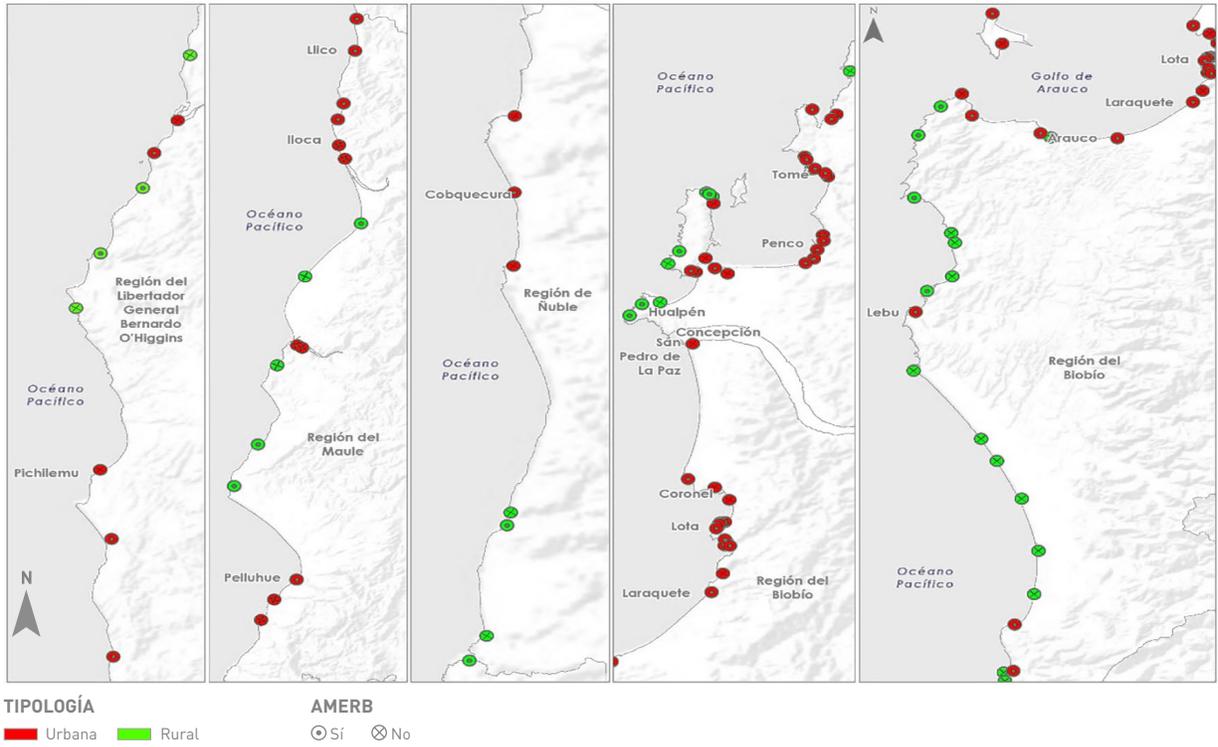


Figura 10. Caletas artesanales urbanas/rurales, con/sin AMERB, entre las regiones de O'Higgins y del Biobío.

Caletas Artesanales

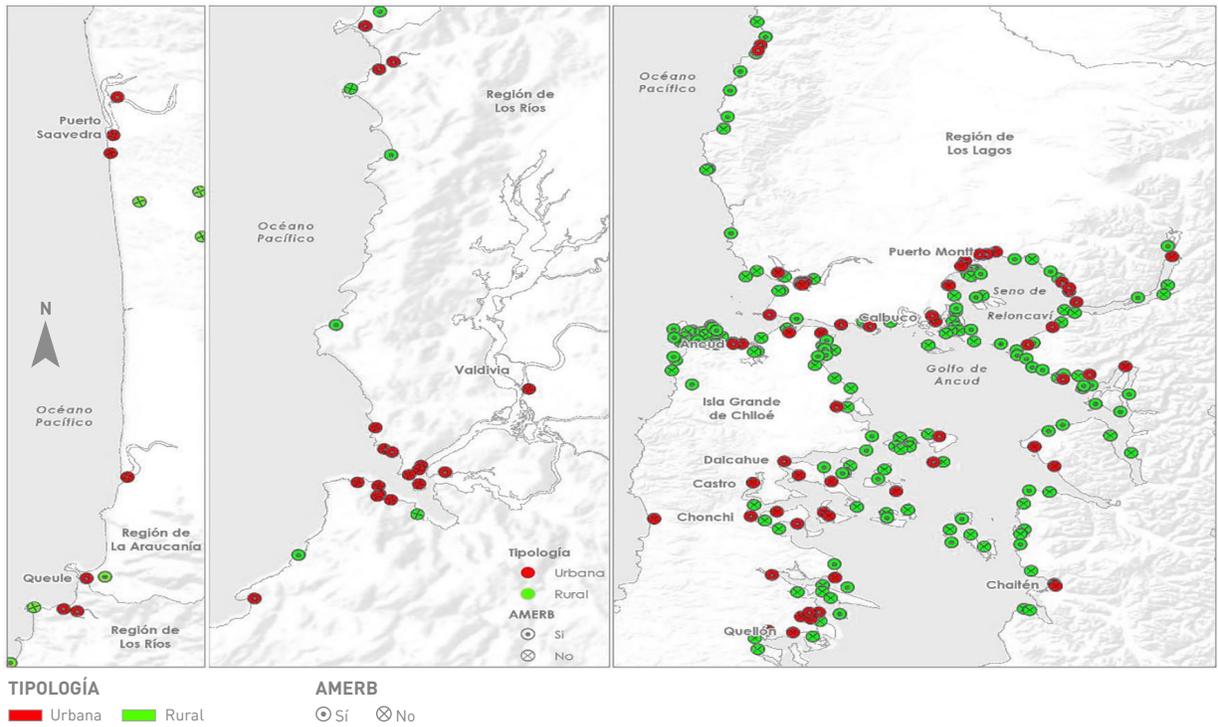


Figura 11. Caletas artesanales urbanas/rurales, con/sin AMERB, entre las regiones de La Araucanía y de Los Lagos.

Caletas Artesanales

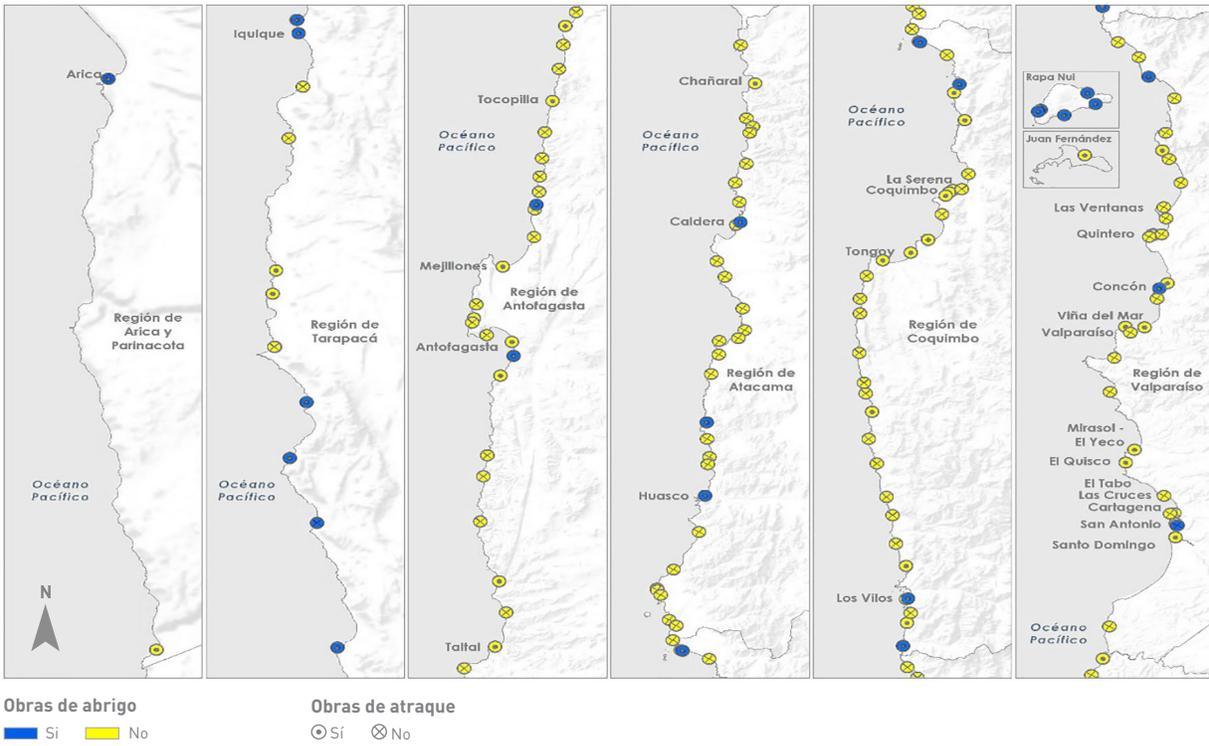


Figura 12. Caletas artesanales, con/sin obras de abrigo y con/sin obras de atraque, entre las regiones de Arica y Parinacota y de Valparaíso.

Caletas Artesanales

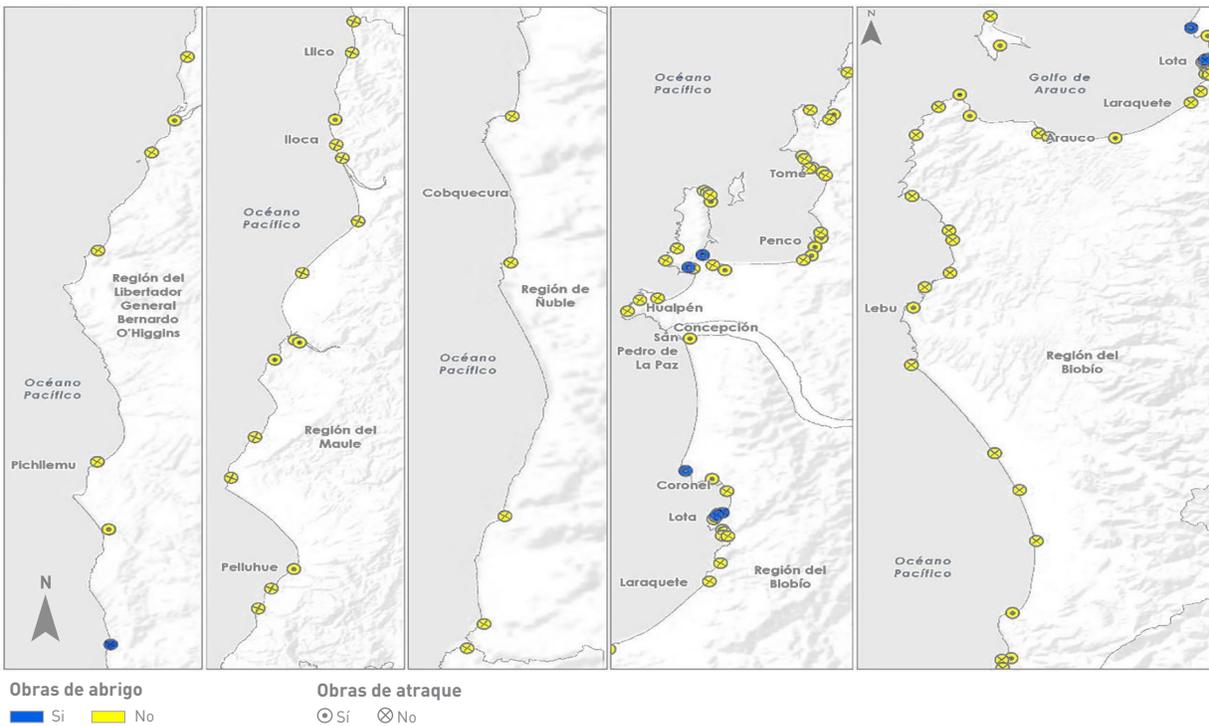


Figura 13. Caletas artesanales, con/sin obras de abrigo y con/sin obras de atraque, entre las regiones de O'Higgins y del Biobío.



Caletas Artesanales

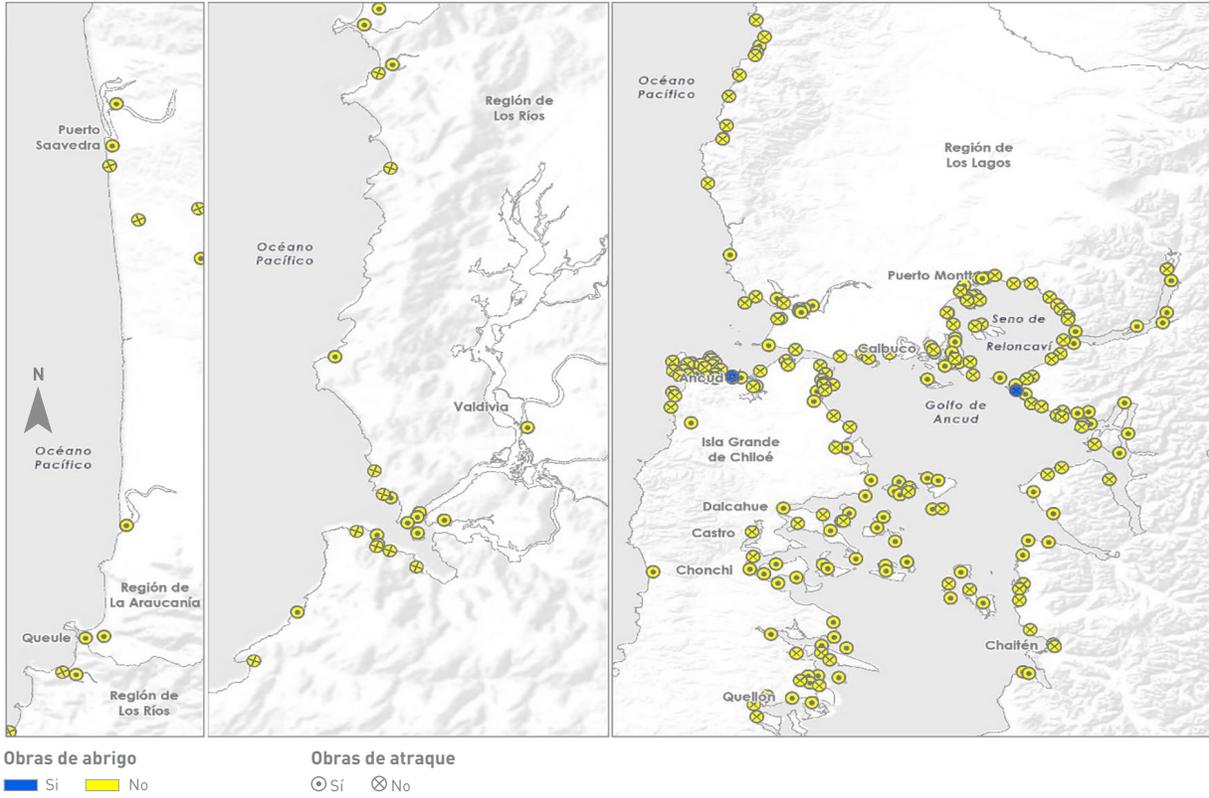


Figura 14. Caletas artesanales, con/sin obras de abrigo y con/sin obras de atraque, entre las regiones de La Araucanía y de Los Lagos.

De esta forma, la Sensibilidad (S) se cuantifica como una combinación entre la Sensibilidad operacional (So) y la Sensibilidad estructural (Se) de cada caleta.

$$S = (So + Se)/2, \quad 0 \leq S \leq 1$$

En este caso, se asume modelo aditivo, calculando la media aritmética entre cada factor. Ambas sensibilidades se cuantifican mediante índices, cuyo valor va entre 0 (muy sensible) y 1 (poco sensible).

La Sensibilidad operacional (So) se define a través de un índice que pondera variables de Exposición relativas al tipo de pescador artesanal presente en la caleta y a sus embarcaciones. Esta se calcula a partir de los siguientes indicadores:

F_n : Fracción de navegantes. Se calcula como la fracción de pescadores que realizan su actividad productiva nave-

gando (se descuentan recolectores del total de pescadores).

$$F_n = \frac{Nn}{Np} = \frac{Np - Nr}{Np}$$

Donde Np es el número de pescadores que trabajan en una caleta, Nr el número de recolectores y Nn el número de pescadores que navegan. Así, mientras mayor es el porcentaje de pescadores que navegan ($F_n \rightarrow 1$), mayor es su Sensibilidad.

F_e : Fracción de embarcaciones mayores. Fracción de embarcaciones mayores a 12 metros de eslora sobre el total de embarcaciones.

$$F_e = \frac{NeM}{Ne} = \frac{Ne - Nem}{Ne}$$



Donde N_e es el número total de embarcaciones, N_{eM} es el número de embarcaciones mayores a 12 metros y N_{em} el número embarcaciones menores a 12 metros. Así, mientras mayor es el número de embarcaciones mayores ($F_e \rightarrow 1$), menor es su Sensibilidad.

So: Índice de susceptibilidad operacional. El índice indica que, entre mayor número de pescadores que navegan y mayor número de embarcaciones mayores a 12 metros, la caleta es menos sensible. Se calcula mediante la expresión:

$$So = (Fn + Fe)/2, \quad 0 \leq So \leq 1$$

Así, mientras menor es el número de pescadores que navegan y mayor el número de embarcaciones mayores ($So \rightarrow 1$), menor es su Sensibilidad. Los pescadores reducen su Sensibilidad pasando de navegantes a recolectores o al utilizar embarcaciones mayores.

La Sensibilidad estructural se define a través de un índice que pondera variables que definen el grado de protección y de servicios con que cuenta la caleta. Esta se calcula a partir de los siguientes indicadores:

R: Ruralidad de la caleta. Una caleta urbana cuenta con servicios, infraestructura y ayudas que la hacen menos sensible que una ubicada en un lugar remoto o alejado de centros poblados. La evaluación, binaria, se efectúa mediante la expresión:

$$R = 1 \text{ si es urbana} \quad R = 0 \text{ si es rural}$$

OA: Obras de abrigo. Una caleta con obras de abrigo al oleaje es menos sensible que una que no posee obras. La evaluación, binaria, se efectúa mediante la expresión:

$$OA = 1 \text{ si cuenta con obra de abrigo} \quad OA = 0 \text{ si no cuenta}$$

M: Muelle o rampa. Una caleta con muelle o rampa cuenta con más facilidades para operar (en condiciones normales, no extremas), siendo menos sensible que una caleta donde el embarque y desembarque debe realizarse sin

facilidades. La evaluación, binaria, se efectúa mediante la expresión:

$$M = 1 \text{ si cuenta con muelle o rampa} \quad M = 0 \text{ si no cuenta}$$

AN: Abrigo natural. Una caleta que cuenta con abrigo natural (ubicada en una bahía, en aguas interiores o protegida por una península, roqueríos o islotes) es menos sensible que una que no posee abrigo. La evaluación, binaria, se efectúa mediante la expresión:

$$AN = 1 \text{ si cuenta con abrigo natural} \quad AN = 0 \text{ si no cuenta}$$

AM: Área de Manejo (AMERB). Una caleta que es capaz de organizarse para contar con un área de manejo es menos sensible que una que no posee área. La evaluación, binaria, se efectúa mediante la expresión:

$$AM = 1 \text{ si cuenta con área de manejo} \quad AM = 0 \text{ si no cuenta}$$

Se: Índice de susceptibilidad estructura. El índice indica que una caleta rural protegida al oleaje, mediante abrigo artificial o natural, que cuente con muelle y con la organización para tener un área protegida ($Se \rightarrow 1$) es menos sensible que una caleta que no cuenta con estos elementos. Se calcula la media aritmética entre todos:

$$Se = (R + OA + M + AN + AM)/5 \quad 0 \leq Se \leq 1$$

3.1.6 RIESGO

El Riesgo (R) se cuantifica como la multiplicación de la Amenaza, la Sensibilidad y la Exposición.

$$R = E \times A \times S$$

En este análisis no se evalúa el impacto económico asociado a desembarques ni la pérdida de bienes y servicios generados a través de la cadena de valor. El procedimiento trae implícito el supuesto de que las marejadas cambian debido al cambio climático, pero la vulnerabilidad, caracterizada mediante los criterios de operación asociada a diferentes artes de pesca, permanece constante en el tiempo.



3.2 PUERTOS ESTATALES

3.2.1 CONTEXTO

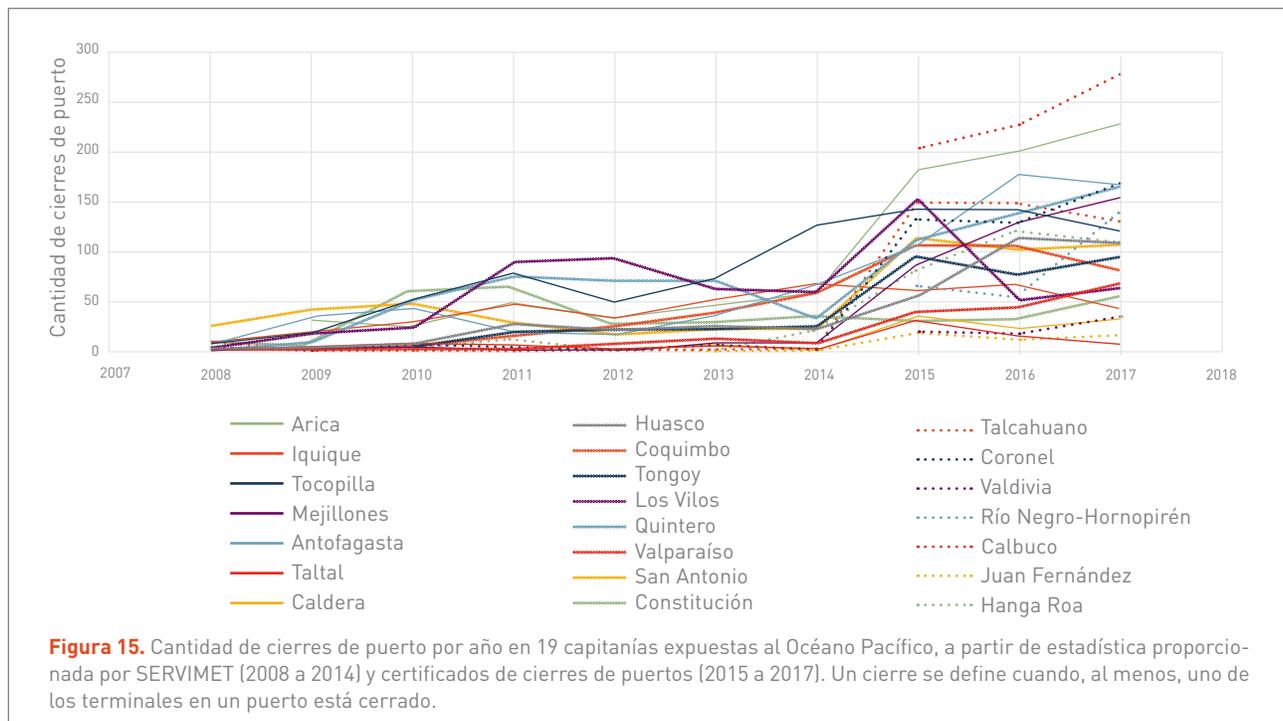
El sistema portuario chileno cumple un rol estratégico para la integración comercial con el mundo, pues transfiere el 90% del comercio internacional. Dicho sistema contempla empresas portuarias, cuyo rol consiste en crear condiciones favorables para el desarrollo del sector portuario al amparo de un sistema de concesiones (Ley 19.542). Además de las empresas portuarias, existen decenas de concesionarias, puertos privados, instalaciones industriales y puertos pesqueros que conforman el sistema.

Durante los episodios de mal tiempo, los puertos se cierran para garantizar la seguridad de las naves, de la carga y de los operadores. Esta facultad de los Capitanes de Puerto comprende una serie de medidas que incluyen la suspensión total o parcial del tránsito o actividades marítimas, de remolcadores y de los botes salvavidas (Marítimo Portuario, 2017), lo que se traduce en pérdidas

económicas del orden de millones de dólares a los actores de la cadena logística.

La cantidad de cierres de puerto por año para 22 capitanías expuestas al océano Pacífico se ilustra en la **Figura 15**. De esta, se infiere que los puertos con mayor cantidad de cierres son Arica (850), Tocopilla (802) y Quintero (761). Aun cuando las estadísticas de cierres de puerto son relativamente cortas como para atribuir este comportamiento al cambio climático, se observa un incremento notorio en la mayoría de los puertos (MMA, 2019f).

En este estudio se analiza el impacto asociado a la pérdida de disponibilidad de sitios de atraque debido a oleaje¹³ en los puertos estatales expuestos directamente al océano Pacífico, en el contexto del cambio climático. Se efectúa un análisis de Riesgo que consiste en comparar estos criterios con la estadística de oleaje para el período histórico (1985 - 2004) y la proyección (2026 - 2045), de modo de calcular el *downtime* en los puertos estatales de Arica, Iquique, Antofagasta, Coquimbo, Valparaíso, San Antonio y San Vicente. Se analiza también el puerto de Mejillones.



¹³ La disponibilidad de sitios de atraque, denominada downtime operacional, corresponde al porcentaje de tiempo en que un sitio de atraque no está disponible para una determinada nave, debido a la acción de agentes ambientales, como el viento, el oleaje, la marea, la corriente y la neblina.

3.2.2 CADENA DE IMPACTO

El Riesgo se analiza en función de la pérdida de operatividad de sitios de atraque, debida a la presencia de marejadas. La cadena de impactos se presenta en la **Tabla 4**.

Subsistema: Puertos (industriales)		Referencias
Amenaza	Cambio en el régimen del oleaje (marejadas), expresado en términos de probabilidad.	MMA (2019a)
Impacto/Riesgo	Aumento del <i>downtime</i> de naves mayores (portacontenedores como buque tipo), calculado en la bocana de los puertos. Cierres de puertos generan impacto económico en la cadena logística.	MMA (2019f)
Unidad territorial	Ocho puertos del Sistema Portuario Estatal analizados en forma individual, que reciben naves portacontenedores y que se encuentran expuestos al océano Pacífico.	
Exposición	Carga transferida, considerando exportaciones e importaciones, por cada puerto en el año 2018, escalado por el mayor valor.	
Sensibilidad	Se evalúa a partir de la estadística histórica obtenida de certificados de cierre de puerto (2015, 2016 y 2017) y de una base de datos de cierres proporcionada por SERVIMET (2007 a abril 2017), escalada por el mayor valor.	MMA (2019f)
Otros aspectos	Se excluyen los puertos estatales protegidos al océano (Chacabuco y Punta Arenas), además de los privados no ubicados en los mencionados en Unidad Territorial (en Chile hay 171 terminales marítimos).	No aplica

Tabla 4. Ficha de cadena de impactos de puertos estatales.

3.2.3 EXPOSICIÓN

La Exposición se calcula a partir de la carga transferida (Q), considerando exportaciones e importaciones, por cada puerto en el año 2018. Dada la gran variabilidad en la carga entre los puertos analizados, en el índice de Exposición (E) se utiliza el logaritmo de la carga para cada puerto, normalizado por el máximo valor a nivel nacional (San Antonio).

$$E = \frac{\log(Q)}{\max \{\log(Q)\}}, \quad 0 \leq E \leq 1$$

3.2.4 AMENAZA

La Amenaza se evalúa como el período de tiempo durante el cual las condiciones del mar no permiten la operación

de naves. El análisis se efectúa utilizando estadística de oleaje en el acceso a los puertos (MMA, 2019f). Específicamente, se calcula el *downtime*, cruzando la estadística de altura significativa del oleaje para un período histórico (1985 - 2004) y para la proyección (2026 - 2045) con el límite operacional de altura significativa del oleaje de 1.5 m, definidos para faenas de atraque en base a recomendaciones internacionales (PPEE, 1999)¹⁴. El *downtime* se expresa como la probabilidad de excedencia del límite operacional y su valor va entre 0 (100% de operación) y 1 (0% de operación). La Amenaza (A) se calcula como la diferencia entre el *downtime* de la proyección (Pp) y el período histórico (Ph):

$$A = Pp - Ph, \quad -1 \leq A \leq 1$$

¹⁴ En caso de que el *downtime* se reduzca en la proyección (respecto del período histórico), se considera una "ganancia" debido a mejores condiciones que permitirían más recaladas.



3.2.5 SENSIBILIDAD

La Sensibilidad se evalúa a partir de la estadística histórica obtenida de certificados de cierre de puerto (2015, 2016 y 2017) y de una base de datos de cierres proporcionada por SERVIMET (2007 a abril 2017). El supuesto es que la evidencia histórica de cierres da cuenta de la Sensibilidad del sistema portuario ante la acción de las marejadas. Con el objetivo de obtener un índice de Sensibilidad (S) entre 0 y 1, la cantidad histórica de horas de cierre de puertos (Dh) se normaliza por el máximo valor a nivel nacional (Arica).

$$S = \frac{Dh}{\max \{Dh\}}, \quad 0 \leq S \leq 1$$

3.2.6 RIESGO

El Riesgo se cuantifica como la multiplicación de la Amenaza, la Sensibilidad y la Exposición.

$$R = E \times A \times S$$

3.3 PLAYAS

3.3.1 CONTEXTO

Las playas evolucionan en un amplio rango de escalas en el tiempo y el espacio. En escalas asociadas al paso de una

ola, se evidencian cambios relativamente pequeños y rápidos, vinculados con la suspensión y la rodadura del sedimento. En escala sucesivamente mayores, las playas evolucionan en pocos días durante el paso de una marejada, en escalas estacionales con la manifestación de los perfiles típicos de invierno y verano, y en escalas de tiempo decadales asociadas a procesos seculares de erosión y sedimentación.

En las escalas típicas de una marejada, las playas actúan como un sistema de protección natural, donde la acción conjunta del oleaje, la marea astronómica y otros fenómenos climáticos opera erosionando y/o depositando el sedimento disponible. Durante el ataque de las olas, las arenas se transportan mar afuera producto de la resaca o hacia la costa producto del oleaje menos energético y/o la asimetría del swash¹⁵. El potencial erosivo de estos procesos puede causar consecuencias dramáticas, tanto para playas como para la infraestructura costera, lo cual ha sido evidenciado en los últimos años en diversas zonas costeras del territorio nacional.

3.3.2 CADENA DE IMPACTO

El Riesgo se analiza en función de la erosión de playas debida a las acciones oceánicas. La cadena de impactos se presenta en la **Tabla 5**.

Subsistema: Playas		Referencias
Amenaza	Cambio en la cota de inundación (combinación de aumento del nivel de mar y aumento de intensidad de las marejadas), expresado en términos de probabilidad.	MMA (2019e)
Impacto/Riesgo	Erosión de la línea de costa.	
Unidad territorial	45 playas analizadas en forma individual y agrupadas por comunas ¹⁶ , representando 28 comunas de las 102 comunas costeras e insulares (27,45%).	
Exposición	Área, escalada por el mayor valor.	
Sensibilidad	Promedio normalizado de categorías tipo de rompiente, tipo de drenaje y existencia de antedunas.	
Tabla 5. Ficha de cadena de impactos de playas.		

¹⁵ La zona de swash es la parte de la playa que está consecutivamente seca y húmeda, debido al ascenso y descenso del mar, producto del oleaje y la marea.

¹⁶ (Iquique, Antofagasta, Chañaral, Caldera, Huasco, La Serena, Coquimbo, Los Vilos, La Ligua, Papudo, Puchuncaví, Quintero, Concón, Viña del Mar, Valparaíso, Casablanca, Algarrobo, El Quisco, El Tabo, Cartagena, Santo Domingo, Pichilemu, Hualpén, Coronel, Arauco, Lebu, Tirúa e Isla de Pascua).

3.3.3 EXPOSICIÓN

La Exposición se estima a partir del área de superficie de las playas estudiadas, que corresponde a 600 hectáreas de playas. La ficha de Exposición disponible en la plataforma web contempla los siguientes parámetros:

- ID de playa
- Nombre de la playa
- Latitud
- Longitud
- Comuna
- Región
- Tipo (industrial, urbana, periurbana, rural)
- Longitud
- Área
- Tasa de cambio (m/año)
- Categoría (acreción, estable, erosión)
- Forma Planta
- Orientación del frente de playa (°)
- Zona de Surf¹⁷+ Zona de swash
- Longitud onda de cusps (m)
- Tipo zona de rompiente
- Barra Tipo
- Barra Forma
- Drenaje
- Campos Dunares
- Sedimento

3.3.4 AMENAZA

La Amenaza se calcula como la erosión esperada, producto de la combinación del aumento en el nivel del mar y del cambio en las propiedades del oleaje. La erosión se calcula para mediados de siglo bajo el escenario RCP 8.5 (2026 - 2045) y para el período histórico (1985 - 2004). La Amenaza corresponde al aumento de erosión entre ambos períodos.

3.3.5 SENSIBILIDAD

La Sensibilidad se calcula a partir de dos índices: la Sensibilidad estructural (Se) y la tasa de erosión normalizada (Er). La Sensibilidad estructural (Se) considera el tipo de rompiente, la existencia de drenaje y la existencia de dunas.

- Tipo de rompiente (Tr):
 - Playas reflectivas = 0
 - Playas intermedias = 0,5
 - Playas disipativas = 1
- Existencia de drenaje (Dr):
 - Curso permanente = 0
 - Curso esporádico = 0,5
 - Ninguno = 1
- Existencia de dunas (Du)
 - Dunas con vegetación = 0,
 - Dunas transgresivas o remanentes = 0,5
 - Ninguna = 1

Como no se conoce la importancia relativa de cada componente, se asume:

$$Se = \frac{Tr + Dr + Du}{3}$$

La tasa de erosión normalizada (Er) varía entre 0 y 1, donde 0 representa acreción y el estado estable, mientras que la erosión y erosión alta se asocian a valores mayores a 0.

Como no se conoce la importancia relativa entre ambos índices, la Sensibilidad se calcula como el promedio aritmético entre ambos.

$$S = \frac{Se + Er}{2}$$

En el estudio se determinan los cambios en la posición de la línea litoral para 45 playas en las regiones de Tarapacá, de Antofagasta, de Atacama, de Coquimbo, de Valparaíso,

¹⁷ Esta franja de la playa representa una región de profundidad somera, donde comienza la rotura del oleaje, fenómeno que está asociado con la transformación de energía ordenada proveniente de aguas profundas a turbulencia y calor.



de O'Higgins y del Biobío. De estas playas, 35 fueron analizadas en detalle en MMA (2019e) y aquí se presentan los resultados de 10 nuevas playas. Para calcular las tasas de erosión se usa método *Linear Regression Rate* (LRR) del software *Digital Shoreline Analysis System* DSAS (USGS), fotografías aéreas, planos de borde costero del SHOA, imágenes satelitales y levantamientos topográficos. El análisis cubre desde 54 años (La Serena) a sólo tres años (Lebu-Tirúa)¹⁸. Para la delimitación de la línea litoral se aplicó un criterio geomorfológico, que considera la de-

terminación de la línea de máxima pleamar visible en la fotografía aérea. El detalle de la metodología se incluye en MMA (2019e). La tasa de erosión (m/año) se clasifica de acuerdo a las cuatro categorías de Rangel *et al.* (2016):

- > -1.5 m/año : Erosión alta
- -0.2 y -1.5 m/año : Erosión
- -0.2 y +0.2 m/año : Estado estable
- > +0.2 m/año : Acreción

Nº	Lugar	Playa	Periodo (años)	Nº años
1	Iquique	Cavanca	1974 - 2018	44
2	Iquique	Playa Brava	1978 - 2018	44
3	Chañaral	Ba. Chañaral	1974 - 2018	44
4	Caldera	Caldera	1964 - 2018	54
5	Huasco	Ba. Huasco	1964 - 2016	52
6	Pichidangui	Pichidangui	1975 - 2018	43
7	Tongoy	Playa Grande	1964 - 2018	54
8	Los Vilos	Playa Amarilla	1964 - 2018	54
9	Bahía La Ligua	Bahía La Ligua	1975 - 2018	43
10	Papudo	Ba. Papudo	1975 - 2018	43

Tabla 6. Listado de playas analizadas en este estudio.

La **Tabla 6** presenta las playas analizadas en este estudio, que complementan a las 35 estudiadas en MMA (2019e). Cabe destacar que este estudio, de carácter histórico, no establece las causas que explican la erosión generalizada, la que pueden ser de origen oceanográfico, geofísico, antrópico o hidrológico.

3.3.6 RIESGO

El Riesgo se cuantifica como la multiplicación de Amenaza, Sensibilidad y Exposición.

$$R = E \times A \times S$$

3.4 ASENTAMIENTOS COSTEROS

3.4.1 CONTEXTO

El 9,77% de los 4.955 asentamientos existentes en Chile son costeros; en ellos viven casi un millón de personas bajo los 10 msnm (MMA 2019b). Estos asentamientos son clasificados dentro de cuatro categorías (ciudades, pueblos, aldeas y caseríos), de acuerdo con la cantidad de habitantes, su denominación y las funciones que desarrollan en el ámbito territorial. Estas cuatro categorías se dividen en entidades urbanas y rurales, estructurándose la clasificación mostrada en la **Tabla 7**.

¹⁸ Se exceptúa el caso de bahía Huasco, playa para la cual sólo se pudo contar con imágenes de 2016.



Concepto	Definición	Tamaño población (habitantes)	Otras condiciones
Entidad urbana	Asentamiento humano con continuidad y concentración de construcciones en un amanzanamiento regular.	Mayor a 2.000	Sin restricción
		Entre 1.001 y 2.000	Menos del 50% de la fuerza laboral se dedica a actividades primarias.
Ciudad	Entidad Urbana.	Mayor a 5.000	Sin condiciones.
		Entre 1.001 y 5.000	Capital regional o provincial.
Pueblo	Entidad Urbana.	Entre 2.001 y 5.000	Sin condiciones.
		Entre 1.001 y 2.000	Menos del 50% de la fuerza laboral se dedica a actividades primarias.
Entidad rural	Asentamiento humano concentrado o disperso.	Menos de 1.000	Sin restricciones.
		Entre 1.001 y 2.000	Más del 50% de la fuerza laboral se dedica a actividades primarias.
Aldea	Entidad rural. Presenta generalmente amanzanamiento y/o continuidad de viviendas en torno a una vía de comunicación estructurante.	Entre 301 y 2.000	Sin restricciones.
		Entre 1.001 y 2.000	Más del 50% de la fuerza laboral se dedica a actividades primarias.
Caserío	Entidad rural con nombre propio, que posea tres viviendas o más, cercanas entre sí, y no forma parte de otra entidad.	Menos de 301	Sin restricciones.

Tabla 7. Categorías que dividen en entidades urbanas y rurales.

El cambio climático supone importantes aumentos en el sobrepaso de obras marítimas e inundación en los paseos marítimos de las ciudades costeras. El sobrepaso puede significar un riesgo para la seguridad de las personas y de vehículos, como es frecuente observar, por ejemplo, en las avenidas costeras de Viña del Mar, La Serena, Antofagasta y Arica durante los temporales de invierno. Finalmente, el cambio climático puede acarrear importantes consecuencias en la estabilidad de los rompeolas y de defensas costeras.

3.4.2 CADENA DE IMPACTO

El Riesgo se analiza como el impacto asociado a la anegación de asentamientos costeros debido a las marejadas y el alza del nivel del mar. La cadena de impactos se presenta en la **Tabla 8**.

Para la identificación de los asentamientos costeros de Chile se utilizó la base de datos del Censo 2017, junto con la clasificación de ciudades, pueblos, aldeas y caseríos

Subsistema: Asentamientos costeros		Referencias
Amenaza	Cambio en la cota de inundación (por una combinación de aumento en el nivel de mar y aumento de intensidad de las marejadas), expresado en términos de probabilidad.	MMA (2019a)
Impacto/Riesgo	Aumento de la cota de inundación.	
Unidad territorial	433 asentamientos humanos (ciudades, pueblos, aldeas y caseríos costeros) emplazados en las 100 comunas costeras y dos comunas insulares, reconocidos por el INE.	MMA (2019b)
Exposición	Tamaño de los emplazamientos con zonas litorales bajas, medido por el número de viviendas, escalado por el mayor valor.	
Sensibilidad	Promedio normalizado entre densidad poblacional, densidad de vivienda y fracción de tipos de vivienda (casa, departamento en edificio o precaria).	

Tabla 8. Ficha de cadena de impactos de asentamientos costeros.



(CPAC) del INE^{19,20}. Una vez identificados los asentamientos costeros oficiales, se incorporaron los asentamientos costeros informales, que no se encuentran en la clasificación oficial del INE, así como aquellos que son clasificados como “indeterminados” en la base de datos del Censo 2017.

Con posterioridad, se calculó, mediante interpretación visual de imágenes satelitales, la superficie urbanizada por cada asentamiento costero, lo que permitió la corrección de la clasificación inicial del INE respecto de la categoría de pueblo/aldea/caserío identificado. De esta manera, se obtuvo un listado de 433 asentamientos costeros a lo largo de Chile, con una base de datos correspondiente al tipo de asentamiento, superficie (km²), número de personas (separados por sexo) y número de viviendas, la cual fue el insumo para el cálculo de los índices posteriores.

3.4.3 EXPOSICIÓN

La Exposición se basa en el inventario de Exposición desarrollado en MMA (2019b). La Exposición se define como el número de habitantes del asentamiento costero de acuerdo con censo 2017 (INE, 2017). La ficha de Exposición disponible en la plataforma web contempla los siguientes parámetros:

- ID
- Nombre del asentamiento
- Latitud
- Longitud
- Comuna
- Región
- Tipo (ciudad, pueblo, aldea, caserío)
- Área
- Número de habitantes
- Número de viviendas
- Existen manzanas censales bajo los 10 metros sobre el nivel del mar msnm (sí / no)

3.4.4 AMENAZA

La Amenaza es el cambio en la cota de inundación proyectada para mediados de siglo bajo RCP 8.5 (2026 - 2045) respecto del período histórico (1985 - 2004). Esta Amenaza se ilustra en la **Figura 6**.

3.4.5 SENSIBILIDAD

Para estudiar la Sensibilidad de los asentamientos costeros se debe tomar en cuenta que la clasificación²¹ no refleja la realidad de la ocupación costera, donde un número importante corresponden a viviendas de veraneo. Esto se puede establecer en base a la existencia de localidades con mayor número de viviendas que habitantes (**Tabla 9**).

Algunos ejemplos de este tipo particular de asentamientos costeros son Puerto Viejo (**Figura 16**), Laguna Verde (**Figura 17**) y Cartagena (**Figura 18**).

La Sensibilidad se define de acuerdo con los siguientes parámetros:

Ti: Tipo de asentamiento (ciudad = 0, pueblo = 0.25, aldea = 0.50, caserío = 1). Entre más rural sea el asentamiento, resulta más sensible.

Em: Existencia de manzanas censales a menos de 10 metros sobre el mar (no existen = 0, sí existen = 1). Si el asentamiento tiene zonas bajas, resulta sensible.

Dp: Densidad poblacional normalizada (número de habitantes/área) / densidad máxima. A mayor densidad poblacional, mayor Sensibilidad.

Dv: Densidad de viviendas normalizadas (número de viviendas/área) / densidad máxima. A mayor densidad de viviendas, mayor Sensibilidad.

19 https://geoarchivos.ine.cl/File/pub/Cd_Pb_Al-Cs_2019.pdf

20 <http://inechile.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=d0bff7af90384faa98d6ff69faa0d6d2>

21 Clasificación urbana (ciudades, pueblos) / rural (aldeas, caseríos) en base al número de habitantes presentes en el momento del censo.

Región	Nombre	Clasificación INE	N° Personas	N° Viviendas	Personas/ Vivienda
Atacama	Flamenco	Caserío	185	678	0,27
	Rodillo	Caserío	74	632	0,12
	Pulpito	Caserío	103	1.239	0,08
	Pulpo	Caserío	259	1.268	0,20
	Bahía Inglesa	Aldea	535	1.234	0,43
	Puerto Viejo	Caserío	104	1.420	0,07
	Caleta Barranquilla	Caserío	242	1.518	0,16
	Carrizal Bajo	Caserío	185	648	0,29
	Los Toyos	Caserío	48	739	0,06
Bahía Carrizalillo	Caserío	28	137	0,20	
Valparaíso	Los Molles	Aldea	648	1.165	0,56
	Los Quinquelles	Aldea	469	1.904	0,25
	Pichicuy	Aldea	530	562	0,94
	Laguna de Zapallar	Aldea	532	1.870	0,28
	Laguna Verde	Pueblo	3.686	4.964	0,74
O` Higgins	La Boca	Aldea	669	799	0,84
	Vega de Pupuya	Aldea	452	721	0,63
	Cáhuil	Aldea	633	645	0,98
País	Promedio Nacional				2,7

Tabla 9. Asentamientos costeros con menor número de personas que viviendas entre las regiones de Atacama y de O`Higgins.

Fuente INE (2018, 2019).



Figura 16. Localidad de Puerto Viejo en la Región de Atacama. Se puede apreciar la ocupación costera en una zona litoral baja, con viviendas frágiles ante un evento de inundación.

F: Fracción de habitantes por vivienda normalizada (habitantes/vivienda) / fracción máxima. A mayor proporción de habitantes por vivienda, mayor Sensibilidad.

El índice de Sensibilidad es la media aritmética de cada componente.

$$S = \frac{Ti + Em + Dp + Dv + F}{5}$$



Figura 17. Localidad de Laguna Verde en la Región de Valparaíso.



Figura 18. Localidad de Cartagena en la Región de Valparaíso.

En la **Figuras 19, 20, 21 y 22** se muestran la distribución de asentamientos costeros para el litoral del país, junto a su clasificación urbana (pueblos, ciudades) y rural (Aldeas y caseríos). Las regiones de Atacama y de Los Lagos destacan por la gran cantidad de asentamientos rurales presentes, mientras que las regiones de Valparaíso y del Biobío concentran los asentamientos urbanos.

3.4.6 RIESGO

El Riesgo se cuantifica como la multiplicación de Amenaza, Sensibilidad y Exposición.

$$R = E \times A \times S$$

Asentamientos Costeros

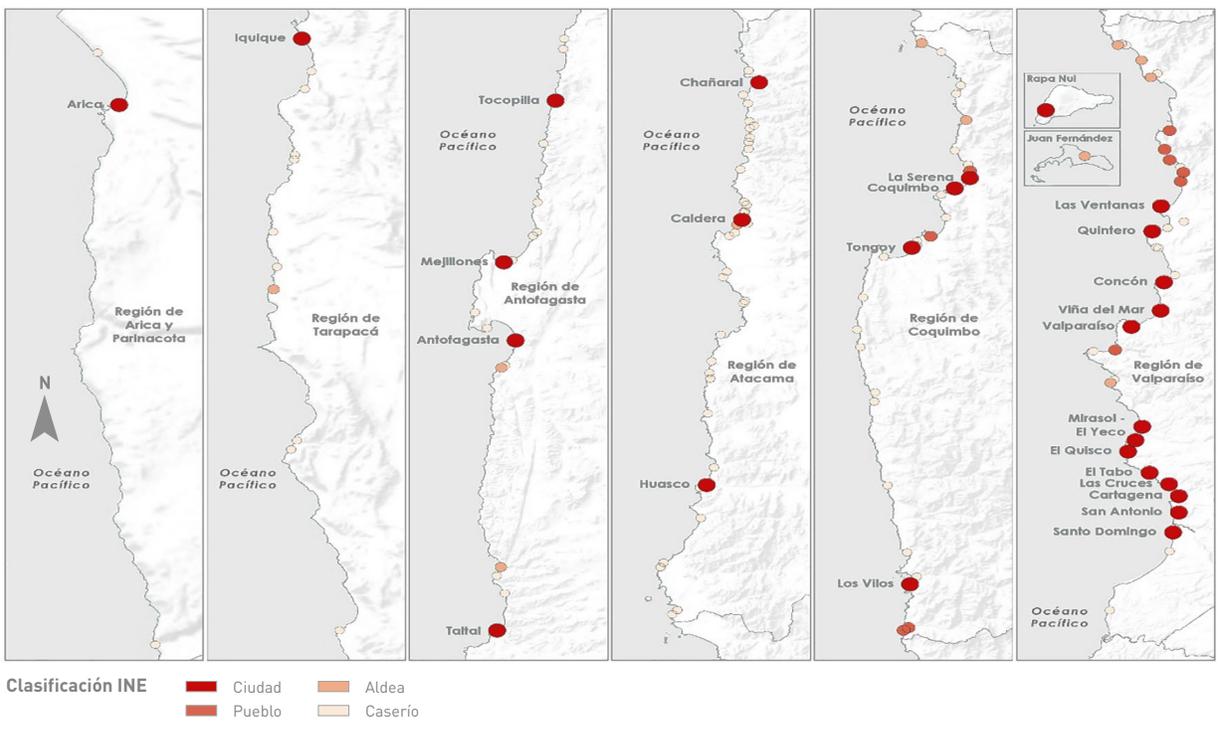


Figura 19. Asentamientos costeros entre las regiones de Arica y Parinacota y de Valparaíso.

Asentamientos Costeros

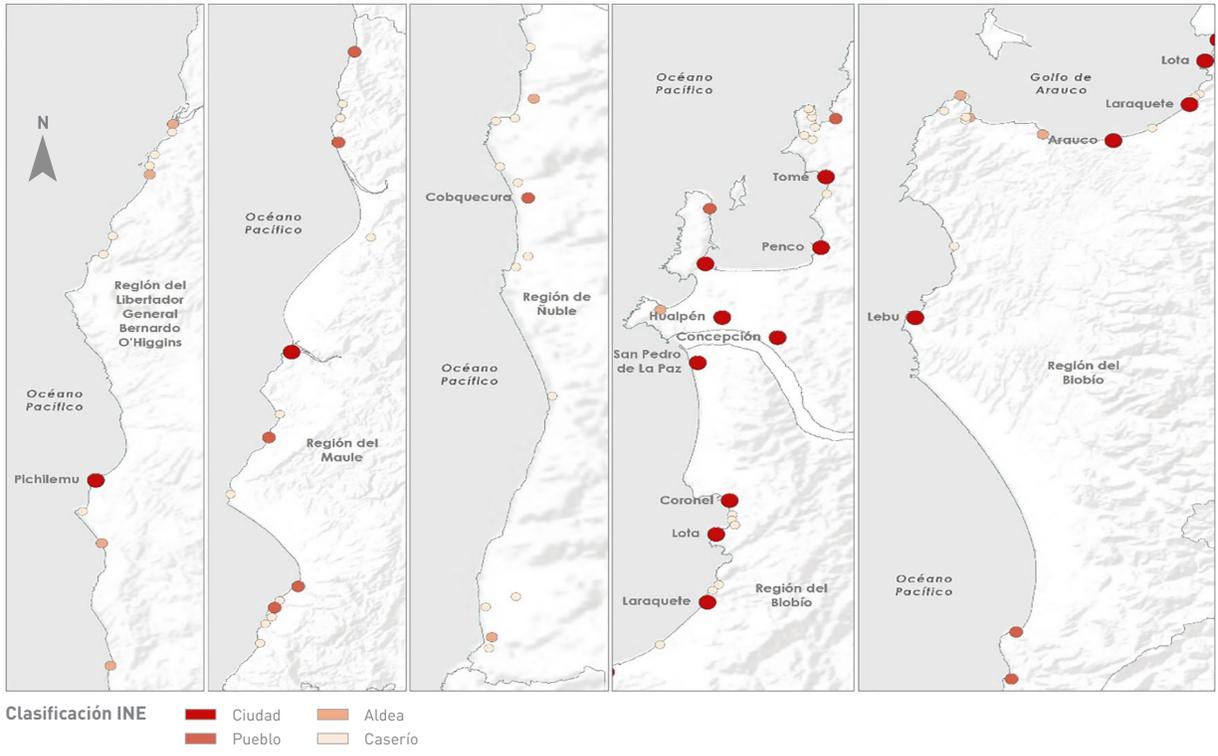


Figura 20. Asentamientos costeros entre las regiones de O'Higgins y del Biobío.



Asentamientos Costeros

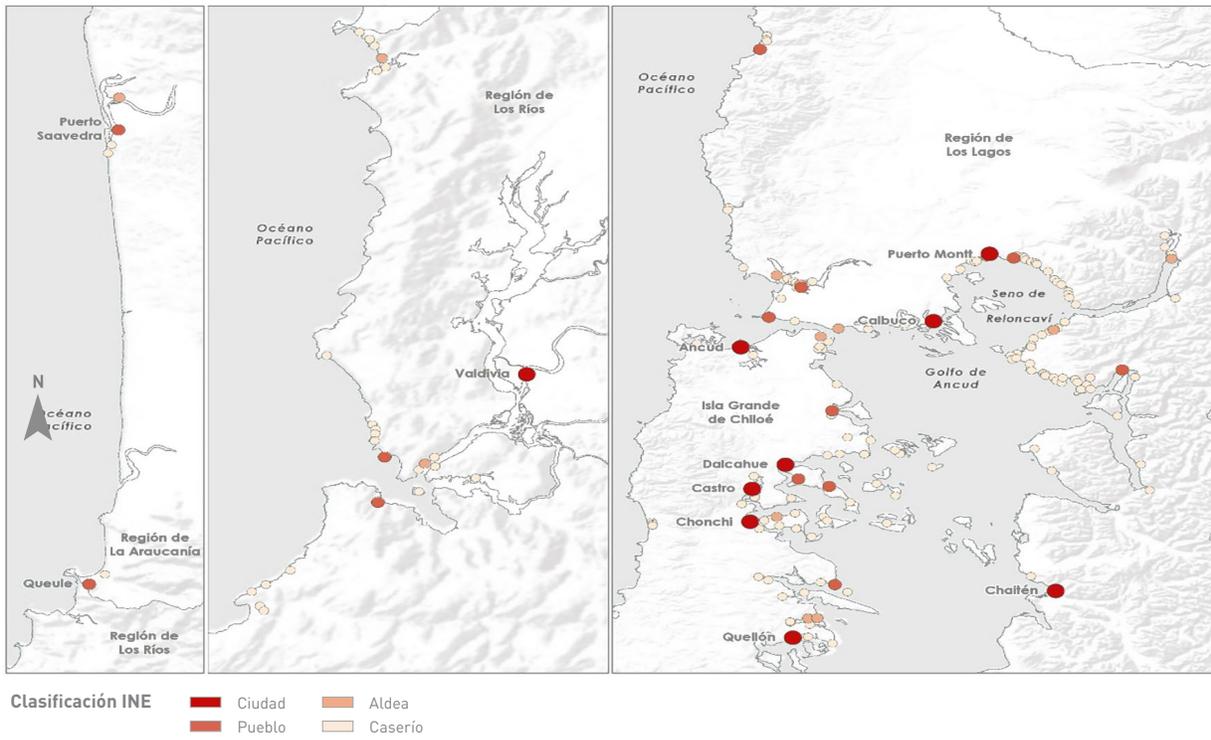


Figura 21. Asentamientos costeros entre las regiones de La Araucanía y de Los Lagos.

Asentamientos Costeros

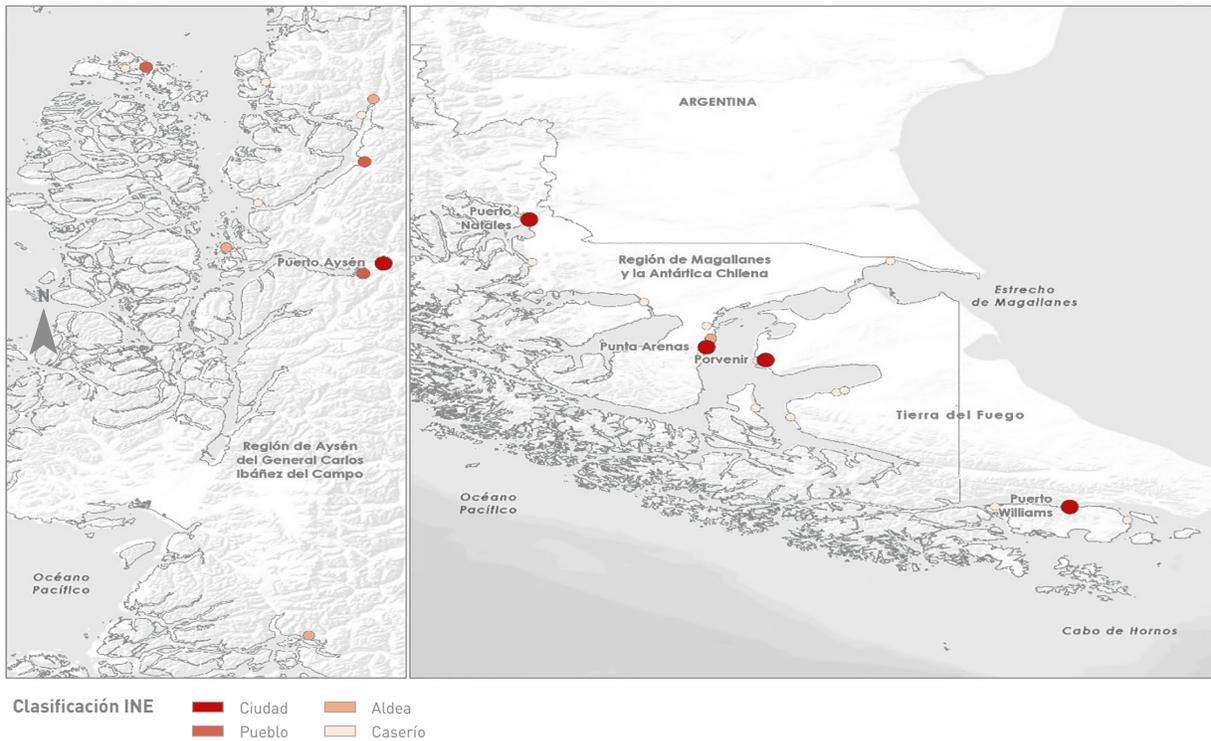


Figura 22. Asentamientos costeros entre las regiones de Aysén y de Magallanes.



1029





4

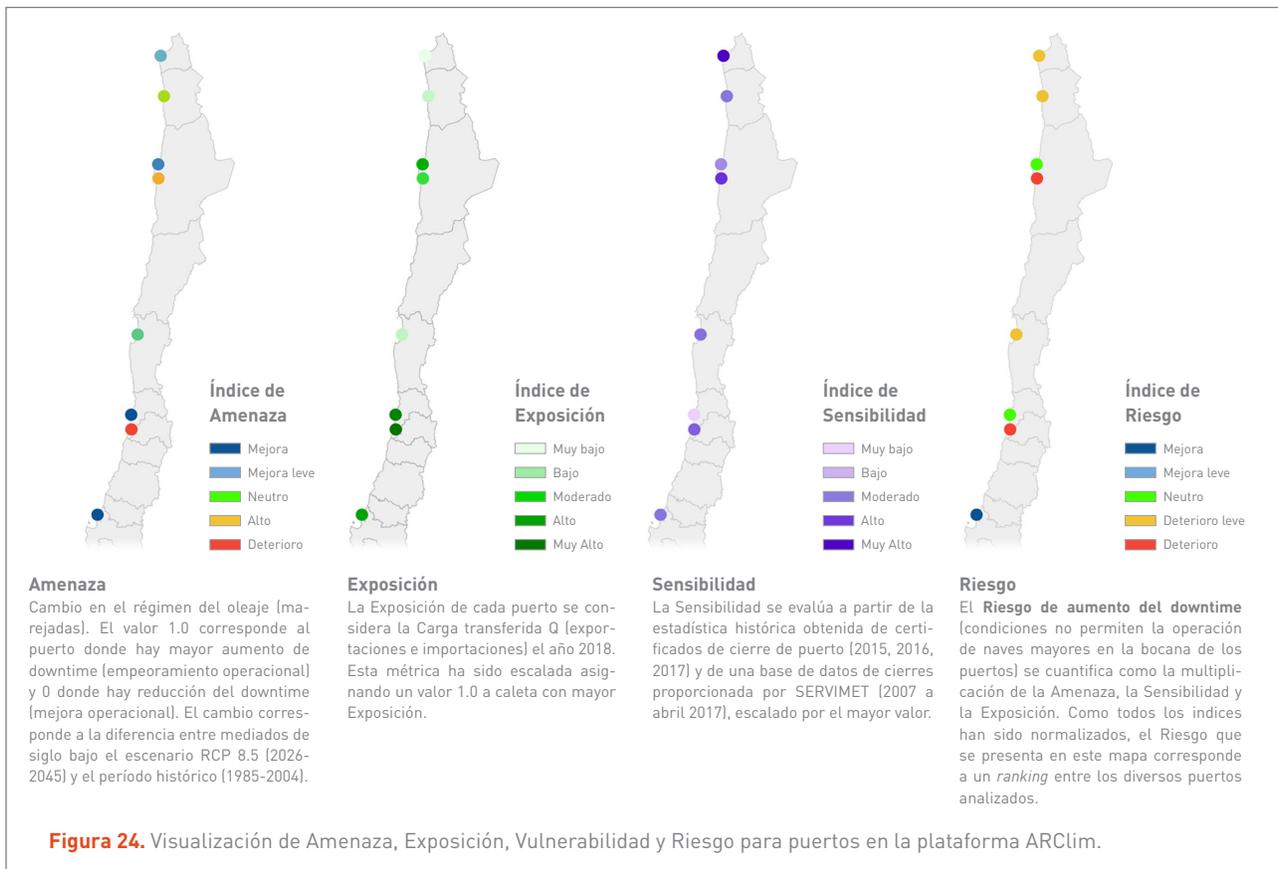
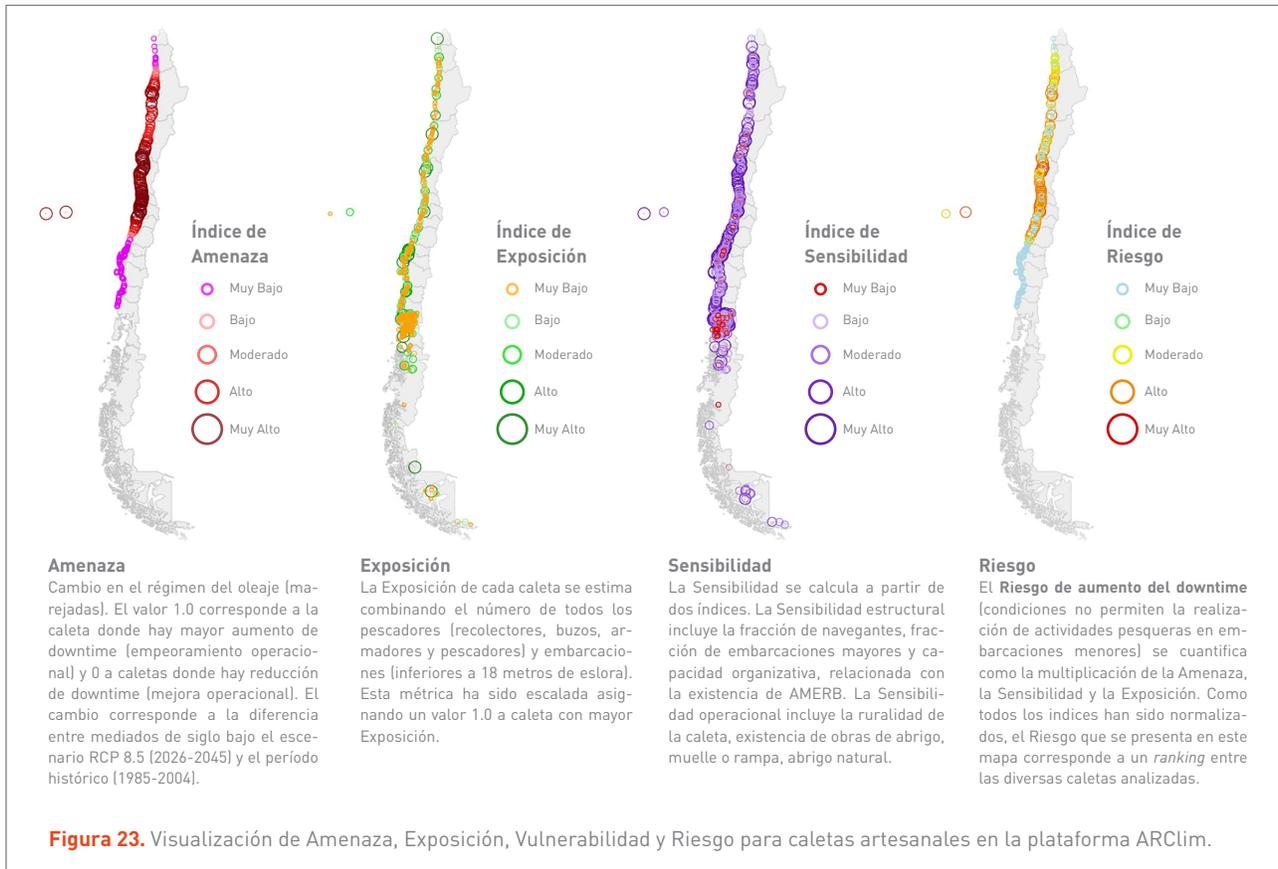
RESULTADOS

4.1 CALETAS DE PESCA ARTESANAL

En la **Figura 23** se muestran los resultados para los indicadores de Amenaza, Exposición, Vulnerabilidad y Riesgo de las caletas de pescadores artesanales. Se puede apreciar que la Amenaza se concentra en el centro-norte del país, mientras que las caletas con mayor Exposición se distribuyen donde la Amenaza es baja o en el mar interior de Chiloé, que no se encuentra expuesta al incremento de las marejadas en aguas abiertas. La Vulnerabilidad tiene una distribución geográfica relativamente homogénea a lo largo del país y, como resultado, el Riesgo más alto se concentra en Chile central.

4.2 PUERTOS ESTATALES

En la **Figura 24** se muestran los resultados para los indicadores de Amenaza, Exposición, Vulnerabilidad y Riesgo de las caletas de pescadores artesanales. La Tabla 10 presenta el cálculo de Amenaza y Sensibilidad, mientras que la Tabla 11 exhibe la Exposición y el Riesgo, entendido como probabilidad, en principales puertos estatales chilenos expuestos a cierres por marejadas. Se observa que algunos puertos mejorarán sus condiciones operacionales (San Vicente), otros las empeorarán (Arica, Iquique, Antofagasta, Coquimbo y San Antonio) y otros no experimentarán cambios sustantivos (Mejillones y Valparaíso).





Ubicación	Latitud [°S]	Amenaza ²²			Sensibilidad	
		1985 - 2004	2026 - 2045	Diferencia	Cierres	Normalizado
		<i>Ph</i> (%)	<i>Pp</i> (%)	<i>A</i> (%)	<i>Dh</i> (horas)	<i>S</i>
Arica	18,476	0,00%	0,00%	0,00%	850	1,00
Iquique	20,199	3,23%	3,44%	0,22%	432	0,51
Mejillones	23,060	0,17%	0,13%	-0,03%	395	0,46
Antofagasta	23,646	5,25%	5,66%	0,41%	700	0,82
Coquimbo	29,942	0,03%	0,04%	0,02%	447	0,53
Valparaíso	33,032	0,51%	0,42%	-0,09%	172	0,20
San Antonio	33,588	49,06%	49,89%	0,83%	523	0,62
San Vicente	36,740	21,50%	20,54%	-0,96%	434	0,51

Tabla 10. Amenaza y Sensibilidad en principales puertos expuestos a cierres por marejadas.

Ubicación	Latitud [°S]	Exposición			Riesgo
		Import & Export		Normalizado	%
		<i>Q</i> (ton)	<i>log(Q)</i>	<i>E</i>	$r=A \times S \times E$
Arica	18,476	393.668	5,60	0,71	0,000
Iquique	20,199	845.532	5,93	0,76	0,083
Mejillones	23,060	8.856.923	6,95	0,89	-0,014
Antofagasta	23,646	3.329.715	6,52	0,83	0,284
Coquimbo	29,942	901.501	5,95	0,76	0,007
Valparaíso	33,032	35.748.426	7,55	0,96	-0,018
San Antonio	33,588	67.656.186	7,83	1,00	0,511
San Vicente	36,740	10.582.003	7,02	0,90	-0,440

Tabla 11. Exposición y Riesgo en principales puertos expuestos a cierres por marejadas

4.3 PLAYAS

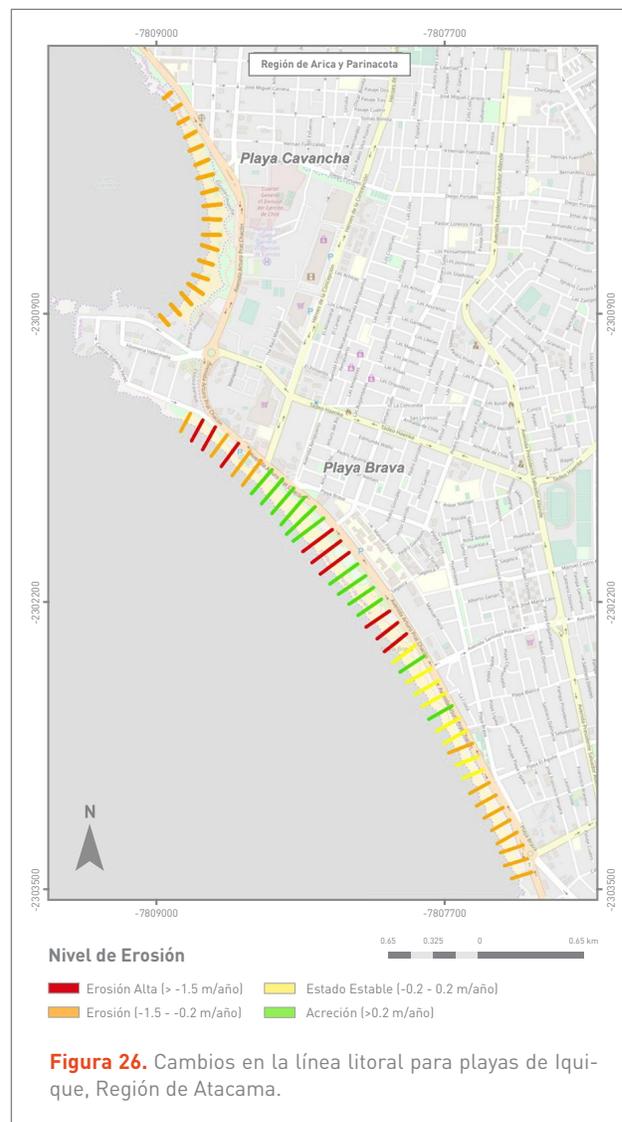
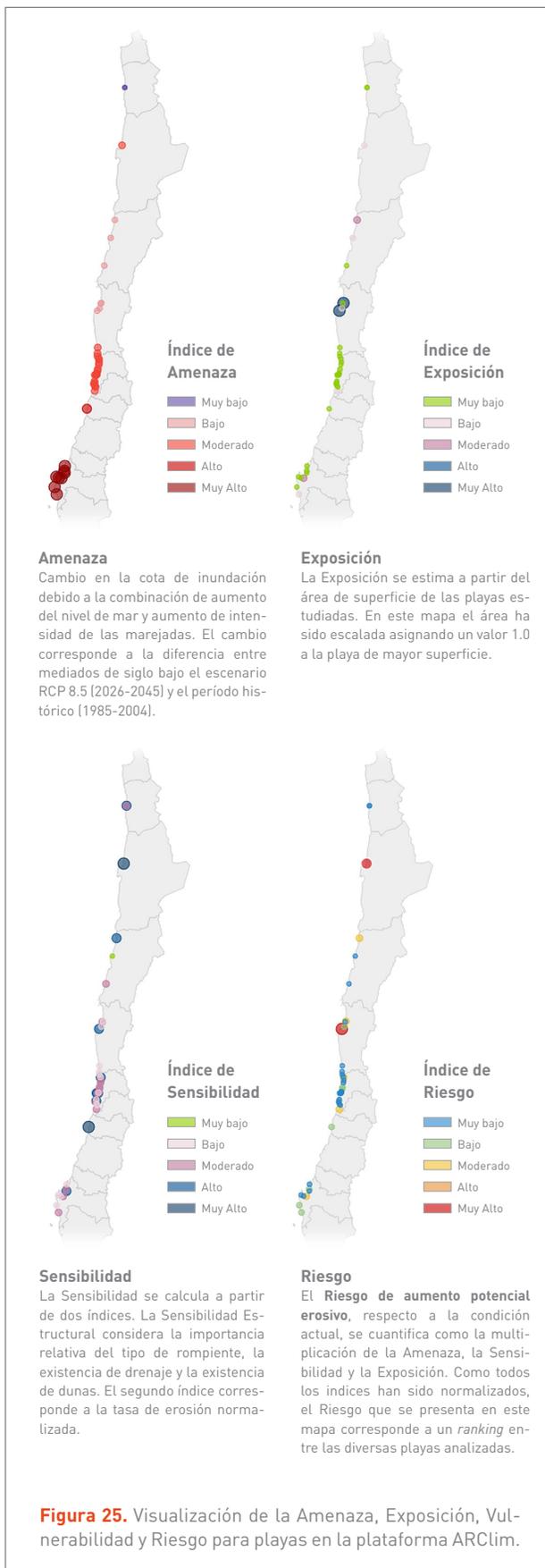
En la **Figura 25** se muestran los resultados para los indicadores de Amenaza, Exposición, Vulnerabilidad y Riesgo para playas.

La **Figura 26** muestra un ejemplo de aplicación de la metodología a las playas de Iquique. La **Tabla 12** indica la

tasa de erosión calculada para las 10 playas analizadas. El **Anexo 7** detalla los cálculos efectuados para estas nuevas playas analizadas.

De acuerdo con los resultados, ocho playas presentan erosión y erosión alta, lo cual corresponde al 80% del total. Aquí se destaca una mayor distribución de tasas de cambio en el rango entre -0.2 y -1.5 m/año, es decir, en el rango de erosión. Este rango concentró al 60% del total

²² La Amenaza se expresa en forma porcentual (en el texto se expresa como razón).



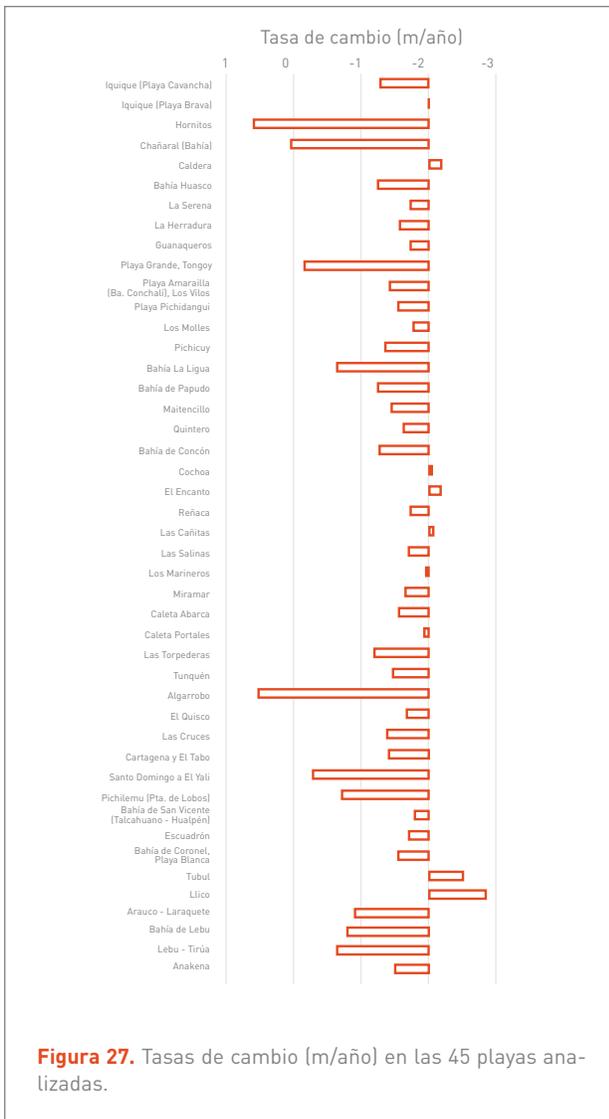
de playas. Estos resultados coinciden con los encontrados por MMA (2019d), donde el 80% de las playas presentaron tasas de erosión y erosión alta. En la **Figura 27** se muestran las tasas de cambio calculadas para las 45 playas, mientras que en la **Figura 28** se muestra el índice de Sensibilidad para las mismas playas. Dicho estudio concluye que los casos de mayor erosión corresponden a extensos litorales arenosos, asociados a campos dunares y humedales.

En este nuevo estudio, las playas con erosión alta corresponden a Chañaral (Región de Atacama) y playa Grande de Tongoy (Región de Coquimbo). Otras playas con altas tasas de erosión son las bahías de La Ligua y de Papudo (Región



N°	Lugar	Playa	Periodo (años)	Nº años	Tasa media de cambio (m/año) ²³	Categoría
1	Iquique	Cavancha	1974 - 2018	44	-0.74	erosión
2	Iquique	Playa Brava	1978 - 2018	44	-0.01	estable
3	Chañaral	Ba. Chañaral	1974 - 2018	44	-2.04	erosión alta
4	Caldera	Caldera	1964 - 2018	54	0.18	estable
5	Huasco	Ba. Huasco	1964 - 2016	52	-0.78	erosión
6	Pichidangui	Pichidangui	1975 - 2018	43	-0.47	erosión
7	Tongoy	Playa Grande	1964 - 2018	54	-1.84	erosión alta
8	Los Vilos	Playa Amarilla	1964 - 2018	54	-0.60	erosión
9	Bahía La Ligua	Bahía La Ligua	1975 - 2018	43	-1.38	erosión
10	Papudo	Ba. Papudo	1975 - 2018	43	-0.77	erosión

Tabla 12. Tasas de cambio (m/año), según período considerado, para playas de Chile.

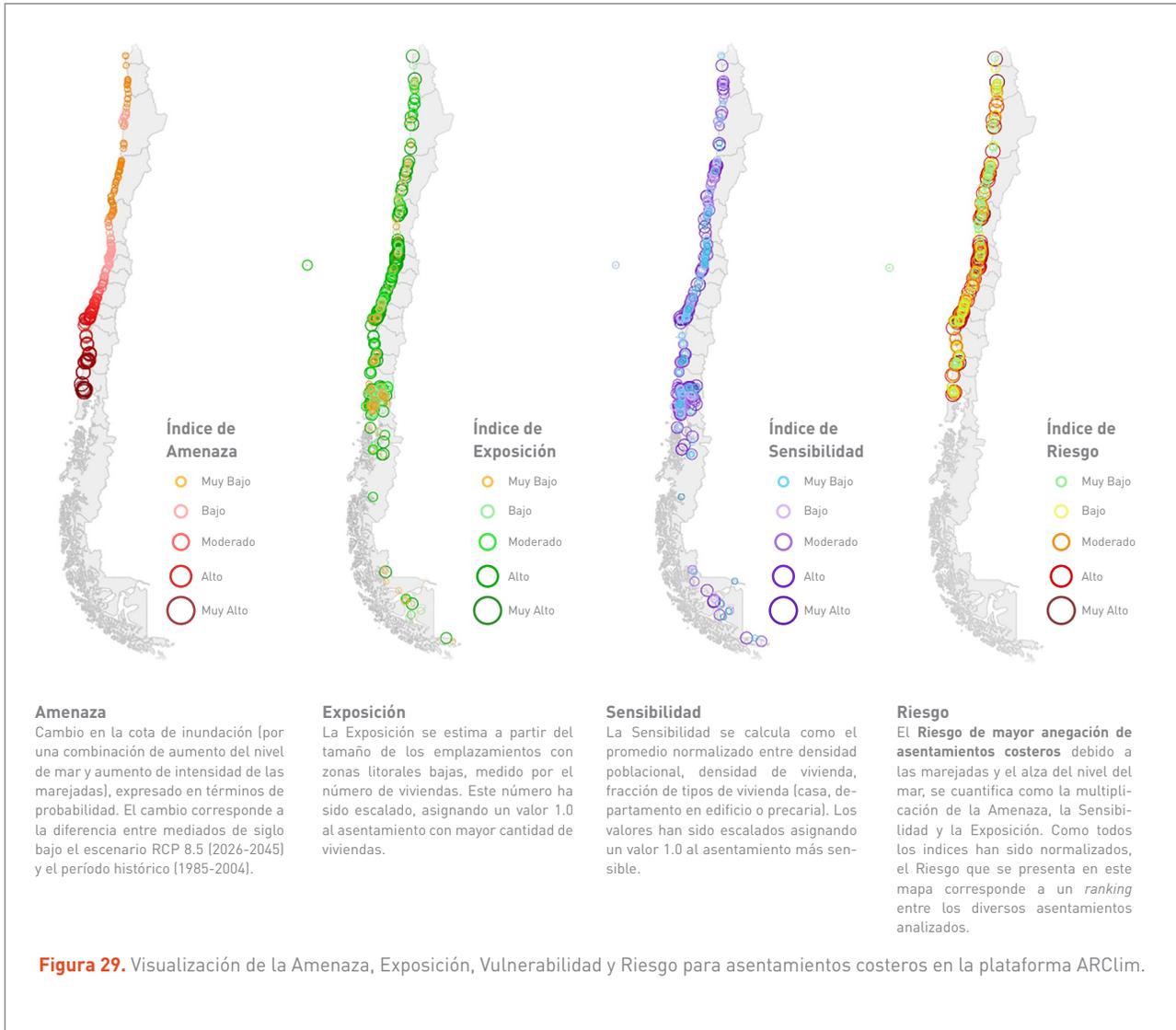
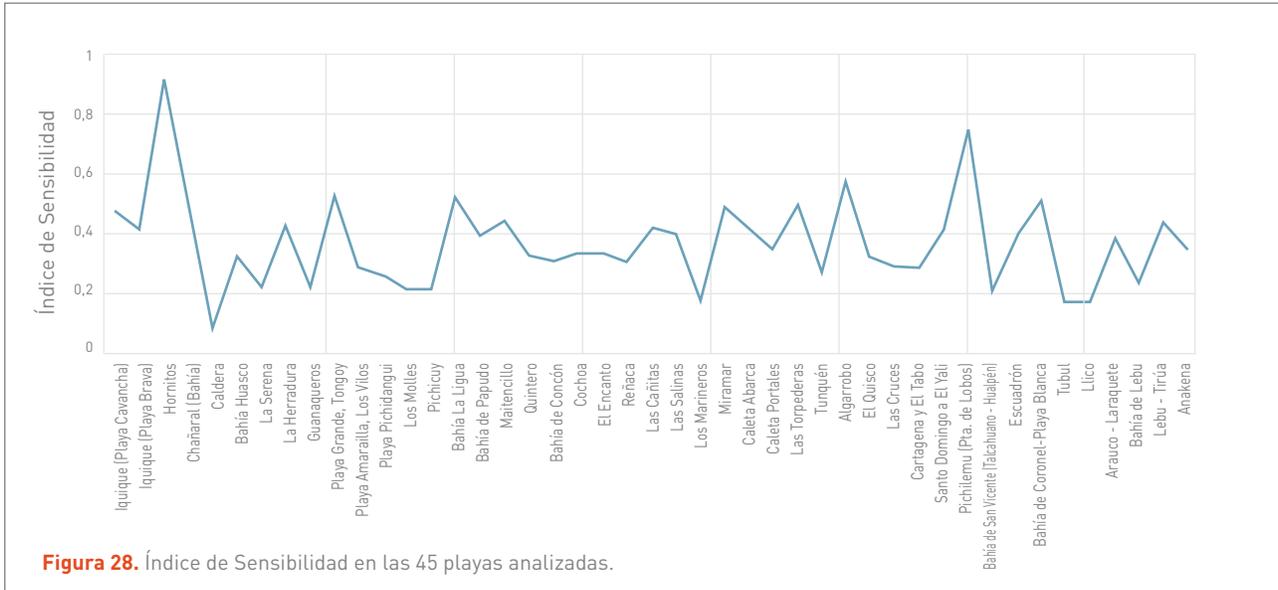


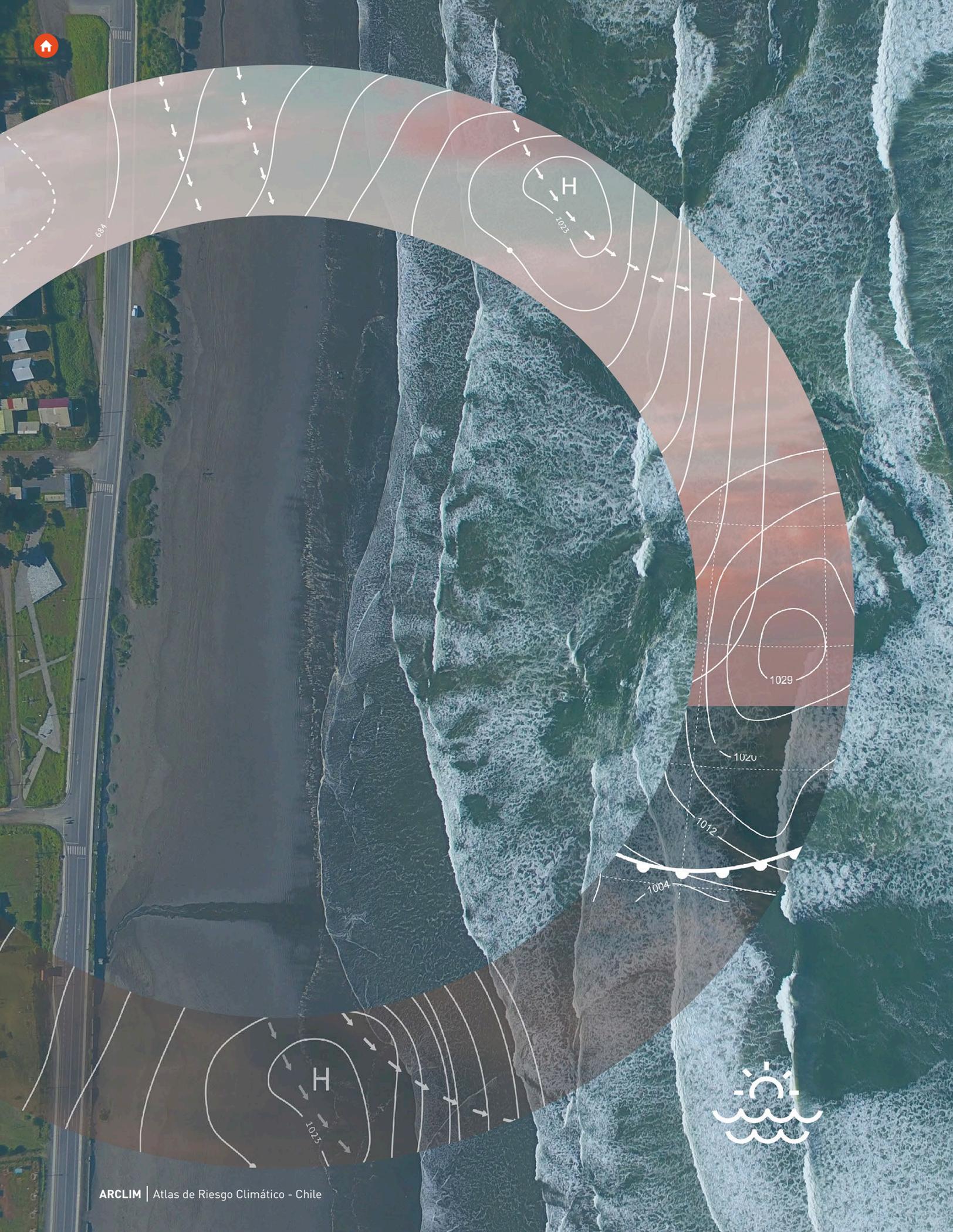
de Valparaíso) y la bahía Huasco (Región del Atacama). Todos estos sistemas corresponden a playas encajadas (bahías), en su mayoría con aportes sedimentarios provenientes de cuencas costeras. Con estado estable se categorizaron las playas de bahía de Caldera y playa Brava en Iquique, con tasas de 0.18 y -0.01 m/año, respectivamente. Es importante destacar que no se encontraron playas con estado de acreción.

4.4 ASENTAMIENTOS COSTEROS

En la **Figura 29** se presenta el cálculo de los índices de Amenazas, Exposición, Sensibilidad y Riesgo para los asentamientos costeros. El Riesgo asociado a la inundación costera se concentra en poblados ubicados en el centro y Norte Chico, siendo algo menor -salvo algunas ciudades grandes- en el Norte Grande y sur del país.

²³ Tasa media calculada mediante el método *Linear Regression Rate* (LRR)-DSAS (USGS).





5

BRECHAS

A continuación, se presentan las brechas para los siguientes sistemas analizados en este informe:

- **Caletas de pesca artesanal.**
- **Puertos estatales.**
- **Playas.**
- **Asentamientos costeros.**

También se incluyen brechas asociadas a otros aspectos del estudio y otros sistemas que podrían verse afectados por las amenazas costeras.

5.1 CALETAS DE PESCA ARTESANAL

En En estudio se podría profundizar en los siguientes aspectos:

- Mejorar las estimaciones de Amenaza, propagando el oleaje de aguas profundas a aguas someras para cada caleta. Esto no fue posible para este estudio, debido a que se requieren de batimetrías locales para cada una de las caletas de pesca artesanal y se estima que propagaciones requieren al menos 300 días de esfuerzo computacional.

- Establecer la importancia relativa de los componentes de los indicadores aquí propuestos, especialmente en relación con la Sensibilidad. En este estudio se consideró que cada componente tiene un peso equivalente, supuesto que sirve como aproximación inicial al problema. Para ello, se debe realizar un trabajo en terreno en, al menos, un conjunto de caletas representativas, realizando entrevistas y/o talleres con los pescadores, de modo de permita establecer la importancia de cada componente.

- Ampliar los indicadores a los efectos sobre los recursos pesqueros, por ejemplo, incorporando factores como la eventual tropicalización de los océanos, alteraciones en la temperatura del agua, pH, oxígeno, nutrientes.

5.2 PUERTOS

En estudio se podría profundizar en los siguientes aspectos:

- **Incorporar los puertos privados.** Esto requiere de la voluntad de las empresas portuarias para disponer de los datos necesarios.



Mejorar las estimaciones a nivel de sitios de atraque.

Esto requiere de esfuerzos computacionales importantes, pues se deben utilizar modelos numéricos que resuelvan la fase para estudiar fenómenos como la agitación.

5.3 PLAYAS

El estudio se podría ampliar a un mayor número de playas, pues contempla 45 de las ~1.200 playas catastradas a nivel nacional (MMA, 2019b, e). En cuanto a la erosión costera, se debe avanzar en incorporar estudios sobre la erosión de acantilados, situación que es relevante en lugares como Rapa Nui (MMA, 2019h).

5.4 ASENTAMIENTOS COSTEROS

Se pueden mejorar las cadenas de impacto, agregando indicadores que tomen en cuenta el equipamiento e infraestructura comunal, como establecimientos de seguridad, salud, educación y servicios descritos en MMA (2019b). También se pueden analizar los impactos en actividades económicas y establecer importancias relativas de los componentes de la Sensibilidad, lo que requiere de un estudio similar al propuesto para los pescadores artesanales.

5.5 MEJORAS AL ANÁLISIS DE AMENAZA

Al igual que en MMA (2019a), el análisis de Vulnerabilidad, efectuado a partir de una cota de inundación que se calcula a partir de diferentes modelos de elevación digital, se basa en un enfoque que combina variables estimadas en forma determinística (marea astronómica), variables estimadas en forma probabilística en otros estudios (marea astronómica) y variables estimadas en este estudio a partir de varios modelos globales climáticos (oleaje y nivel del mar). La naturaleza de estas variables es disímil y debiera ser combinada en forma rigurosa mediante una aproximación probabilística, cuya complejidad dependerá del

sistema en estudio. En el caso de la operatividad de puertos, por ejemplo, debiera aplicarse métodos estocásticos en combinación con proyecciones de cambio climático.

Debido a las deformaciones verticales que ocurren durante el ciclo sísmico y a los tsunamis generados frente a las costas de Chile, se recomienda analizar el problema de inundación costera bajo un enfoque multi-amenaza (Winckler, 2020).

Se podría extender el estudio a finales de siglo, cuestión que requiere generar nuevos escenarios (proceso que, actualmente, este equipo está desarrollando).

Por último, una de las grandes barreras existentes para estudiar los efectos del cambio climático antropogénico en el litoral del país es la necesidad de contar con topografía o modelos de elevación digital detallados de la zona costera que permitan determinar una línea de costa real para el litoral, especialmente en el extremo sur-austral del país donde no se han considerado las fluctuaciones de la marea, sino que se ha dibujado una línea de costa sin criterios estandarizados a partir de una fotografía, lo que deriva en diferencias que pueden ser de varias decenas de metros (**Figura 30**).

5.6 OTROS IMPACTOS ASOCIADOS A AMENAZAS FÍSICAS

Para cuantificar de mejor forma el Riesgo en la ocupación costera de nuestro país, en el futuro se deberían analizar otras cadenas de impacto que no pudieron ser incluidas en este estudio, debido a las restricciones de tiempo, falta de antecedentes o la necesidad de levantar estudios que aún no se han realizado. En la **Tabla 13** y la **Tabla 14** se presentan las brechas de los impactos en sistemas naturales y humanos no analizados en este informe.

A continuación, se describen propuestas de estudio que podrían cubrir algunas brechas detectadas en el presente estudio.

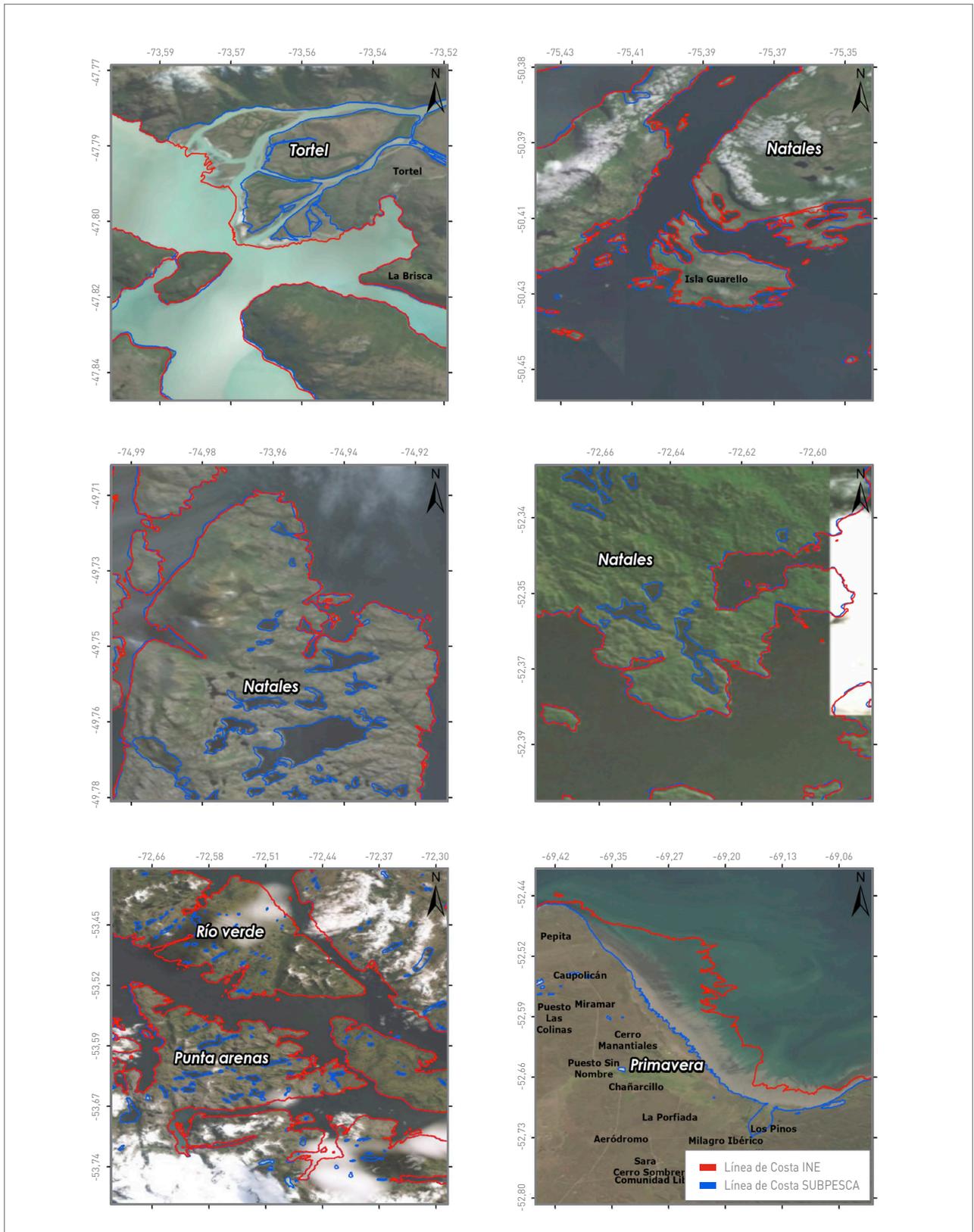


Figura 30. Ejemplo de las diferencias y mal ajuste al borde costero de las líneas de costa de SUBPESCA e INE en la zona sur-austral del país. Fuente: MMA (2019b).



Impacto	Brecha
Cambios en la dinámica de humedales	<ul style="list-style-type: none"> • Requerimiento de tiempo. • Falta de información sistemática que permita analizar el comportamiento temporal de los humedales. • Mejoras en el inventario de humedales a escala nacional (se cuenta con un inventario preliminar actualizado a 2019).
Cambios en la dinámica de estuarios	<ul style="list-style-type: none"> • Experiencia del equipo es insuficiente. • Falta de información sistemática (este equipo conoce someramente los estudios disponibles).
Cambios en la dinámica de deltas	<ul style="list-style-type: none"> • Experiencia del equipo es insuficiente. • Falta de información sistemática. • No hay deltas activos en las costas de Chile expuestos al océano Pacífico y hay deltas menores en la zona de los fiordos que no ha concitado el interés científico. Este impacto es relevante en grandes deltas en otros países (e.g. Mississippi, Ebro, Nilo).
Cambios en la dinámica de dunas	<ul style="list-style-type: none"> • Requerimiento de tiempo. • Falta de información sistemática (se cuenta con un inventario preliminar actualizado a 2019).
Erosión de acantilados	<ul style="list-style-type: none"> • Requerimiento de tiempo. • Falta de información sistemática (no se cuenta con un inventario a nivel nacional).
Afectaciones de zonas con patrimonio natural	<ul style="list-style-type: none"> • Necesidad de cruce de información generada por este equipo (Exposición) con equipos (biología/ecología). • Falta de información sistemática. • Requerimiento de tiempo.
<p>MMA (2019g) efectúa un análisis preliminar sobre algunos humedales (Exposición y Vulnerabilidad). Para calcular Riesgo hace falta afinar el balance hídrico a nivel de subcuencas que tributan a cada humedal.</p> <p>Tabla 13. Identificación de Brechas asociadas a sistemas naturales.</p>	

Impacto	Brecha
Daños sobre obras portuarias ⁽¹⁾	<ul style="list-style-type: none"> • Requerimiento de tiempo.
Daños sobre obras costeras ⁽¹⁾	<ul style="list-style-type: none"> • Requerimiento de tiempo.
Daños sobre obras industriales ⁽¹⁾	<ul style="list-style-type: none"> • Requerimiento de tiempo.
Intrusión salina en acuíferos	<ul style="list-style-type: none"> • Necesidad de cruce de información generada por este equipo (nivel del mar) con equipos (hidrología, agricultura). • Requerimiento de tiempo.
Afectaciones de zonas con patrimonio cultural	<ul style="list-style-type: none"> • Necesidad de cruce de información generada por este equipo con equipos (patrimonio, antropología, etc.). • Falta de información sistemática. • Requerimiento de tiempo.
<p>⁽¹⁾ Este tema es tratado en forma preliminar (no a modo de mapas) en MMA (2019f).</p> <p>Tabla 14. Identificación de brechas asociadas a sistemas humanos.</p>	

5.6.1 INFRAESTRUCTURA ENERGÉTICA

En MMA (2019b), se levantó un primer catastro de las centrales generadoras de electricidad, estaciones y subestaciones, almacenamiento de combustibles que se encuentran en los primeros 10 m sobre el nivel del mar. Sin embargo, para comprender los efectos del cambio climático antropogénico sobre la matriz energética nacional frente a las amenazas costeras, se podrían realizar los siguientes estudios:

- Comprender cómo los cambios futuros de oleaje y nivel del mar afectarán diferentes estructuras costeras (como los sistemas de captación y vertido) y los puertos que sirven de importación o exportación de productos utilizados en el proceso de generación de energía (carbón, GNL, entre otros). Esto debería ser tomado en cuenta en los diseños de este tipo de instalaciones.
- Incluir los efectos de acidificación del océano, cambios en la temperatura para evaluar cambios en las tasas de acumulación de *fouling*, corrosión, entre otros factores.

5.6.2 SISTEMA NATURAL

MMA (2019b) levantó información sobre los emplazamientos de humedales costeros y dunas, estudiándose algunos humedales costeros en mayor profundidad, pero en un número insuficiente como para analizar el Riesgo a lo largo de todo el país. Además, solo se ha evaluado los cambios producto del nivel del mar y oleaje, faltando analizar factores como el cambio de la disponibilidad hídrica y cambios en la temperatura ambiente, los que tienen consecuencias sobre la ecología de estos sistemas.

5.6.3 REDES DE COMUNICACIÓN Y TRANSPORTE

MMA (2019b) identificó un número importante de infraestructura vial que se encuentra en el área expuesta bajo los 10 msnm (**Figura 31**), esto junto a los riesgos que tienen las redes de comunicaciones y otros sistemas (por ejemplo emplazamientos de aeródromos y terminales de buses), podrían ser analizados en un futuro.



5.7 OTROS IMPACTOS ASOCIADOS A AMENAZAS FISICOQUÍMICAS

Otros posibles impactos en la costa asociados a parámetros fisicoquímico (e.g. temperatura, acidificación) han sido estudiados en forma parcial, debido a la falta de re-

gistros en el litoral (**Tabla 15**). Este equipo podría aportar con el análisis de este tipo de parámetros²⁴ y proporcionar información para evaluar los cambios en la biota (posible tropicalización de los océanos, favoreciendo el ingreso de especies invasoras, con efectos en la pesca y la acuicultura, salmonicultura y miticultura).

Sector	Comentario
Acuicultura	Las marejadas y los cambios en el nivel del mar constituyen Amenazas para las operaciones e infraestructura de las caletas. Estas se analizan en forma preliminar en la nueva versión del Plan Nacional de Adaptación de Pesca y Acuicultura (Comité Científico COP25, 2019), pero podrían ser analizadas con mayor detalle para caletas ubicadas en las costas abiertas de Chile.
Asentamientos humanos	Existe un vínculo preliminar con el equipo de Asentamientos Costeros para aplicar una metodología multi-riesgo a un prototipo en Viña de Mar. Esta se desarrolla en conjunto con la SECPLA. El prototipo contempla inundaciones costeras, incendios y remociones en masa.
Ciudades	Se podrían evaluar el Riesgo de inundación para ciudades costeras, a partir de estudios avanzados desarrollados para el MMA (2019c).
Energía	Existe un vínculo preliminar con el equipo de Energía. Se han identificado, en forma preliminar, los siguientes impactos del cambio climático (oceánico) en la infraestructura eléctrica: <ul style="list-style-type: none"> • Cierres de puertos asociados a las marejadas (estudiado sólo en nueve puertos estatales; requeriría de estudios específicos en plantas). • Daño estructural producto de la combinación de marejadas y nivel del mar (estudiado sólo en nueve puertos estatales; requeriría de estudios específicos en plantas). • Problemas operacionales en la captación de sistemas de refrigeración de termoeléctricas debido al <i>fouling</i>. Esto depende de la temperatura y salinidad del agua. (No se ha abordado). • Problemas operacionales en tuberías de sistemas de refrigeración, debidos al <i>fouling</i> que aumenta la rugosidad. Esto depende de la temperatura y salinidad del agua. (No se ha abordado). • Impactos sistémicos derivados de la falla de otros sistemas que nutren al eléctrico, como puertos graneleros, sistemas de tratamiento de agua. (No se ha abordado). • Impactos en la infraestructura costera asociada al sistema eléctrico producto de la inundación o erosión costera. (No se ha abordado).
Hidrología	Se identifican brechas en la evaluación del impacto: <ul style="list-style-type: none"> • del aumento en el nivel del mar y marejadas en las desembocaduras. • del aumento en el nivel del mar en la salinización de acuíferos.
Minería	Se identifica la presencia de fundiciones, transporte y relaves en la costa. Se han registrado episodios (Chañaral) donde los impactos de crecidas hidrológicas en combinación con procesos geofísicos (tsunamis) han generado impactos ambientales severos. Asimismo, hay instalaciones (e.g. Codelco Ventanas) ubicadas en zonas bajas potencialmente afectas a Amenazas costeras.
Turismo	Se identifican brechas en la evaluación del impacto de la pérdida de playas por erosión, que ha sido evaluada en forma preliminar para las playas expuestas al océano Pacífico y con detalle para algunas playas de la Bahía de Valparaíso (MMA, 2019e). Se debiera incorporar el número de atractivos turísticos que podrían verse afectados.

Tabla 15. Brechas de impactos asociados a Amenazas fisicoquímicas.

24 Existe información de temperatura; una serie larga de pH sólo está disponible en la Región del Biobío.



6

BIBLIO- GRAFÍAS

Albrecht, F., & Shaffer, G. (2016). *Regional Sea-Level Change along the Chilean Coast in the 21st Century*. Journal of Coastal Research, 32(6), 1322–1332. <http://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-15-00192>.

Araujo, R.; G. Silva; D. Freitas & A. Klein. (2009). *Georreferenciamento de fotografías aéreas e análise da variação da linha de costa*. Red Iberoamericana de Riesgos Geológicos Litorales. En: Alcántara-Carrió, J.; Correa, I.; Isla, F.; Alvarado, M.; Klein, A.; Cabrera, J. & R. Barlow Eds. "Métodos en teledetección aplicada a la prevención de riesgos naturales en el litoral, 325 pp.

Beyá, J., Álvarez, M., Gallardo, A., Hidalgo, H., Aguirre, C., Valdivia, J., Parra, C., Méndez, L., Contreras, C., Winkler, P., and Molina, M. (2016). *Atlas de Oleaje de Chile*. ISBN: 978-956-368-194-9. Valparaíso, Chile.

Beyá, J., Álvarez, M., Gallardo, A., Hidalgo, H., & Winkler, P. (2017). *Generation and validation of the Chilean Wave Atlas database*. Ocean Modelling, 116, 16-32.

Comité Científico COP25 (2019). *Propuestas para la actualización del Plan de Adaptación en Pesca y Acuicultura*.

Contreras-López M, Torres R & Cevallos J (2017). *Tendencias del Nivel Medio del Mar en el litoral del Pacífico Sur Oriental*. En Botello A, Villanueva S, Gutiérrez J y Rojas JL (eds.) Vulnerabilidad de las zonas costeras de Latinoamérica al cambio climático, Editorial Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT) - Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)- Universidad Autónoma de Campeche (UAC), 165-176.

Himmelstoss, E.A., (2009). *DSAS 4.0 Installation Instructions and User Guide*. In: Thieler, E.R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L., and Ergul, Ayhan. 2009 Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 — An ArcGIS extension for calculating shoreline change: U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278. *updated for version 4.3.

Iguait F, Breuer W, Contreras-López M & Martínez C (2019) *Efectos del cambio climático en la zona urbana turística y costera de Viña del Mar: Levantamiento de daños para una inundación por marejadas y percepción de seguridad*. Revista 180, 44: 120-133. DOI: 10.32995/rev180. Num-44. (2019). art-626.



- INE (2018) *Censo de Población y Vivienda 2017*, Instituto Nacional de Estadística, Santiago.
- INE (2019) *Ciudades, Pueblos, Aldeas y Caseríos 2017*, Instituto Nacional de Estadística, Santiago.
- Marítimo Portuario Consultora Ltda. (2017). *Análisis de la Capacidad Operativa Portuaria Nacional y Requerimientos para Maniobras de Atraque y Desatraque. Informe final*. Preparado para el Sistema Empresas Públicas (SEP)
- 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.
- MMA (2019a). *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., Ministerio del Medio Ambiente, Santiago, Chile.
- MMA (2019b) *Volumen 2: Exposición de zonas costeras, en "Determinación del Riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile"*. 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. para el Ministerio del Medio Ambiente.
- MMA (2019c). *Volumen 3: Vulnerabilidad de sistemas humanos y naturales, 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., Ministerio del Medio Ambiente, Santiago, Chile.
- MMA (2019d). *Volumen 7 Vulnerabilidad y Riesgo en Caletas Pesqueras, 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., Ministerio del Medio Ambiente, Santiago, Chile.
- MMA (2019e). *Volumen 4: Vulnerabilidad y riesgos en playas, en "Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile"*. Documento preparado por: Winckler, P.; Contreras-López, M.; Vicuña, S.; Larraguibel, C.; Mora, J.; Esparza, C.; Salcedo, J.; Gelcich, S.; Fariña, J. M.; Martínez, C.; Agredano, R.; Melo, O.; Bambach, N.; Morales, D., Marinkovic, C.; Pica, A., Ministerio del Medio Ambiente, Santiago, Chile.
- MMA (2019f). *Volumen 5: Vulnerabilidad y riesgo en puertos, 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., Ministerio del Medio Ambiente, Santiago, Chile.
- MMA (2019g). *Volumen 6: Vulnerabilidad en humedales, 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.
- MMA (2019h). *Volumen 8: Vulnerabilidad en Rapa Nui y Archipiélago Juan Fernández, 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.
- Montecino, H. D., Ferreira, V. G., Cuevas, A., Cabrera, L. C., Báez, J. C. S., & De Freitas, S. R. (2017). *Vertical deformation and sea level changes in the coast of Chile by satellite altimetry and tide gauges*. *International Journal of Remote Sensing*, 38(24), 7551-7565.



PPEE (1999) ROM 3.1-99. *Recomendaciones para el "Proyecto de la Configuración Marítima de los Puertos; Canales de Acceso y Áreas de Flotación"*. (ROM 3.1).

Rangel-Buitrago, N., Anfuso, G., Williams, A. (2015). *Coastal erosion problems along the Caribbean Coast of Colombia*. *Ocean & Coastal Management*, 114: 120-144.

Schneider W, Donoso D, Garcés-Vargas J, Escribano R. (2017). *Water-column cooling and sea surface salinity increase in the upwelling region off central-south Chile driven by a poleward displacement of the South Pacific High*. *Prog Oceanogr* 151: 38-48. doi: 10.1016/j.pcean.2016.11.004.

SHOA (2014) Derrotero de la Costa de Chile. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada. Volúmenes 1 a 4, Valparaíso.

Thieler, E.R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L., Ayhan, E. (2009) *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 — An ArcGIS extension for calculating shoreline change: U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278*. *current version 4.3.

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.

Winckler, P (2020), Contreras-López M, Castilla JC (2019) *Impactos y Adaptación en Océanos y Zonas Costeras*. En: Castilla, J.C., Meza, F., Vicuña, S., Marquet, P. A., Montero, J.-P. (eds.). *Cambio Climático en Chile: Ciencia, Mitigación y Adaptación*. Ediciones UC. Santiago, 423 – 457.

Winckler, P. (2020), *Towards a multi-hazard analysis of infrastructure in a seismic coast subjected to climate change, with a focus on the Chilean coastline*. *Proceedings of the 8th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures (ISHS2020)*, 12-15 May 2020, Santiago, Chile. (Indexado SCOPUS).



7

ANEXO: RESULTADOS COMPLEMENTARIOS AL ESTUDIO DE PLAYAS

7.1 ANÁLISIS GENERAL DE CAMBIOS HISTÓRICOS DE LA LÍNEA LITORAL

Este anexo complementa los resultados obtenidos en el estudio del MMA (2019d). La **Figura 32** indica la localización de las 10 playas adicionales analizadas, las cuales se encuentran en cuatro regiones del norte y centro del país (regiones de Tarapacá y de Valparaíso). Siguiendo la metodología de MMA (2019d), en este estudio se utiliza el

método *Linear Regression Rate* (LRR) para calcular la tasa de erosión de la línea litoral. Dado que el cálculo de la erosión se realizó, principalmente, sobre la base de fotografías aéreas históricas disponibles, los períodos de análisis difieren (**Tabla 16**), siendo el más largo (1954 – 2018) de 54 años y el más corto (1978 – 2018) de 40 años. No obstante, se contó con una serie histórica relativamente homogénea para comparar el comportamiento de las playas en similar período de tiempo, como son los casos de Caldera, Playa Amarilla (Los Vilos) y Playa Grande (Tongoy), que tuvieron la serie histórica más extensa (54 años). Con el fin de extraer líneas litorales recientes, la base de datos de fotogra-

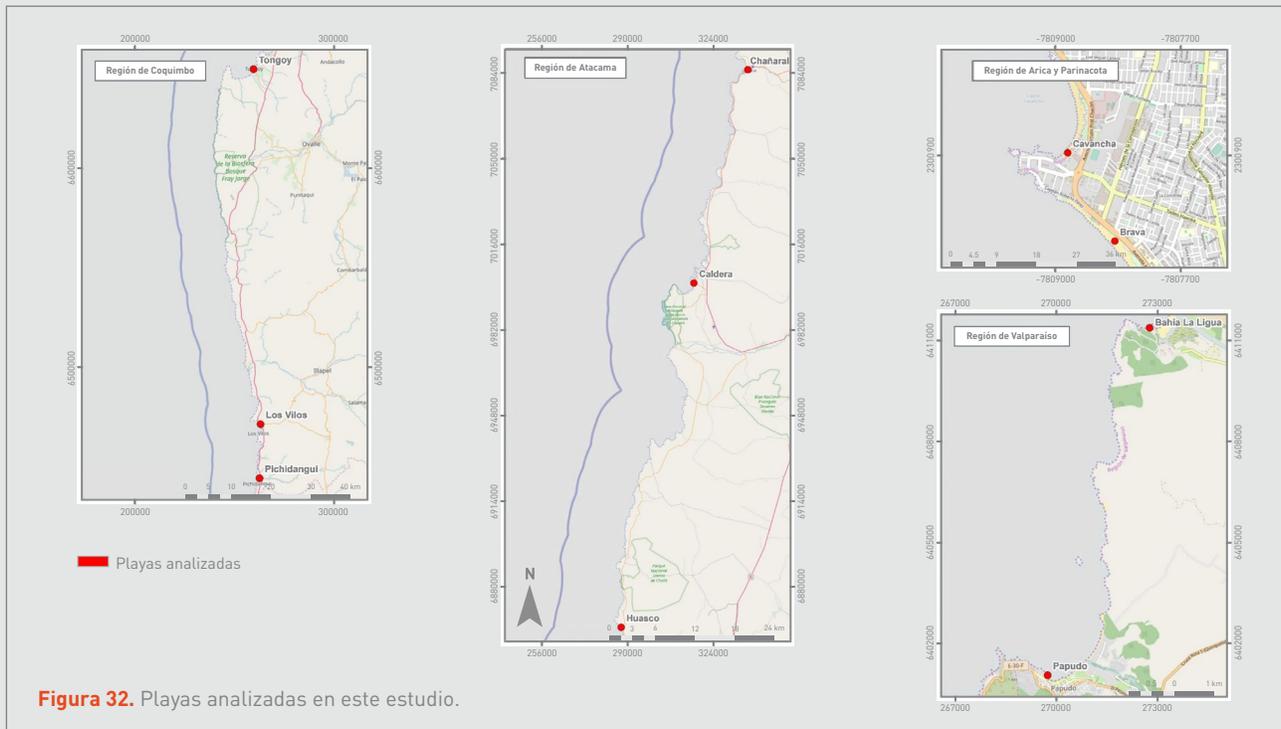


Figura 32. Playas analizadas en este estudio.

fías aéreas se complementó con planos de borde costero elaborados por el SHOA e imágenes satelitales Google Earth Pro, en su mayoría, correspondientes al año 2018. Se exceptúa el caso de bahía Huasco, playa para la cual sólo se pudo contar con imágenes de 2016.

La **Tabla 16** indica la tasa de erosión calculada para las 10 playas analizadas. De acuerdo a estos resultados, ocho presentan erosión y erosión alta, lo cual corresponde al

80% del total. Las playas con erosión alta son Chañaral (Región de Atacama) y Playa Grande de Tongoy (Región de Coquimbo). Otras playas con altas tasas de erosión son las bahías de La Ligua y de Papudo (Región de Valparaíso) y bahía Huasco (Región del Atacama). Todos estos sistemas corresponden a playas encajadas (bahías), en su mayoría, con aportes sedimentarios provenientes de cuencas costeras. Con estado estable se categorizaron dos playas (20% del total). Estas son bahía de Caldera y Playa Brava

Nº	Lugar	Playa	Periodo (años)	Nº años	Tasa media de cambio (m/año)*	Categoría
1	Iquique	Cavancha	1974 - 2018	44	-0.74	erosión
2	Iquique	Playa Brava	1978 - 2018	44	-0.01	estable
3	Chañaral	Ba. Chañaral	1974 - 2018	44	-2.04	erosión alta
4	Caldera	Caldera	1964 - 2018	54	0.18	estable
5	Huasco	Ba. Huasco	1964 - 2016	52	-0.78	erosión
6	Pichidangui	Pichidangui	1975 - 2018	43	-0.47	erosión
7	Tongoy	Playa Grande	1964 - 2018	54	-1.84	erosión alta
8	Los Vilos	Playa Amarilla	1964 - 2018	54	-0.60	erosión
9	Bahía La Ligua	Bahía La Ligua	1975 - 2018	43	-1.38	erosión
10	Papudo	Ba. Papudo	1975 - 2018	43	-0.77	erosión

* Tasa media calculada mediante el método *Linear Regression Rate* (LRR)-DSAS (USGS).

Tabla 16. Tasas de cambio (m/año), según período considerado, para playas de Chile.

en Iquique, con tasas de 0.18 y -0.01 m/año, respectivamente. No se encontraron playas con estado de acreción.

La **Figura 33** sintetiza el comportamiento de las tasas de cambio de la línea litoral para las playas analizadas, donde se destacan las categorías de erosión y erosión alta (color rojo) y estado estable (amarillo). En la **Tabla 17** se presenta la distribución de las tasas de cambio de la línea litoral en el contexto de las categorías de cambio (erosión, erosión alta y estabilidad). Aquí se destaca una mayor distribución de tasas de cambio en el rango entre -0.2 y -1.5 m/año, es decir, en el rango de erosión. Este rango concentró al 60% del total de playas.

La distribución espacial de los cambios asociados a la línea litoral se presenta en las **Figuras 34, 35, 36 y 37**. Las zonas con erosión alta (color rojo) se localizan en playas de la Región de Atacama y de Coquimbo (Chañaral y Playa Grande de Tongoy).

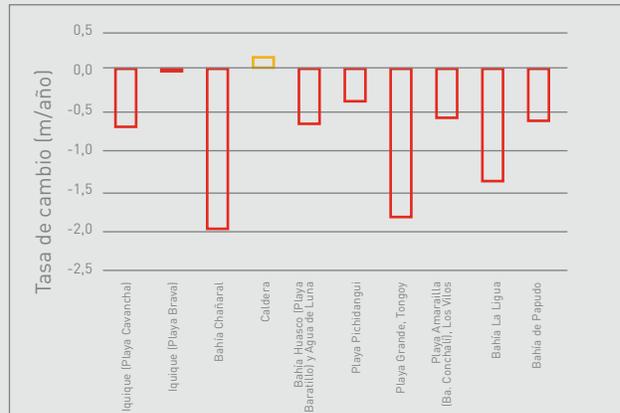


Figura 33. Estado de erosión, estabilidad o acreción para las playas analizadas.

Categoría	Nº	%
Erosión alta	2	20
Erosión	6	60
Estado estable	2	20
Acreción	0	0
Total	10	100

Tabla 17. Categorías de erosión/acreción para playas de Chile.



Figura 34. Cambios en la línea litoral para playas de la Región de Tarapacá.

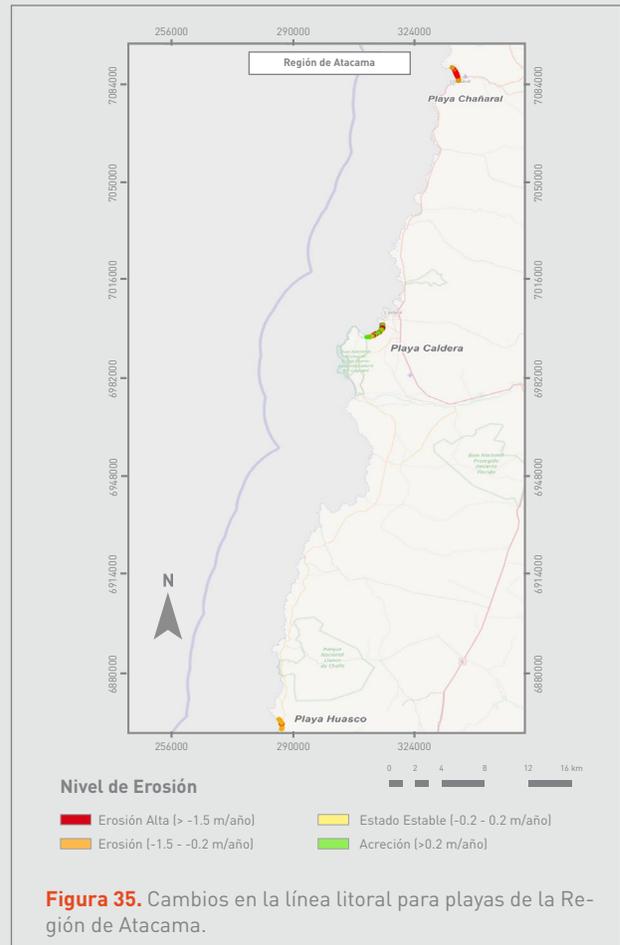
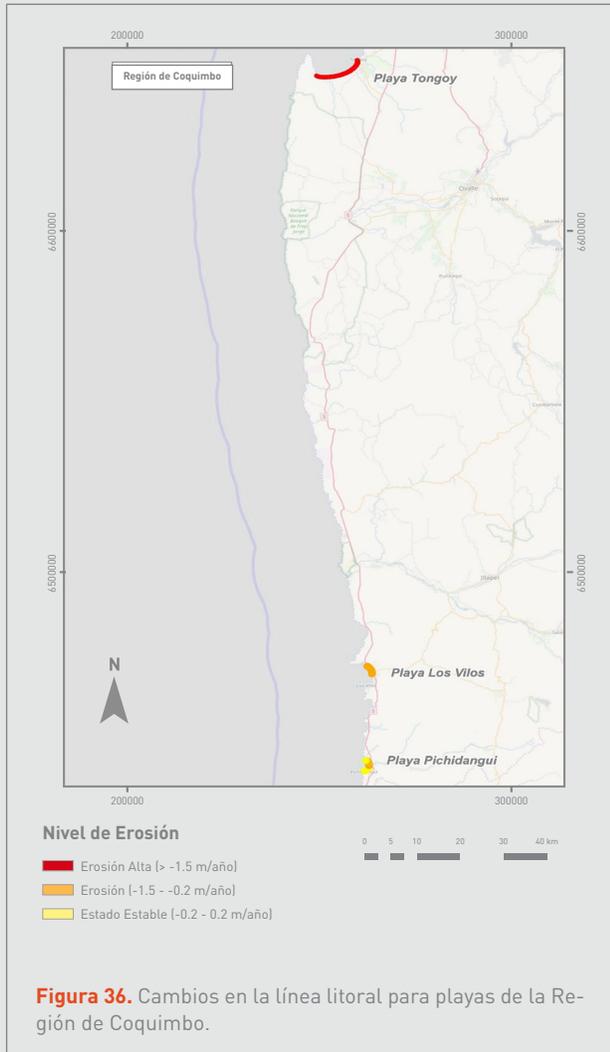


Figura 35. Cambios en la línea litoral para playas de la Región de Atacama.



7.2 ANÁLISIS DE CAMBIOS HISTÓRICOS DE LA LÍNEA LITORAL POR PLAYA

7.2.1 REGIÓN DE TARAPACÁ

Playa Cavancha (Iquique)

Esta playa es encajada, tiene 940 m de largo, conformada por arenas claras y su tipo de zona de rompiente es reflectiva de baja energía, con presencia de *beach cups* de longitud de onda de 21 m en promedio, que generan una

topografía rítmica. No presenta drenaje local por lo cual sus aportes sedimentarios provienen de zonas alejadas. Se trata de una playa urbana, con importante afluencia de turistas durante todo el año. Para el período analizado (1974 - 2018), playa Cavancha registra una tasa de cambio de -0,74 m/año, clasificándose como “erosión” (Figura 38). De acuerdo con la Figura, los niveles de erosión (-0.2 y -1.5 m/año) se distribuyen sistemáticamente a lo largo del sistema costero.

Playa Brava

Playa brava es rectilínea, de 2,7 km de largo y ancho reducido (hasta 110 m), con una zona de rompiente intermedia-reflectiva y arenas claras. Presenta beach cusps con

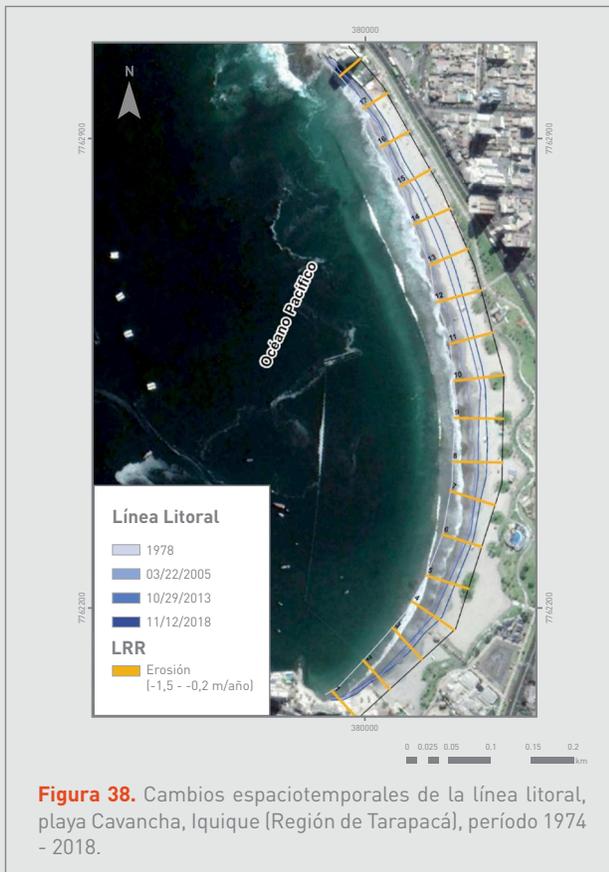


Figura 38. Cambios espaciotemporales de la línea litoral, playa Cavancha, Iquique (Región de Tarapacá), período 1974 - 2018.

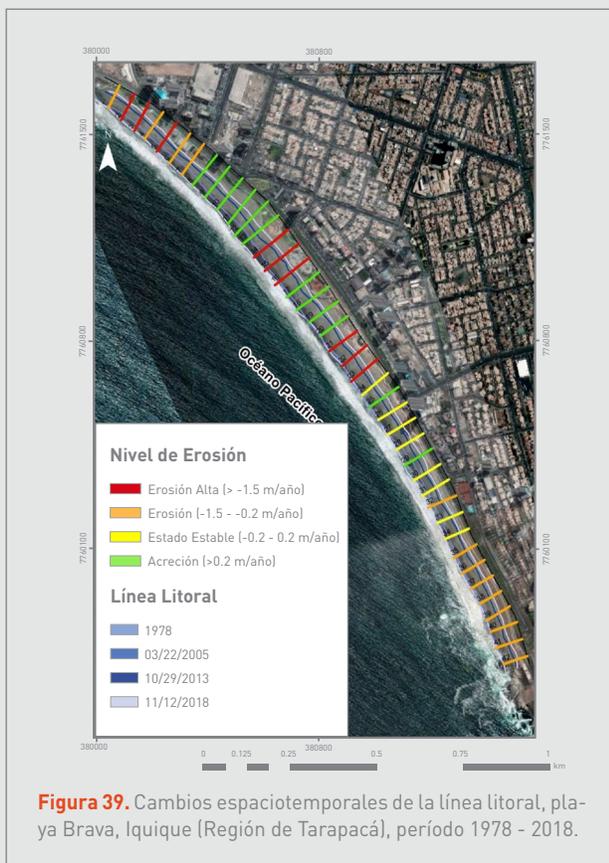


Figura 39. Cambios espaciotemporales de la línea litoral, playa Brava, Iquique (Región de Tarapacá), período 1978 - 2018.

longitudes de onda entre 40 y 87 m, condición que se registra a lo largo de toda la playa. Para el período analizado (1978 - 2018), playa Cavancha tiene una tasa de cambio de $-0,01$ m/año, clasificándose como “estado estable” (Figura 39). De acuerdo con la Figura 33, la zona norte de la playa alterna sectores de erosión y acreción, mientras que en la zona sur predomina el estado estable y la erosión. Por tratarse de una playa urbana, la distribución espacial de la erosión hace que esta playa se encuentre en una condición de fragilidad, pudiendo avanzar hacia estados erosivos, dada la tendencia de la tasa media.

7.2.2 REGIÓN DE ATACAMA

Bahía Chañaral

Bahía Chañaral tiene una forma en planta elíptica, de 5,1 km de largo. La zona de rompiente es intermedia reflectiva, con beach cusps cuya longitud de onda fluctúa entre 20 y 224 m. En la zona sur de la bahía desemboca el río Salado, aportando sedimentos locales. Presenta extensos depósitos eólicos y dunas barjanes en la zona sur. En la zona sur de la bahía, también, se emplaza la ciudad de Chañaral, por lo cual se genera presión urbana. Sin embargo, al norte de la bahía, la playa registra un mayor grado de naturalidad. Para el período analizado (1974 - 2018), el litoral arenoso de la bahía de Chañaral muestra una tasa de cambio de $-2,04$ m/año, clasificándose como “erosión alta”, siendo la tasa más alta registrada en las playas analizadas (Figura 40). De acuerdo con la Figura 33, se observa una mayor distribución espacial del rango de “erosión alta” en las zonas norte y media de la bahía, mientras que en la zona sur predomina el nivel de “erosión”.

Bahía Caldera

Bahía Caldera tiene forma elíptica de 6,1 km de largo y compuesta de arenas claras. En el centro de la bahía aflora un promontorio rocoso (sector Rocas Negras) y donde desembocan numerosas quebradas intermitentes. Destacan playas como Bahía Inglesa y Las Machas, de alto interés turístico. La zona de rompiente es reflectiva,



Figura 40. Cambios espaciotemporales de la línea litoral, Caldera (Región de Atacama), período 1964 - 2018.

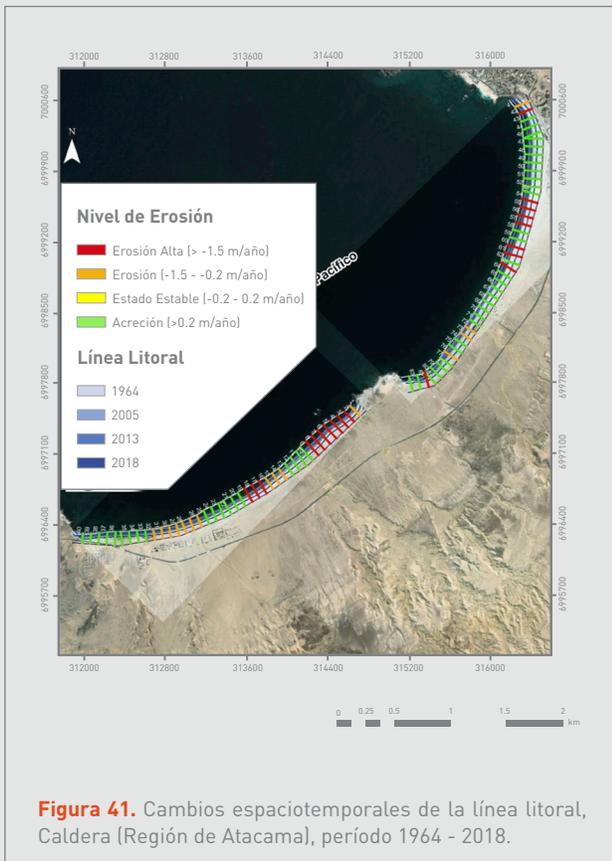


Figura 41. Cambios espaciotemporales de la línea litoral, Caldera (Región de Atacama), período 1964 - 2018.

con escaso ancho de zona de surf (del orden de los 20 m). En ella se encuentran representados todos los rangos de cambio en la línea litoral, desde la acreción a la erosión alta. Sin embargo, predomina la acreción, intercalada con áreas de erosión y erosión alta. La tasa media de cambio, que indica “estado estable”, hace que esta playa tenga gran Sensibilidad para pasar a un estado erosivo. Para el período analizado (1964 - 2018), el litoral arenoso de la bahía de Chañaral registra una tasa de cambio de 0,18 m/año, clasificándose como “estado estable” (Figura 41).

Bahía Huasco (playa Baratillo y Agua de Luna)

Bahía Huasco tiene forma en planta elíptica y largo de 3,5 km. Su zona de rompiente es intermedia-reflectiva, con desarrollo de *beach cusp* de hasta 140 m de longitud de onda. En la bahía de desarrolla un extenso campo dunar, destacando dunas parabólicas y upsiloidales. La bahía cuenta con varios aportes sedimentarios de quebradas locales. Para el período analizado (1964 - 2016), el litoral arenoso de la bahía registra una tasa de cambio de -0,78 m/año, clasificándose como “erosión” (Figura 42).

7.2.3 REGIÓN DE COQUIMBO

Playa Pichidangui

Playa Pichidangui es una playa encajada, marcada en su zona norte por la desembocadura del río Quilimarí (cuenca costera), el cual forma un importante humedal costero. En la zona norte de la bahía se forma un extenso campo dunar expuesto a los vientos del S y SW, lo cual favorece el desarrollo de dunas parabólicas. En las zonas central y sur de la bahía, la playa interactúa con otros humedales formados por drenaje local y campos dunares fragmentados por uso residencial. La playa Pichidangui tiene un largo de 3 km, arenas claras y una zona de rompiente que aumenta en ancho de sur a norte, pasando de intermedia reflectiva en la zona sur a intermedia disipativa en la zona norte. Para el período analizado (1975 - 2018), playa Pichidangui registra una tasa de cambio de -0,47 m/año, clasificándose como “erosión” (Figura 43).



Figura 42. Cambios espaciotemporales de la línea litoral, bahía de Huasco (Región de Atacama), período 1964 - 2016.

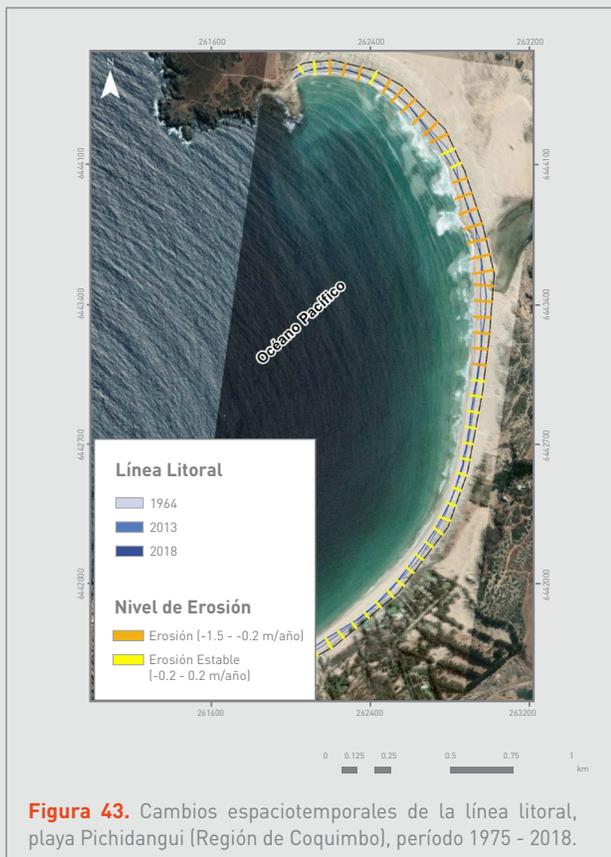


Figura 43. Cambios espaciotemporales de la línea litoral, playa Pichidangui (Región de Coquimbo), período 1975 - 2018.

Playa Tongoy (bahía de Tongoy)

Playa Tongoy está inserta en una de las más extensas bahías del país, donde destacan las playas Grande, Tongoy y Socos. Es una playa encajada, de 12 km de largo y compuesta de arenas claras. Tiene numerosas quebradas y esteros locales; estos últimos forman un conjunto de tres humedales actualmente protegidos como Santuario de la Naturaleza (Salinas Chica, Grande y Pachingo). El litoral arenoso de la bahía tiene una topografía rítmica, debido al tipo de zona de rompiente reflectiva de baja energía, con presencia de *rip current* y *beach cusps* de hasta 30 m de longitud de onda. Para el período analizado (1964 - 2018), playa Tongoy registra una tasa de cambio de $-1,84$ m/año, clasificándose como “erosión alta”, estado que se distribuye sistemáticamente a lo largo de toda la playa (Figura 44).

Playa Amarilla (bahía Conchalí), Los Vilos

Playa Amarilla es una playa encajada de 2,7 km de largo y formada por arenas claras. En su extremo sur se desarrolla el humedal Laguna Conchalí (Santuario de la Naturaleza), formado por el estero Conchalí. En las zonas norte y centro de la bahía de Conchalí hay un extenso campo dunar formado por antedunas monticulares, parabólicas y transgresivas. La zona de rompiente de la playa es intermedia reflectiva, con desarrollo de *rip currents* y *beach cusps* de hasta 170 m de longitud de onda. La playa presenta sólo un estado de cambio predominante, registrándose “erosión” a lo largo de todo el litoral arenoso de la bahía. Para el período analizado (1964 - 2018), Playa Amarilla registra una tasa de cambio de $-0,60$ m/año, clasificándose como “erosión” (Figura 45).

7.2.4 REGIÓN DE VALPARAÍSO

• Bahía La Ligua (playa Longotoma)

Bahía La Ligua es una playa elíptica; en su zona sur desembocan los ríos Petorca y La Ligua, formando un extenso estuario barrera y el humedal Salinas de Pullally. El litoral arenoso tiene un largo de 5,8 km, incluye las playas de Pichicuy y Longotoma, y se compone de arenas claras. La

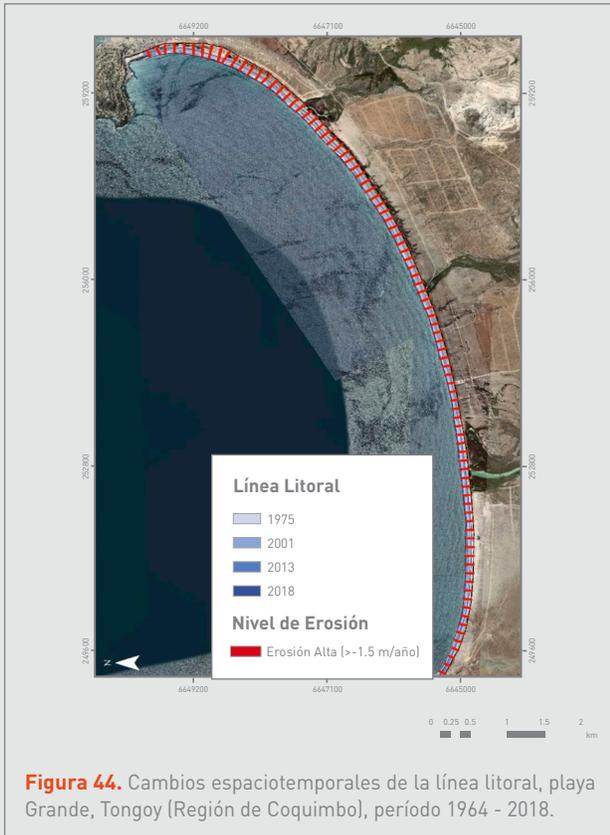


Figura 44. Cambios espaciotemporales de la línea litoral, playa Grande, Tongoy (Región de Coquimbo), período 1964 - 2018.

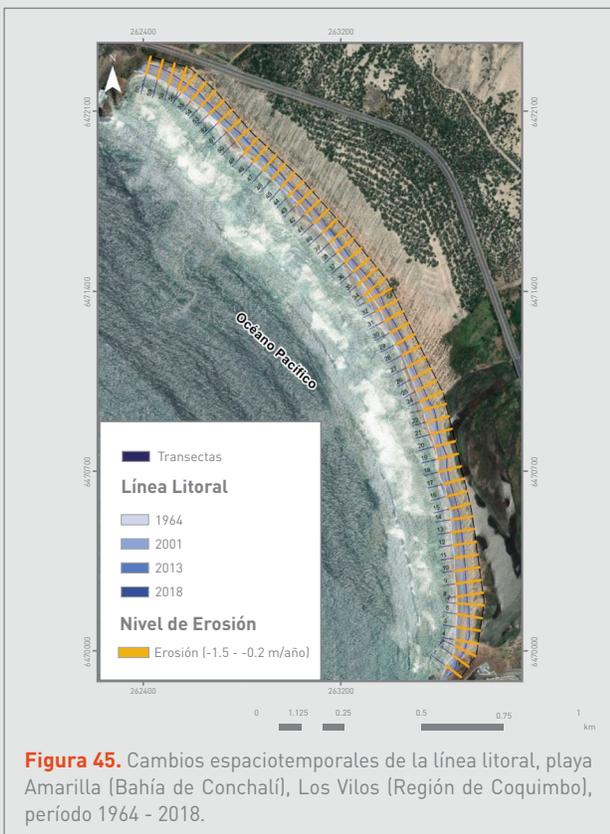


Figura 45. Cambios espaciotemporales de la línea litoral, playa Amarilla (Bahía de Conchalí), Los Vilos (Región de Coquimbo), período 1964 - 2018.

bahía contiene, además, un extenso campo dunar (erg) con distintas familias de dunas, descritas por Veloso (2005). Esta playa y el sistema costero es de alto interés turístico y patrimonial por su valor natural y cultural. Sin embargo, se encuentra afectada por erosión y erosión alta a lo largo de toda su extensión. El tipo de zona de rompiente es intermedia disipativa, con un ancho en la zona de *surf* de hasta 500 m. Para el período analizado (1964 - 2018), el litoral arenoso de la bahía La Ligua registra una tasa de cambio de $-1,38$ m/año, clasificándose como “erosión” (Figura 46).

Playa Papudo

Playa Papudo es una playa encajada de 2,1 km de largo, compuesta de arenas claras. El litoral arenoso conforma dos playas reconocidas: playa Chile (sector sur) y playa Grande (sector norte). Por tratarse de una playa urbana y altamente antropizada, una parte importante del sistema costero se encuentra degradado, principalmente, por proyectos inmobiliarios. La playa es angosta, con un ancho máximo de 50 m. El tipo de zona de rompiente es reflectiva de alta energía, principalmente, en playa Grande. El desarrollo de beach cusps es discontinuo, con mayor presencia en la zona norte (playa Grande). La playa se encuentra con estado de erosión y de erosión alta a lo largo de toda su extensión. Para el período analizado (1964 - 2018), el litoral arenoso de la bahía de Papudo registra una tasa de cambio de $-0,77$ m/año, clasificándose como “erosión” (Figura 47).

