

Determinación del **RIESGO** de los **IMPACTOS** del **CAMBIO CLIMÁTICO** en las costas de Chile

Volumen 5: Vulnerabilidad y riesgo en puertos
Ministerio del Medio Ambiente
22 de octubre de 2019

Equipo consultor del estudio

- Andrés Pica (PUC)
- Carolina Martínez (PUC)
- Catalina Marinkovic (PUC)
- César Esparza (UV)
- Cristián Larraguibel (PUCV)
- David Morales (PUC)
- Iván Torres (PUC)
- Javiera Mora (UV)
- José Miguel Fariña (PUC)
- Julio Salcedo (UPLA)
- Luis Flores (PUC)
- Macarena Pérez
- Manuel Contreras-López (UPLA)
- Nicolás Bassi (UPLA)
- Nicolás Bambach (PUC)
- Oscar Melo (PUC)
- Patricio Winckler (UV)
- Roberto Agredano (UCM)
- Sebastián Vicuña (PUC)
- Stefan Gelcich (PUC)

Equipo consultor volumen 5: Vulnerabilidad y riesgos en puertos

- Patricio Winckler (UV)
- Javiera Mora (UV)
- César Esparza (UV)
- Manuel Contreras-López (UPLA)
- Oscar Melo (PUC)

Contraparte técnica del Ministerio del Medio Ambiente

- Maritza Jadrijevic
- Nico Kohlhas
- Gladys Santis
- Priscilla Ulloa

Cómo citar este informe

Ministerio del Medio Ambiente, 2019. 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., Santiago, Chile.

Resumen del estudio

El estudio **Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile**, busca generar información de proyecciones de la amenaza, exposición, vulnerabilidad y riesgo de los sistemas humanos y naturales de la zona costera ubicados en 104 comunas de Chile continental, además de Rapa Nui y el Archipiélago Juan Fernández. El objetivo de este estudio es sentar las bases para el diseño de políticas e implementación de medidas de adaptación. El estudio se desarrolló entre octubre de 2018 y octubre de 2019 y se presenta mediante un resumen ejecutivo, 8 volúmenes temáticos y un Sistema de Información Geográfica (SIG). El estudio, financiado y desarrollado por el Ministerio del Medio Ambiente, contó con la participación de 21 investigadores de 5 universidades (PUC, UV, UPLA, PUCV y UCM) y 3 centros de investigación (CCG-UC, CIGIDEN y COSTAR-UV).

El **estudio de amenaza** se basa en el análisis histórico del oleaje y del nivel medio del mar (NMM), además de una proyección para el período 2026-2045 de estas variables y de la cota de inundación. En primer lugar, se analiza el comportamiento histórico del oleaje obtenido a partir un modelo numérico (WWIII) cada 2° de latitud (1980-2015). El análisis de clima medio del oleaje concluye que ha habido un incremento leve en la altura y el período, además de un giro al sur del oleaje, probablemente asociados a la migración al sur del Anticiclón Permanente del Pacífico Sur. El análisis de clima extremo demuestra en todo Chile se ha registrado un aumento en la cantidad de marejadas de 0.1 a 0.3 eventos más por año, dependiendo de la latitud. El estudio de NMM, basado en el análisis de 11 mareógrafos con más de 30 años de data, muestra que no existe una tendencia clara de aumento en Chile, lo que puede atribuirse a las deformaciones de la corteza producto del ciclo sísmico. En particular, en el norte existe un descenso del NMM probablemente asociado al acoplamiento de las placas tectónicas luego del terremoto de 1877.

En segundo lugar, el estudio busca evaluar los cambios del oleaje (marejadas), NMM y cota de inundación entre el período histórico (1985-2004) y la proyección (2026-2045) correspondiente al escenario de emisiones RCP 8.5 del IPCC. El estudio de oleaje basa en el forzamiento del modelo WWIII mediante 6 modelos de viento en toda la cuenca del Pacífico. El modelo es calibrado y validado con registros de boyas direccionales y altimetría satelital entre 1980 y 2015. El estudio de clima medio concluye que la altura de ola y el período seguirán incrementándose levemente y el oleaje girará más al sur, también en forma moderada. Los eventos extremos, no obstante, serán más frecuentes e intensos, sobre todo en la zona central de Chile, lo que seguramente aumentará los daños en la infraestructura costera. El estudio de NMM, por su parte, se basa en 21 modelos disponibles en el CMIP5 los cuales se analizan cada 5 [km] en forma latitudinal. El estudio concluye que en todo Chile, incluidas Rapa Nui y Juan Fernández, se espera un ascenso de 0.15 a 0.18 [m], con un rango de incertidumbre del orden de ± 0.1 [m] para la proyección. A fines de siglo, no obstante, el incremento sería del orden de 0.65 ± 0.3 [m]. La cota de inundación, calculada a partir del oleaje, el NMM, la marea astronómica y la marea meteorológica, presenta valores de 2.5 [m] NRS en el extremo norte a 3.5 [m] NRS en el Canal Chacao para el escenario histórico y de entre 2.8 a 3.8 [m] NRS para ambos extremos. El aumento de la cota de inundación abarca desde +0.23 a +0.29 [m] en los extremos sur y norte, respectivamente.

El **estudio de exposición** consiste en elaborar un modelo de elevación digital (DEM) en 106 comunas a partir de tres fuentes satelitales (ASTER GDEM-2, ALOS WORLD 3D y ALOS PALSAR). A partir del DEM se elabora un inventario de exposición de los sistemas humanos y naturales ubicados bajo los 10 metros sobre el nivel del mar (msnm). El inventario es generado a partir de información disponible en los servicios públicos, levantamientos en terreno y talleres efectuados en Antofagasta, Valparaíso y Concepción. Luego de un proceso de limpieza de 174.746 registros identificados inicialmente, se llega a un inventario con 18.376 entradas, separadas en 6 categorías (población, infraestructura, equipamiento, economía, sistemas naturales y otros), subdivididas a su vez en 76 tipos de entidades. La información más relevante del inventario es presentada a nivel nacional, regional y comunal. En síntesis, el inventario identifica un total de 972.623 personas habitando en los primeros 10 msnm y que en dicha área se ubican 546 caletas de pescadores, 1692 humedales, 256 campos dunares, 1172 playas, 156 lugares de interés para la biodiversidad, 1198 equipamientos (colegios, jardines infantiles, carabineros, entre otros), 171 terminales marítimos, 475 elementos de infraestructura costera y 477 asentamientos, entre otros elementos (Tabla 22, Volumen 1). A partir inventario y mediante el juicio experto, se definen 12 comunas críticas en las que se utilizan planos de borde costero del SHOA para refinar el cálculo de la vulnerabilidad. Las comunas críticas son Antofagasta, Coquimbo, Viña del Mar, Valparaíso, Pichilemu, Talcahuano, Coronel, Arauco, Puerto Saavedra, Valdivia, Rapa Nui y el Archipiélago Juan Fernández; ambas últimas que se detallan en el volumen de **vulnerabilidad y riesgo en islas oceánicas**.

El **estudio de vulnerabilidad** se orienta a los sistemas humanos y naturales identificados en el estudio de exposición. Dada la gran cantidad y complejidad de categorías (6) y entidades existentes (76), el análisis se reduce a evaluar si cada objeto del inventario de exposición será o no inundado durante la proyección (2026-2045) bajo el escenario RCP 8.5. Las líneas de inundación para el período histórico y la proyección se presentan en el SIG. El estudio concluye que 589 manzanas censales, 46357 personas y 18338 viviendas pasarían a ubicarse en zonas de inundación. Lo mismo ocurriría 17 puentes, 4245 puntos de la red vial, 8 centros de distribución de energía por hidrocarburos, 1 central termoeléctrica, 2 subestaciones y 53 elementos de infraestructura sanitaria. Con respecto al equipamiento comunal, 10 edificaciones de bomberos, 7 establecimientos de salud, 49 de educación y 5 de policía se ubicarían en zonas inundables. Por último, se identifican 358 elementos asociados al turismo en dichas zonas. Adicionalmente, y en volúmenes separados, se caracteriza la vulnerabilidad (y cuando es posible el riesgo) de playas, caletas, puertos y humedales, proponiendo también medidas de adaptación específicas para estos sistemas.

En el estudio de **vulnerabilidad en playas** se determinan los cambios en la posición de la línea litoral para 35 playas en las regiones de Antofagasta, Coquimbo, Valparaíso, O'Higgins y Biobío. Para ello se usa el software DSAS, fotografías aéreas, imágenes satelitales y levantamientos topográficos. El análisis cubre desde 39 años (La Serena) a sólo 3 años (Lebu-Tirúa), pero en 33 playas exceden los 20 años. Los resultados integrados en el SIG indican que el 9% de estas playas presenta erosión alta (mayor a 1.5 m anuales), el 71% erosión, el 11% un estado estable y solo un 9% acreción. Los casos de mayor erosión corresponden a extensos litorales arenosos, asociados a campos dunares y humedales. El estudio histórico no establece las causas que explican la erosión generalizadas, que pueden ser de origen oceanográfico, geofísico, antrópico o hidrológico. En el estudio de **riesgo en playas** se estima, en forma general, que aquellas playas

ubicadas entre Arica y el Canal Chacao experimentarán retrocesos medios de entre 3 y 23 [m] por efecto de cambios en oleaje y nivel del mar en el escenario RCP 8.5 en el período 2026-2045. La tendencia es que playas largas experimenten erosión en sus extremos sur y acreción en sus extremos norte debido a un leve cambio en la dirección del oleaje. La estimación del daño económico calculado en forma específica para 6 playas en la Región de Valparaíso permite estimar una pérdida cercana a los 500 mil dólares anuales producto del riesgo de erosión causada por cambio climático.

En el estudio de **vulnerabilidad en puertos** se analiza el impacto histórico asociado a la pérdida de disponibilidad de sitios de atraque debido a oleaje (*downtime*). A partir de los certificados de cierre de puerto (2015 a 2017) y una base de datos de SERVIMET (2007 a 2014) se concluye que, entre 2008 y 2017, se registraron 9097 cierres de puerto en 19 capitanías expuestas al Océano Pacífico de las cuales se contó con información. Los puertos con mayor cantidad de cierres son Arica (850), Tocopilla (802) y Quintero (761). El estudio de **riesgo en puertos** se evalúa el *downtime* operacional en 9 puertos en Chile (Arica, Iquique, Mejillones, Antofagasta, Coquimbo, Quintero, Valparaíso, San Antonio y San Vicente). El oleaje en aguas profundas se transfiere a cada puerto utilizando un modelo numérico (SWAN). Luego, el *downtime*, expresado en horas de cierre por año, se calcula comparando el clima del oleaje local con límites operacionales definidos en la ROM 3.1-99 (PPEE, 2000) para el período histórico (1985-2004) y la proyección (2026-2045). Se concluye que algunos puertos mejorarán y otros empeorarán su operatividad y que el clima extremo será más severo a mediados de siglo. La mejora operativa puede explicarse por el giro al sur del oleaje que mejoraría las condiciones de abrigo de puertos ubicados en el extremo sur de las bahías. En términos económicos, el análisis a nivel agregado para los 9 puertos se traduce en pérdidas de US\$ 4,12 millones anuales y ganancias por US\$ 6,34 millones anuales, dando como resultado unas ganancias netas de US\$ 2,22 millones anuales como efecto del cambio climático. El aumento del NMM, sumado al incremento en la frecuencia e intensidad de las marejadas, no obstante, significará un aumento significativo del sobrepaso y del daño estructural de obras portuarias. Se proponen medidas de adaptación para mejorar las condiciones operacionales y para la gestión de la infraestructura en un contexto de clima futuro más severo que el actual.

Dada su similitud operacional, el estudio de **vulnerabilidad en caletas** equivale al de puertos y busca mostrar que estas han experimentado numerosos cierres debido a marejadas en la última década. En el estudio de **riesgo en caletas** de pescadores se evalúa el *downtime* operacional de las 546 caletas agrupadas cada 2° de latitud para el período histórico (1985-2004) y la proyección (2026-2045), considerando los límites operacionales definidos en base a *focus groups* y encuestas para diferentes actividades (buzos, recolectores, embarcaciones de eslora inferior y superior a 12 m). El oleaje en aguas profundas se transfiere a la costa utilizando una metodología simplificada que rescata la física fundamental de la zona de aproximación a la costa, pero no las condiciones locales de cada caleta. El análisis concluye que un 23% de los registros pesqueros artesanales se encuentran en zonas con predicciones de aumento en *downtime* de pesca (19°S a 34°S). Hacia el sur, las condiciones operacionales asociadas al oleaje mejorarían en la proyección. Considerando los valores de desembarque y de precios en playa del año 2017, se estima una pérdida a nivel agregado que podría fluctuar entre los US\$ 1,3 y 7,6 millones anuales para las caletas ubicadas entre los 19°S y 34°S, dependiendo del escenario. Las pérdidas en desembarque representan alrededor de un 2-5% de capturas actuales.

El estudio de **vulnerabilidad de humedales** presenta la distribución comunal de 1692 humedales costeros. A nivel específico y dependiendo de la disponibilidad de información y levantamientos en terreno, se identifica una tendencia general a la reducción del área de los espejos de agua (18 de 21 casos analizados) que podría explicarse por la reducción de los caudales (100% de 30 ríos analizados). Debido al incremento histórico de la frecuencia e intensidad de las marejadas extremas, los episodios de sobrepaso que aportan agua salada a los humedales podrían generar cambios en el patrón de dominancia de las especies vegetales levantadas en los humedales costeros. No obstante, los cambios identificados en los humedales podrían deberse a otros factores no estudiados como la influencia de perturbaciones naturales provenientes de la cuenca (aluviones), al efecto del pastoreo ejercido por vacas y caballos, al pisoteo de turistas y al efecto combinado de dichos factores, tsunamis y tormentas marinas.

Contenidos

1. INTRODUCCIÓN	10
1.1 OBJETIVOS	10
1.2 ESTRUCTURA DEL INFORME	11
1.3 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO	11
1.4 EQUIPO DE TRABAJO	13
1.5 AGRADECIMIENTOS	14
1.6 GLOSARIO	15
2 MARCO DE REFERENCIA	17
2.1 EL SISTEMA PORTUARIO CHILENO	17
2.2 INVENTARIO DE EXPOSICIÓN DE INFRAESTRUCTURA COSTERA	21
2.3 EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL SECTOR PORTUARIO	26
2.4 CIERRES DE PUERTO EN CHILE	26
2.4.1 Antecedentes	26
2.4.2 Marco normativo de cierres de puertos en Chile	27
2.4.3 Proyecciones de cierres de puertos en Chile	29
3 METODOLOGÍA	30
3.1 ESTUDIO DE VIENTO Y OLEAJE	31
3.2 VULNERABILIDAD DE CIERRE DE PUERTOS	31
3.3 RIESGO DE CIERRE DE PUERTOS	32
3.4 IMPACTO ECONÓMICO DE CIERRE DE PUERTOS	32
4 RESULTADOS	34
4.1 ESTUDIO DE OLEAJE	34
4.1.1 Oleaje en aguas profundas	34
4.1.2 Oleaje en zonas portuarias	39
4.2 VULNERABILIDAD DE CIERRES DE PUERTOS	51
4.2.1 Caracterización de la flota	51
4.2.2 Criterios de cierre de puertos	53
4.2.3 Análisis de estadística de cierres de puerto	56
4.2.4 Correlación de cierres de puertos y parámetros de oleaje	66
4.3 RIESGO DE CIERRE DE PUERTOS	72
4.3.1 Clima medio u operacional del oleaje	72
4.3.2 Clima extremo de oleaje	78
4.4 IMPACTO ECONÓMICO DE CIERRE DE PUERTOS	81
5 CONCLUSIONES	86
5.1 ESTUDIO DE VIENTO Y OLEAJE	86
5.2 VULNERABILIDAD DE CIERRE DE PUERTOS	86
5.3 RIESGO DE CIERRE DE PUERTOS	87
5.3.1 Resultados	87
5.3.2 Análisis crítico de la metodología y oportunidades de mejora	88
5.4 IMPACTO ECONÓMICO DE CIERRE DE PUERTOS	89

5.5	MEDIDAS DE ADAPTACIÓN	90
5.5.1	Mejoras orientadas a la operación portuaria	92
5.5.2	Sistemas de alerta temprana de marejadas.....	95
5.5.3	Mejoras orientadas a la gestión de la infraestructura marítima.....	97
6	REFERENCIAS.....	103
7	ANEXOS.....	105
7.1	TERMINALES EN LOS 9 PUERTOS EN ESTUDIO.....	105
7.2	METODOLOGÍA DE TRASFORMACIÓN DE OLEAJE.....	106
7.3	CARACTERIZACIÓN DE LA FLOTA EN LOS PUERTOS DE CHILE	109
7.3.1	ANÁLISIS HISTÓRICO DE CIERRES DE PUERTOS EN 9 PUERTOS ESTATALES	116
7.3.2	Cruce de información cierre de puertos versus H_{mo}	116
7.3.3	Cruce de información cierre de puertos versus T_m	119
7.3.4	Cruce de información cierre de puertos versus D_m	123
7.3.5	Cruce de información cierre de puertos versus potencia.....	126
7.3.6	Histogramas cierre de puertos versus H_{mo}	130
7.3.7	Histogramas cierre de puertos versus T_m	134
7.3.8	Histogramas cierre de puertos versus D_m	138
7.3.9	Histogramas cierre de puertos versus potencia.....	142
7.4	CURVAS DE EXCEDENCIA DE OLEAJE.....	146
7.1	DOWNTIME HISTÓRICOS Y PROYECTADOS PARA LOS 9 PUERTOS	160
7.2	CRUCE ENTRE CRITERIOS DE CIERRE DE PUERTOS Y ESTADÍSTICA DE OLEAJE.....	170
7.3	CERTIFICADOS DE CIERRES DE PUERTOS.....	174

1. INTRODUCCIÓN

Muchos de los cambios observados en el sistema climático desde la década de 1950 no han tenido precedentes en los últimos decenios a milenios (IPCC, 2014). Este fenómeno ha forzado la adopción de medidas y acuerdos a nivel internacional para atenuar, en la medida de lo posible, las consecuencias de este fenómeno. En una primera instancia, los acuerdos se enfocaron en mitigación de gases efecto invernadero, pero los impactos del calentamiento global se han visto de manera más recurrente, teniendo que enfocarse esfuerzos en adaptación. Los impactos asociados a los efectos agudos y crónicos del cambio climático son cada vez más evidentes en el caso de Chile. Para avanzar en el desafío de la adaptación es necesario entender los riesgos en distintos componentes del sistema productivo, ambiental y social del país.

Atendiendo a la escasez de información sobre los efectos de este fenómeno en el litoral de nuestro país, se presenta el primer informe de la consultoría "Determinación del riesgo de los impactos del cambio climático en las costas de Chile", cuyas bases administrativas y técnicas corresponden a la R.E. N° 0568, del 11 de julio de 2018, del Ministerio del Medio Ambiente. El estudio es desarrollado por una alianza entre del Centro de Cambio Global UC (CCG), el Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN), la Universidad de Valparaíso, la Universidad de Playa Ancha, la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso y la Universidad Católica del Maule.

1.1 OBJETIVOS

El objetivo general del proyecto es "Generar información de proyecciones respecto de la amenaza del cambio climático en las costas de Chile y sus impactos, a escala regional, y determinar el riesgo asociado a este fenómeno, para el diseño de políticas e implementación de medidas de adaptación".

A partir de este objetivo general, se desprenden los siguientes objetivos específicos:

- a) Generar proyecciones de la amenaza del cambio climático en el borde costero de Chile continental e insular, considerando el escenario de emisiones RCP 8.5 del IPCC.
- b) Elaborar información sobre la exposición de sistemas humanos y naturales del borde costero de Chile continental e insular según los resultados del objetivo específico a).
- c) Realizar una evaluación de la vulnerabilidad frente a la amenaza del cambio climático, para el borde costero de Chile continental e insular
- d) Determinar el riesgo humano y físico frente a esta amenaza según los resultados de los objetivos específicos a) y b).

1.2 ESTRUCTURA DEL INFORME

Dado el gran volumen de información generada en esta consultoría, se presentan los resultados en los siguientes volúmenes:

- Resumen Ejecutivo
- Volumen 1: Amenazas (oleaje, nivel del mar y cota de inundación)
- Volumen 2: Exposición de zonas costeras
- Volumen 3: Vulnerabilidad de sistemas humanos y naturales
- Volumen 4: Vulnerabilidad y riesgo en playas
- Volumen 5: Vulnerabilidad y riesgo en puertos
- Volumen 6: Vulnerabilidad en humedales costeros
- Volumen 7: Vulnerabilidad y riesgo en caletas pesqueras
- Volumen 8: Vulnerabilidad en Rapa Nui y Archipiélago Juan Fernández

El presente Volumen 5 cubre la vulnerabilidad y riesgo en puertos.

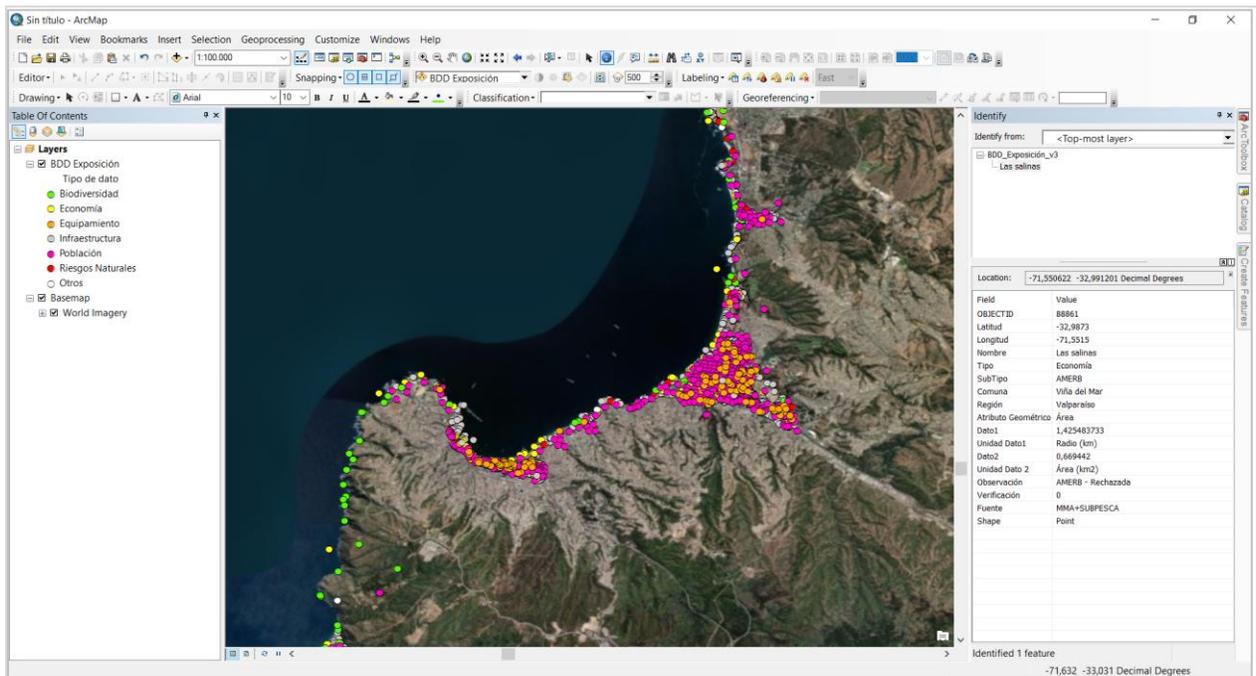
1.3 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO

La información generada en el estudio fue proporcionada al Ministerio de Medio Ambiente en forma de un Sistema de Información Geográfica (SIG) mediante la elaboración de una Geodatabase¹ (GDB). Esta base de datos, compatible con el software ArcGis 10 o superior, se utilizó para elaborar sets planimétricos de exposición, vulnerabilidad y erosión costera, los cuales fueron entregados en formato PNG y como archivo editable propio del software (MXD).

La GDB contiene archivos vectoriales (puntos, líneas o polígonos) y ráster (matriz de datos compuesta por píxeles). Los primeros poseen una tabla de atributos con información detallada de cada elemento que conforma la base de datos. En los archivos ráster cada pixel tiene un valor asociado al dato observado. La base de datos SIG del proyecto tiene un aspecto como el ilustrado en la Figura 1.

¹ Información geoespacial contenida en una carpeta de archivos que comparten un origen común.

Figura 1: Ejemplo de visualización de la base de datos de Exposición en el SIG.



El SIG se estructuró de la siguiente manera:

- **Área expuesta:** contiene planos (PNG) y archivos editables (MXD) del área expuesta correspondiente a la franja de borde costero que se encuentra entre los 0 y 10 [m] sobre el nivel del mar (Volumen 2).
- **Área vulnerable:** contiene planos (PNG) y archivos editables (MXD) del área vulnerable correspondiente a la franja de borde costero afecta a la cota de inundación actual y futura (Volúmenes 1 y 2).
- **GDB CCCostas (.gdb):** contiene la base de datos de exposición y vulnerabilidad (Volúmenes 1 y 2). En su interior posee la siguiente información:
 - Área expuesta definida mediante un polígono del área expuesta nacional además de polígonos y curva de exposición para las comunas críticas².
 - Área vulnerable definida mediante un polígono y curvas de vulnerabilidad identificadas a partir de las proyecciones de las cotas de inundación actual y futura, entre Arica y Canal Chacao.
 - Inventario de exposición separado en 7 categorías (biodiversidad, economía, equipamiento, infraestructura, población, riesgos naturales, otros) para 106

² El estudio de exposición (Volumen 2) identifica las siguientes comunas críticas: Antofagasta, Arauco, Coquimbo, Coronel, La Serena, Pichilemu, Saavedra, Talcahuano, Valdivia, Valparaíso y Viña del Mar.

comunas.

- Línea de costa del INE, modificada en algunos sectores y utilizada para calcular las longitudes costeras del territorio nacional.
 - Archivo vectorial de puntos con las características principales de las playas analizadas.
 - Modelos de elevación digital elaborados a partir de información topográfica detallada entregada por el SHOA para las comunas críticas.
 - Ortomosaicos de humedales generados en base a imágenes de drone de algunos de los humedales visitados en este estudio³.
- **Líneas de playa:** contiene los planos (PNG), archivos editables (MXD) y GDB de las playas analizadas en el estudio de erosión costera (Volumen 4).

1.4 EQUIPO DE TRABAJO

El equipo de trabajo está conformado por 21 académicos y profesionales de apoyo de la Pontificia Universidad Católica de Chile, de la Universidad de Valparaíso, de la Universidad de Playa Ancha, de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso y la Universidad Católica del Maule (Figura 2). El trabajo se desarrolla bajo la coordinación del Centro UC de Cambio Global (CCG-UC⁴), centro de investigación interdisciplinario cuya misión es promover la colaboración académica (nacional e internacional) para investigar los fenómenos relacionados al cambio global, abordando integralmente las dimensiones biofísicas y humanas. Miembros del equipo de trabajo son también parte del Centro Integrado de Gestión de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN⁵), centro de investigación de excelencia que tiene como misión desarrollar, integrar y transferir conocimiento científico, y formar capital humano avanzado que contribuya a reducir las consecuencias sociales de los eventos naturales extremos. Se cuenta también con el apoyo del Centro de Observación Marino para estudios de Riesgos del Ambiente Costero de la Universidad de Valparaíso (COSTAR-UV⁶).

³ Los humedales son: Carampangue, Cartagena, Cebada, Chaihuín, Conchalí, Cuccao, El Culebrón, Tongoy, Huasco, Huentelauquén, La Boca (los Choros), Limarí, Mantagua, Merquinche, Pachingo, Pucotrihue, Punta Teatinos, Quilimarí, Salinas Chica, Salinas Grande, Salinas de Copiapó (Norte y Sur), San Alfonso, Vegas de Coliumo y Vegas del Itata.

⁴ <https://cambioglobal.uc.cl/>

⁵ <http://cigiden.cl/en/>

⁶ <https://costar.uv.cl/>

Figura 2: Organigrama del equipo de trabajo e instituciones desarrolladoras.



1.5 AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a todas las instituciones que proporcionaron información en forma desinteresada o mediante la Ley de Transparencia y, en particular a aquellas personas en dichas instituciones que levantaron la información utilizada en este estudio. En particular, a las diferentes unidades del Ministerio del Medio Ambiente, a la Dirección de Obras Portuarias y a la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas, al Ministerio de Bienes Nacionales y al Ministerio de Vivienda y Urbanismo, a la Subsecretaría para las Fuerzas Armadas del Ministerio de Defensa, a SUBPESCA, SERNAPESCA, ONEMI, DIRECTEMAR, SHOA, IGM, Servicio Sismológico de la Universidad de Chile, SISS, INE, SERNATUR, Subsecretaría de Transporte (MTT). Finalmente, queremos agradecer a Gladys Santis, Maritza Jadrijevic, Nico Kohlhas y Priscila Ulloa, quienes ofician de contraparte técnica del proyecto.

1.6 GLOSARIO

En esta sección se presentan términos esenciales para comprender el texto. El glosario incluido en el Quinto Informe de Evaluación del IPCC (2014b) ofrece una definición mucho más detallada de términos que pueden complementar a los incluidos en esta lista. Adicionalmente, en los 8 volúmenes se incluyen otros términos (e.g. marejadas, marea meteorológica, nivel del mar) que son definidos en el marco teórico correspondiente a cada tópico.

- **Adaptación:** Proceso de ajuste al clima real o proyectado y sus efectos. En los sistemas humanos, la adaptación trata de moderar o evitar los daños o aprovechar las oportunidades beneficiosas. En algunos sistemas naturales, la intervención humana puede facilitar el ajuste al clima proyectado y a sus efectos (IPCC, 2014).
- **Amenaza:** Es un fenómeno, sustancia, actividad humana o condición peligrosa que pueden ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales.
- **AR:** Assessment Report (Informe de Evaluación). Son documentos elaborados por centenares de expertos del IPCC, que dan cuenta del estado del arte de la ciencia del cambio climático. Se han elaborado cinco AR desde el primero en 1990. El último fue publicado entre los años 2013 y 2014.
- **Cambio climático:** El IPCC (2014b) define al cambio climático como la variación del estado del clima identificable en las variaciones del valor medio o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo (decenios o períodos más largos). El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o a forzamientos externos tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas o cambios antropógenos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso del suelo. La CMNUCC define el cambio climático como “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”. La CMNUCC diferencia, pues, entre el cambio climático atribuible a las actividades humanas que alteran la composición atmosférica y la variabilidad atribuible a causas naturales.
- **CMNUCC:** La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático ofrece una estructura para canalizar los esfuerzos intergubernamentales dirigidos a resolver el desafío del cambio climático.
- **Exposición:** La presencia de personas, medios de subsistencia, especies, ecosistemas, funciones, servicios y recursos ambientales, infraestructura, activos económicos, sociales o culturales en lugares y entornos que podrían verse afectados negativamente (IPCC, 2014).
- **IPCC:** Intergovernmental Panel on Climate Change (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). Está compuesto por centenares de científicos y expertos que contribuyen de manera voluntaria, escribiendo informes para dar cuenta

del estado del arte de la ciencia del cambio climático y generando la mejor información técnica posible, para apoyar la toma de decisiones de los países.

- **Impactos:** Efectos sobre los sistemas naturales y humanos de episodios meteorológicos y climáticos extremos y del cambio climático. Los impactos generalmente se refieren a efectos en las vidas, medios de subsistencia, salud, ecosistemas, economías, sociedades, culturas, servicios e infraestructuras debido a la interacción de los cambios climáticos o fenómenos climáticos peligrosos que ocurren en un lapso de tiempo específico y a la vulnerabilidad de las sociedades o los sistemas expuestos a ellos. Los impactos también se denominan consecuencias y resultados. Los impactos del cambio climático sobre los sistemas geofísicos,
- **Mitigación:** es una intervención humana que busca disminuir las fuentes (y/o las emisiones de las mismas) o mejorar los sumideros de Gases Efecto Invernadero (GEI).
- **Riesgo:** Consecuencias eventuales en situaciones en que algo de valor está en peligro y el desenlace es incierto, reconociendo la diversidad de valores. A menudo el riesgo se representa como la probabilidad de ocurrencia de fenómenos o tendencias peligrosos multiplicada por los impactos en caso de que ocurran tales fenómenos o tendencias.
- **RCPs:** Las Trayectorias de Concentración Representativas (Representative Concentration Pathways) son escenarios que abarcan series temporales de emisiones y concentraciones de la gama completa de gases de efecto invernadero y aerosoles y gases químicamente activos, así como el uso del suelo y la cubierta terrestre (IPCC, 2014b). Las RCPs, que hacen referencia a la parte de la trayectoria de concentración hasta el año 2100, son:
 - RCP2.6: Trayectoria en la que el forzamiento radiativo alcanza el valor máximo a aproximadamente 3 [W/m²] antes de 2100 y posteriormente disminuye.
 - RCP4.5 y RCP6.0: Trayectorias intermedias en las cuales el forzamiento radiativo se estabiliza a aproximadamente 4.5 [W/m²] y 6.0 [W/m²] después de 2100.
 - RCP8.5: Trayectoria alta para la cual el forzamiento radiativo alcanza valores mayores a 8.5 [W/m²] en 2100 y sigue aumentando durante un lapso de tiempo.
- **SRES:** Special Report on Emissions Scenarios (Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones), usados para el AR4. Estos escenarios hacen supuestos ("historias") respecto al crecimiento de la población global futura, el desarrollo tecnológico, la globalización y los valores sociales. El escenario A1 ('una familia global') asume un futuro de globalización y rápido crecimiento económico y tecnológico, con uso intensivo de combustibles fósiles (A1FI), no intensivo en combustibles fósiles (A1T) y versiones equilibradas (A1B). El escenario A2 ('un mundo dividido') asume un mayor énfasis en las identidades nacionales. Los escenarios B1 y B2 asumen prácticas más sostenibles ('utopía'), con un enfoque más global y regional, respectivamente.
- **Vulnerabilidad:** Propensión o predisposición a ser afectado negativamente. La vulnerabilidad comprende una variedad de conceptos que incluyen la sensibilidad o susceptibilidad al daño y la falta de capacidad de respuesta y adaptación (IPCC, 2014b).

2 MARCO DE REFERENCIA

En este informe se analiza el impacto económico asociado a la pérdida de disponibilidad de sitios de atraque debido a oleaje de las zonas portuarias de mayor importancia en las costas chilenas expuestas al Océano Pacífico. En primer lugar, el estudio contempla un análisis de **vulnerabilidad** cuyo objetivo es comprender, a nivel histórico, los criterios de cierre de puertos debido a las marejadas que utiliza la autoridad marítima de cada puerto. En segundo lugar, 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* operacional⁷ de cada puerto. A partir de estos resultados se estima el **impacto económico** asociado a los cierres de puertos para el período histórico y la proyección, atribuyendo el cambio entre ambos períodos de tiempo al cambio climático. Finalmente, se proponen medidas de **adaptación** específicas para las instalaciones portuarias.

2.1 EL SISTEMA PORTUARIO CHILENO

A nivel país, los puertos cumplen un rol estratégico para la integración comercial de Chile con el mundo, pues transfieren aproximadamente el 90% del comercio internacional. El sistema portuario chileno cumple un rol estratégico para la integración comercial de Chile con el mundo pues transfiere aproximadamente el 90% del comercio internacional. Dicho sistema contempla nueve empresas portuarias autónomas cuyo rol consiste en crear condiciones favorables para el desarrollo del sector portuario al amparo de un sistema de concesiones establecido en la Ley 19.542 de Modernización del Sector Portuario Estatal, del 19 de diciembre de 1997.

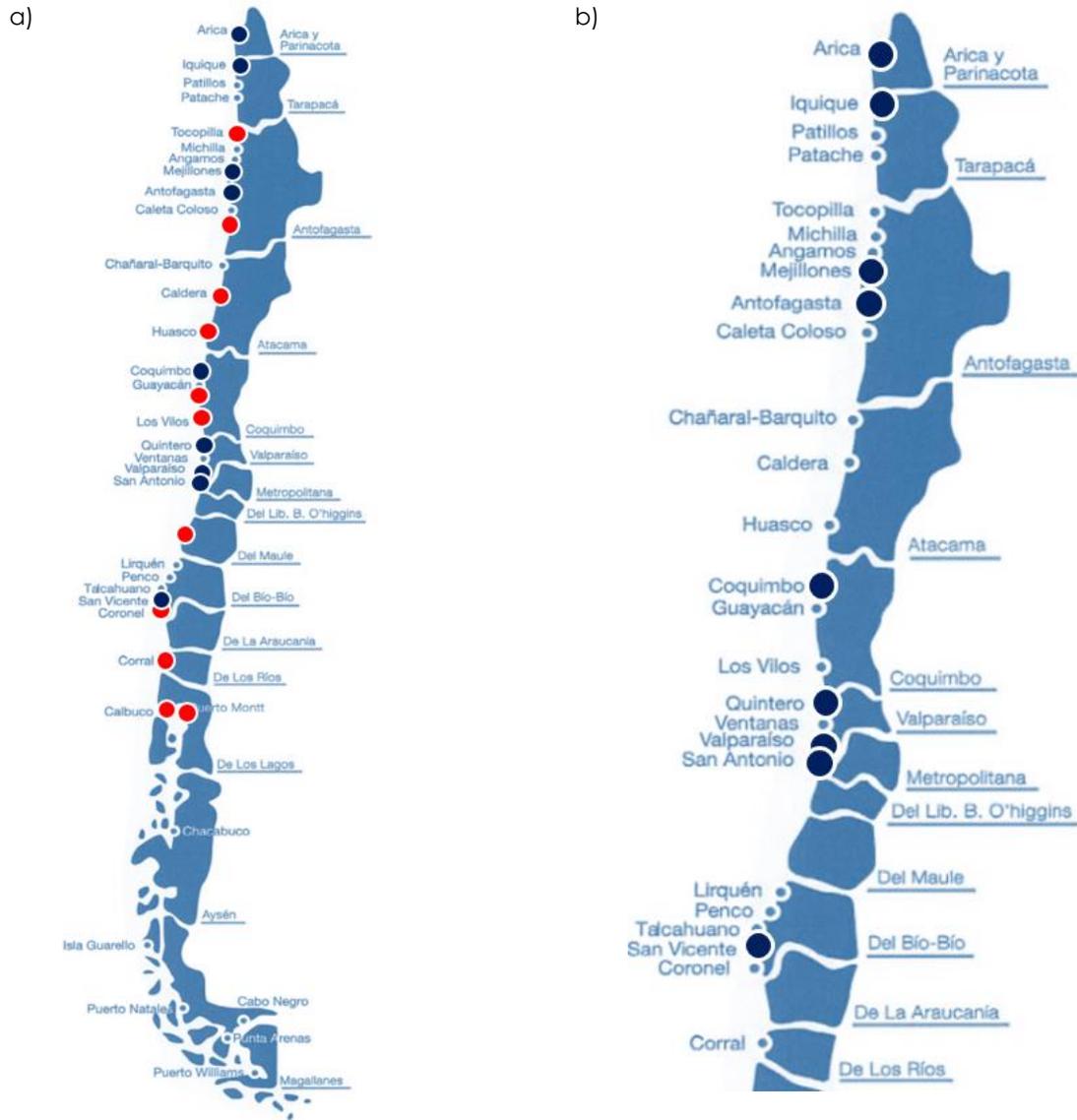
Las empresas portuarias se emplazan en Arica, Iquique, Antofagasta, Coquimbo, Valparaíso, San Antonio, Talcahuano - San Vicente, Puerto Montt, Chacabuco y Punta Arenas. Existen además decenas de empresas concesionarias, puertos privados, instalaciones industriales y puertos pesqueros que conforman el sistema. "La importancia de los puertos estatales radica en que a través de ellos se transfiere la mayor cantidad de carga general y de contenedores, y en que su ubicación es relativamente mejor que la de los puertos privados" (SEP, 2006). La Figura 3 muestra el sistema portuario de Chile en 2017.

Según estadísticas de UNCTAD citadas por Mundo Marítimo⁸, "Chile recibió un total de 17.608 recaladas a lo largo de 2018, los que permanecieron en sus puertos un promedio de 1,3 días /.../ su tonelaje promedio alcanzó los 18.614 GT, la capacidad medida en toneladas promedió 35.676 DWT y la capacidad media de transporte de contenedores alcanzó los 6.096 TEUs. El máximo tonelaje recalado fue de 143.521 GT, el máximo de capacidad de toneladas fue de 209.546 y el mayor portacontenedor arribado alcanzó los 13.100 TEUs".

⁷ 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, entre otros.

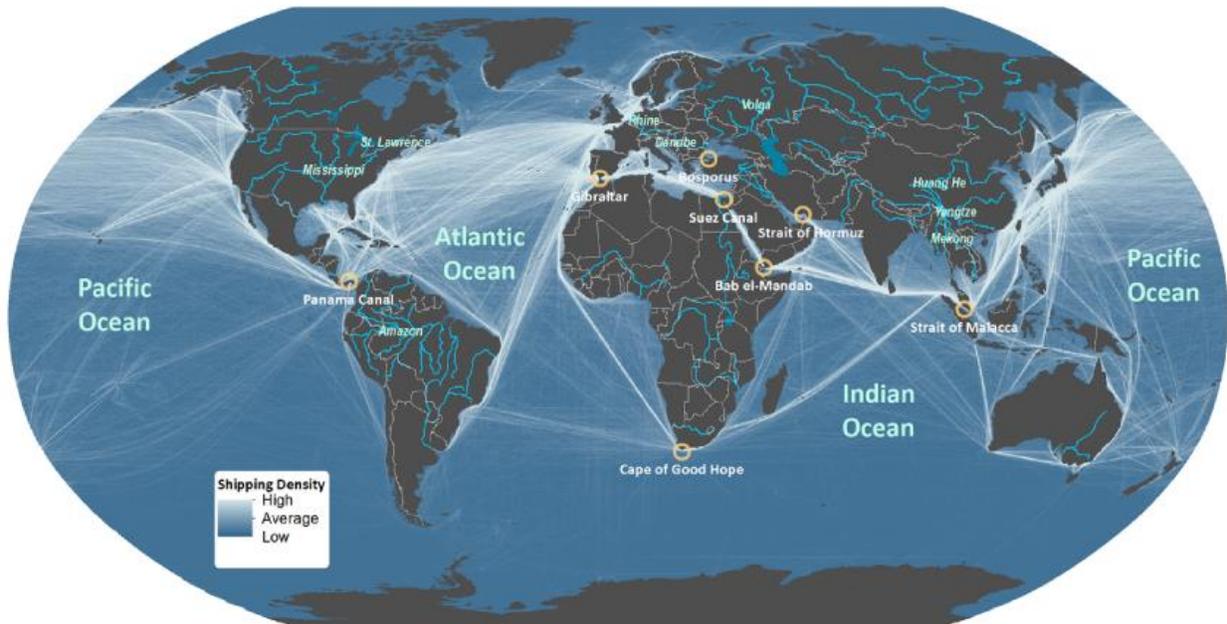
⁸ www.mundomaritimo.cl/noticias/puertos-de-chile-recipientes-un-total-de-17608-recaladas-en-2018-con-una-permanencia-en-puerto-de-13-dias

Figura 3: El sistema portuario de Chile en 2017. a) En rojo los puertos donde se analizan sólo los cierres de puerto históricos y en azul oscuro los puertos usados en el análisis de riesgo. b) Puertos utilizados en el análisis de riesgo (Adaptado de CAMPORT, 2017).



Debido a su geomorfología marcada por la actividad tectónica, la gran pendiente y exposición a los agentes oceánicos, los puertos en Chile tienen características únicas y adversas pues en su mayoría –salvo aquellos ubicados en la zona de los fiordos y canales- se encuentran abiertos al Océano Pacífico. La distribución demográfica asimismo y la lejanía a las grandes rutas de navegación transoceánicas (Figura 4), hace que existan puertos relativamente menores a lo largo de toda la costa, comparados con los puertos del hemisferio norte.

Figura 4: Vías de navegación a nivel mundial⁹.



Muchos de los puertos Chilenos han requerido de la construcción de grandes obras de abrigo para permitir la operación de los buques, como son el caso de Arica, Iquique, Antofagasta (Figura 5), Valparaíso (Figura 6), San Antonio y San Vicente. Otros puertos se emplazan en las escasas bahías donde dicho abrigo se da en forma natural, como en Mejillones, Caldera, Huasco (Figura 7), Coquimbo, Guayacán, bahía de Concepción y el Golfo de Arauco.

En general, los puertos estatales se ubican en emplazamientos geográficos ventajosos y cuentan con muelles marginales, mientras que los privados suelen tener sólo muelles de penetración (SEP. 2006). En los próximos años el sector portuario deberá hacer inversiones para adaptarse a los profundos cambios en la tecnología de la industria naviera (e.g. el tamaño de los buques y la forma de transferencia de la carga), a los nuevos estándares en la relación con la comunidad y al cambio climático.

⁹ https://transportgeography.org/?page_id=8354

Figura 5: Puerto de Antofagasta (Gentileza de la DOP).



Figura 6: Puerto de Valparaíso (archivos personales).



Figura 7: Puerto de la Central termoeléctrica Electroandina, en Huasco (archivos personales).



2.2 INVENTARIO DE EXPOSICIÓN DE INFRAESTRUCTURA COSTERA

En el inventario de exposición efectuado en este estudio se identificaron los sistemas de infraestructura costera indicados en la Tabla 1, entre los cuales se excluye la infraestructura vial. El número de entidades asciende a 2445. A modo de ejemplo, se presentan figuras con el inventario de exposición para la porción central de las regiones de Valparaíso (Figura 8), Biobío (Figura 9) y Los Lagos (Figura 10).

El análisis de operatividad portuaria presentado en adelante se restringe a los 9 puertos indicados en la Figura 3. No obstante, a partir del inventario de exposición se podrían explorar múltiples formas de evaluar la vulnerabilidad y el riesgo¹⁰ que, en favor de la síntesis y dado el plazo de ejecución del estudio, no se han efectuado.

¹⁰ La vulnerabilidad podría ser evaluada mediante indicadores como la parada operativa de instalaciones industriales, de energía o abastecimiento de agua.

Tabla 1: Número entidades de infraestructura costera en comunas con áreas bajo los 10 [msnm].

Clasificación	Tipo entidad	Número
Industria	Establecimientos Industriales Químicos	35
	Establecimientos Registro Emisiones y Transferencia de Contaminantes	1.033
	Instalaciones de tratamiento de residuos	10
Energía	Biomasa	2
	Oleoductos	10
	Gasoductos	15
	Almacenes de combustible	18
	Termoeléctricas cercanas a la costa	24
	Subestaciones	47
Agua	Emisarios submarinos	22
	Puntos de Captación	66
	Plantas desaladoras	20
Instalaciones navales, Puertos y Obras costeras	Plantas de tratamiento aguas servidas	17
	Plantas de tratamiento agua potable	14
	Plantas elevadora aguas servidas	290
	Plantas elevadora agua potable	90
	Cables submarinos	20
	Astilleros	10
	Varaderos	3
	Obras de borde costero	49
	Defensa costera	116
	Embarcaderos	4
	Muelles	235
	Paseos Costeros	3
	Ramplas	68
	Terminales estatales	71
	Terminales privados	74
	Boyas	26
	Puertos estatales	12
	Puertos privados	14
	Faros	2
	Club de yates, Club Náutico o CENDYR náutico	21
Marinas y puertos deportivos	4	

Figura 8: Inventario de exposición de infraestructura marítima y energética de la parte central de la región de Valparaíso.

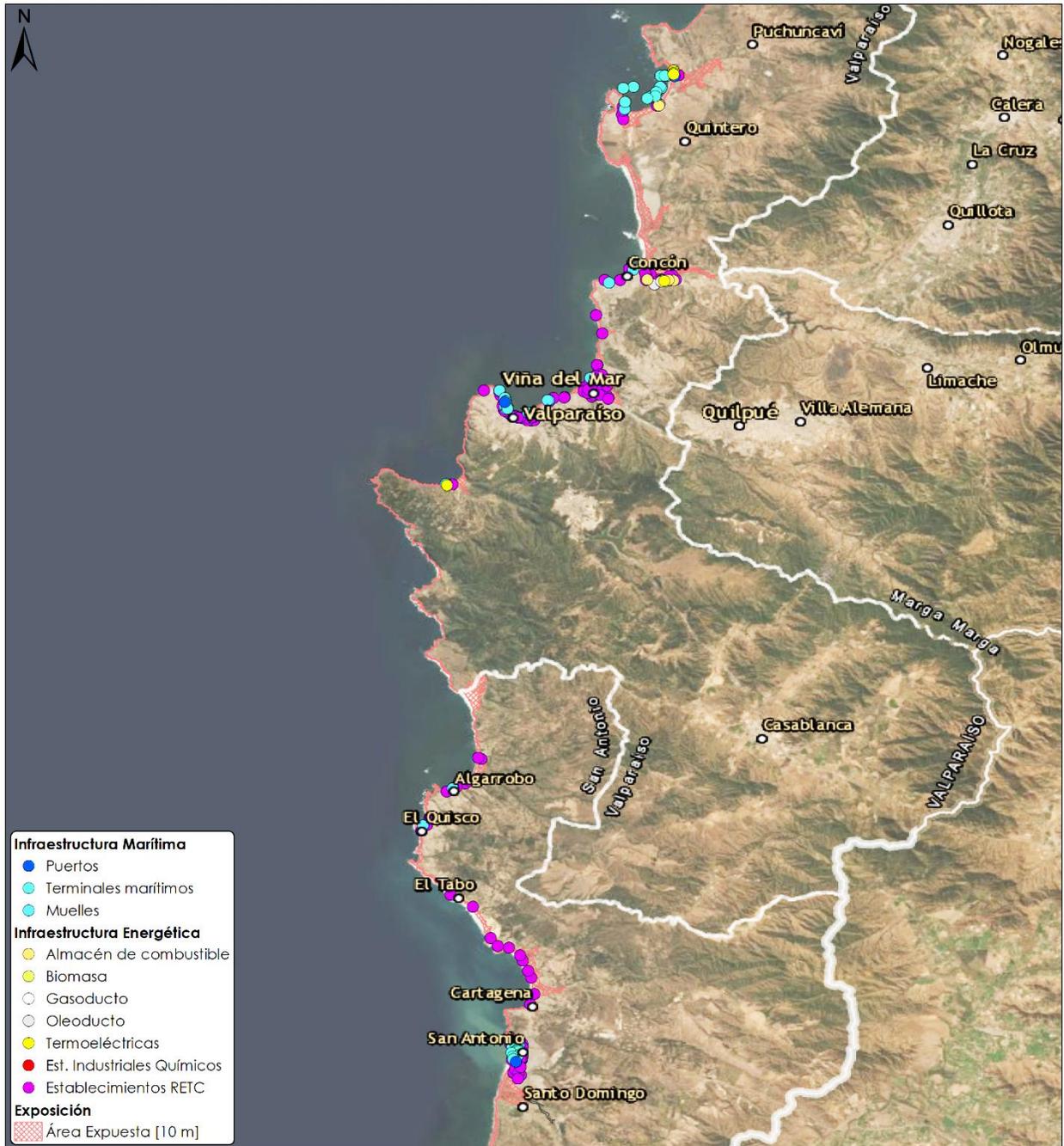


Figura 9: Inventario de exposición de infraestructura marítima y energética de la parte central de la región del Biobío.

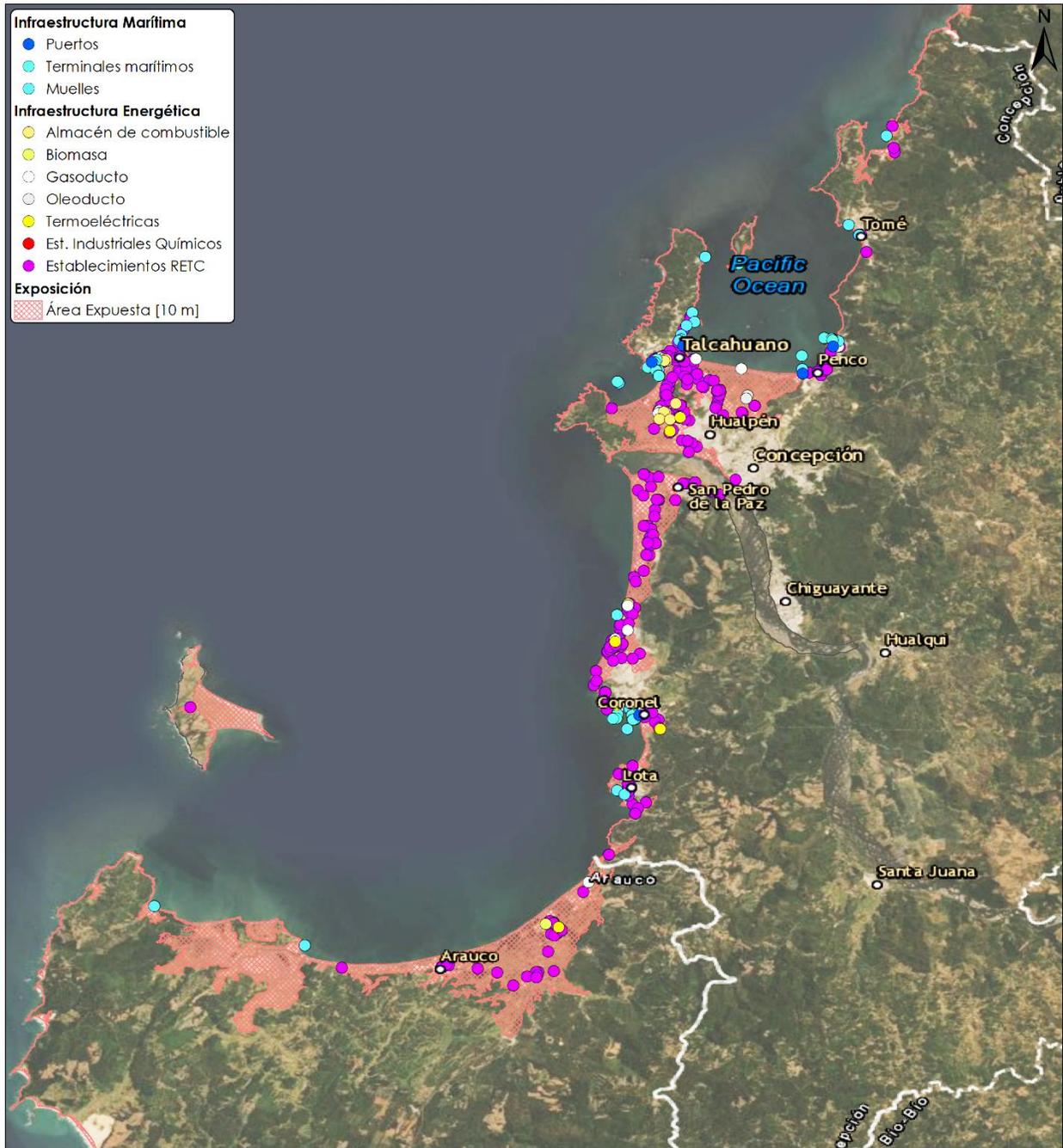
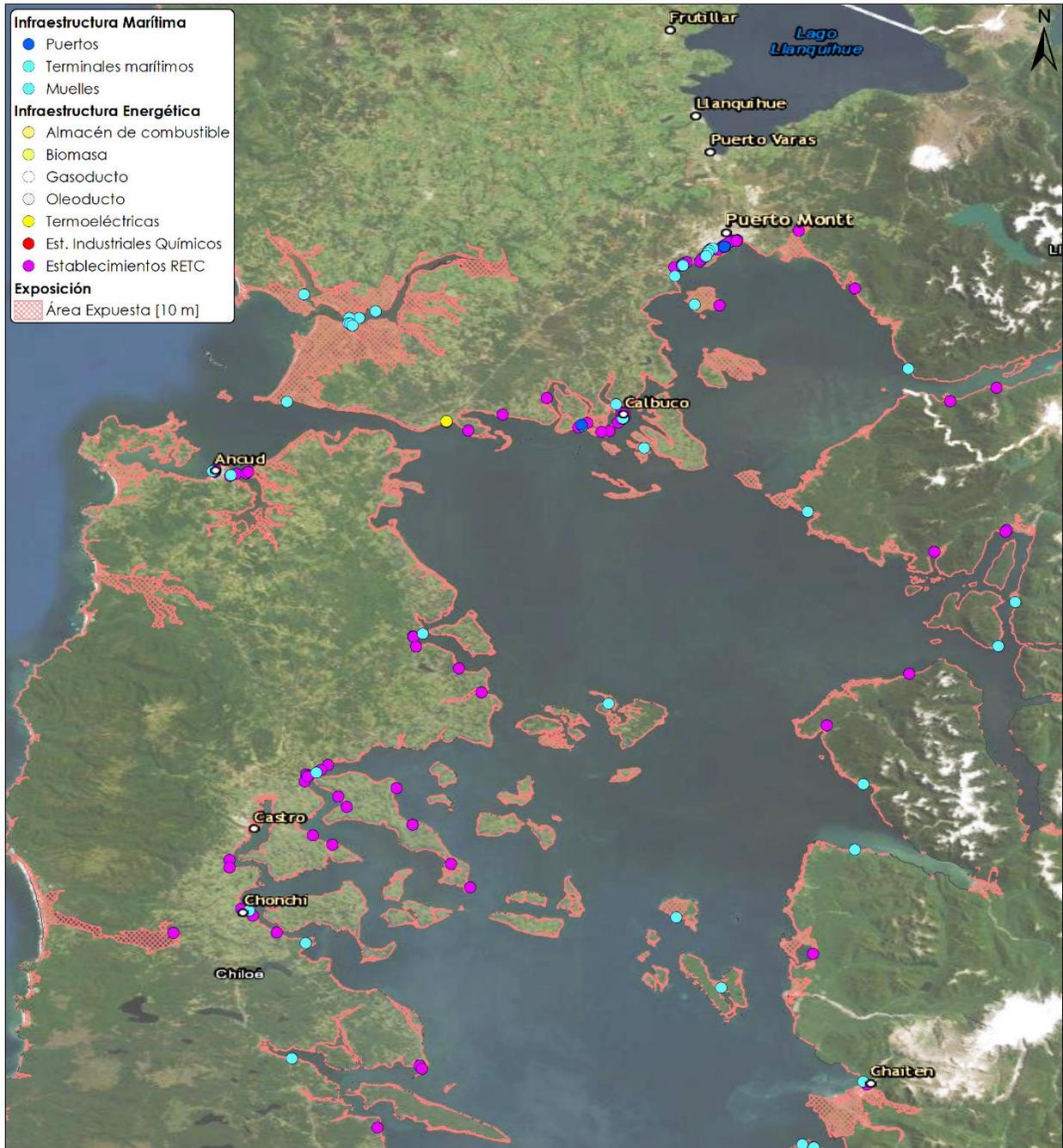


Figura 10: Inventario de exposición de infraestructura marítima y energética de la parte central de la región de Los Lagos.



2.3 EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL SECTOR PORTUARIO

Existe consenso que tanto la variabilidad climática como el cambio climático pueden afectar la competitividad del sector portuario mediante i) el incremento en los costos de operación y mantenimiento de sus instalaciones, ii) la generación de pérdidas por incidentes y iii) la generación de beneficios que se deriven de las diferentes acciones de mitigación de GEI y la adaptación¹¹. Existe abundante literatura sobre los efectos del cambio climático futuro (e.g. Becker et al., 2013; Ng et al., 2013; Hippe et al., 2015; McCarron et al., 2018; Yang et al., 2018) que, en favor de la síntesis se omiten en este documento. El presente estudio se enfoca exclusivamente en la vulnerabilidad operacional del puerto mediante indicadores asociados a los cierres de puerto.

2.4 CIERRES DE PUERTO EN CHILE

2.4.1 Antecedentes

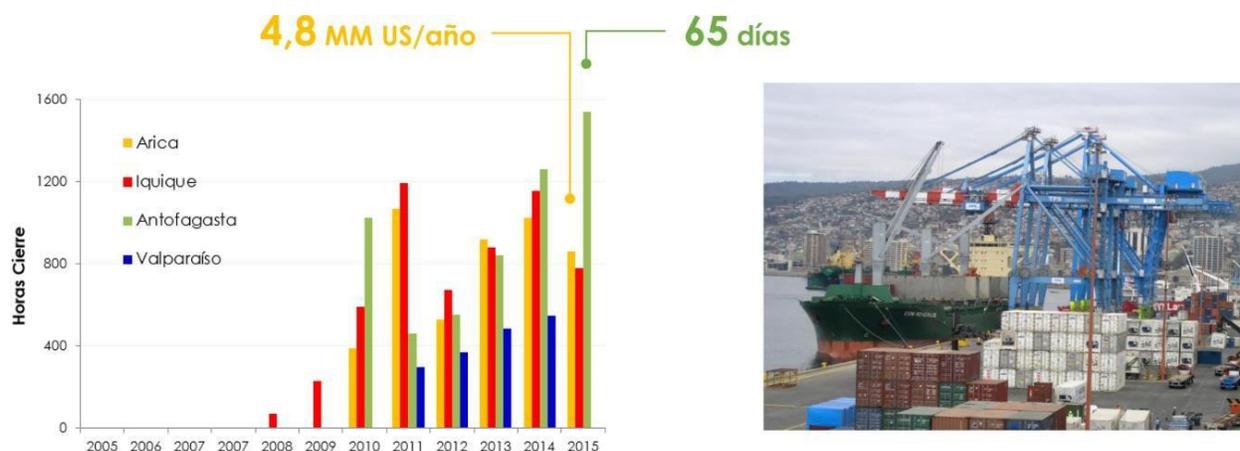
Durante los episodios de mal tiempo, los puertos se cierran para garantizar la seguridad de las naves, carga y operadores. El cierre de puertos es una facultad de los Capitanes de Puerto que emana del Reglamento General de Orden, Seguridad y Disciplina en las Naves y Litoral de la República (Art. 151), y comprende una serie de medidas que incluyen la suspensión total o parcial del tránsito o actividades marítimas, estado de alerta de la Capitanía de Puerto, de los remolcadores de servicio, de los botes salvavidas, etc. (Marítimo Portuario, 2017).

Estos cierres pueden significar pérdidas económicas del orden de millones de dólares para los concesionarios portuarios, y a fin de cuentas, para el erario público. Aun cuando las estadísticas de cierres de puerto son escasas en Chile, estudios preliminares efectuados por este equipo consultor indican que en la última década se observa un incremento notorio en los principales puertos del centro y del norte (Figura 11). Aun cuando la ventana de análisis es muy corta como para atribuir este comportamiento al cambio climático, el hecho de que haya un incremento en el número de eventos extremos obliga a idear medidas de adaptación para reducir los cierres de puerto. Entre estas se pueden mencionar el uso de sistemas de predicción de oleaje o sistemas dinámicos de amarra de buques, entre otros. En este capítulo se profundiza en este tipo de análisis para los principales puertos de Chile.

La literatura sobre cierres de puertos es bastante escasa a nivel nacional, pero ha sido abordada recientemente (Puelma et al., 2016; International Transport Forum, 2016; Marítimo Portuario, 2017; Allende, 2018; Rozas et al., 2018) como consecuencia de presiones de la comunidad portuaria por introducir criterios claros de cierre, fundados en datos medidos en puntos representativos de los frentes de ataque y áreas de maniobras.

¹¹ Entre los beneficios se incluyen la participación en mercados de carbono y la reducción de la vulnerabilidad frente a amenazas climáticas, entre otros.

Figura 11: Cantidad de horas de cierre de los principales puertos de Chile Centro-Norte, para el período comprendido entre 2005 y 2015. Se observa, por ejemplo, que el puerto de Antofagasta permaneció cerrado el equivalente a dos meses en 2015 y que la cantidad de horas de cierre en Arica generó pérdidas por U\$ 4.8 millones ese año¹².



2.4.2 Marco normativo de cierres de puertos en Chile

El documento titulado “Análisis de la capacidad operativa portuaria nacional y requerimientos para maniobras de atraque y desatraque” (Marítimo Portuario, 2017) corresponde a un estudio acabado sobre la materia. El estudio tuvo entre sus objetivos “analizar y caracterizar los eventos de cierres de puerto y su impacto en la capacidad operativa portuaria” y, en base a experiencia comparada en sistemas de medición de parámetros meteorológicos y oceanográficos, propone opciones para mitigar riesgos manteniendo el puerto abierto para las maniobras.

La metodología consistió en contrastar los parámetros de viento y oleaje de cada evento de cierre, con los límites operacionales del puerto definidos en los estudios de maniobrabilidad. El análisis se separó en las siguientes tres partes:

- Eventos de puerto cerrado para movimiento de naves mayores y cerrado para naves menores dentro y fuera de la bahía.
- Eventos de puerto cerrado totalmente solamente considerando paralización de faenas.
- Eventos de puerto cerrado totalmente, con abandono de las naves que se encuentran en los sitios.

A continuación, se rescatan y adaptan párrafos relevantes de dicho documento:

- El mismo reglamento, en el Art. 152, señala que la suspensión del tránsito marítimo puede ser general o parcial:

Suspensión parcial: queda suspendido todo tráfico de embarcaciones menores en la bahía por mal tiempo. La recepción de naves se hará a juicio del Capitán de Puerto.

¹² Este gráfico se elaboró a partir de estadística proporcionada por las autoridades portuarias.

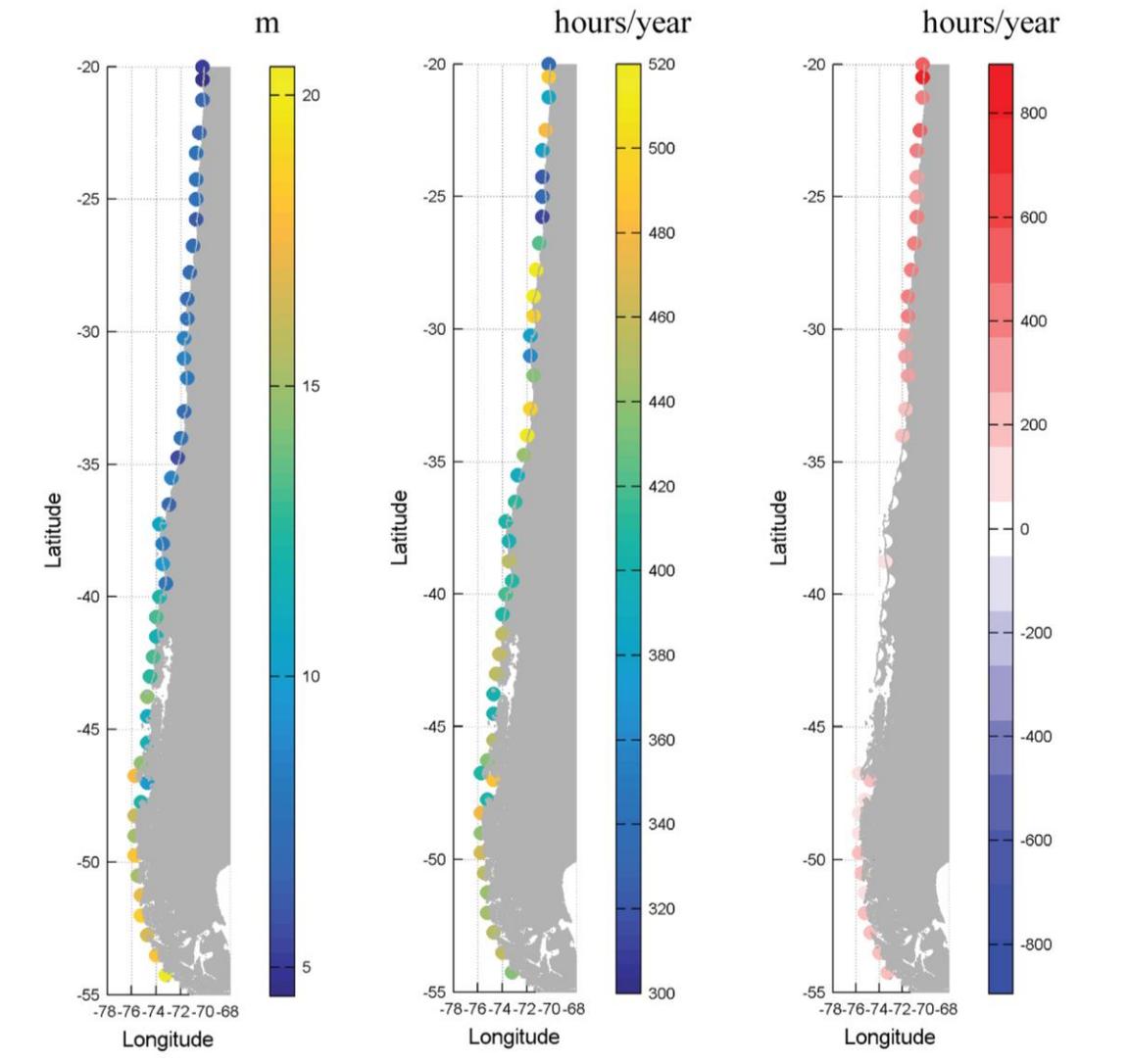
Suspensión general: queda suspendido todo tráfico y las faenas de carga y descarga, debiendo amarrarse lanchas y remolcadores. La recepción de naves no será obligatoria, quedando éstos a juicio del Capitán de Puerto, según los medios de que disponga. Sólo se permitirá la salida de embarcaciones equipadas expresamente para el salvamento, previo aviso al Capitán de Puerto, el cual se reservará el derecho de negar la salida a todo vapor que no reúna las condiciones excepcionales de fuerza, resistencia, seguridad y dimensiones que se requieren para hacerse a la mar en tales circunstancias".

- Para operativizar en forma clara las disposiciones del reglamento indicadas en el punto anterior, la Autoridad Marítima define las siguientes **condiciones de anormalidad:** normal, sismo, marejadas, tiempo variable, mal tiempo, temporal, cerrazón de niebla, ventisca o nevazón y otro, siendo las condiciones tiempo variable, mal tiempo y temporal, definidas para cada puerto.
- Las condiciones de anormalidad dan origen a alguna de las **restricciones** siguientes:
 - Cerrado para naves menores dentro y fuera de la bahía
 - Cerrado para naves menores fuera de la bahía
 - Cerrado Totalmente - Paralización de actividad
 - Cerrado para movimiento naves mayores
- Los **límites operacionales** se establecen en las resoluciones de habilitación de los puertos, y se extraen de los respectivos estudios de maniobrabilidad. Éstos son definidos en base a una nave tipo, principalmente para la definición de los elementos de apoyo a las maniobras (remolcadores), los límites de permanencia (buque amarrado) y para el diseño de la maniobra. El hecho de estar definidos en base a una nave tipo, implica que en un puerto específico, en un mismo momento, pueden encontrarse naves con restricciones o impedidas de efectuar maniobras, y otras sin limitaciones.
- El estudio lo efectúan utilizando el registro de cierres de puerto de los Capitanes de Puerto (2015, 2016 y 2017) y Registro de cierres de puerto del SERVIMET (2009 a abril 2017).

2.4.3 Proyecciones de cierres de puertos en Chile

A la fecha existe sólo un estudio de proyecciones de cierres de puertos en Chile. El estudio, elaborado por Camus et al. (2017), efectúa una comparación entre el período histórico (1979–2005) y la proyección (2070–2100) de oleaje a lo largo de Chile para el escenario RCP8.5 y, a partir de esas estadísticas, utiliza el sobrepaso (overtopping) como un indicador (proxy) de la operatividad portuaria. El estudio, no obstante, considera una propagación muy simplificada del oleaje hacia la costa mediante teoría lineal (sin especificar la batimetría utilizada)

Figura 12: Parámetros asociados a la operatividad portuaria estimados por Camus et al. (2017) en todo Chile para el escenario RCP8.5. a) Francobordo correspondiente a una operatividad de 95%. b) Horas al año en que el sobrepaso excede 0.1 [lt/s/m]. c) cambios en la operatividad, en horas al año, entre la proyección (2070–2100) y el período histórico (1979–2005).



3 METODOLOGÍA

Para efectos de evaluar la pérdida de disponibilidad de sitios de atraque debido a oleaje, se contempla efectuar un análisis de vulnerabilidad, riesgo e impactos asociados a los cierres de puertos. Las 9 zonas portuarias analizadas y las correspondientes empresas portuarias estatales son:

- Arica Empresa Portuaria Arica (EPA)
- Iquique Empresa Portuaria Iquique (EPI)
- Mejillones No existe una empresa portuaria estatal
- Antofagasta Empresa Portuaria Antofagasta
- Coquimbo Empresa Portuaria Puerto de Coquimbo (EPCO)
- Quintero No existe una empresa portuaria estatal
- Valparaíso Empresa Portuaria Valparaíso (EPV)
- San Antonio Empresa Portuaria San Antonio (EPSA)
- San Vicente Empresa Portuaria Talcahuano - San Vicente

El estudio no contempla:

- El estudio del downtime operacional asociado a otras variables atmosféricas (e.g. viento, neblina) ni oceanográficas (e.g. cambios en el nivel del mar, corrientes y mareas meteorológica y astronómica).
- El estudio del downtime operacional asociado a variables de índole geofísico (tsunamis y terremotos). Cabe notar que los puertos chilenos han sufrido prolongadas paradas operativas debido a la ocurrencia de sismos. Ejemplos son Valparaíso y San Antonio para el terremoto del 3/mar/1985 (Ortigosa, 1986), Talcahuano para el tsunami del 27/feb/2010 (Fritz et al., 2011; ASCE, 2013), Iquique para el terremoto de 1/abr/2014 (Catalán et al., 2015) y Coquimbo para el tsunami del 16/sep/2015 (Contreras et al., 2016).
- El estudio de las paradas operativas asociadas a paros de trabajadores portuarios u otras causas de origen no natural.
- La evaluación del impacto económico asociado a la pérdida de bienes y servicios que se generan en la cadena logística del transporte. Los costos calculados en este estudio se restringen en este estudio a reducciones potenciales de ingresos anuales de los operadores de los terminales.

El estudio asume que las condiciones de vulnerabilidad permanecen constantes entre ambos períodos de análisis. No obstante, la vulnerabilidad puede reducirse mediante el uso de obras de infraestructura (e.g. mejoramiento de condiciones de abrigo) o soluciones tecnológicas (e.g. mejoramiento de configuraciones de amarre de naves o uso de sistemas de alerta temprana de marejadas a nivel local). Las tareas para cada uno de estos análisis se describen a continuación.

3.1 ESTUDIO DE VIENTO Y OLAJE

El estudio de oleaje contempla la transformación del oleaje desde aguas profundas¹³ (sección 4.1.1) a la entrada de las dársenas portuarias (sección 4.1.2). Esta transformación se efectúa con los objetivos de:

- Comparar información de oleaje local con los cierres de puertos registrados por la Autoridad Marítima (2008-2017) y de esta manera caracterizar la vulnerabilidad de cierres de puerto (sección 3.2).
- Generar una base de datos de oleaje local para el período histórico (1985-2004) y proyección (2026-2045), que permite estimar el riesgo de cierres de puerto (sección 4.3).

El análisis se realiza para nodos ubicados en la bocana de acceso de la dársena portuaria (Arica, Iquique, Antofagasta, Valparaíso, San Antonio y San Vicente) o a puntos representativos de la bahía (Mejillones, Coquimbo, Quintero), que son indicados mediante un círculo rojo en la Figura 20 a la Figura 28. La Tabla 2 presenta las coordenadas utilizadas para realizar el análisis de operatividad. El detalle del procedimiento de transformación de oleaje desde aguas a las zonas portuarias se describe en el Anexo 7.2.

Tabla 2: Nodos numéricos utilizados para calcular el clima de oleaje en puertos.

Nodos	Latitud [°S]	Longitud [°S]
Arica	18.476	70.325
Iquique	20.199	70.155
Mejillones	23.060	70.393
Antofagasta	23.646	70.408
Coquimbo	29.942	71.324
Quintero	32.759	71.502
Valparaíso	33.032	71.614
San Antonio	33.588	71.627
San Vicente	36.740	73.155

3.2 VULNERABILIDAD DE CIERRE DE PUERTOS

El estudio contempla un análisis de vulnerabilidad cuyo objetivo es comprender, a nivel histórico, los criterios de cierre de puertos debido a las marejadas que utiliza la autoridad marítima de cada puerto.

¹³ En aguas profundas se dispone de los modelos globales y donde el oleaje no siente el fondo.

Para ello se efectúan los siguientes análisis:

- Caracterización de la flota (sección 4.2.1) a partir de estadísticas históricas disponibles en DIRECTEMAR (2019), con el objetivo de definir una tipología de nave que represente a cada uno de los 9 puertos analizados y a partir de esta se definan los umbrales de operación (sección 4.2.2).
- Criterios de cierre de puertos (sección 4.2.2) a partir de información disponible en las Capitanías de Puerto de los 9 puertos analizados y de las Recomendaciones de Obras Marítimas Españolas (PPEE, 2000), con el objetivo de definir umbrales de operación que serán cruzados con la información estadística del oleaje en el análisis de riesgo.
- Análisis de estadística de cierres de puerto (sección 4.2.3) obtenida de certificados de cierre de puerto (2015, 2016 y 2017) y de una base de datos de cierres de puerto proporcionada por SERVIMET (2007 a abril 2017), con el objetivo de cuantificar las horas de cierre para 19 puertos expuestos al Océano Pacífico en general, y en particular para los 9 puertos analizados.
- Correlación de cierres de puertos y parámetros de oleaje (sección 4.2.4) a partir del análisis de estadística de cierres de puerto (sección 4.2.3) y del estudio de oleaje (sección 4.1).

3.3 RIESGO DE CIERRE DE PUERTOS

El estudio contempla un análisis de riesgo que consiste en cruzar los criterios de cierre de puertos basados en la altura significativa del oleaje (sección 4.2.2) con la estadística de oleaje para el período histórico y la proyección (sección 4.1), de modo de calcular el *downtime* operacional¹⁴ de cada uno de los 9 puertos de interés. Este cruce se efectúa tanto en el período histórico y la proyección considerando que los criterios de cierre de puerto no se mantienen constantes en el tiempo. Este procedimiento trae implícito el supuesto de que la amenaza (oleaje) cambia debido al cambio climático pero la vulnerabilidad, caracterizada mediante los criterios de cierre de puerto, permanece constante en el tiempo.

3.4 IMPACTO ECONÓMICO DE CIERRE DE PUERTOS

Una vez obtenidos los *downtime* históricos y proyectados para cada puerto, se utiliza la diferencia de tiempo para valorar el impacto económico, la que se multiplica por el valor económico del tiempo de perdido. Para aproximar este valor se utilizaron las tarifas asociadas al uso del puerto.

¹⁴ La disponibilidad de sitios de atraque, denominada *downtime* operacional en la literatura especializada, 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, entre otros.

Las tarifas de tiempo de atraque y carga movilizada se obtuvieron de información pública de empresas portuarias del estado. La estructura de estas tarifas tiene dos elementos principales:

- cobro por hora de atraque y metros de eslora,
- cobro por movimiento de carga.

Para el cálculo del cobro por hora de atraque y metros de eslora, se calculó la eslora promedio a partir de las Toneladas de Registro Grueso (TRG) total y número de naves recaladas al año, reportadas por DIRECTEMAR para 2017¹⁵ para cada zona portuaria según autoridad marítima. Este valor fue transformado en TRG promedio y luego transformado a eslora utilizando tablas de las Recomendaciones de Obras Marítimas (ROM) 3.1-99.

Para el cálculo del cobro por movimiento de carga, se sumaron los volúmenes de importación y exportación de cada zona portuaria según autoridad marítima para el año 2018 a partir de datos del Servicio Nacional de Aduanas, y fueron asignados a cada puerto en forma proporcional a partir del número de sitios de cada uno. Este valor se multiplicó por una tasa de ocupación promedio para estimar las toneladas en carga/descarga por hora para cada zona portuaria. Estas toneladas por hora se multiplicaron por la tarifa por tonelada y las horas de downtime para calcular el impacto económico del cierre de puertos producto del cambio climático. La tasa de ocupación promedio se construyó a partir del tiempo promedio de permanencia y el número de naves por zona portuaria, asignadas a cada puerto según número de sitios. Esto entrega el número total de horas de ocupación por puerto, el que se divide por sitio y el número de horas en un año para obtener esta tasa.

¹⁵ DIRECTEMAR – Armada de Chile. 2018. Análisis Estadísticas Portuarias. 103p.

4 RESULTADOS

4.1 ESTUDIO DE OLAJE

4.1.1 Oleaje en aguas profundas

Los campos bidimensionales de viento a 10 [m] sobre el nivel del mar y los parámetros de altura significativa, período medio y dirección media se presentan en la Figura 13 a la Figura 19 para el período histórico (1985-2004), la proyección (2026-2045) y para la diferencia entre ambos. Se muestra el percentil 50% y 99% como ejemplo del clima medio y el percentil 99% como un ejemplo de un oleaje más intenso (pero no necesariamente extremo). Cabe notar que para este estudio se transfirió toda la estadística y por tanto se cuenta (pero no se presenta) con curvas de excedencia de todos estos parámetros en aguas profundas a la cuadra de los 9 puertos en análisis. La Tabla 3 presenta un resumen de las tendencias identificadas en cada una de estas variables en cuatro zonas de Chile continental¹⁶ (CORFO, 1950).

Tabla 3: Resumen de diferencias de parámetros de viento y oleaje entre el período histórico (1985-2004) y la proyección (2026-2045) en las 4 zonas geográficas de Chile. Celdas sin descriptor representan cambios despreciables.

Parámetro	Percentil %	Zona Norte 19°S – 32°S	Zona Centro 32°S – 37°S	Zona Sur 37°S – 44°S	Zona Austral 44°S - 55°S
Viento	50	Aumento	Disminución	Disminución	Variable
	90	Aumento	Disminución	Disminución	Aumento
Altura significativa	50	-	-	-	Aumento
	90	Aumento	-	Aumento	Aumento
Período medio	50	Disminución	Aumento	Aumento	Aumento
	90	Aumento	Aumento	Aumento	Aumento
Dirección media	50	-	Giro al sur	Giro al sur	-



¹⁶ Las regiones Norte Grande y Norte Chico definidas por CORFO (1950) se funden en "Zona Norte".

Figura 13: Campos de magnitud de viento a 10 metros sobre el nivel del mar para el período histórico (1985-2004) y proyección (2026-2045), además de la diferencia entre ambos para el percentil 50% frente a Chile.

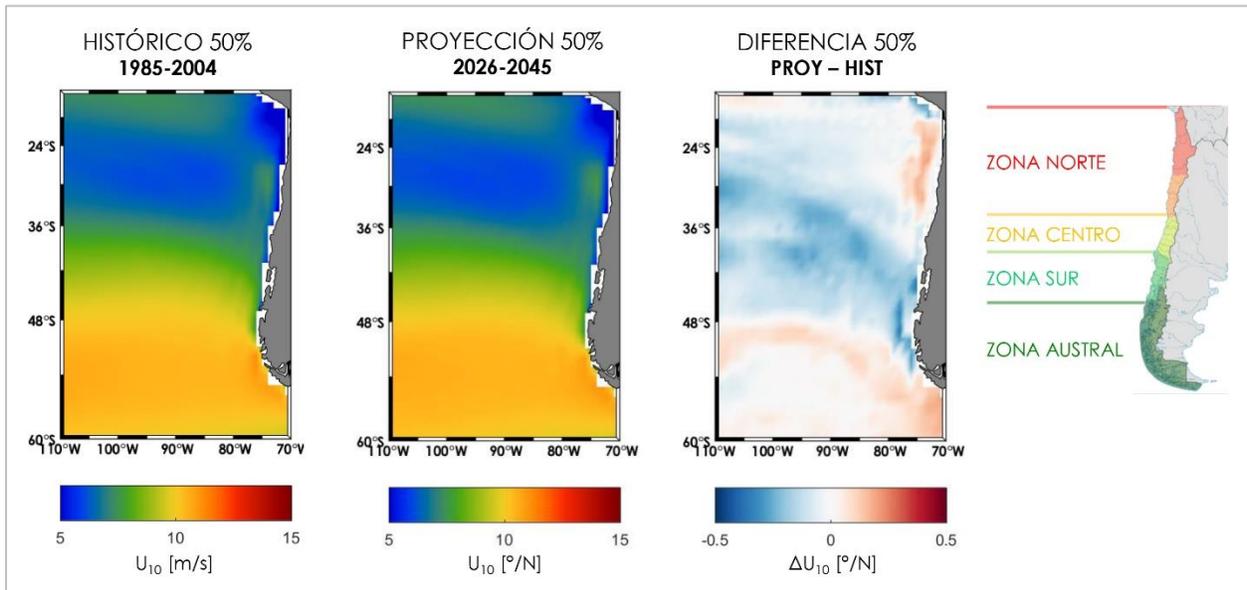


Figura 14: Campos de magnitud de viento a 10 metros sobre el nivel del mar para el período histórico (1985-2004) y proyección (2026-2045), además de la diferencia entre ambos para el percentil 99% frente a Chile.

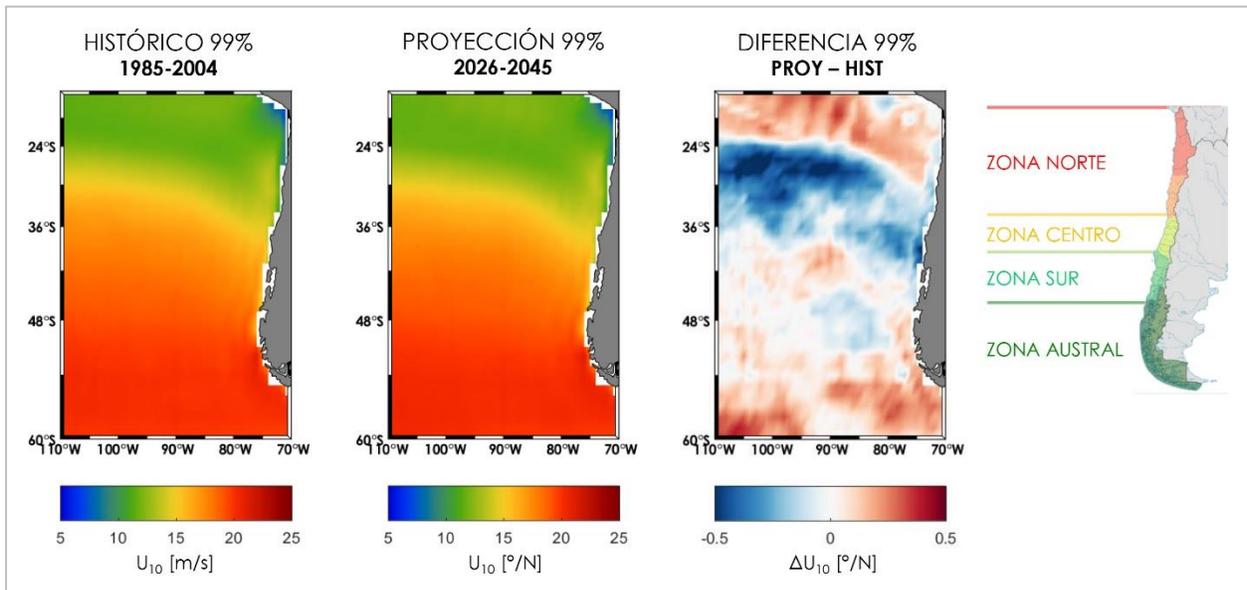


Figura 15: Campos de altura significativa de oleaje para el período histórico (1985-2004) y proyección (2026-2045), además de la diferencia entre ambos para el percentil 50% frente a Chile.

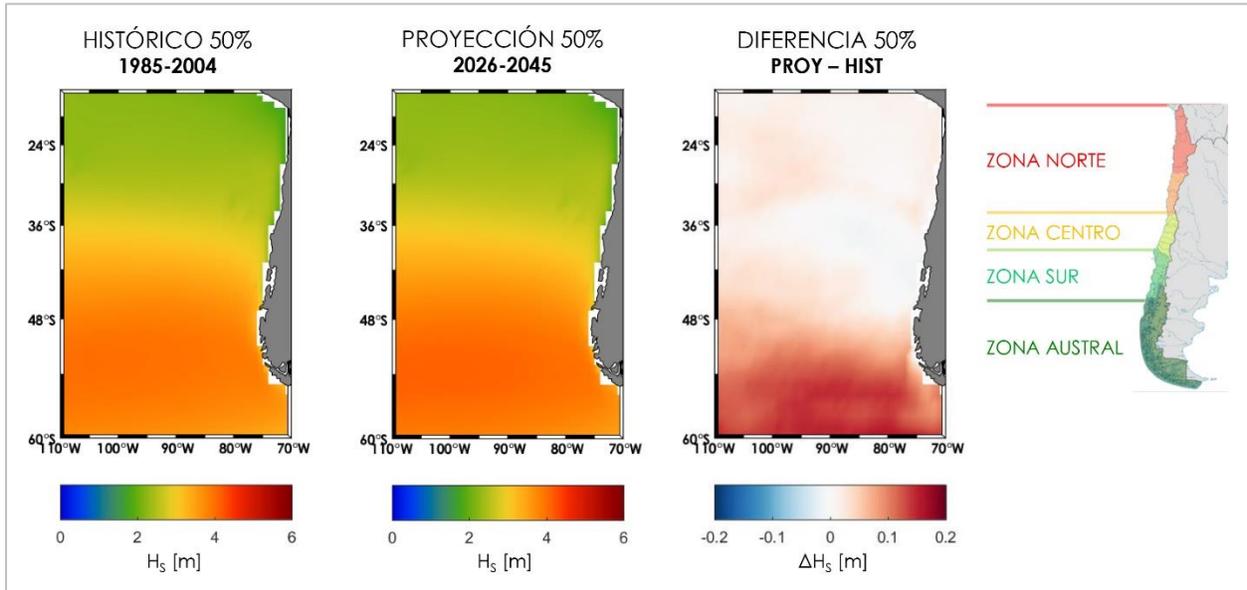


Figura 16: Campos de altura significativa de oleaje para el período histórico (1985-2004) y proyección (2026-2045), además de la diferencia entre ambos para el percentil 99% frente a Chile.

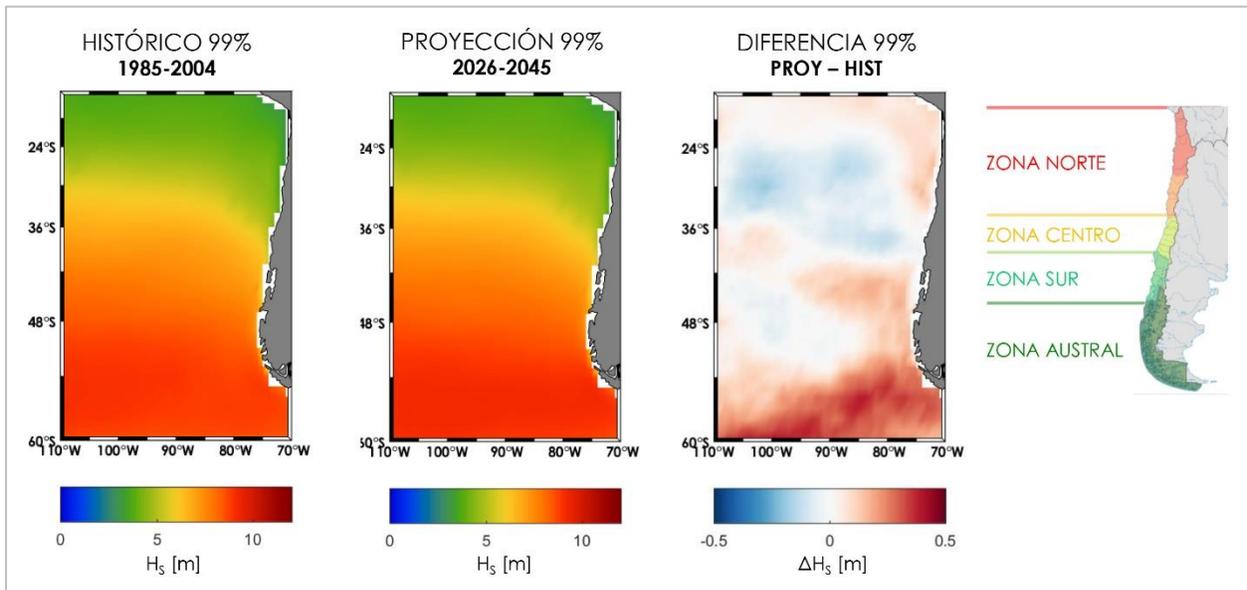


Figura 17: Campos de período medio de oleaje para el período histórico (1985-2004) y proyección (2026-2045), además de la diferencia entre ambos para el percentil 50% frente a Chile.

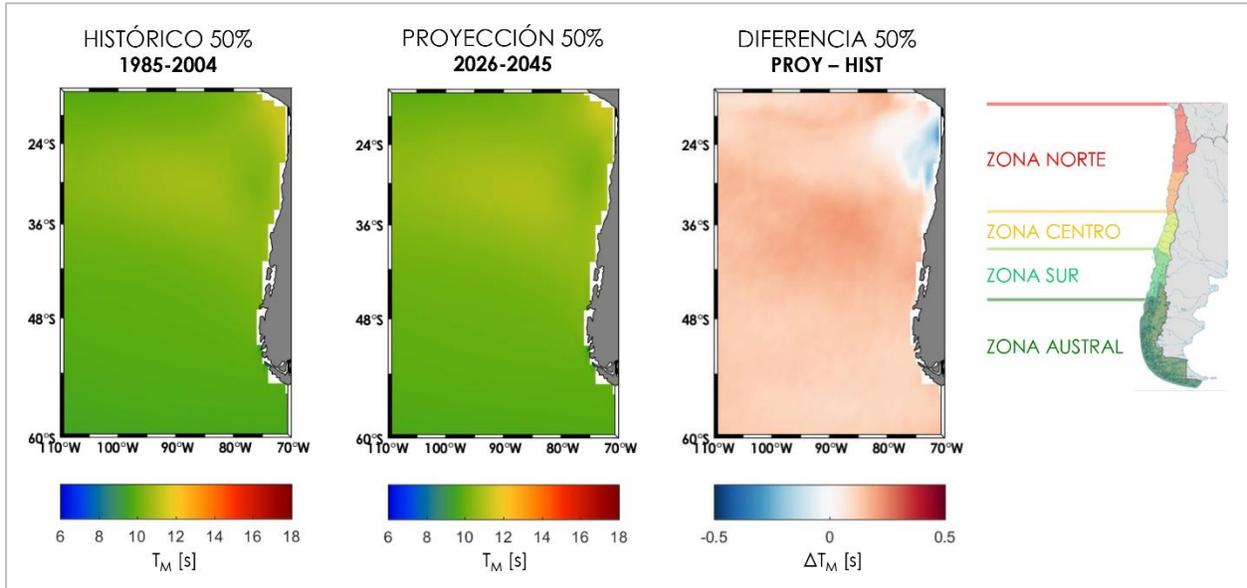


Figura 18: Campos de período medio de oleaje para el período histórico (1985-2004) y proyección (2026-2045), además de la diferencia entre ambos para el percentil 99% frente a Chile.

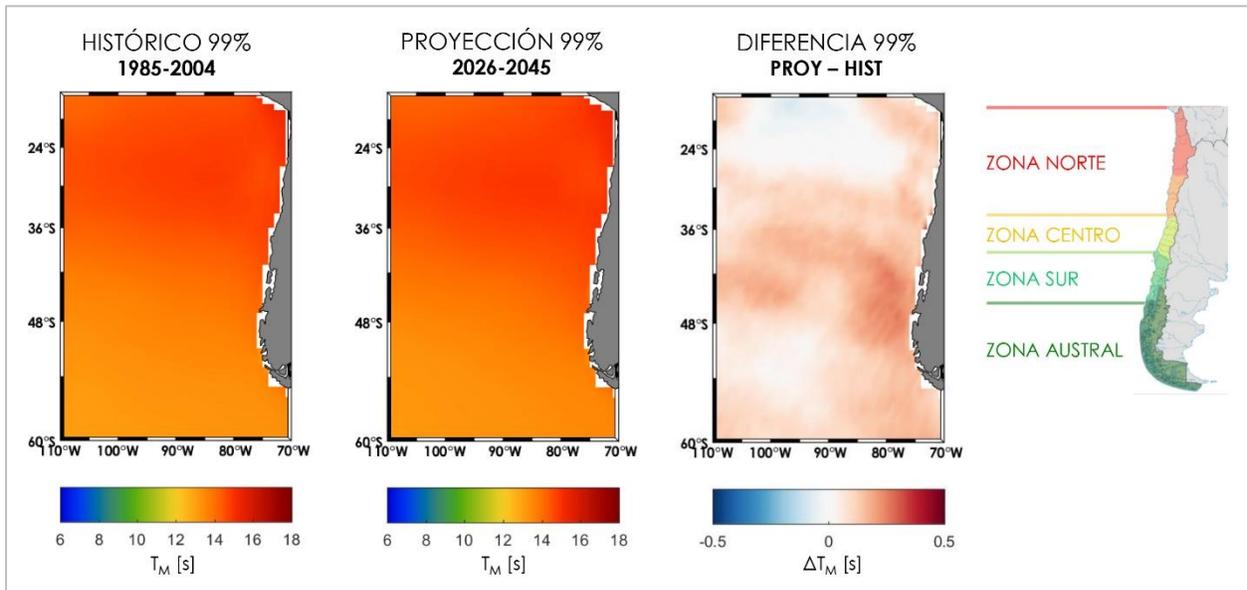
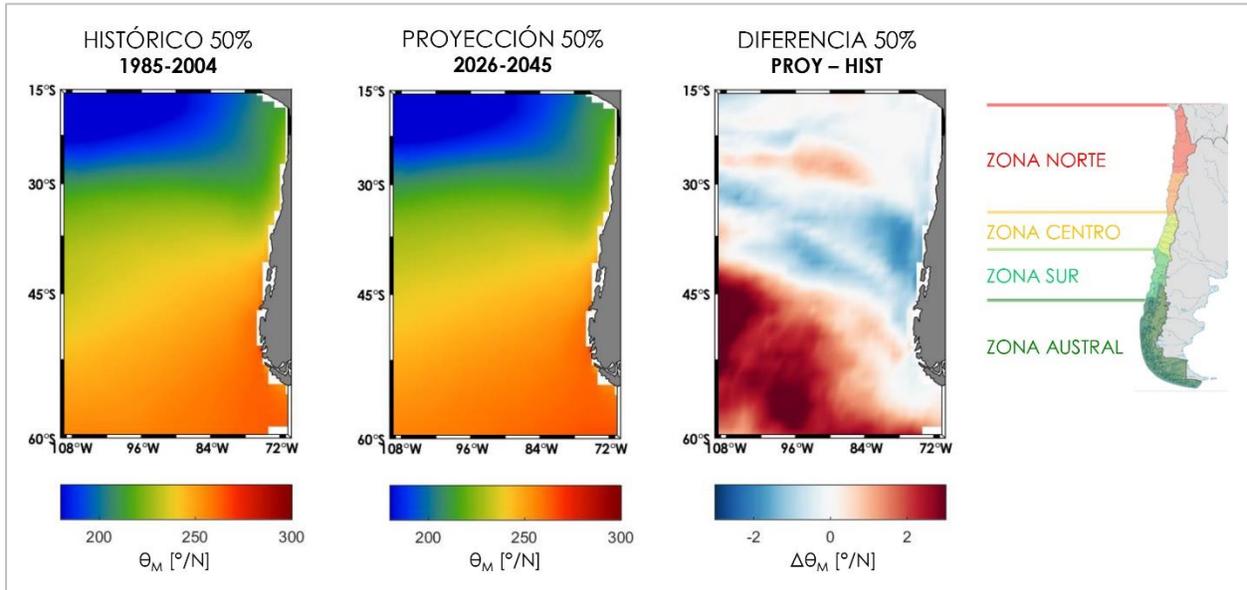


Figura 19: Campos de dirección media de oleaje para el período histórico (1985-2004) y proyección (2026-2045), además de la diferencia entre ambos para el percentil 50% frente a Chile.



4.1.2 Oleaje en zonas portuarias

El procedimiento de transformación de oleaje desde aguas profundas a las dársenas portuarias se efectuó para los siguientes puertos:

- Arica
- Iquique
- Mejillones
- Antofagasta
- Coquimbo
- Quintero
- Valparaíso
- San Antonio
- San Vicente

Mediante la transformación del oleaje desde aguas profundas a los nodos representativos de cada puerto, se calculan la probabilidad de excedencia, tanto para el periodo histórico (1985-2004), como para la proyección (2026-2045) de los siguientes parámetros de oleaje

- Altura significativa (H)
- Período medio (T)
- Potencia normalizada (H^2T)

Aun cuando los límites operacionales se definen en Chile en función de la altura del oleaje (sin necesariamente definir exactamente qué estadígrafo la representa), se analizaron también el período medio y la potencia normalizada pues se presume que el primero puede ser un buen predictor para swell distantes y la segunda combina la altura y el período (es decir, es un indicador más completo). A modo de ejemplo, las figuras Figura 20 a Figura 28 presentan los patrones de transformación de oleaje (altura significativa, período medio y dirección media) además de la batimetría para los 9 puertos en estudio¹⁷.

La Figura 29, Figura 30 y Figura 31 muestran, a modo de ejemplo, las curvas de probabilidad de excedencia de altura significativa, período medio y potencia normalizada, respectivamente, para los 6 modelos de oleaje y mediana en el período histórico y en la proyección, además de la diferencia entre las medianas históricas y de la proyección, en el puerto de Valparaíso. Los resultados para los otros puertos se presentan en el Anexo 0.

¹⁷ Cabe mencionar que estas figuras han sido producidas por el equipo de Ingeniería Civil Oceánica de la Universidad de Valparaíso a partir de la información generada por el proyecto un Atlas de Oleaje para Chile (www.oleaje.uv.cl).

Figura 20: Transformación de oleaje al puerto de Arica. a) Batimetría en [m]. b) altura significativa y c) periodo medio y dirección media (flechas negras para el período histórico. El nodo de evaluación del oleaje se presenta en círculo rojo.

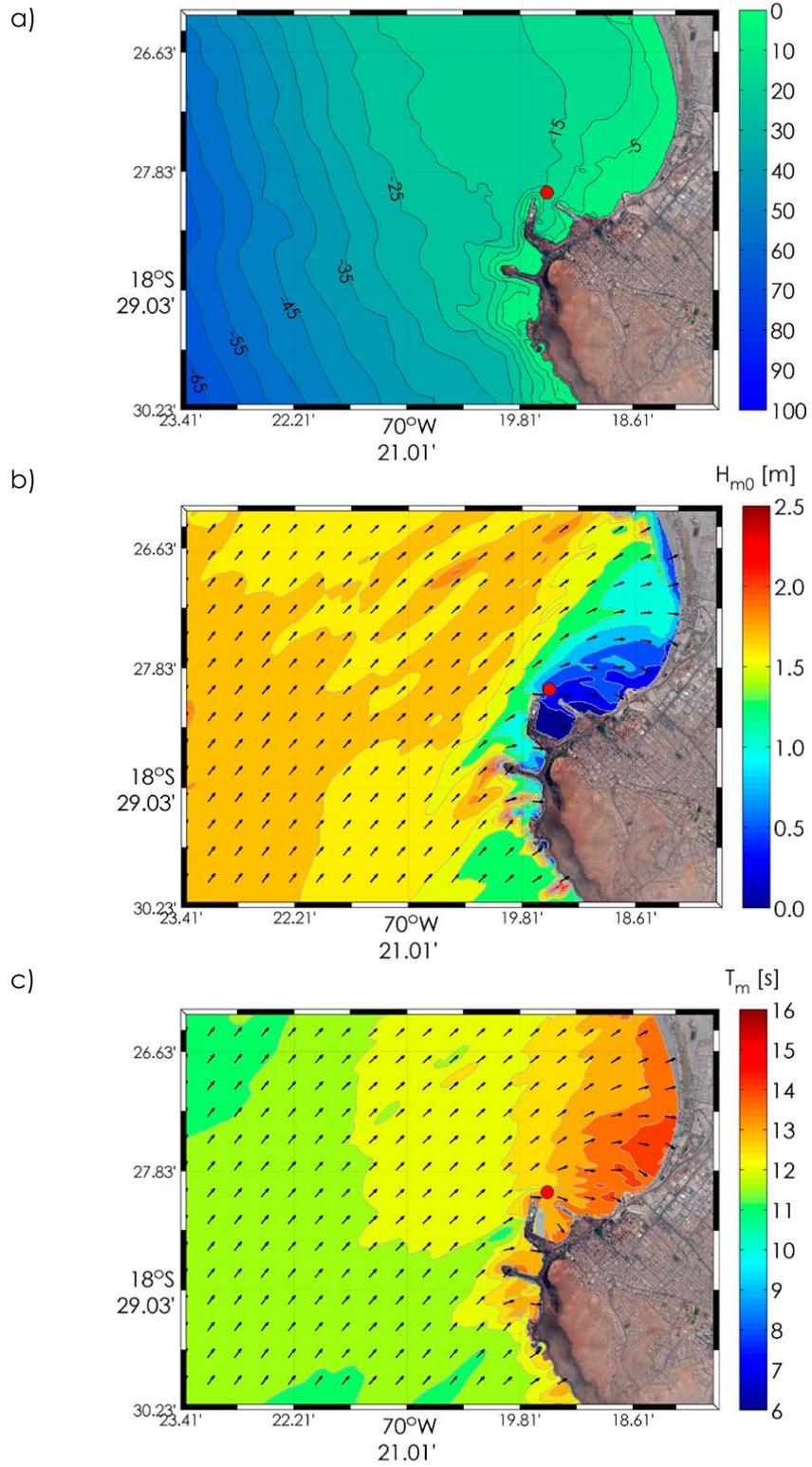


Figura 21: Transformación de oleaje al puerto de Iquique. a) Batimetría en [m]. b) altura significativa y c) periodo medio y dirección media (flechas negras para el período histórico. El nodo de evaluación del oleaje se presenta en círculo rojo.

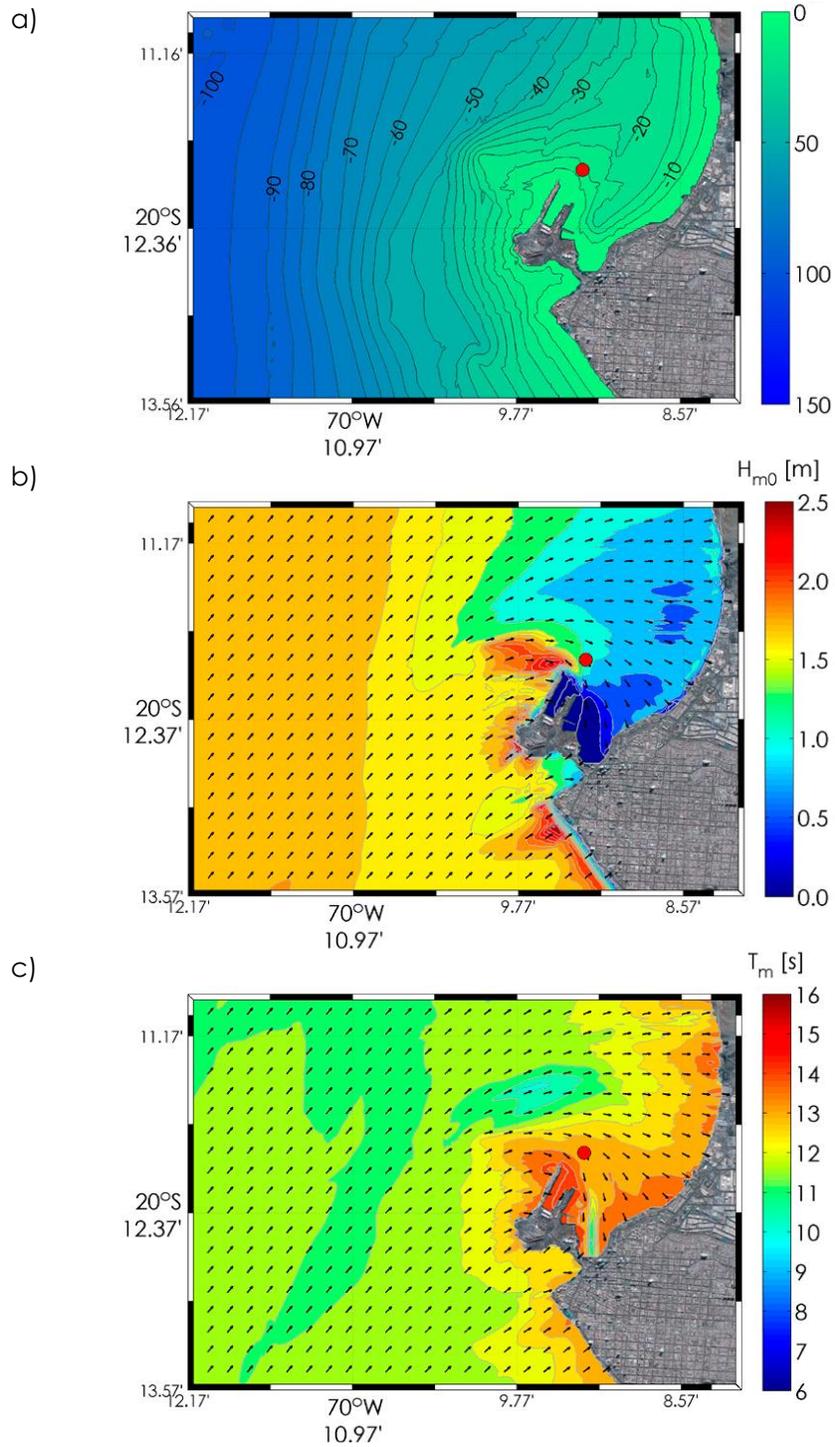


Figura 22: Transformación de oleaje al puerto de Mejillones. a) Batimetría en [m]. b) altura significativa y c) periodo medio y dirección media (flechas negras para el período histórico. El nodo de evaluación del oleaje se presenta en círculo rojo.

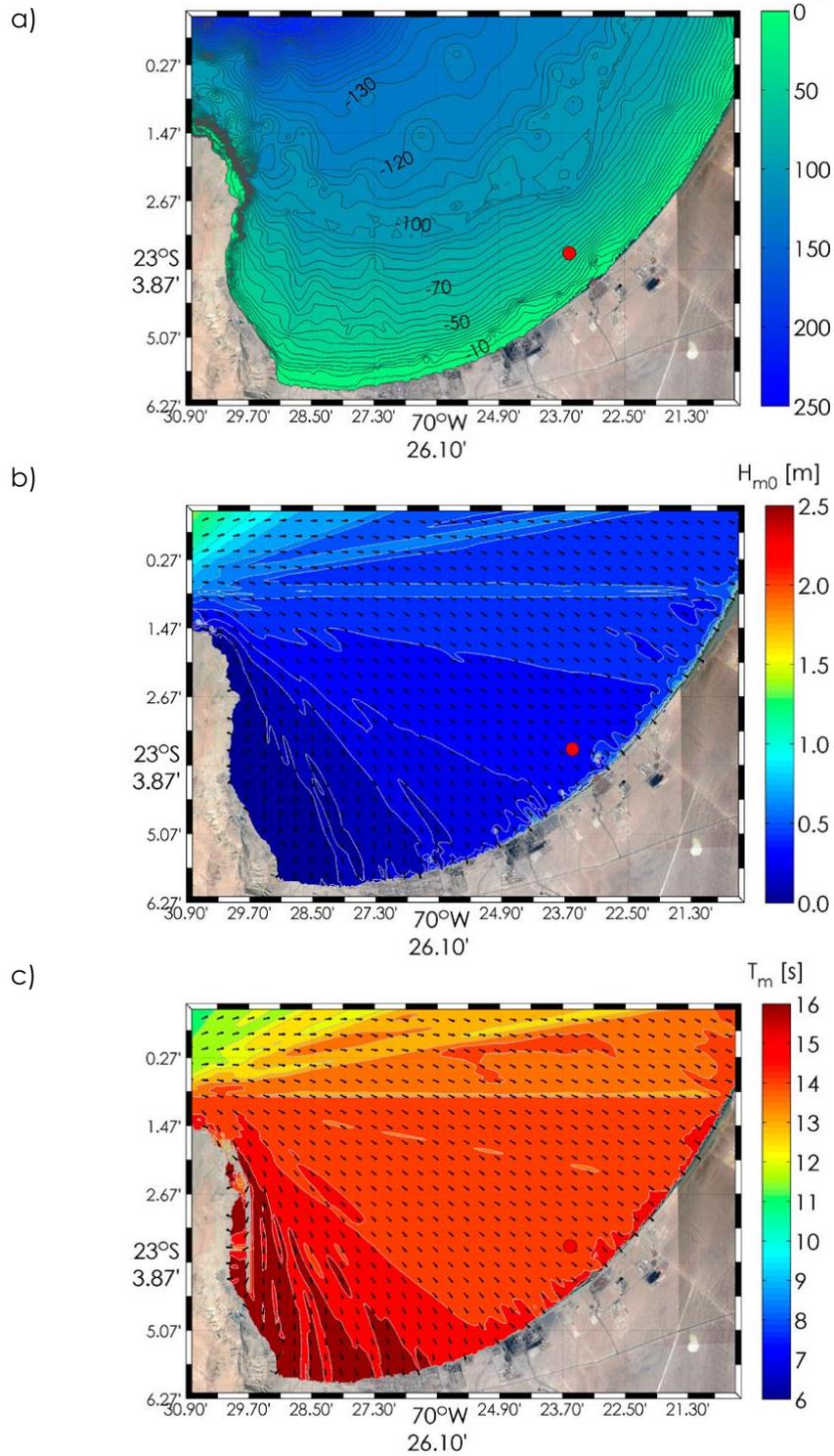


Figura 23: Transformación de oleaje al puerto de Antofagasta. a) Batimetría en [m]. b) altura significativa y c) periodo medio y dirección media (flechas negras para el período histórico). El nodo de evaluación del oleaje se presenta en círculo rojo.

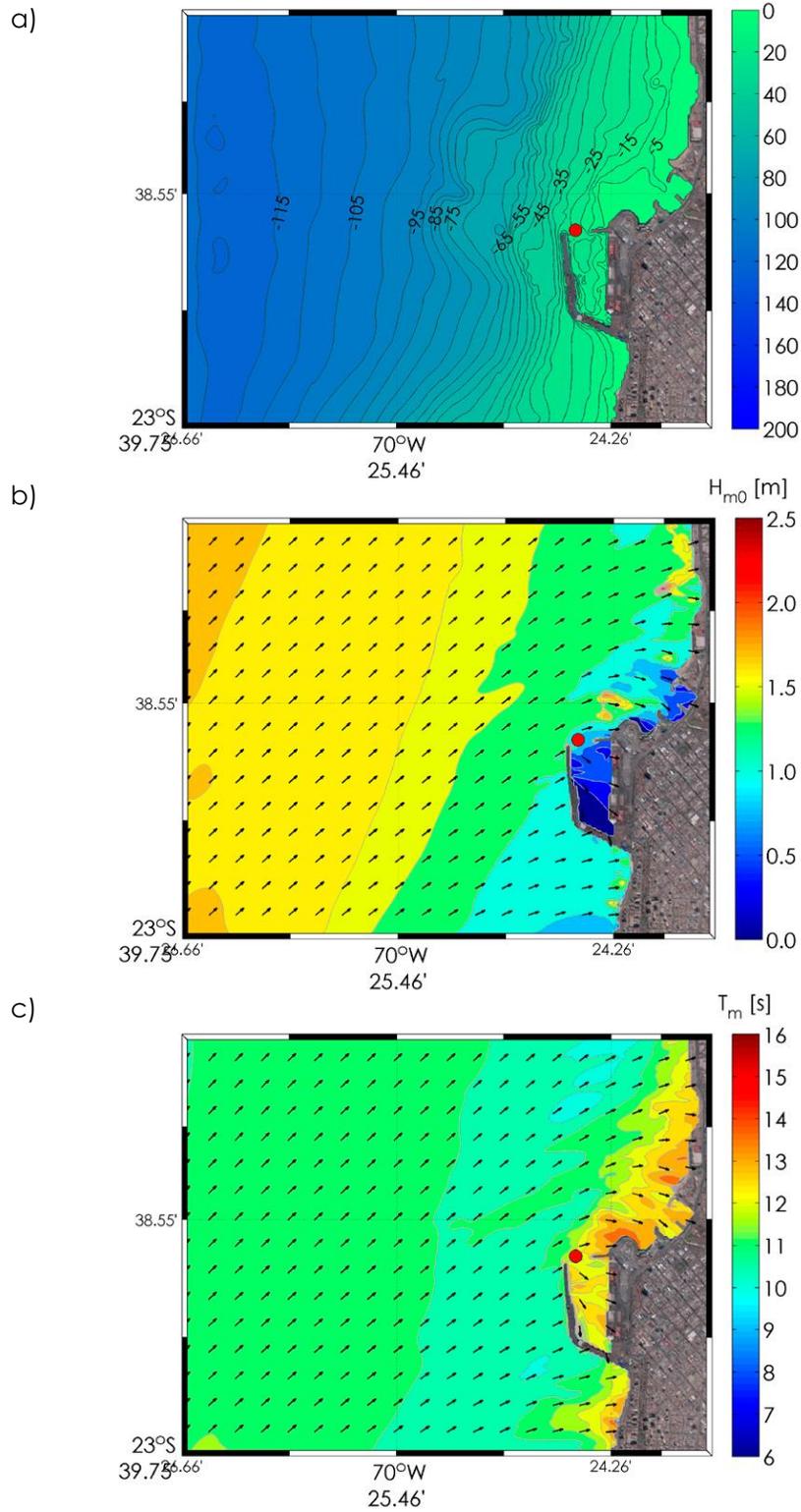


Figura 24: Transformación de oleaje al puerto de Coquimbo. a) Batimetría en [m]. b) altura significativa y c) periodo medio y dirección media (flechas negras para el período histórico. El nodo de evaluación del oleaje se presenta en círculo rojo.

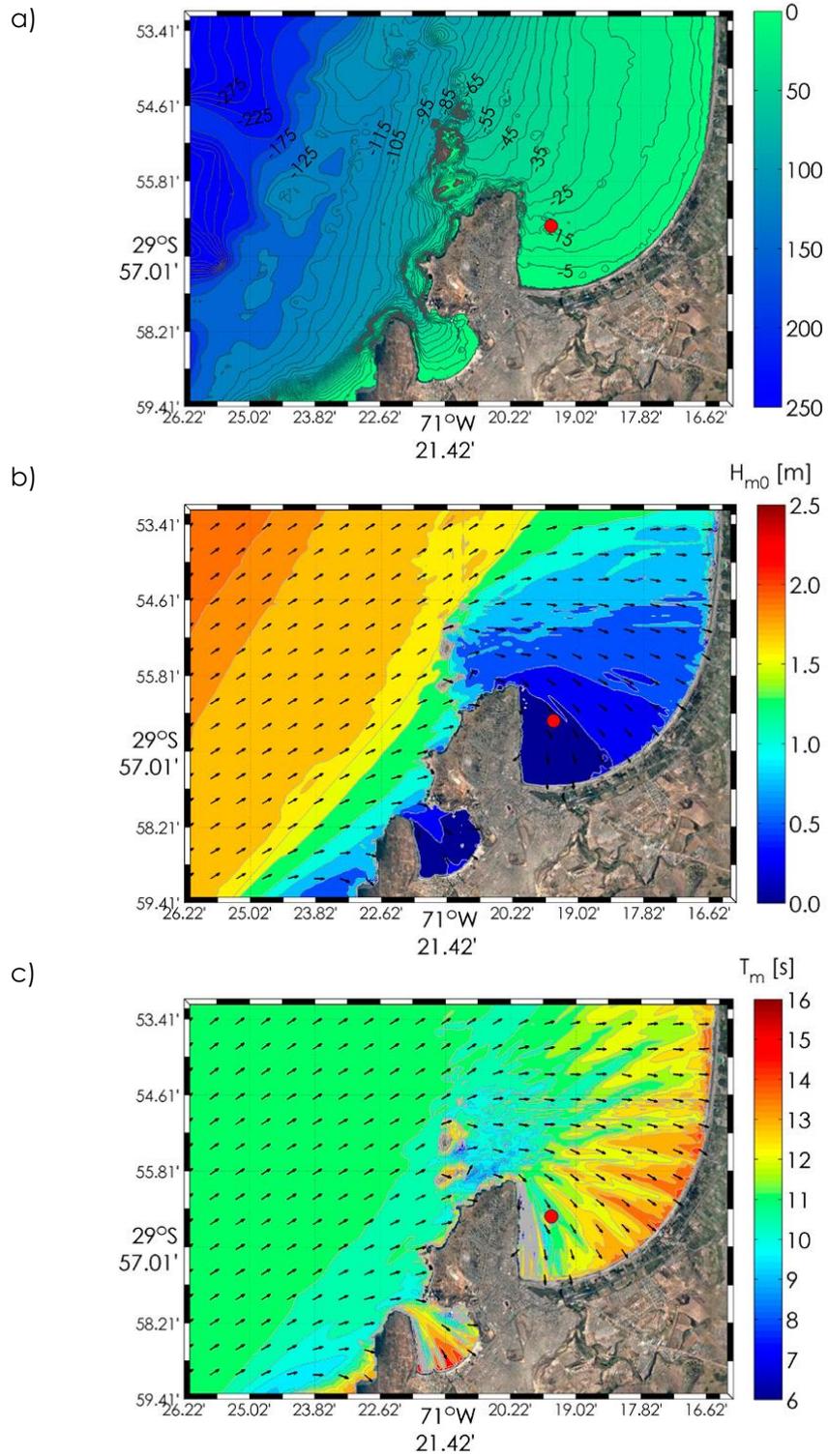


Figura 25: Transformación de oleaje al puerto de Quintero. a) Batimetría en [m]. b) altura significativa y c) periodo medio y dirección media (flechas negras para el período histórico. El nodo de evaluación del oleaje se presenta en círculo rojo.

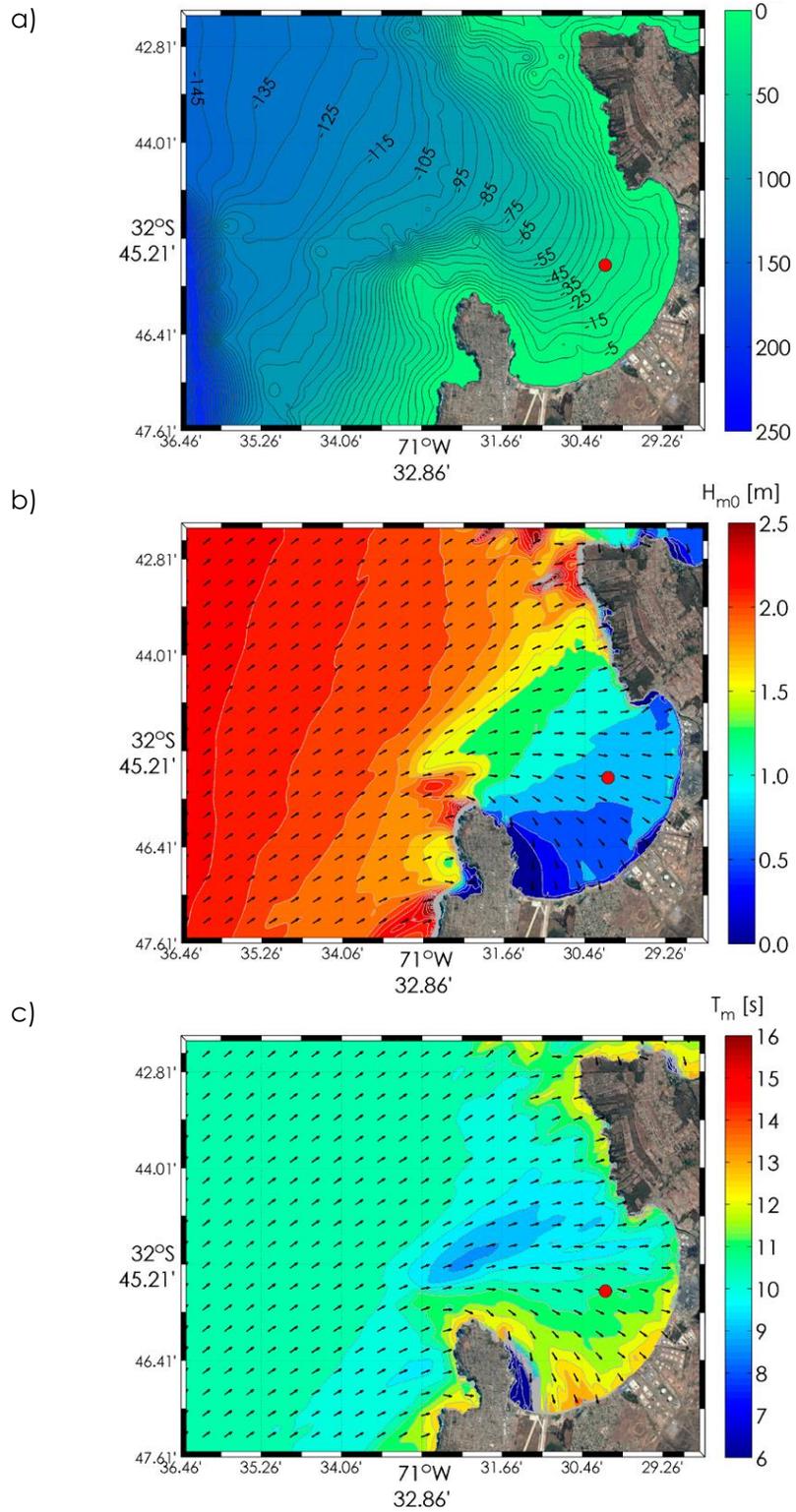


Figura 26: Transformación de oleaje al puerto de Valparaíso. a) Batimetría en [m]. b) altura significativa y c) período medio y dirección media (flechas negras para el período histórico. El nodo de evaluación del oleaje se presenta en círculo rojo.

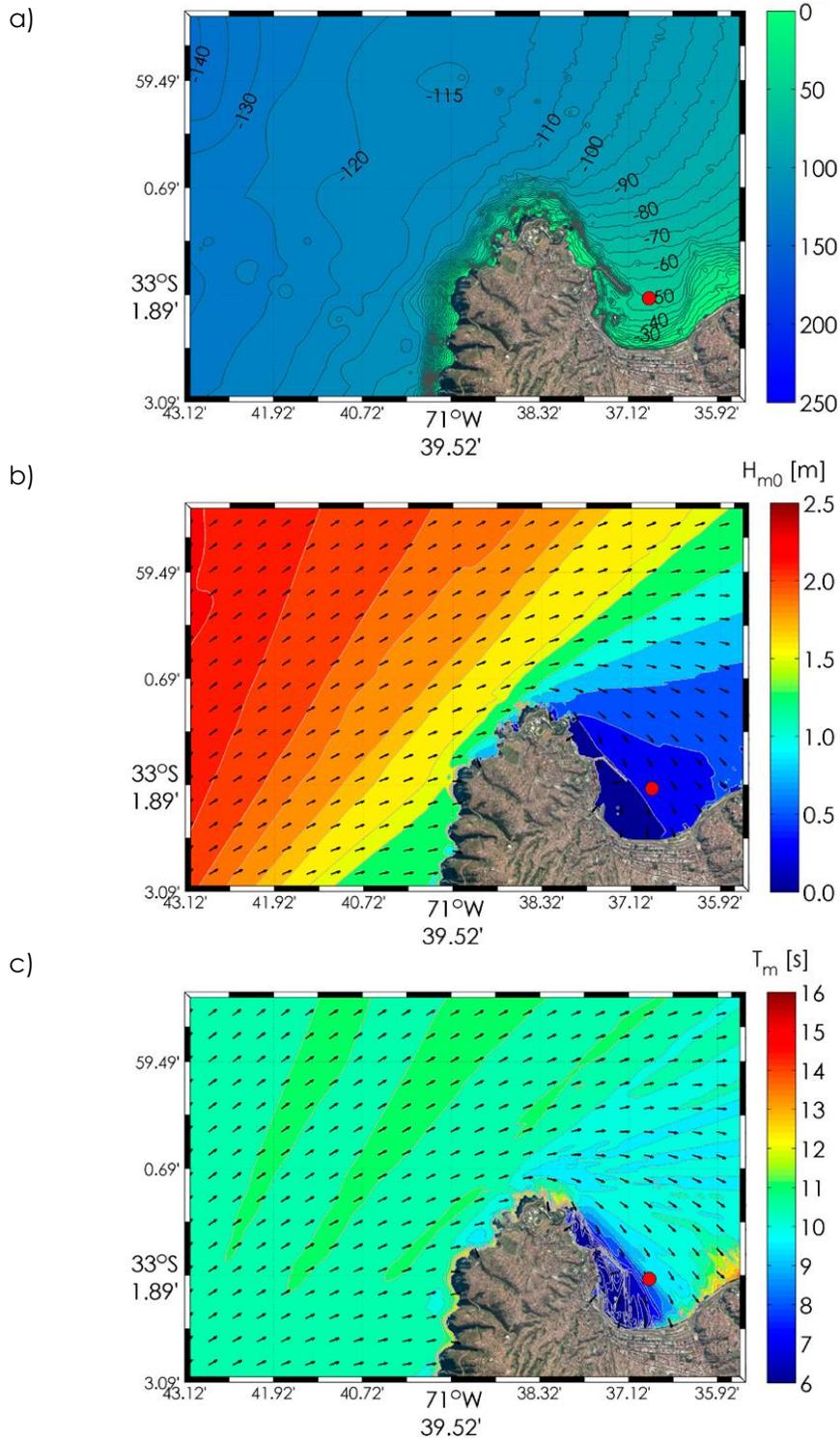


Figura 27: Transformación de oleaje al puerto de San Antonio. a) Batimetría en [m]. b) altura significativa y c) periodo medio y dirección media (flechas negras para el período histórico. El nodo de evaluación del oleaje se presenta en círculo rojo.

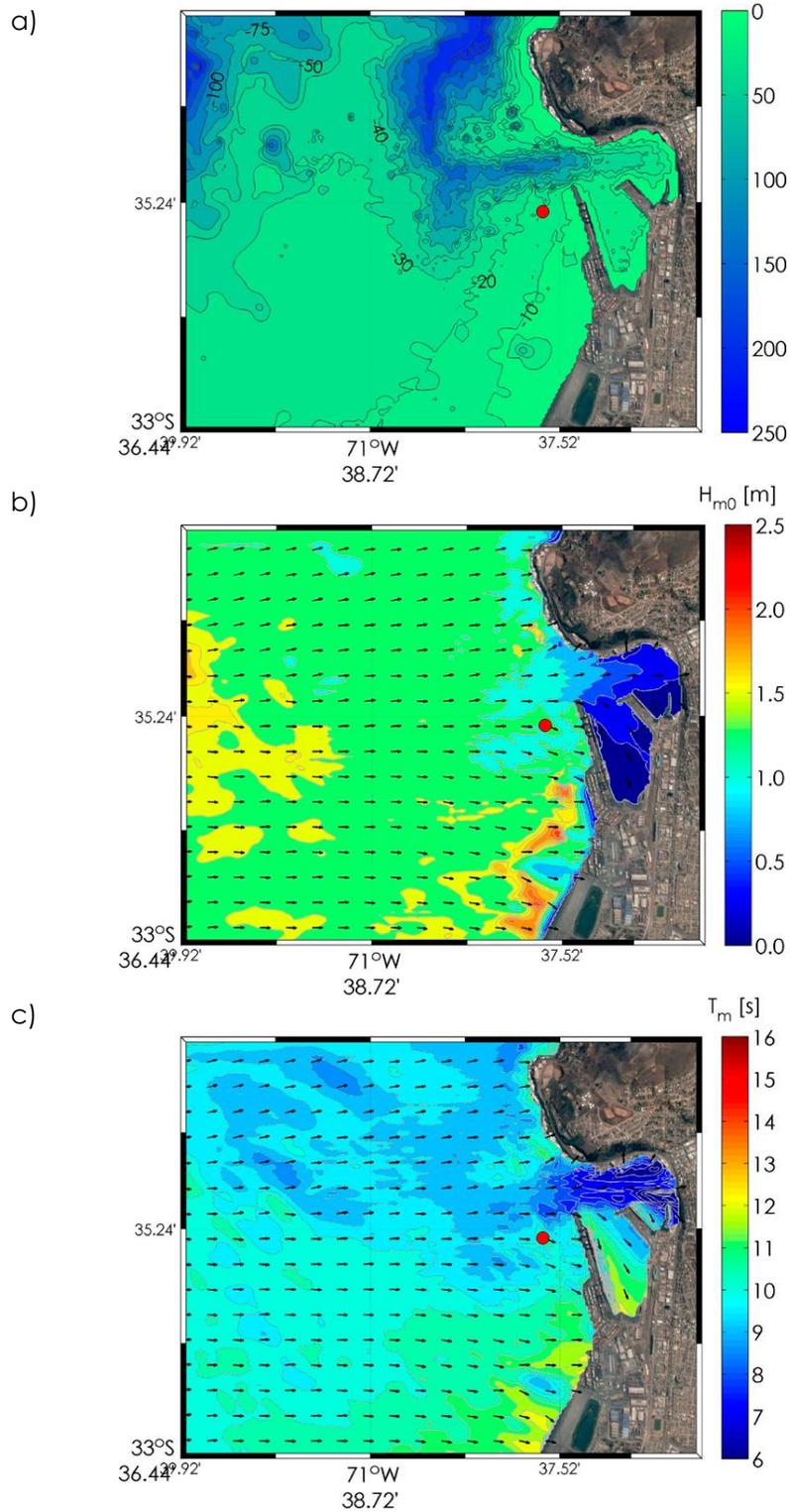


Figura 28: Transformación de oleaje al puerto de San Vicente. a) Batimetría en [m]. b) altura significativa y c) periodo medio y dirección media (flechas negras para el período histórico. El nodo de evaluación del oleaje se presenta en círculo rojo.

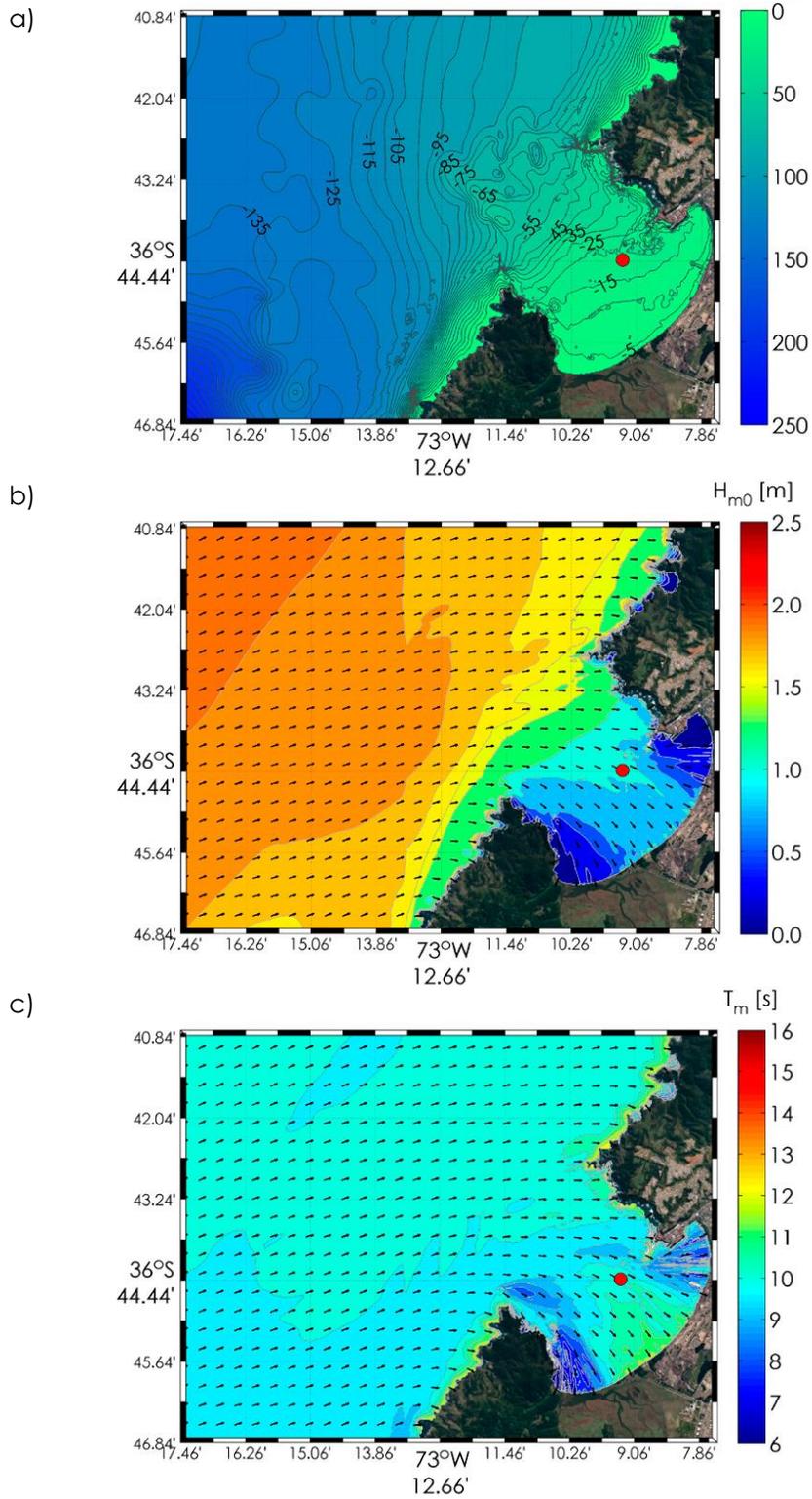


Figura 29: Probabilidad de excedencia altura significativa (Hmo) en el puerto de Valparaíso para los 6 modelos y mediana en el período histórico 1985-2004 (izquierda) y proyección 2026-2045 (centro). La figura de la derecha muestra la diferencia entre las medianas históricas y de la proyección.

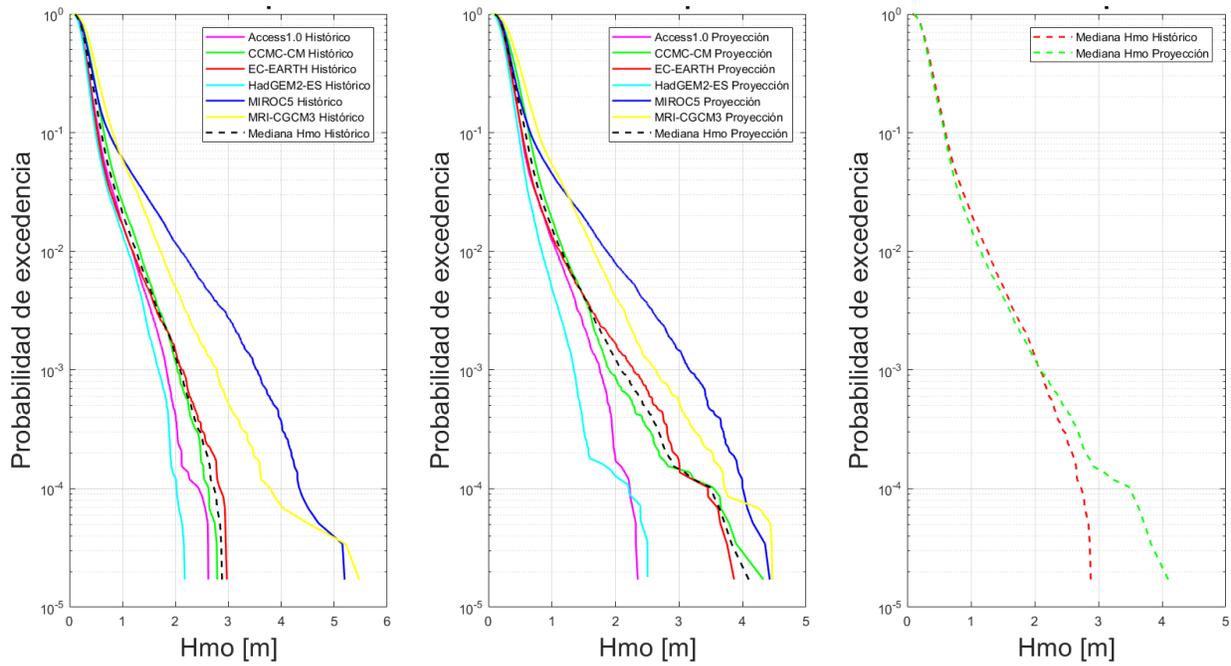


Figura 30: Probabilidad de excedencia período medio (Tm) en el puerto de Valparaíso para los 6 modelos y mediana en el período histórico 1985-2004 (izquierda) y proyección 2026-2045 (centro). La figura de la derecha muestra la diferencia entre las medianas históricas y de la proyección.

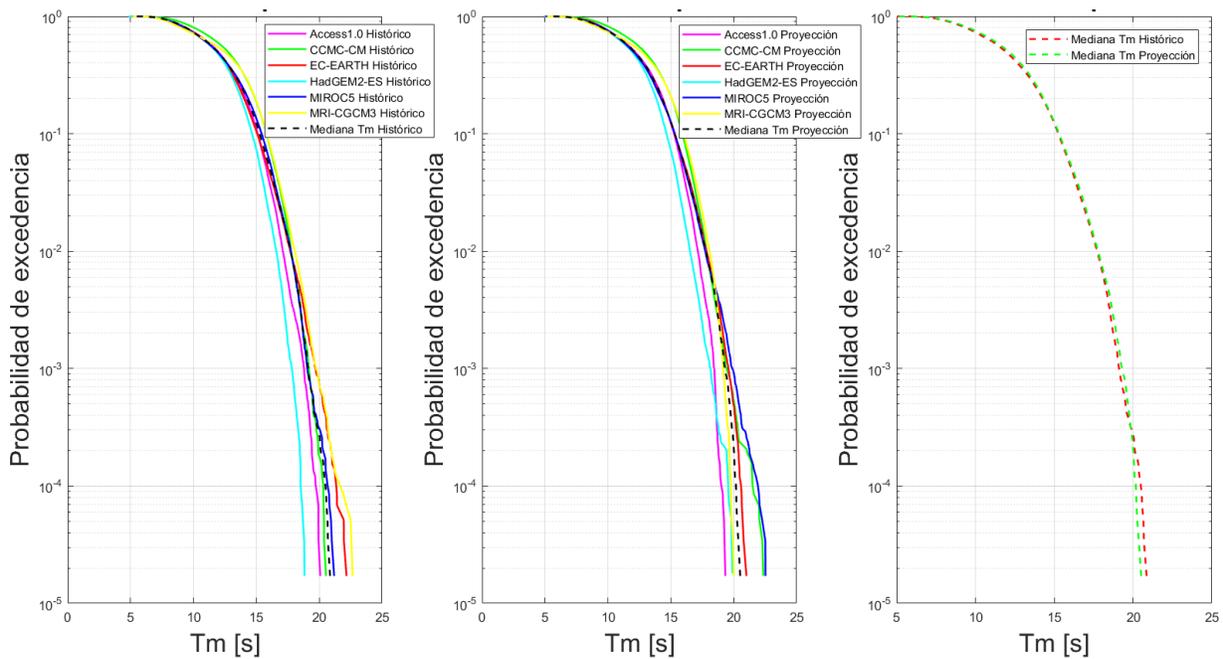
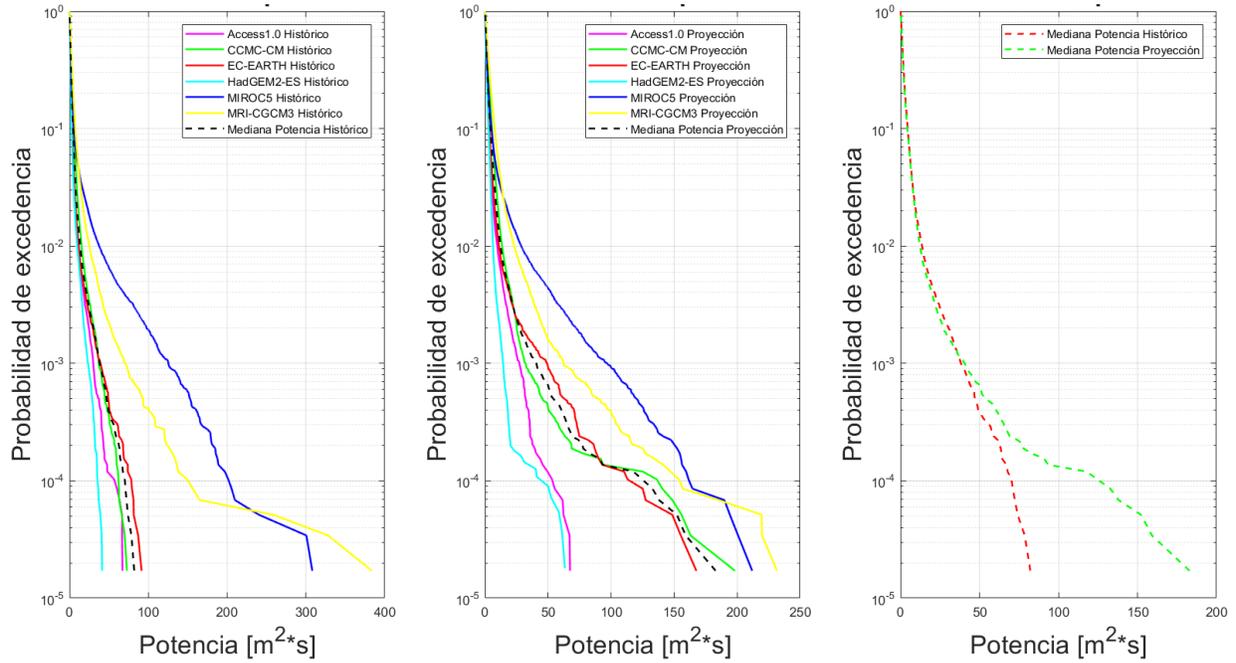


Figura 31: Probabilidad de excedencia potencia normalizada (Hmo2Tm) en el puerto de Valparaíso para los 6 modelos y mediana en el período histórico 1985-2004 (izquierda) y proyección 2026-2045 (centro). La figura de la derecha muestra la diferencia entre las medianas históricas y de la proyección.



4.2 VULNERABILIDAD DE CIERRES DE PUERTOS

4.2.1 Caracterización de la flota

Para conocer el tipo de flota que atiende cada puerto, se analizaron las estadísticas portuarias que elabora cada año DIRECTEMAR (2019). La Tabla 4 presenta un ejemplo de estas estadísticas para el puerto de Valparaíso. En el Anexo 7.3 se ilustra la caracterización de la flota para los otros 8 puertos analizados (Arica, Iquique, Mejillones, Antofagasta, Coquimbo, Quintero, San Antonio y San Vicente). Una vez identificadas las recaladas por tipo de embarcación, se selecciona la tipología de buque que es representativa de cada uno de los puertos analizados.

Tabla 4: Recaladas por tipo de nave en el puerto de Valparaíso (DIRECTEMAR, 2019).

Año	Portacontenedores	Carga general	Petrolero	Granelero	Roll on- roll off	Tanque químico	Frigorífico	Pasajeros	Tanque líquido específico	Pesquero ¹⁸	Gasero	Científico	Otros ¹⁹
2012	340	187	44	50	69	-	132	34	1	8	-	3	5
2013	303	246	36	61	71	-	91	38	-	5	-	19	3
2014	353	57	168	17	42	-	100	39	-	10	-	6	11
2015	296	77	181	8	-	15	-	87	34	5	-	-	13
2016	227	194	3	44	2	3	55	48	-	3	-	1	15
2017	240	228	1	43	-	-	59	32	-	7	-	6	6
2018	185	181	-	39	4	-	2	14	-	3	52	-	36
Total	1994	1170	433	262	188	18	439	292	35	41	52	35	79

Como se observa en la Tabla 5 y Tabla 6, la tipología de embarcación que posee un mayor número de recaladas en siete de los nueve puertos es el portacontenedores (a excepción de Coquimbo y Quintero, que tienen un alto porcentaje de buques graneleros y petroleros, respectivamente). Por ende, y con el objeto de simplificar el análisis, se consideró esta tipología como representativa de todos los puertos.

¹⁸ Incluye pesquero de arrastre, pesquero espinelero, pesquero de factoría, pesquero de cerco y wellboat.

¹⁹ Catamarán, yate, barcaza, remolcador de alta mar, pontón, transbordador, lancha de apoyo técnico, etc.

Tabla 5: Recaladas por rango TRG en el puerto de Valparaíso (DIRECTEMAR 2019).

Año	Menos de 10.000	10.000 a 20.000	20.000 a 30.000	30.000 a 40.0000	Más de 40.000
2012	220	184	119	53	297
2013	240	174	101	52	306
2014	148	176	73	66	340
2015	137	168	55	50	306
2016	127	121	45	43	259
2017	101	123	50	43	305
2018	80	121	53	29	223
Total	1053	1067	496	336	2036

Tabla 6: Número total de recaladas por tipo de embarcación (DIRECTEMAR 2019). El máximo por puerto se indica en negritas.

Puerto	Portacontenedores	Carga general	Petrolero	Granelero	Roll on- roll off	Tanque químico	Frigorífico	Pasajeros	Tanque líquido específico	Pesquero	Gasero	Científico	Otros
Arica	1335	767	435	254	64	53	8	78	38	0	1	13	5
Iquique	1430	559	411	161	895	229	53	36	35	10	1	0	26
Mejillones	1463	1364	1291	1096	189	902	68	7	277	0	83	10	21
Antofagasta	855	814	491	551	20	74	3	20	33	1	5	5	628
Coquimbo	121	239	247	289	8	80	163	108	19	1	9	0	6
Quintero	216	515	2543	1720	76	659	54	0	360	0	328	44	10
Valparaíso	1944	1170	433	262	188	18	439	292	35	41	52	35	79
San Antonio	3414	1647	602	886	1028	396	40	37	134	0	2	0	128
San Vicente	1319	693	1245	878	25	304	42	0	128	8	22	0	3

4.2.2 Criterios de cierre de puertos

Para determinar los impactos que el cambio climático tendrá en la operatividad de los puertos, es necesario definir los límites operacionales que se adoptan habitualmente para la navegación y maniobras de buques. De acuerdo a las Recomendaciones de Obras Marítimas, ROM (PPEE, 2000), los límites operacionales se pueden definir para los siguientes tipos de operación:

- Atraque de los buques.
- Paralización de las operaciones de carga y descarga.
- Permanencia de los buques en los muelles.

De acuerdo a las ROM (PPEE, 2000), estos límites operacionales *“dependen de otros factores además del propio barco; así,*

- *El atraque de los buques vendrá condicionado por los remolcadores disponibles y los sistemas de defensa de los muelles,*
- *La paralización de las operaciones de carga y descarga dependerá fundamentalmente de las características de los equipos que se utilicen para esta función,*
- *La permanencia de los buques en los muelles dependerá de los criterios de diseño de las estructuras, de la disponibilidad de medios de remolque para poder sacar los buques de los puestos de atraque en estas condiciones y de la posibilidad de que el buque pueda navegar controladamente hacia otros muelles, fondeaderos o áreas de navegación exterior.*
- *En algunos casos particulares intervendrán otros factores, por ejemplo, los límites de habitabilidad de una embarcación deportiva sometida a la acción del oleaje”.*

Los límites operacionales definidos en la ROM requieren del cálculo del clima de oleaje en el muelle, cuestión que no se desarrolla en este estudio por los límites de tiempo. No obstante, y en forma aproximada, en este estudio se cruzan estos límites operacionales definidos en los muelles con la información de oleaje calculada en la bocana de acceso de la dársena portuaria (Arica, Iquique, Antofagasta, Valparaíso, San Antonio y San Vicente) o a puntos representativos de la bahía (Mejillones, Coquimbo, Quintero).

Para complementar el análisis, en este estudio se analizan los límites operacionales definidas por las Capitanías de Puerto, además de los límites operacionales definidas por las ROM. Ambos se describen a continuación.

4.2.2.1 Límites operacionales definidas por las Capitanías de Puerto

Los límites de operación se obtuvieron de la resolución de habilitación emitida por cada Capitanías de Puerto en estudio. Cabe notar que hay puertos que poseen más de un límite de operación para una misma maniobra debido a que en ellos hay diversas estructuras que

atienden a diferentes buques. Tal es el caso del puerto de Mejillones (Tabla 7) y de Quintero (Tabla 8). La Tabla 9 muestra el resumen de los criterios de cierre en los 9 puertos en estudio. Con la finalidad de analizar un solo límite por tipo de maniobra, se ha seleccionado el límite más restrictivo para cada operación.

Tabla 7: Límites de operación, según la altura significativa (Hs), en el Puerto de Mejillones.

Criterio	Angamos	Centinela	Enaex	GNL	Interacid naves de eslora < 80	Interacid naves de eslora < 242	Oxiqum	Terminal marítimo puerto mejillones S.A.	Terminal de graneles del norte S.A.	Terquim	Michilla	Umbral más restrictivo
Maniobras de atraque y/o amarre	1,0	1,5	1,0 - 1,5	0,7	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	0,5
Maniobras de desatraque y/o desamarre	1,5	1,5	1,0 - 1,5	0,7	1,0	1,5	1,75	1,75	1,0	1,75	1,75	0,7
Permanencia en sitio o terminal marítimo	1,5	2,0	1,5	1,2	1,0	1,5	1,5	1,5	0,5	1,75	1,75	0,5
Ejecución de faenas de carga y/o descarga	1,5	1,75	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,25	1,0

Tabla 8: Límites de operación, según la altura significativa (Hs), en el Puerto de Quintero.

Criterio	Barcaza	El Bato	LPG	Monoboya	Multicrudo	Oxiqum	Ventanas	GNL	Asimar	Umbral más restrictivo
Maniobras de atraque y/o amarre	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5
Maniobras de desatraque y/o desamarre	1,0	1,5	1,5	2,0	1,0	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5
Permanencia en sitio o terminal marítimo	1,0	1,5	-	2,0	1,0	-	-	-	-	1,0
Ejecución de faenas de carga y/o descarga	1,0	1,5	<1	-	1,0	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5

Tabla 9: Resumen de límites de operación obtenidos de las Capitanías de Puerto.

Puerto	Descripción umbral	Hs umbral (m)
Arica	Maniobras de atraque / amarre	1,5
	Maniobras de desatraque/ desamarre	Sin restricción
	Permanencia en sitio o terminal marítimo	Sin restricción
	Ejecución de faenas de carga y / o descarga	Sin restricción
Iquique	Naves de eslora < 270 [m]	0,5
	Naves de eslora > 270 y < 304 [m]	0,5
	Naves de eslora > 304 y < 348,5 [m]	0,5
Mejillones	Maniobras de atraque / amarre	0,5
	Maniobras de desatraque/ desamarre	0,7
	Permanencia en sitio o terminal marítimo	0,5
	Ejecución de faenas de carga y / o descarga	1,0
Antofagasta	Maniobras de atraque	1,5
	Maniobras de desatraque	1,5
	Permanencia en sitio	2,0
	Ejecución de faenas de carga y / o descarga	2,0
Coquimbo	Maniobras de atraque / amarre	0,5
	Maniobras de desatraque/ desamarre	0,5
Quintero	Maniobras de atraque / amarre	0,5
	Maniobras de desatraque/ desamarre	0,5
	Permanencia en sitio o terminal marítimo	1,0
	Ejecución de faenas de carga y / o descarga	0,5
Valparaíso	Maniobras de atraque / amarre	0,5
	Maniobras de desatraque/ desamarre	0,5
San Antonio	Maniobras de atraque / amarre	1,0
	Maniobras de desatraque/ desamarre	1,0
	Permanencia en sitio o terminal marítimo	1,0
	Ejecución de faenas de carga y / o descarga	1,0
San Vicente	Maniobras de atraque / amarre	1,5
	Maniobras de desatraque/ desamarre	1,5
	Permanencia en sitio o terminal marítimo	1,8
	Ejecución de faenas de carga y / o descarga	1,5

4.2.2.2 Límites operacionales definidas por las Recomendaciones de Obras Marítimas

Los límites de operación definidos en las ROM (PPEE, 2000) indican que

- Para el atraque de buques portacontenedores la altura significativa del oleaje no debe superar los 2 [m] para las acciones en sentido longitudinal al muelle y 1.5 [m] para las acciones en sentido transversal al muelle.
- En la paralización de actividades (es decir, carga y descarga de buques), la altura de ola no debe superar los 0.5 [m] para las acciones en sentido longitudinal al muelle y los 0.3 [m] para las acciones en sentido transversal al muelle.

4.2.2.3 Límites operacionales empíricos obtenidos a partir de la estadística de cierres de puerto

En la sección 4.2.4 se efectúa una correlación clara entre los parámetros del oleaje en aguas profundas (altura significativa, período medio, dirección media y potencia normalizada) y los cierres de puertos. El análisis, sin embargo, no permite establecer límites operacionales empíricos de cierre mediante esta metodología.

4.2.3 Análisis de estadística de cierres de puerto

El estudio se efectúa utilizando estadística obtenida de certificados de cierre de puerto (2015, 2016 y 2017) y de una base de datos de cierres de puerto proporcionada por SERVIMET (2007 a abril 2017). La descripción y comparación de ambas bases de datos se presenta a continuación.

4.2.3.1 Base de datos generada a partir de certificados de cierres de puerto.

Se solicitaron certificados de cierres de puertos en las fechas comprendidas entre enero de 2015 hasta Diciembre de 2017 a 19 Capitanías de Puerto, las cuales se presentan a continuación

- Arica
- Iquique
- Tocopilla
- Mejillones
- Antofagasta
- Taltal
- Caldera
- Huasco
- Coquimbo
- Tongoy,

- Los Vilos
- Quintero
- Valparaíso
- San Antonio
- Constitución
- Valdivia
- Hornopirén
- Hanga Roa
- Juan Fernández

Cabe notar que, de las 59 Capitanías de Puerto en Chile²⁰ (Tabla 10), sólo se solicitaron certificados de cierre de puertos a las 29 capitanías expuestas al Océano Pacífico. No se analizaron las 25 capitanías ubicadas en aguas interiores ni las 5 capitanías lacustres pues obedecen a dinámicas que no son analizados en este estudio (viento local y régimen de marea en las primeras, y viento local y ciclo hidrológico las segundas). De las 29 capitanías expuestas directamente al Océano Pacífico, solo 19 respondieron a la solicitud efectuada por este equipo consultor.

La base de datos obtenida de los certificados de cierre de puertos fue transcrita y filtrada para considerar sólo aquellos cierres de puerto asociados a marejadas. Cabe mencionar que, para simplificar el análisis, la estadística no ha sido desagregada por cada terminal, es decir, basta que un solo terminal esté cerrado para considerar que el puerto está cerrado en su integridad.

En la Tabla 11 se presenta la información contenida en cada certificado en tanto que la Figura 32 muestra ejemplos de certificados de cierre de puerto en Valparaíso e Iquique. Cabe mencionar que la información que contienen los certificados de cierres de puertos no es uniforme, siendo algunos certificados de puerto más detallados que otros. Al igual que en presente estudio, el estudio de Marítimo Portuario (2017) identifica bases incompletas, formatos incompatibles y no comparables de información para un análisis estadístico de los cierres de puertos en 10 puertos.

²⁰ <https://www.ssfaa.cl/asuntos-maritimos/cnubc/contacto-capitanias-de-puerto-de-chile/>

Tabla 10: Detalle de solicitudes de certificados de cierre de puertos a Capitanías de Puerto.

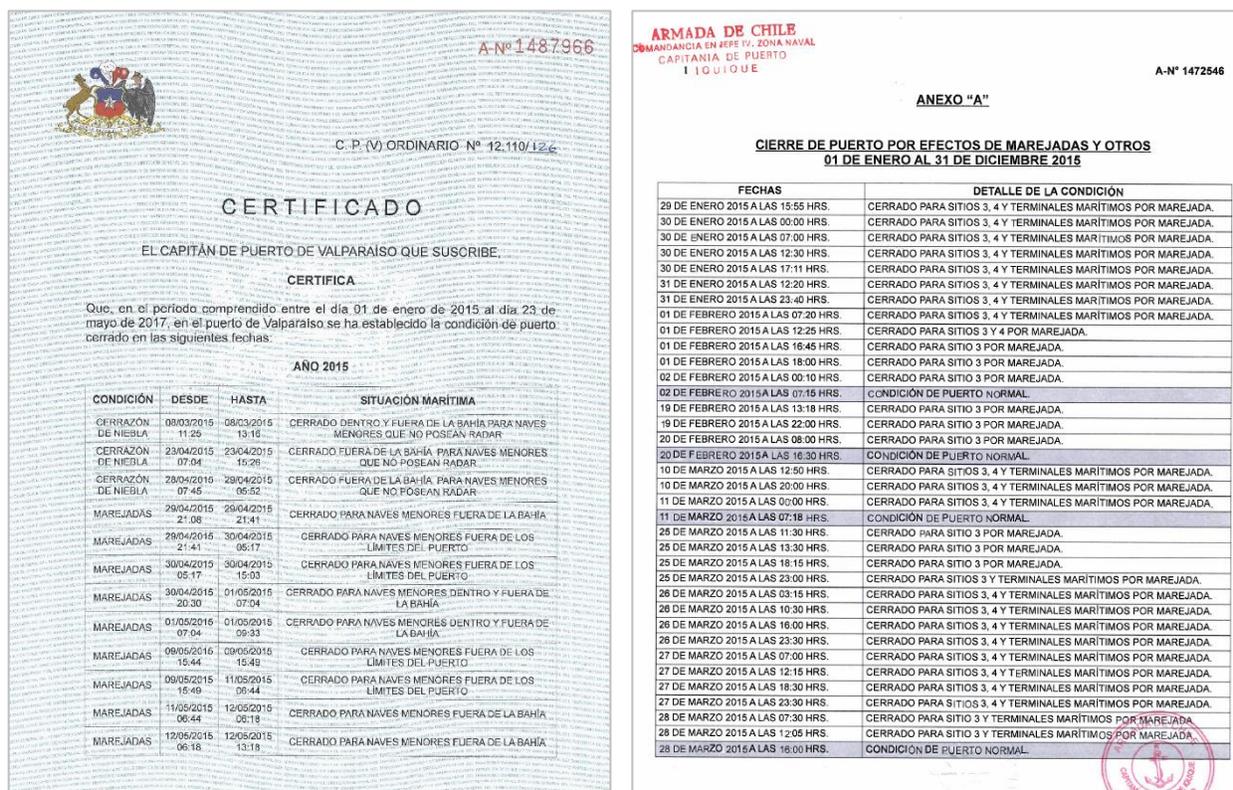
N	Capitanías de Puerto	Respuesta a solicitud	Observación
1	Arica	✓	
2	Iquique	✓	
3	Patache	✗	No se recibe respuesta a la solicitud
4	Antofagasta	✓	
5	Tocopilla	✓	
6	Mejillones	✓	
7	Taltal	✓	
8	Caldera	✓	
9	Chañaral	✗	No se recibe respuesta a la solicitud
10	Huasco	✓	
11	Hanga Roa	✓	
12	Coquimbo	✓	
13	Tongoy	✓	
14	Los Vilos	✓	
15	Valparaíso	✓	
16	Quintero	✓	
17	Juan Fernández	✓	
18	San Antonio	✓	
19	Lago Rapel	✗	No se analizaron capitanías lacustres
20	Pichilemu	✗	No se recibe respuesta a la solicitud
21	Algarrobo	✗	No se recibe respuesta a la solicitud
22	Talcahuano	✓	
23	San Vicente	✗	No se recibe respuesta a la solicitud
24	Lirquén- Tomé	✗	No se recibe respuesta a la solicitud
25	Coronel- Lota	✓	
26	Lebu	✗	No se recibe respuesta a la solicitud
27	Constitución	✓	
28	Valdivia	✓	
29	Corral	✗	No se recibe respuesta a la solicitud
30	Villarrica	No se solicita	No se analizaron capitanías lacustres
31	Panguipulli	No se solicita	No se analizaron capitanías lacustres
32	Lago Ranco	No se solicita	No se analizaron capitanías lacustres

N	Capitanías de Puerto	Respuesta a solicitud	Observación
33	Puerto Montt	No se solicita	No se analizaron aguas interiores
34	Calbuco	✓	No se analizaron aguas interiores
35	Mauñín	✗	No se recibe respuesta a la solicitud
36	Puerto Varas	No se solicita	No se analizaron capitanías lacustres
37	Río Negro- Hornopirén	✓	No se analizó de Chacao al sur
38	Cochamó	No se solicita	No se analizó de Chacao al sur
39	Castro	No se solicita	No se analizó de Chacao al sur
40	Ancud	No se solicita	No se analizó de Chacao al sur
41	Quellón	No se solicita	No se analizó de Chacao al sur
42	Chaitén	No se solicita	No se analizó de Chacao al sur
43	Achao	No se solicita	No se analizó de Chacao al sur
44	Chonchi	No se solicita	No se analizó de Chacao al sur
45	Quemchi	No se solicita	No se analizó de Chacao al sur
46	Chacabuco	No se solicita	No se analizó de Chacao al sur
47	Lago General Carrera	No se solicita	No se analizó de Chacao al sur
48	Melinka	No se solicita	No se analizó de Chacao al sur
49	Puerto Aguirre	No se solicita	No se analizó de Chacao al sur
50	Puerto Cisnes	No se solicita	No se analizó de Chacao al sur
51	Puerto Baker	No se solicita	No se analizó de Chacao al sur
52	Punta Arenas	No se solicita	No se analizó de Chacao al sur
53	Puerto Natales	No se solicita	No se analizó de Chacao al sur
54	Punta Delgada	No se solicita	No se analizó de Chacao al sur
55	Puerto Tierra del Fuego	No se solicita	No se analizó de Chacao al sur
56	Puerto Edén	No se solicita	No se analizó de Chacao al sur
57	Puerto Williams	No se solicita	No se analizó de Chacao al sur
58	Bahía Fildes	No se solicita	No se analizó de Chacao al sur
59	Bahía Paraíso	No se solicita	No se analizó de Chacao al sur

Tabla 11: Resumen del tipo de información incluida en los certificados de cierre de puertos.

Capitanía de puerto		Fecha	Hora	Motivo de cierre	Estado de mar	Condición de tiempo	Cierre por tonelaje de naves	Cierre por actividades	Cierre por sitio de atraque
1	Arica	✓	✓		✓		✓		✓
2	Iquique	✓	✓	✓					✓
3	Tocopilla	✓	✓	✓					
4	Mejillones	✓	✓	✓					✓
5	Antofagasta	✓	✓	✓					
6	Taltal	✓	✓	✓					
7	Caldera	✓	✓			✓	✓		
8	Huasco	✓	✓		✓	✓	✓		
9	Coquimbo	✓	✓			✓			
10	Tongoy	✓	✓			✓			
11	Los Vilos	✓	✓			✓			
12	Quintero	✓	✓	✓				✓	✓
13	Valparaíso	✓	✓			✓	✓		
14	San Antonio	✓	✓		✓	✓	✓		
15	Constitución	✓	✓		✓	✓	✓		
16	Talcahuano	✓	✓		✓	✓	✓		
17	Coronel	✓	✓		✓	✓	✓		
18	Valdivia	✓	✓		✓	✓	✓		
19	Hornopirén	✓	✓			✓	✓	✓	
20	Calbuco	✓	✓		✓	✓	✓		
21	Hanga Roa	✓	✓			✓	✓		
22	Juan Fernández	✓		✓		✓			

Figura 32: Ejemplo de los certificados de cierre de puerto en Valparaíso e Iquique entre enero de 2015 y Diciembre de 2017 (sólo se muestra la primera página).



4.2.3.2 Base de datos proporcionada por SERVIMET

La base de datos obtenida de los certificados descrita anteriormente se cruzó con una base de datos con estadísticas sobre cierre de puertos de 26 puertos (2007 a 2017, dependiendo del puerto) proporcionada por SERVIMET. La base de datos de SERVIMET contiene la información de 50 puertos y dispone de parámetros cuantitativos de viento y oleaje. No obstante, presenta el inconveniente de que la clasificación del carácter de los cierres de puertos es general, y no permite hacer análisis más detallados. Asimismo, se dispone en formatos diferentes. La Figura 34 muestra un ejemplo de la base de datos, para Iquique.

4.2.3.3 Comparación entre ambas bases de datos

En la Tabla 12 se presenta una comparación entre la base de datos generada a partir de los certificados de cierre de puertos y la proporcionada por SERVIMET. Se aprecia que la cantidad de cierres de puertos reportados por SERVIMET es muy inferior a la de las Capitanías, en casi la totalidad de los puertos exceptuando Constitución. Por ende, para el período 2015 a 2017 se utiliza la información obtenida de los certificados. Para el período anterior se opta por mantener la información de SERVIMET aun cuando ello introduzca un sesgo en el análisis.

Figura 33: Certificados de cierre de puerto entre enero de 2015 y Diciembre de 2017 para todas las capitanías que respondieron (sólo se muestra la primera página), donde se aprecia la heterogeneidad del tipo de datos reportado por cada capitanía.

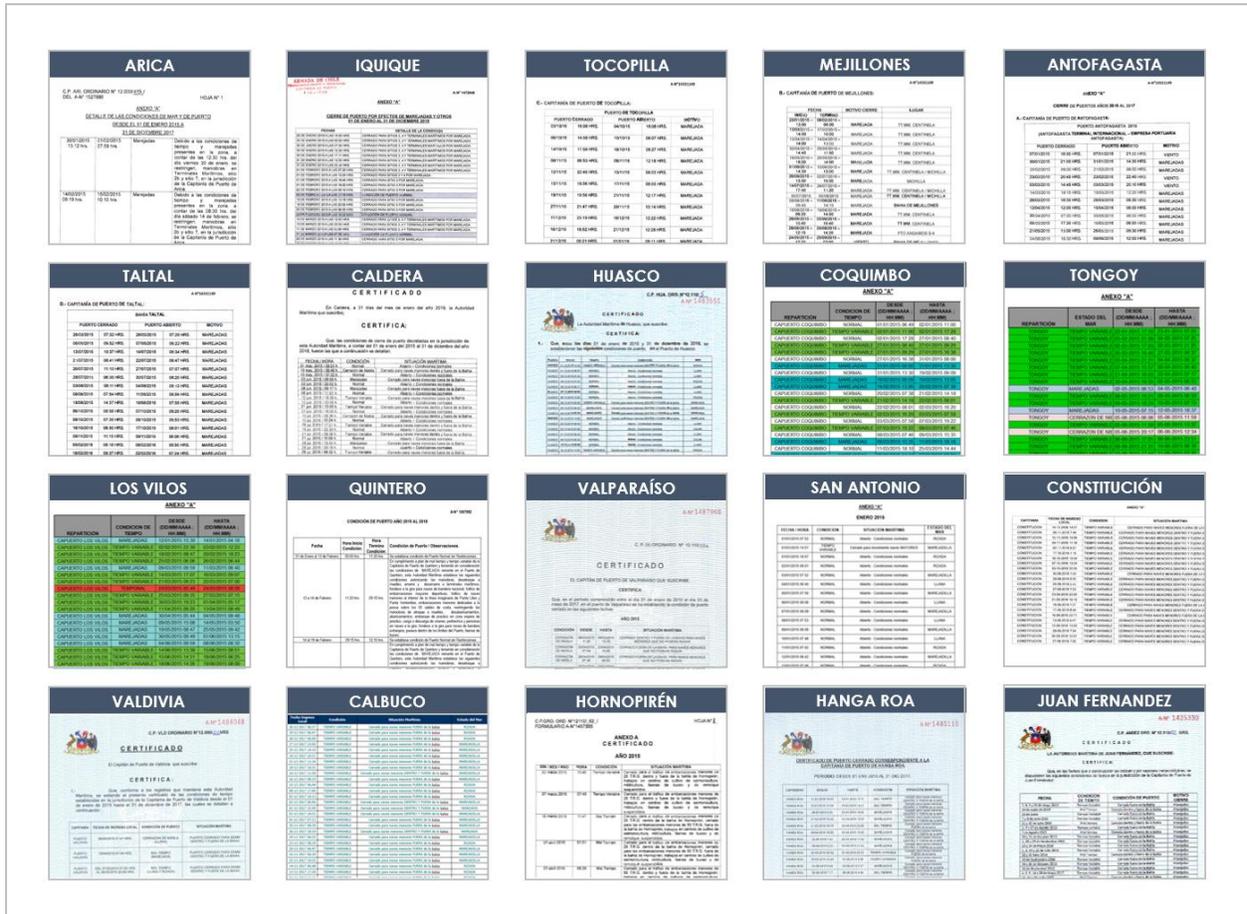


Figura 34: Ejemplo de la base de datos de cierre de puerto en Iquique (sólo se muestran las primeras filas). La base de datos ha sido modificada para mostrar los campos de interés.

	B	C	G	H	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	FCHoraIngresoUtc	CDCondicionAnormalida	CD SituacionMaritimaF	CDTrabajoPortuario	FCHoraObs	NRAlturaMax	NRAlturaMin	NRPeriodo	GLDireccion	CDEstadoMg	GLOrigenDat	NRIntensidad	NRDireccion
2	09/05/2008 10:57	MAREJADAS	Abierto - Condiciones no	Trabajos Normales	06:50:00	1,5	1,0	20	S	MAREJADA	ETI	3	165
3	05/06/2008 14:57	MAREJADAS	Abierto - Condiciones no	Trabajos Normales	10:20:00	4,0	3,0	15	SW	MAREJADA	INT	6	45
4	06/06/2008 00:58	MAREJADAS	Cerrado para naves men	Trabajos Normales	21:00:00	2,0	1,5	8	SW	MAREJADA	INT	5	180
5	06/06/2008 11:44	MAREJADAS	Cerrado para naves men	Naves Mayores atracada	07:30:00	3,5	2,0	13	SW	MAREJADA	ETI	6	220
6	07/06/2008 12:53	MAREJADAS	Cerrado para naves men	Trabajos Normales	07:50:00	3,0	2,0	17	SW	MAREJADIL	ETI	4	200
7	08/06/2008 12:47	MAREJADAS	Cerrado para naves men	Trabajos Normales	08:45:00	4,0	2,0	15	NE	MAREJADIL	ETI	2	80
8	09/06/2008 12:53	MAREJADAS	Cerrado para naves men	Trabajos Normales	08:20:00	3,0	2,0	15	SW	MAREJADA	ETI	6	150
9	10/06/2008 12:06	MAREJADAS	Cerrado para naves men	Trabajos Normales	07:30:00	3,5	2,5	19	S	MAREJADA	INT	6	165
10	11/06/2008 11:19	MAREJADAS	Cerrado para naves men	Trabajos Normales	07:20:00	3,0	2,0	14	SW	MAREJADA	ETI	3	200
11	17/07/2008 11:52	MAREJADAS	Abierto - Condiciones no	Trabajos Normales	07:50:00	3,5	2,0	17	SW	MAREJADA	ETI	5	200
12	17/07/2008 12:13	MAREJADAS	Cerrado para naves men	Trabajos Normales	08:00:00	3,5	2,0	17	SW	MAREJADA	ETI	5	200
13	17/07/2008 17:32	MAREJADAS	Cerrado para movimiento	Trabajos Normales	12:45:00	2,5	2,0	20	SW	MAREJADA	ETI	20	80
14	18/07/2008 11:30	MAREJADAS	Cerrado para movimiento	Trabajos Normales	07:15:00	2,5	2,0	15	NE	MAREJADA	ETI	2	240
15	18/07/2008 16:14	MAREJADAS	Cerrado para naves men	Trabajos Normales	12:00:00	2,5	1,5	25	S	MAREJADA	ETI	10	65
16	28/08/2008 12:08	MAREJADAS	Cerrado para naves men	Trabajos Normales	07:30:00	3,5	2,5	20	E	RIZADA	ETI	10	85
17	23/10/2008 11:09	MAREJADAS	Abierto - Condiciones no	Trabajos Normales	08:15:00	2,5	2,0	26	SE	MAREJADIL	ETI	6	150
18	10/11/2008 14:16	MAREJADAS	Abierto - Condiciones no	Trabajos Normales	11:00:00	2,0	1,5	15	NE	MAREJADIL	ETI	8	80
19	11/11/2008 11:59	MAREJADAS	Abierto - Condiciones no	Trabajos Normales	09:00:00	1,5	1,0	15	NE	MAREJADIL	ETI	5	80
20	06/12/2008 03:53	MAREJADAS	Abierto - Condiciones no	Trabajos Normales	00:30:00	2,0	1,0	15	SW	MAREJADIL	INT	0	0
21	21/02/2009 11:34	MAREJADAS	Abierto - Condiciones no	Trabajos Normales	07:59:00	2,0	1,5	26	S	MAREJADA	ETI	5	195
22	11/03/2009 10:28	MAREJADAS	Abierto - Condiciones no	Trabajos Normales	07:15:00	2,0	1,0	18	SW	MAREJADA	ETI	5	200
23	31/03/2009 11:18	MAREJADAS	Abierto - Condiciones no	Trabajos Normales	07:10:00	3,0	1,5	17	SW	MAREJADA	ETI	3	200
24	06/05/2009 11:44	MAREJADAS	Abierto - Condiciones no	Trabajos Normales	07:30:00	2,0	1,0	18	SW	LLANA	ETI	5	200
25	24/06/2009 10:59	MAREJADAS	Abierto - Condiciones no	Trabajos Normales	07:00:00	2,0	1,0	26	SW	MAREJADA	ETI	3	225
26	05/07/2009 11:09	MAREJADAS	Abierto - Condiciones no	Trabajos Normales	07:00:00	2,5	1,5	18	SW	MAREJADA	ETI	5	200

Tabla 12: Registros cierre de puertos.

Puerto	Certificados cierre de puertos			SERVIMET		
	2015	2016	2017	2015	2016	2017
Arica	180	200	228	69	57	32
Iquique	62	67	43	53	63	47
Tocopilla	142	141	120	140	144	68
Mejillones	87	129	153	10	41	15
Antofagasta	109	181	172	88	106	68
Taltal	30	14	6	9	12	2
Caldera	35	23	33	5	6	3
Huasco	30	60	57	9	26	19
Coquimbo	107	106	82	63	59	26
Tongoy	94	76	95	13	10	18
Los Vilos	151	51	63	75	26	10
Quintero	115	149	173	58	50	22
Valparaíso	38	43	67	11	8	6
San Antonio	113	101	106	21	34	23
Constitución	31	33	56	38	39	22
Coronel	132	128	169	0	2	2
Juan Fernández	19	12	16	0	7	5
Hanga Roa	81	120	109	13	57	23

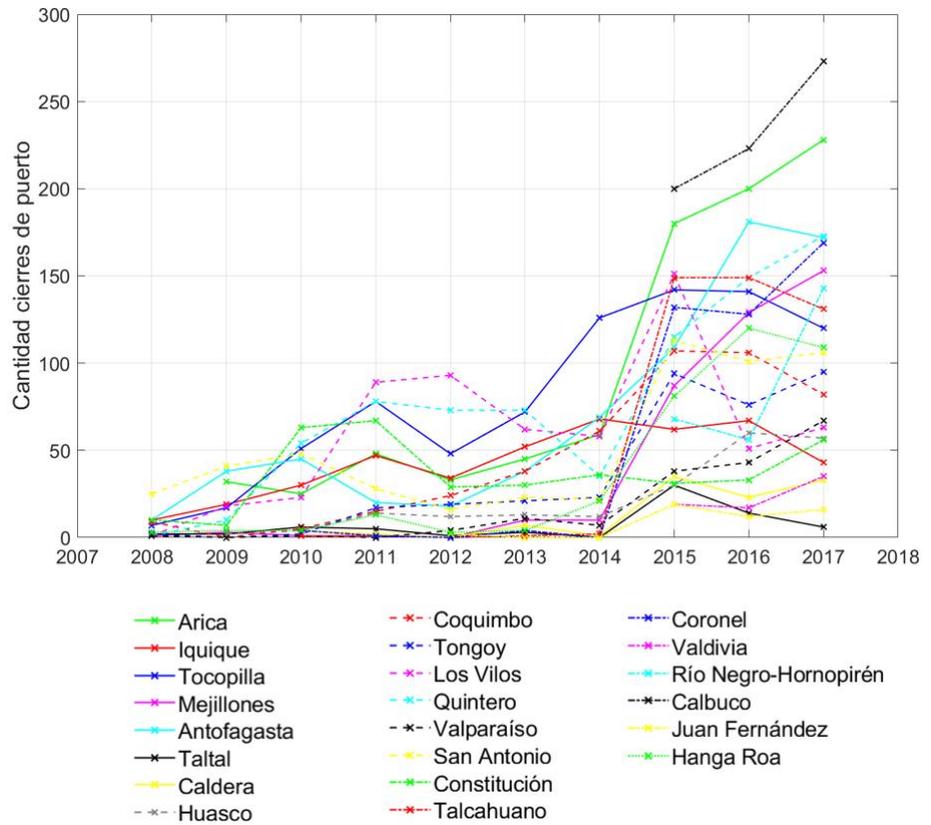
4.2.3.4 Resultados

La cantidad de cierres de puerto por año para las 19 capitanías expuestas al Océano Pacífico se ilustra en la Tabla 13 y en la Figura 35. Se observa que los puertos con mayor cantidad de cierres entre 2008 y 2017 son Arica (850), Tocopilla (802), Quintero (761). Cabe notar, que como primera aproximación se asume que un cierre de puerto se define cuando al menos uno de los terminales en un puerto está cerrado, es decir, basta que sólo un sitio esté cerrado para considerar que todo el puerto está cerrado.

Tabla 13: Cantidad de cierres de puerto por año para las 19 capitanías expuestas al Océano Pacífico. Un cierre de puerto se define cuando al menos uno de los terminales en un puerto está cerrado. La intensidad del rojo y verde se escala con la cantidad de cierre de puertos para facilitar la inspección de la tabla.

Puerto	SERVIMET (2008 a 2014)							Certificados de cierres			Total
	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	
Arica	-	32	25	48	33	45	59	180	200	228	850
Iquique	10	19	30	47	34	52	68	62	67	43	432
Tocopilla	7	17	51	78	48	72	126	142	141	120	802
Mejillones	1	3	1	1	0	10	10	87	129	153	395
Antofagasta	10	38	45	20	18	38	69	109	181	172	700
Taltal	2	2	6	5	1	3	0	30	14	6	69
Caldera	-	-	4	2	0	7	1	35	23	33	105
Huasco	-	2	4	14	12	13	12	30	60	57	204
Coquimbo	9	0	5	15	24	38	61	107	106	82	447
Tongoy	2	0	2	17	19	21	23	94	76	95	349
Los Vilos	1	18	23	89	93	62	58	151	51	63	609
Quintero	1	10	54	78	73	73	35	115	149	173	761
Valparaíso	1	0	1	0	4	11	7	38	43	67	172
San Antonio	25	41	48	28	16	23	22	113	101	106	523
Constitución	10	7	63	67	29	30	36	31	33	56	362
Talcahuano	-	-	1	1	0	1	2	149	149	131	434
Coronel	-	-	4	1	0	4	0	132	128	169	438
Valdivia	-	-	-	-	-	-	-	19	17	35	71
Río Negro-Hornopirén	-	-	-	-	-	-	-	68	56	143	267
Calbuco	-	-	-	-	-	-	-	200	223	273	696
Juan Fernández	-	-	-	-	2	0	0	19	12	16	49
Hanga Roa	3	4	4	13	3	4	21	81	120	109	362
Total	82	193	371	524	409	507	610	1992	2079	2330	9097

Figura 35: Cantidad de cierres de puerto por año para las 19 capitanías expuestas al Océano Pacífico. Un cierre de puerto se define cuando al menos uno de los terminales en un puerto está cerrado.



4.2.4 Correlación de cierres de puertos y parámetros de oleaje

Se realizó un cruce de información entre los cierres de puerto registrados por SERVIMET (2009-2014) y las Capitanías de Puerto (2015 a 2017) con las estadísticas de oleaje en los nodos de oleaje ubicados en los puertos. El objetivo de este análisis es evaluar si se pueden establecer en forma empírica límites operacionales para cada puerto. Se consideraron los puertos de Arica, Iquique, Mejillones, Antofagasta, Coquimbo, Quintero, Valparaíso y San Antonio. Se excluyó el San Vicente ya que la solicitud de certificado de cierre de puertos efectuada por este equipo no fue entregada. Específicamente, se consideraron los siguientes parámetros:

- Altura significativa (H_{mo})
- Período medio (T_m)
- Dirección media (D_m)
- Potencia normalizada ($H_{mo}^2 T_m$)

La intención de utilizar estos parámetros fue indagar si alguno de estos corresponde a un buen predictor de los cierres de puertos. Como ejemplo, de la Figura 36 a la Figura 39 se cruzan las estadísticas de cierres de puerto y los parámetros de oleaje en Valparaíso, mediante series e histogramas de frecuencia. Los cierres de puerto se indican de acuerdo a la escala de Beaufort (Tabla 14), utilizada por algunas capitanías para caracterizar el viento y el oleaje durante los cierres de puerto. En el Anexo 7.3.1 se muestran los gráficos para los otros puertos.

Tabla 14: Escala de Beaufort.

Fuerza Beaufort	Intensidad del viento [nudos]	Altura de ola [m]	Estado de mar
0	Menor de 1	0	Calma
1	1 - 3	0.1	Llana
2	4 - 6	0.1 - 0.5	Rizada
3	7 - 10	0.1 - 0.5	Rizada
4	11 - 16	0.5 - 1.25	Marejadilla
5	17 - 21	1.25 - 2.5	Marejada
6	22 - 27	2.5 - 4.0	Gruesa
7	28 - 33	4.0 - 6.0	Muy gruesa
8	34 - 40	6.0 - 8.0	Arbolada
9	41 - 47	8.0 - 10.0	Arbolada alta
10	48 - 55	10.0 - 12.5	Montañosa
11	56 - 63	12.5 - 16.0	Confusa
12	64 o más	Sobre 16.0	Huracanado

Figura 36: Arriba: Cruce de información cierre de puertos versus Hmo en el puerto de Valparaíso entre enero de 2008 y Diciembre de 2017. Abajo: En azul histograma obtenido a partir de la totalidad de los datos del gráfico de arriba (línea gris) y en rojo histograma obtenido a partir del cierre de puerto (círculos de colores).

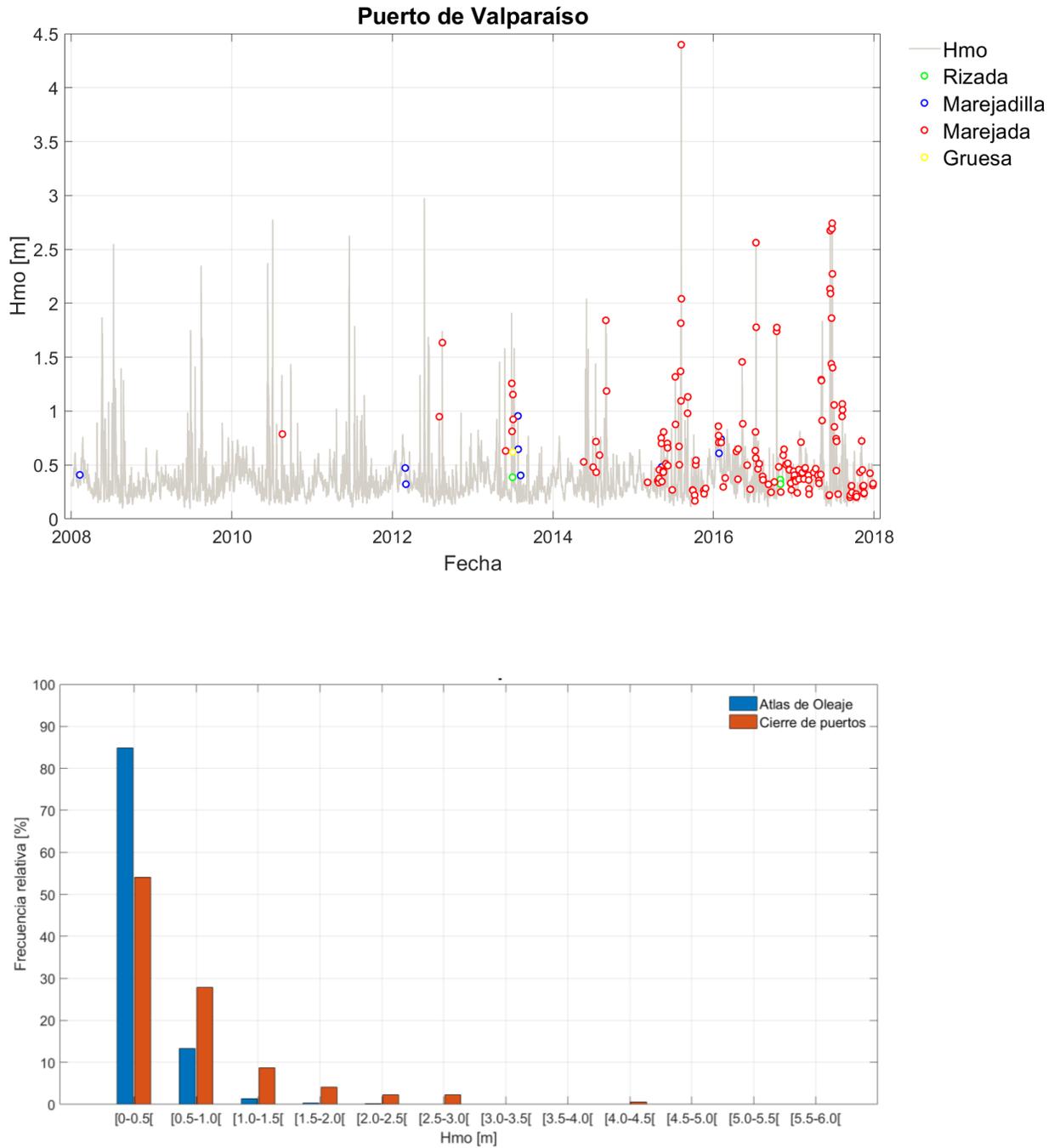


Figura 37: Arriba: Cruce de información cierre de puertos versus T_m en el puerto de Valparaíso entre enero de 2008 y Diciembre de 2017. Abajo: En azul histograma obtenido a partir de la totalidad de los datos del gráfico de arriba (línea gris) y en rojo histograma obtenido a partir de los cierres de puerto (círculos de colores).

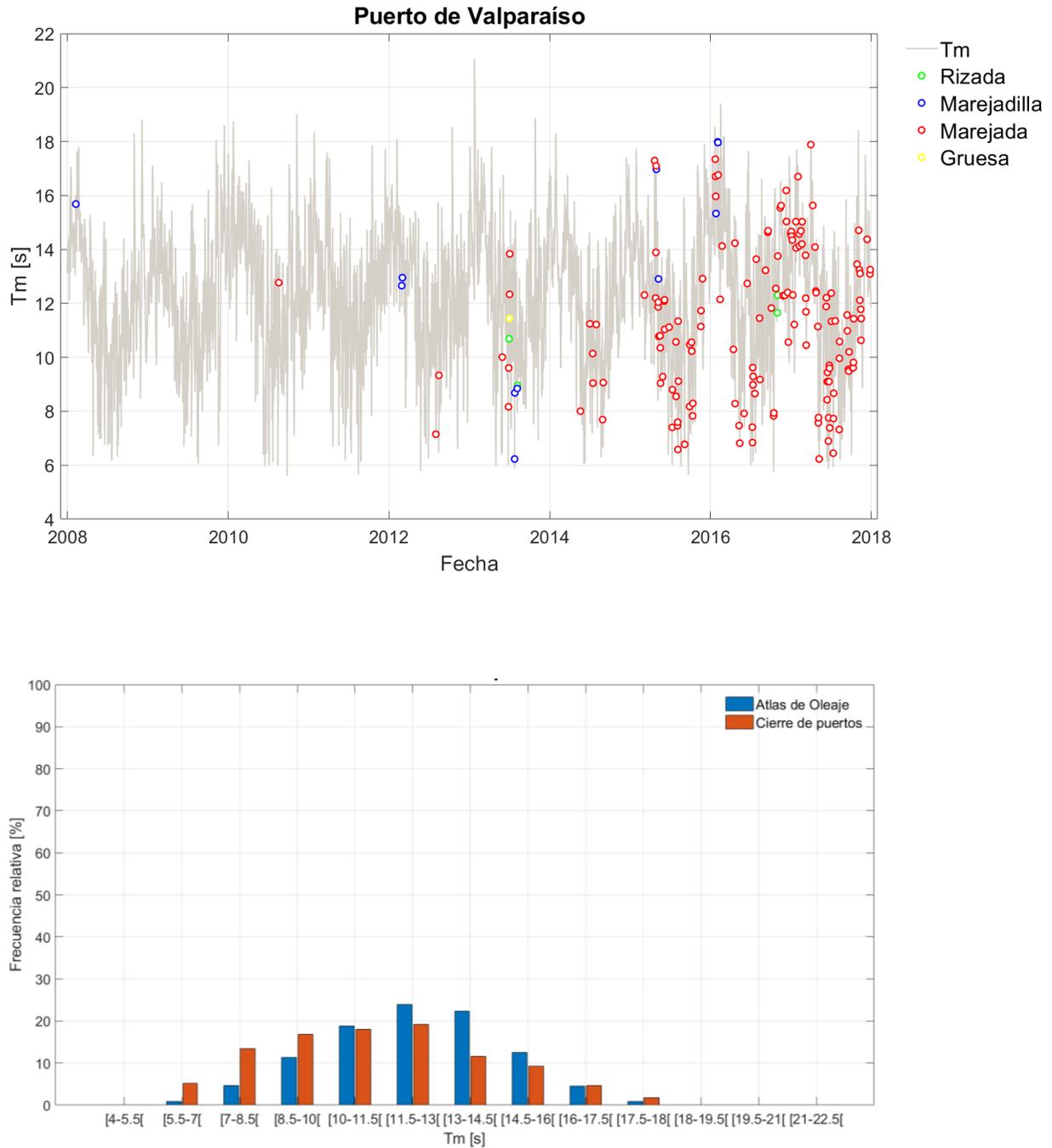


Figura 38: Arriba: Cruce de información cierre de puertos versus Dm en el puerto de Valparaíso entre enero de 2008 y Diciembre de 2017. Abajo: En azul histograma obtenido a partir de la totalidad de los datos del gráfico de arriba (línea gris) y en rojo histograma obtenido a partir de los cierres de puerto (círculos de colores).

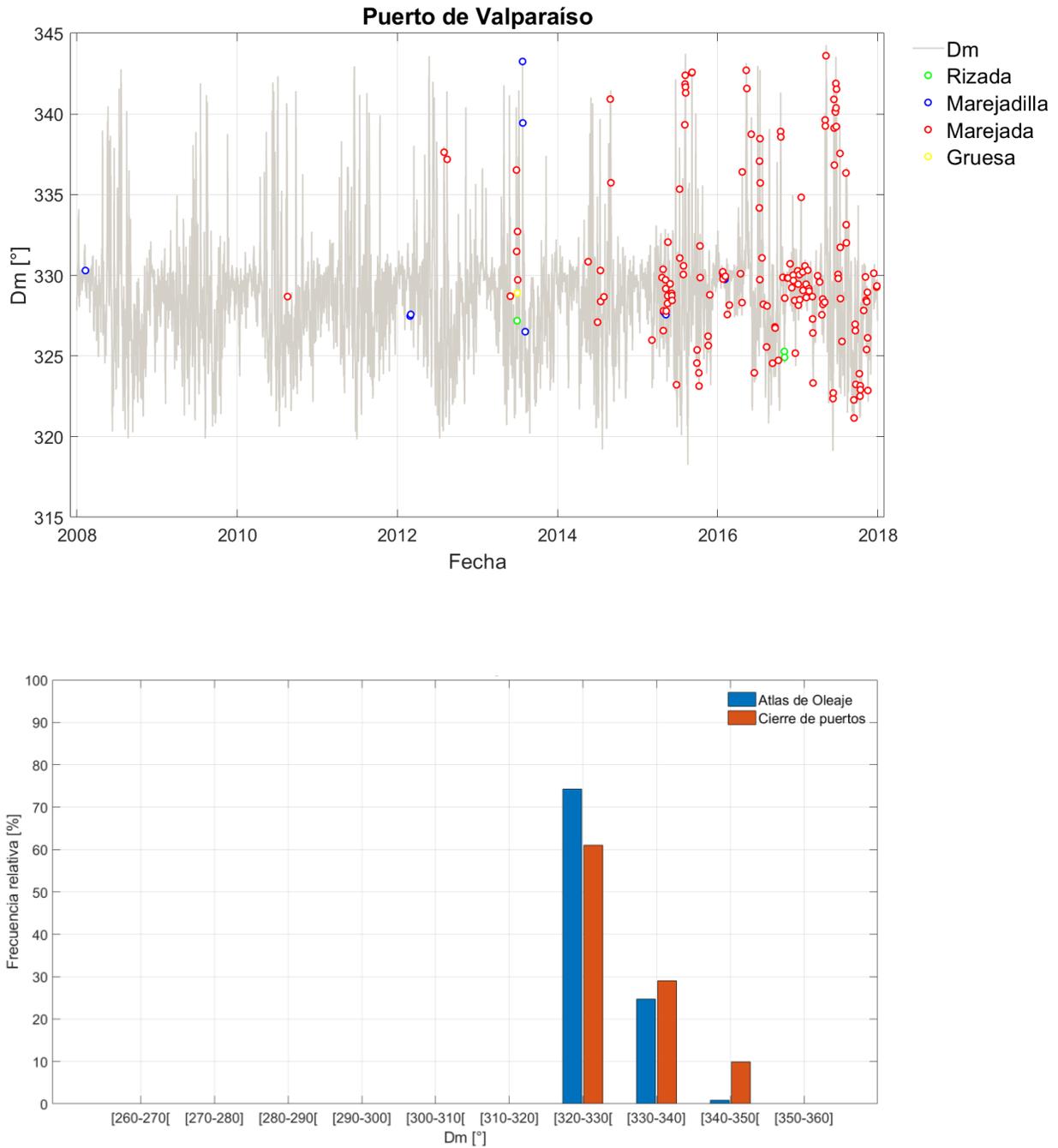
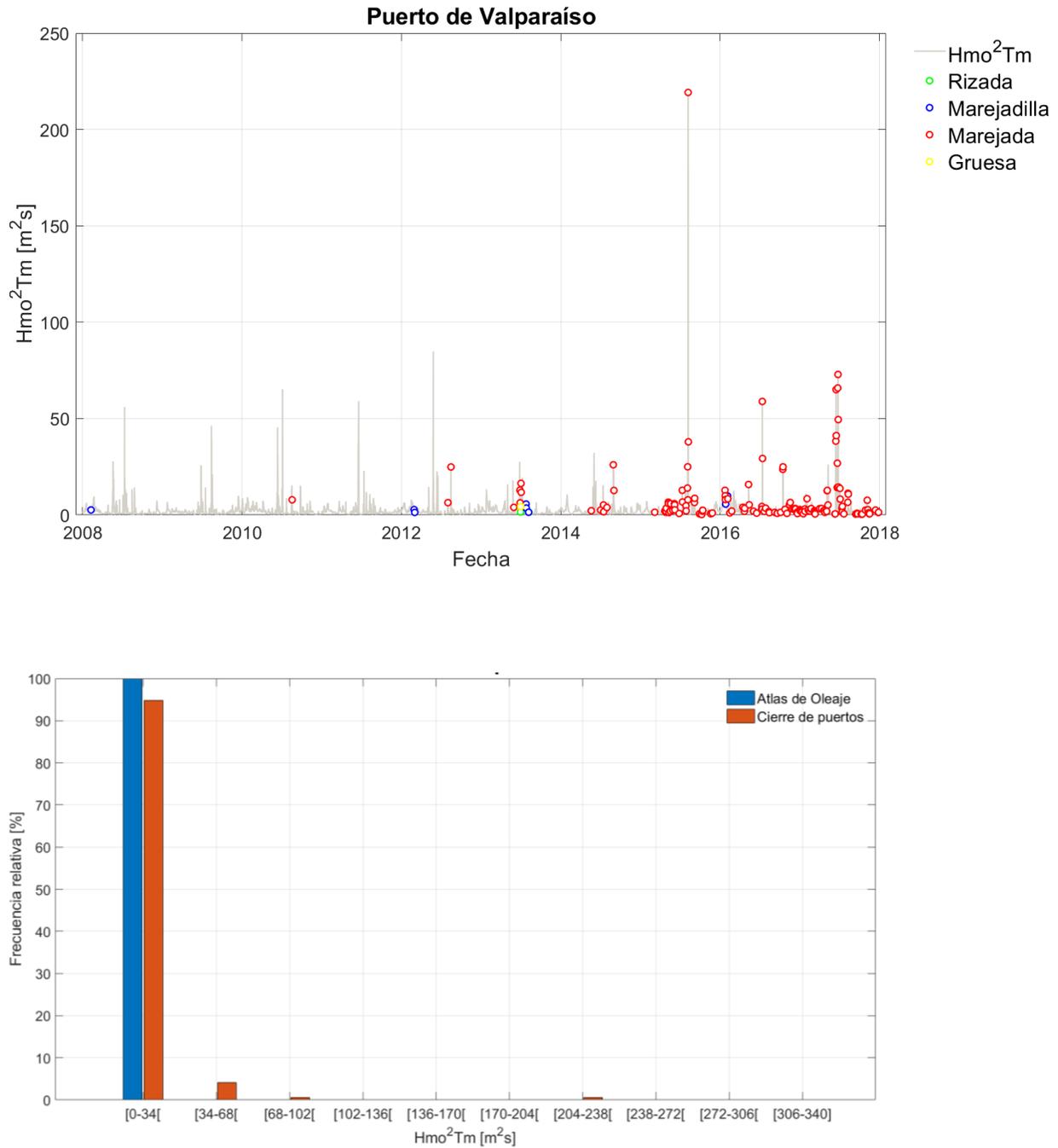


Figura 39: Arriba: Cruce de información cierre de puertos versus potencia en el puerto de Valparaíso entre enero de 2008 y Diciembre de 2017. Abajo: En azul histograma obtenido a partir de la totalidad de los datos del gráfico de arriba (línea gris) y en rojo histograma obtenido a partir de los cierres de puerto (círculos de colores).



En la Figura 36 a la Figura 39 se aprecia que, salvo excepciones, no existe una correlación muy clara entre los parámetros de oleaje y los cierres de puerto en Valparaíso. Se observa que la altura significativa (Figura 36) y la potencia normalizada (Figura 39) predicen bien los cierres de puertos en Valparaíso para eventos extremos entre 2015 y 2017. No obstante, existen muchos cierres de puerto con bajos valores de estos parámetros, lo que les resta valor como predictores. Como se observa en los Anexos 7.3.2 y 7.3.5, la altura es un mejor predictor de los cierres de puerto de Iquique y Quintero y la potencia normalizada en Arica e Iquique, respectivamente. No obstante, este análisis no permite establecer en forma clara son ambos parámetros de oleaje pueden ser utilizados como para definir límites operacionales empíricos para los puertos analizados.

El período medio (Figura 37) y la dirección media (Figura 38) por su parte, no son buenos predictores de los cierres de puerto en Valparaíso pues éstos ocurren en todo el rango de valores de los parámetros de oleaje. Como se ve en los Anexos 7.3.3 y 7.3.4 no existen períodos ni direcciones preferentes del oleaje asociadas a cierres de puerto, salvo por Iquique donde los cierres de puerto tienden a ocurrir con mayores periodos y dirección 320° a 330°. No obstante, este análisis no permite establecer en forma clara son ambos parámetros de oleaje pueden ser utilizados como para definir límites operacionales empíricos para los puertos analizados.

En conclusión, no existe una correlación clara entre los parámetros del oleaje en aguas profundas y los cierres de puertos, por lo que no pueden establecerse límites operacionales empíricos de cierre mediante esta metodología. Esto puede deberse, entre otras razones en que:

- La estadística de cierres de puerto no es homogénea en cuanto al tipo de registro reportado por las Capitanías de Puerto.
- La estadística de cierres de puerto no es homogénea en cuanto a la fuente de información. La cantidad de cierres de puertos reportados por SERVIMET (2009-2014) son bastante menos que la cantidad reportada por las Capitanías de Puerto (2015 a 2017).

4.3 RIESGO DE CIERRE DE PUERTOS

4.3.1 Clima medio u operacional del oleaje

El riesgo de cierre de puertos se cuantifica a través de la diferencia del downtime histórico (1985-2004) y la proyección (2026-2045), expresado en términos de probabilidad de excedencia de los valores umbrales, multiplicados por la cantidad de horas que tiene un año (365×24 horas). Dada la gran cantidad de información, en esta sección se analiza el caso de Valparaíso para ejemplificar el análisis. En el Anexo 7.1 se presentan los resultados para cada uno de los puertos analizados utilizando los límites operacionales definidos en la ROM y aquellos definidos por las Capitanías de Puerto.

En la Tabla 15 y Tabla 16 se muestran los downtime puerto de Valparaíso para los umbrales definidos por la ROM 3.1-99 (PPEE, 1999) y la Capitanía de Puerto de Valparaíso. Estos valores se cruzan con las curvas históricas y proyectadas en la Figura 40. En lo sucesivo, el análisis se efectúa sólo para los umbrales de la ROM dado que cubran rangos más amplios de alturas, además de permitir una comparación entre los 9 puertos. Cabe también notar que las horas de downtime y el cambio entre la proyección y la etapa histórica no son estimadas en los sitios de atraque, por lo que constituyen un proxy (indicador aproximado) de las horas de cierre.

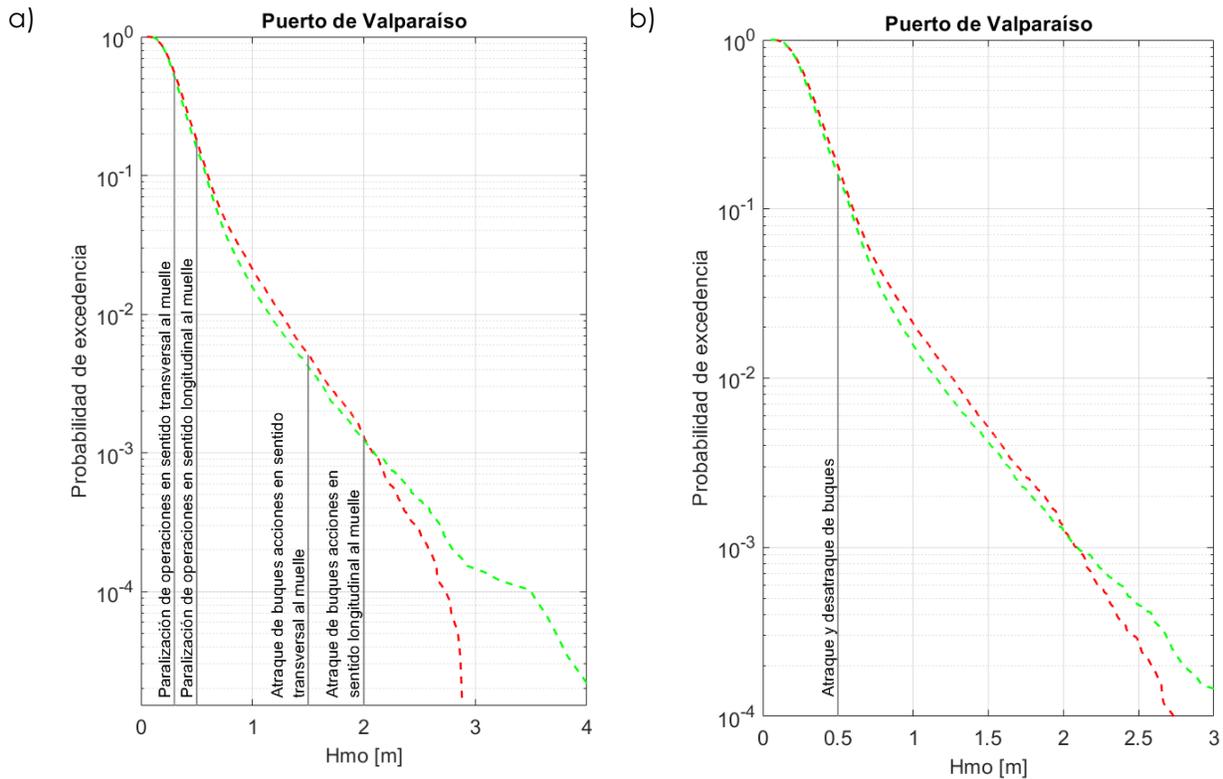
Tabla 15: Downtime puerto de Valparaíso. Umbrales definidos por la ROM 3.1-99 (PPEE, 1999).

Descripción umbral	Hs umbral (m)	P _{excedencia} 1985-2004	P _{excedencia} 2026-2045	Downtime 1985-2004 [Horas/año]	Downtime 2026-2045 [Horas/año]	Downtime Diferencia [Horas/año]
Paralización de operaciones. Acciones en sentido transversal al muelle	0.3	55.05 %	51.58 %	4823	4518	-304
Paralización de operaciones. Acciones en sentido longitudinal al muelle	0.5	18.00 %	15.89 %	1577	1392	-185
Atraque de buques. Acciones en sentido transversal al muelle	1.5	0.51 %	0.42 %	45	37	-8
Atraque de buques. Acciones en sentido longitudinal al muelle	2.0	0.13 %	0.12 %	12	11	-1

Tabla 16: Downtime puerto de Valparaíso. Umbrales definidos por Capitanía de Puerto.

Descripción umbral	Hs umbral (m)	P _{excedencia} 1985-2004	P _{excedencia} 2026-2045	Downtime 1985-2004 [Horas/año]	Downtime 2026-2045 [Horas/año]	Downtime Diferencia [Horas/año]
Maniobras de atraque / amarre	0,5	18,00 %	15,89 %	1577	1392	-185
Maniobras de desatraque/ desamarre	0,5	18,00 %	15,89 %	1577	1392	-185

Figura 40: Probabilidad de excedencia de medianas históricas (rojo) y proyecciones (verde) de la altura significativa (Hmo) en el puerto de Valparaíso. Umbrales a a) partir de ROM y b) Capitanías de Puerto.

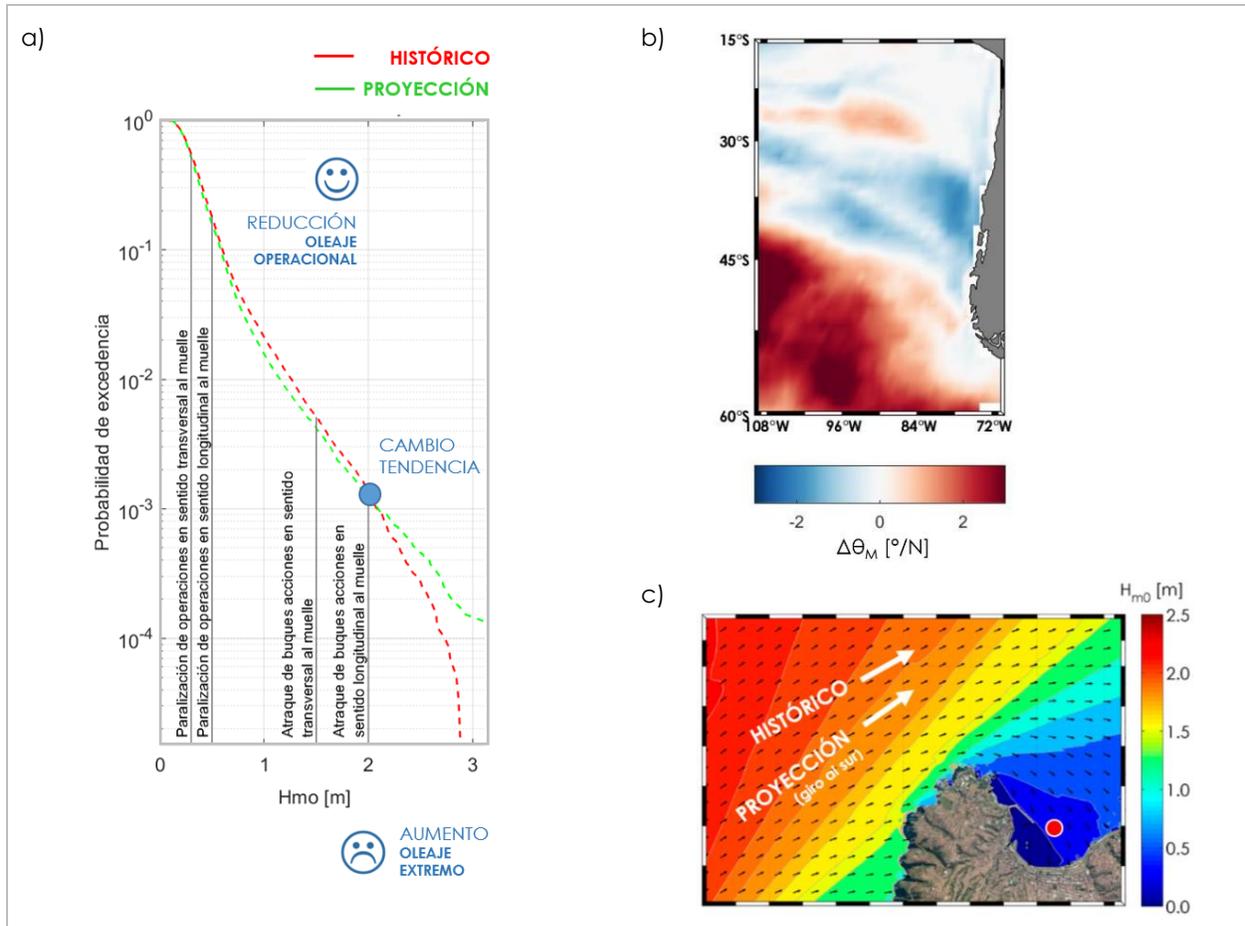


A objeto de analizar estos resultados, en la Figura 41 (a) se observa que, para los límites operacionales definidos en la ROM, la altura de oleaje en la proyección es levemente menor que la correspondiente al período histórico. Esto puede deberse a un giro al sur de 2° en la dirección del oleaje en aguas profundas (b), que generaría una mejor condición de abrigo en la zona más protegida al sur de la bahía (c)²¹. El giro al sur de la dirección del oleaje puede atribuirse a la migración al sur del Anticiclón Permanente del Pacífico Sur (Schneider, 2017) que se asocia a un desplazamiento también al sur de la zona de generación del oleaje. En términos prácticos, estos resultados indican que, en el puerto de Valparaíso, las condiciones operacionales mejorarían levemente en las próximas décadas.

Como medidas de mitigación, los puertos debieran optimizar los sistemas de amarre y atraque de las naves, mejorar las condiciones de abrigo o absorción de energía en los sitios expuestos e implementar sistemas de alerta temprana de marejadas que les permitan planificar sus operaciones con varios días de anticipación.

²¹ El efecto del aumento del período medio de oleaje (Figura 17 y Figura 18) no es analizado en detalle pero contribuye también a la modificación del patrón de oleaje.

Figura 41: Ejemplo del a) cruce entre criterios de cierre de puertos definidos por la ROM 3.1-99 (PPEE, 1999) y curvas de excedencia de medianas históricas (rojo) y proyecciones (verde) de la altura significativa (H_{m0}) en el puerto de Valparaíso. b) Diferencia de dirección media de oleaje entre la proyección y el período histórico frente a Chile. c) Campo de altura de oleaje en el puerto de Valparaíso. El cambio en la dirección del oleaje se dibuja en forma esquemática.



El caso de Valparaíso, no obstante, no es extrapolable a todos los puertos. En la Figura 42 y Figura 43 se muestra el downtime en los puertos para el período histórico y para la proyección para los criterios definidos por la ROM 3.1-99 (PPEE, 1999) y las Capitanías de Puerto, respectivamente.

Como es de esperar, el downtime se reduce con el aumento de la altura umbral (valores más grandes son sobrepasados menos horas al año). La cantidad de horas, no obstante, es artificialmente grande²² dado que para su cálculo se utilizan los umbrales operacionales definidos en el sitio de atraque, donde la agitación es mucho menor que en los nodos en los cuales se calcula el clima de oleaje (fuera de las dársenas portuarias). Por esta razón, los valores calculados de downtime sólo sirven para efectuar comparaciones relativas entre el período histórico y la proyección y no deben ser considerados como valores absolutos.

²² Por ejemplo, en algunos casos, ubicados en latitudes mayores a los 33° puede registrarse un downtime de 8760 horas, que corresponde al 100% de inoperatividad para umbrales bajos ($H_{\text{umbral}} = 0.3$ y 0.5 m).

Figura 42: Downtime en los puertos analizados para el período histórico (1985-2004) y para la proyección (2026-2045) para los criterios definidos por la ROM 3.1-99.

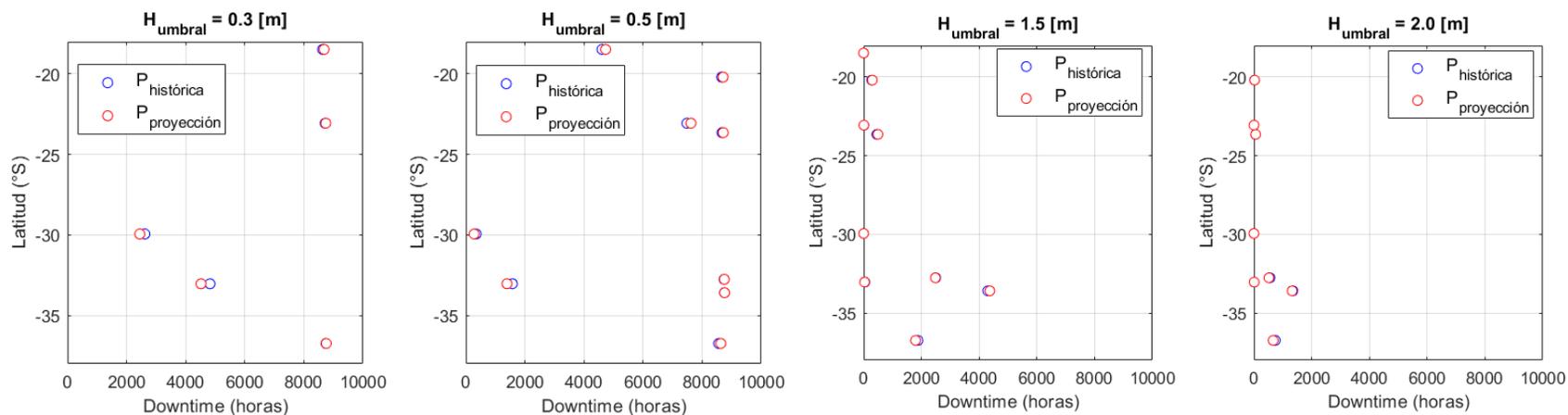
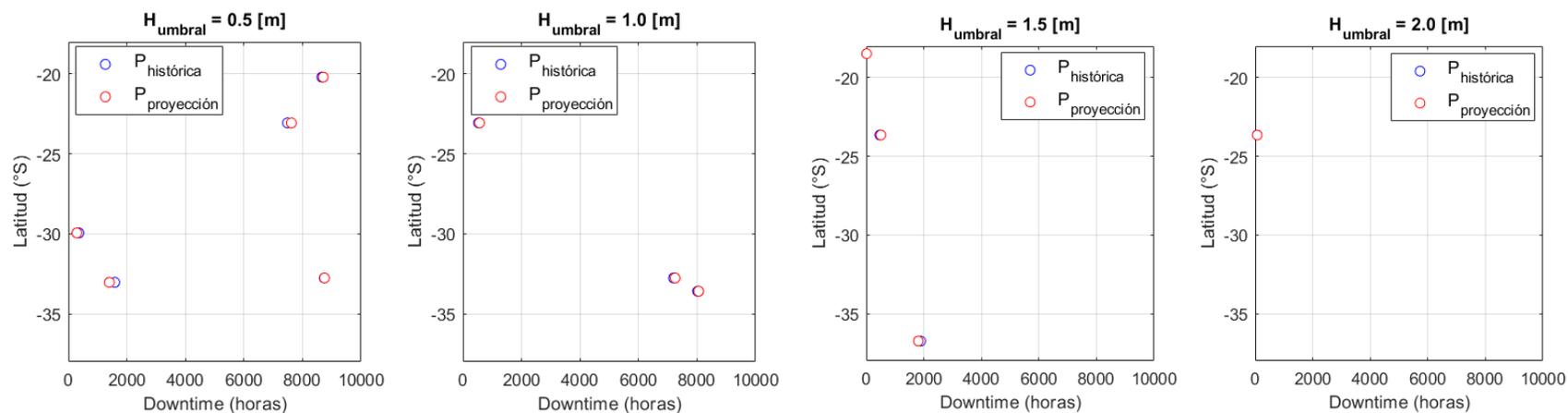


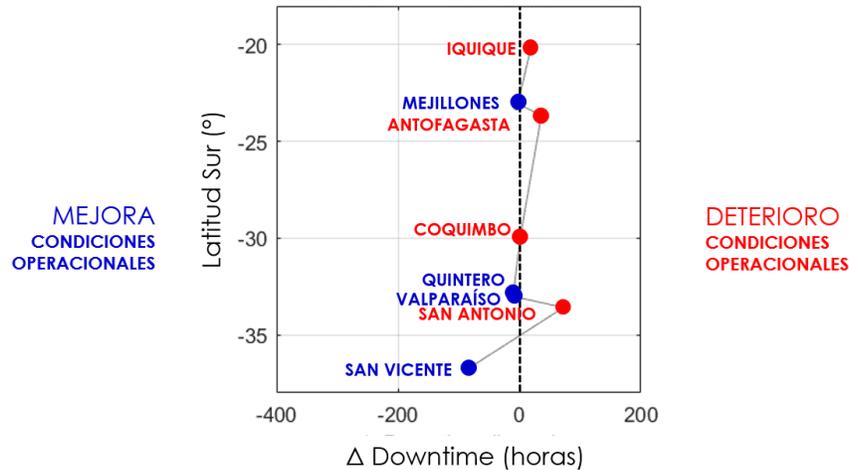
Figura 43: Downtime en los puertos analizados para el período histórico (1985-2004) y para la proyección (2026-2045) para los criterios definidos por las Capitanías de Puerto.



En la Figura 45 y Figura 46 se presenta el cambio en el downtime en los puertos analizados entre el período histórico (1985-2004) y la proyección (2026-2045) para los criterios definidos por la ROM 3.1-99 (PPEE, 1999) y las Capitanías de Puerto.

Para facilitar la lectura de estos resultados, en la Figura 44 se muestra el cambio en el downtime en los puertos analizados entre el período histórico y la proyección para un umbral operacional de 1.5 m, definido por la ROM 3.1-99 para el criterio de atraque de buques y acciones (oleaje) en sentido transversal al muelle. A partir de esta figura se observa que algunos puertos mejorarán sus condiciones operacionales (Mejillones, Quintero, Valparaíso y San Vicente) y otros las empeorarán (Iquique, Antofagasta, Coquimbo y San Antonio). No obstante, algunos cambios son poco significativos como para generalizar esta conclusión (Mejillones, Coquimbo, Quintero y Valparaíso) y en otros casos los cambios son más evidentes (San Antonio y San Vicente).

Figura 44: Cambio en el downtime en los puertos analizados entre el período histórico (1985-2004) y la proyección (2026-2045) para un umbral operacional de 1.5 m, definido por la ROM 3.1-99 para el criterio de atraque de buques y acciones en sentido transversal al muelle.



Para generalizar el análisis se deben analizar la Figura 45 y Figura 46 en forma conjunta. La primera conclusión es que los cambios en el downtime se reducen con el aumento de la altura umbral (valores más grandes son sobrepasados menos horas al año). La segunda conclusión es que algunos puertos mejorarán y otros empeorarán su operatividad. En concreto, los puertos del Norte (Arica, Iquique, Mejillones y Antofagasta) tienden a tener un aumento en el downtime para los umbrales asociados con la paralización de operaciones ($H_{\text{umbral}} \leq 0.5 \text{ m}$). Para umbrales mayores asociados a atraque de buques ($H_{\text{umbral}} \geq 1.5 \text{ m}$), sólo el puerto de Antofagasta presenta un deterioro significativo en la operatividad. Los puertos de Coquimbo y Valparaíso presentan una mejora en las condiciones asociadas con la paralización de operaciones ($H_{\text{umbral}} \leq 0.5 \text{ m}$) y cambios menores en condiciones limitantes para el atraque. El Puerto de San Antonio solo tiene cambios significativos para un umbral de $H_{\text{umbral}} = 1.5 \text{ m}$ en tanto que San Vicente empeora sus condiciones de atraque y mejorar las restricciones asociadas a la paralización.

Figura 45: Cambio en el downtime en los puertos analizados entre el período histórico (1985-2004) y la proyección (2026-2045) para los criterios definidos por la ROM 3.1-99.

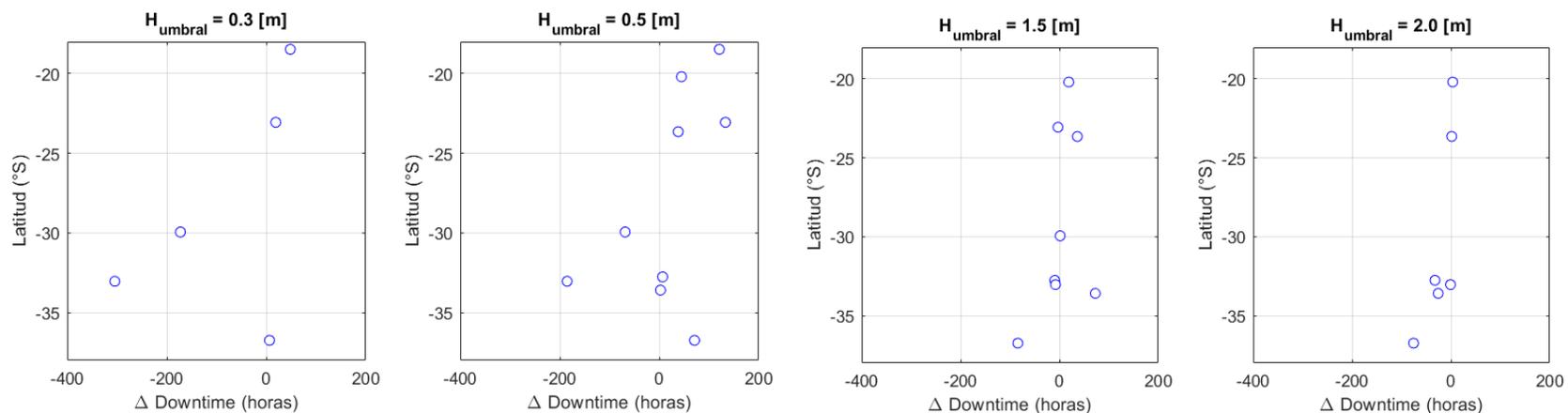
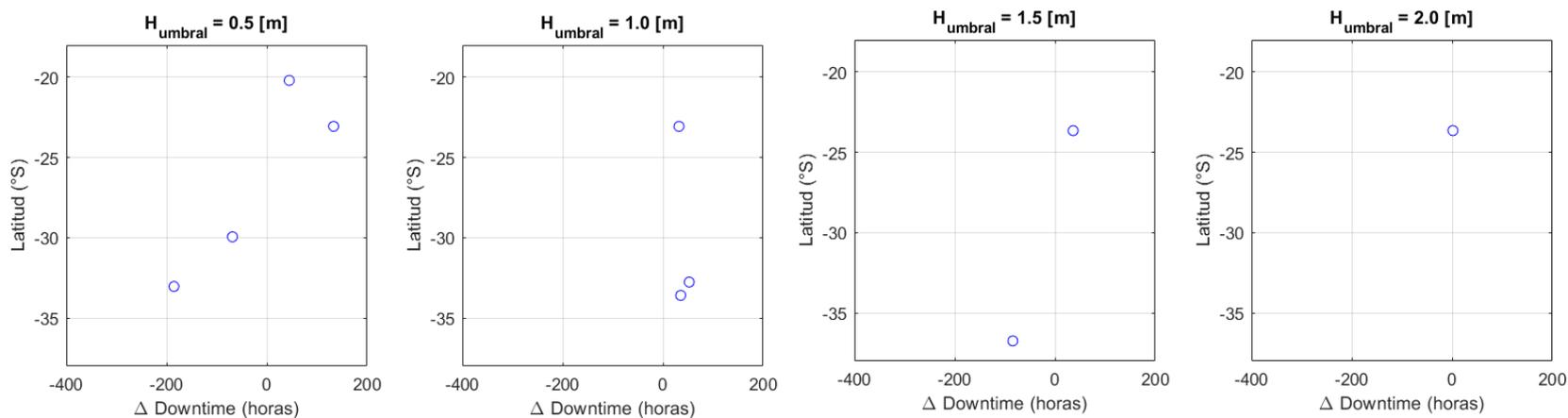


Figura 46: Cambio en el downtime en los puertos analizados entre el período histórico (1985-2004) y la proyección (2026-2045) para los criterios definidos por las Capitanías de Puerto.



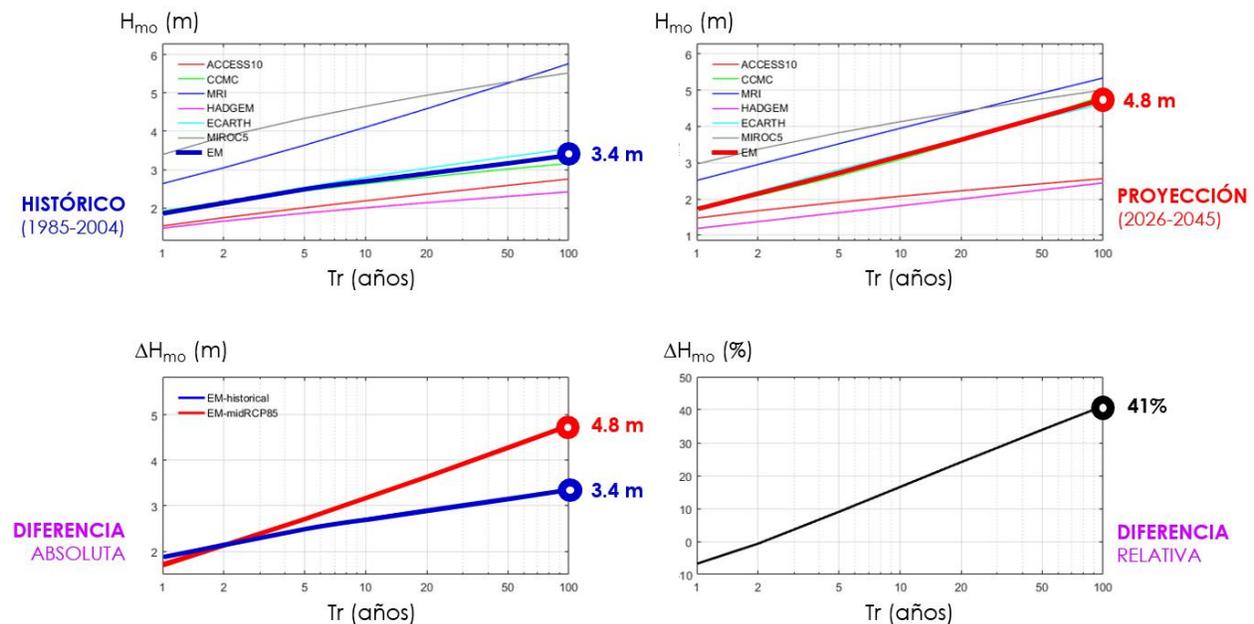
4.3.2 Clima extremo de oleaje

En la misma Figura 41a se observa que, para valores de altura por sobre límites operacionales definidos en la ROM la proyección muestra mayores alturas que el período histórico. Para el caso de Valparaíso, existe una altura significativa cercana a 2 [m] sobre la cual la proyección es más severa que el período histórico. Si bien no afecta el downtime (pues en esas condiciones el puerto no opera), este incremento en las alturas extremas puede afectar las obras de abrigo, atraque y fondeo de las instalaciones portuarias.

Para profundizar en el comportamiento de las grandes marejadas, se efectúa un análisis de valores extremos para las alturas significativas del oleaje. Este tipo de análisis –muy convencional para el diseño de obras de infraestructura- se efectúa a partir de una selección de valores extremos para el período histórico (1985-2004) y la proyección (2026-2045).

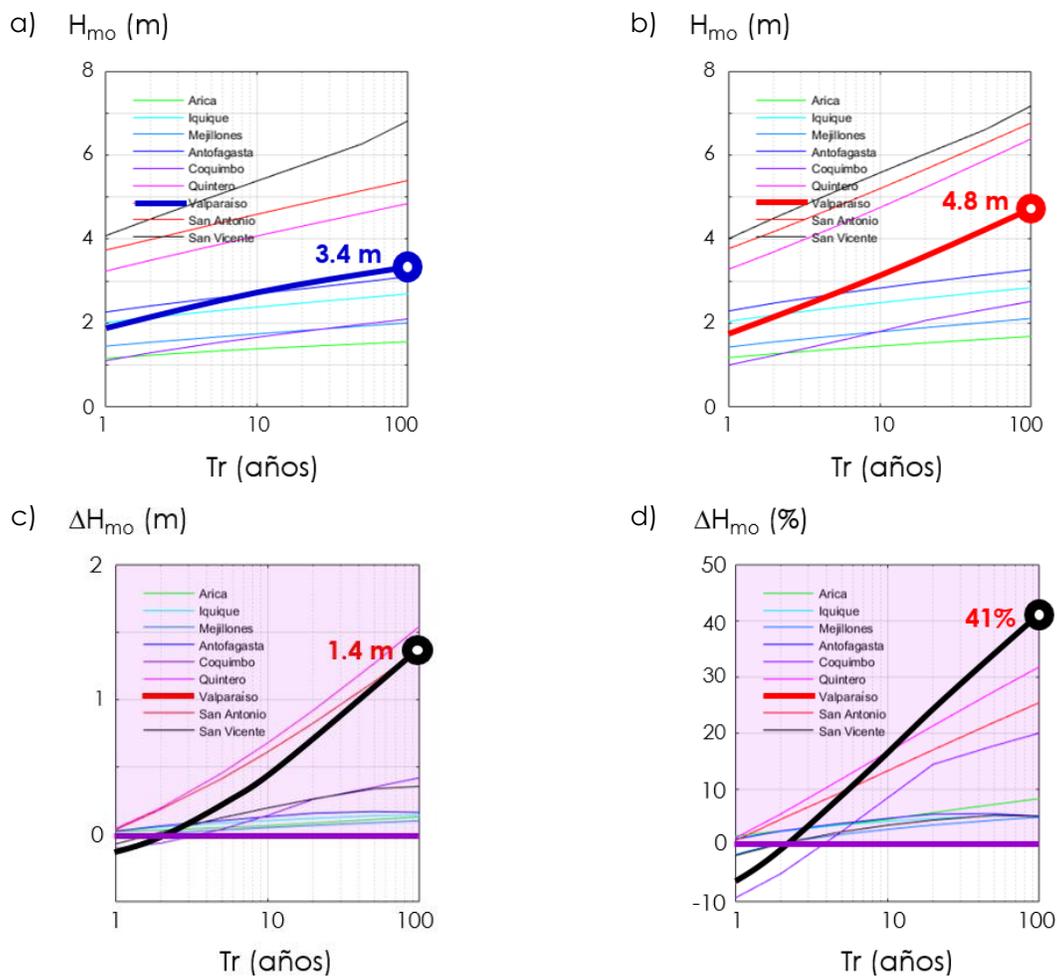
En la Figura 47 se presenta, a modo de ejemplo, un análisis de valores extremos de altura significativa obtenido a partir de seis modelos de oleaje, incluyendo la mediana entre los modelos, en Valparaíso. De la mera inspección de estos resultados, se observa que la altura significativa de los eventos extremos será mayor en la proyección aumentando. Por ejemplo, para un período de retorno de 100 años, el análisis entrega una altura de $H_{mo} = 3.4$ [m] para el período histórico y $H_{mo} = 4.8$ [m] para la proyección, lo que representa un aumento de $\Delta H_{mo} = 1.4$ [m], equivalente a un incremento de 41% en dicha variable. Este incremento puede tener consecuencias significativas en aquellas obras diseñadas en forma convencional (bajo el supuesto de condiciones estacionarias).

Figura 47: Valores extremos de altura significativa obtenida como la mediana de las curvas de valores extremos obtenidos a partir de seis modelos de oleaje en Valparaíso para el período histórico (1985-2004) y la proyección (2026-2045). Abajo se muestra la diferencia absoluta y la diferencia relativa entre las medianas.



El caso de Valparaíso, no obstante, es el más crítico de los puertos analizados. En la Figura 48 se presenta el mismo análisis para los puertos de Arica, Iquique, Mejillones, Antofagasta, Coquimbo, Quintero, Valparaíso, San Antonio y San Vicente. De la mera inspección de estos resultados, se observa que, para períodos de retorno superiores a 5 años, la altura significativa de los eventos extremos será mayor en la proyección para los 9 puertos analizados. Por ejemplo, para un período de retorno de 100 años, se espera un incremento porcentual de en 8% en Arica, 41% en Valparaíso y 6% en San Vicente.

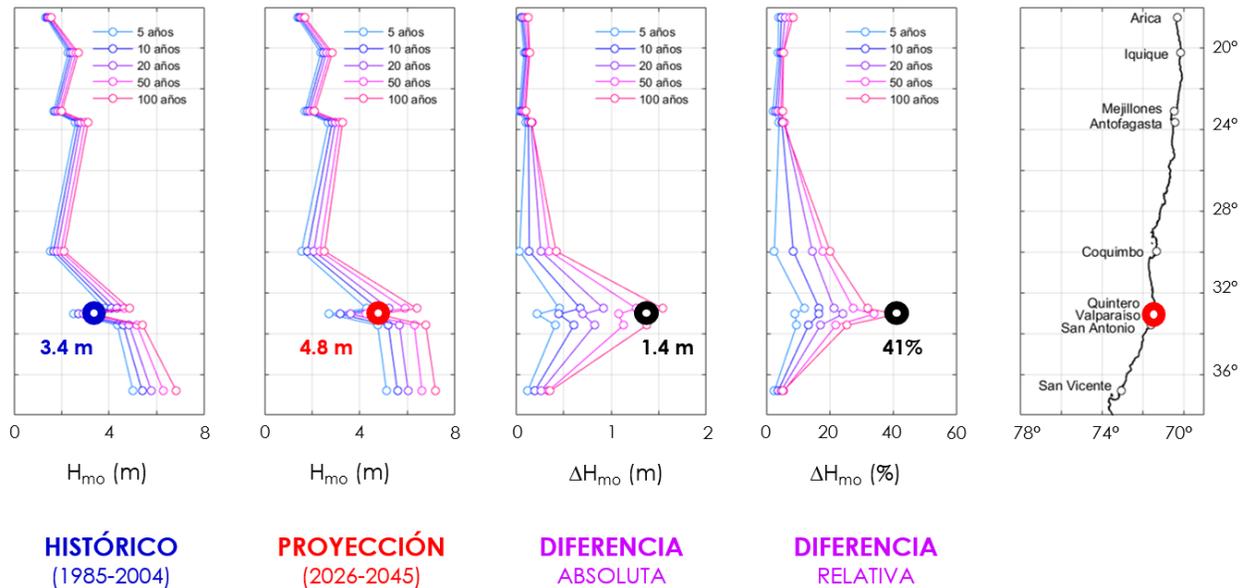
Figura 48: Análisis de valores extremos de altura significativa obtenida como la mediana de seis modelos de oleaje para a) el período histórico (1985-2004) y b) la proyección (2026-2045) frente a los 9 puertos analizados. Líneas más gruesas corresponden al análisis en Valparaíso presentado en la Figura 47. c) presenta la diferencia absoluta y b) la diferencia relativa entre los valores obtenidos para el período histórico y la proyección.



La Figura 49 muestra los resultados de altura significativa distribuidos de manera latitudinal para períodos de retorno superiores a 5 años. Se observa que en todos los casos existe un aumento de la altura significativa extrema, pero dicho aumento es mucho más significativo en la zona central (Coquimbo, Quintero, Valparaíso y San Antonio). Hacia el norte y sur, el aumento no es tan

importante. Estos resultados están afectos a las condiciones locales de cada puerto y no pueden generalizarse a toda la costa de Chile. No obstante, el hecho de que en la zona central exista una tendencia generalizada de aumento significativo puede asociarse, a modo de hipótesis con cambios en el sistema climático a gran escala.

Figura 49: Análisis de valores extremos de altura significativa obtenida como la mediana de seis modelos de oleaje frente a los 9 puertos analizados, expresadas en términos latitudinales. Los círculos gruesos corresponden al análisis en Valparaíso presentado en la Figura 47. Se presenta la altura para el período histórico (1985-2004), la proyección (2026-2045), la diferencia absoluta y la diferencia relativa entre los valores obtenidos para el período histórico y la proyección.



Desde la perspectiva de la gestión de la infraestructura, las autoridades portuarias deberían establecer planes de mantenimiento y reparación de obras de atraque y abrigo que serán dañadas con más frecuencia en la medida que avance el siglo. Este tipo de medidas se discute en la sección 5.5.3.

4.4 IMPACTO ECONÓMICO DE CIERRE DE PUERTOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos al aplicar la metodología descrita en el punto 3.4 de este informe a los downtime obtenidos para cada puerto con los umbrales definidos por la ROM 3.1-99 (PPEE, 1999).

En la Tabla 17 se presentan las tarifas obtenidas para cada puerto. Estas tarifas aproximan el valor económico de las pérdidas asociadas a menores o mayores tiempos de cierre o downtime. Las tarifas son de dos tipos: aquellas que cobra por el uso del muelle a la nave, que define un valor por metro de eslora y por hora, y otra que cobra por el uso del muelle a la carga que cobra por tonelada desembarcada o embarcada.

En la Tabla 18 se presenta un resumen de los resultados obtenidos para cada puerto. Se debe notar que en algunos puertos los tiempos de downtime son negativos, indicando que las proyecciones de cambio climático sugieren una disminución en la cantidad de eventos que podría afectar la operación de los mismos. En términos económicos, esto se traduce en una potencial ganancia (valores en negativo en la tabla). De esta manera a las pérdidas totales de US\$ 4,12 millones se deben restar ganancias por US\$ 6,34 millones anuales, dando como resultado unas ganancias netas de US\$ 2,22 millones anuales como efecto del cambio climático en la operación de los puertos analizados.

En esta sección se ha realizado una primera aproximación a las posibles pérdidas (o ganancias) asociadas a los efectos del cambio climático en la operación de los puertos. Para realizar este análisis se han hecho simplificaciones y supuestos. En primer lugar, se utilizó la tarifa para aproximar la pérdida económica por los cierres de puertos. Esto no considera pérdidas que pueden ir más allá que la pérdida del servicio o el hecho que en algunos casos, como cuando el puerto opera con holguras, se podría recuperar estos servicios con posterioridad. Tampoco se han considerado otros servicios que podrían verse mermados como por ejemplo el practicaje y almacenamiento en tierra. Se debe notar también, que por tratarse de un trabajo exploratorio no se intentó hacer una proyección del comercio y movimiento de naves para hacerlo coincidir con el periodo futuro en que se han hecho las proyecciones climáticas.

Tabla 17: Tarifas Portuarias utilizadas en el cálculo del impacto económico de los cierres de puertos

Autoridad Marítima	Puerto	Concepto tarifa	Unidad cobro	Tarifa US\$
Arica	Terminal Puerto Arica (TPA)	Uso de muelle a la nave	USD/metro-eslora (LOA)-hr	3.56
		Uso de muelle a la carga	USD/Ton	2.29
Iquique	Empresa Portuaria Iquique (EPI)	Uso muelle nave comercial afecto	USD/metro-eslora (LOA)-hr	1.60
		Descarga cabotaje	USD/Ton	1.54
Antofagasta	Empresa Portuaria Antofagasta (EPA)	Uso de muelle a la nave	USD/metro-eslora (LOA)-hr	1.89
		Uso muelle a la carga general	USD/Ton	3.67
Coquimbo	Terminal Puerto Coquimbo	Muellaje de la nave	USD/metro-eslora (LOA)-hr	2.11
		Muellaje a la carga	USD/Ton	1.05
Mejillones	Puerto Angamos	Naves comerciales	USD/metro-eslora (LOA)-hr	2.27
		Carga general y contenedores	USD/Ton	5.79
	Puerto Mejillones	Cobro por derecho a uso de muelle	USD/metro-eslora (LOA)-hr	3.10
	Terminal Graneles del Norte	Dólares por metro eslora-hora maniobra de desatraque.	USD/metro-eslora (LOA)-hr	2.49
	Terquim	Cobro por derecho a uso de muelle	USD/metro-eslora (LOA)-hr	2.30
San Antonio	Panul	Tarifa a la nave por uso de muelle	USD/metro-eslora (LOA)-hr	4.92
		Tarifa a la carga por uso de muelle	USD/Ton	0.91
	Puerto Central	Uso de muelle a la nave	USD/metro-eslora (LOA)-hr	1.75

Autoridad Marítima	Puerto	Concepto tarifa	Unidad cobro	Tarifa US\$
		Uso de muelle a la carga	USD/Ton	0.79
	STI	Uso de muelle a la nave	USD/metro-eslora (LOA)-hr	1.80
		Uso de muelle a la carga	USD/Ton	0.75
Valparaíso	Puerto Valparaíso	Tarifa uso de puerto para naves de comercio internacional	USD/Ton	0.46
	Terminal Cerros de Valparaíso (TCVAL)	Uso de muelle a la nave	USD/metro-eslora (LOA)-hr	3.65
		Uso de muelle a la carga	USD/Ton	1.50
	Terminal Pacífico sur de Valparaíso (TPS)	Muellaje a la nave	USD/metro-eslora (LOA)-hr	1.79
		Muellaje a la carga	USD/Ton	0.74
Biobío	San Vicente STVI	Uso de muelle a la nave	USD/metro-eslora (LOA)-hr	3.36
		Uso de muelle a la carga	USD/Ton	3.36

Tabla 18: Resumen Cálculo Pérdidas Por Cierre de Puertos

Puerto	Unidad Cobro	Tarifa (USD)	Downtime (Hrs/Año)	Eslora (n)	Export/Import (Tons)	Ton Por Hora Efectiva	Pérdida (Usd/Año)
Terminal Puerto Arica	USD/metro-eslora (LOA)-hr	3.56	0	210			0
	USD/Ton	2.29	169		393,668	239	92,760
Empresa Portuaria Iquique	USD/metro-eslora (LOA)-hr	1.60	23	278			40,270
	USD/Ton	1.54	45		845,532	338	23,314
Empresa Portuaria Antofagasta	USD/metro-eslora (LOA)-hr	1.89	38	237			118,911
	USD/Ton	3.67	38		3,329,715	1,592	223,340
Terminal Puerto Coquimbo	USD/metro-eslora (LOA)-hr	2.11	1	210			1,328
	USD/Ton	1.05	-241		901,501	182	-46,009
Puerto Angamos	USD/metro-eslora (LOA)-hr	2.27	-3	237			-6,452
	USD/Ton	5.79	152		8,856,923	2,812	2,481,801
Puerto Mejillones	USD/metro-eslora (LOA)-hr	3.10	-3	237			-4,405
Terminal Graneles del Norte	USD/metro-eslora (LOA)-hr	2.49	-3	237			-7,077
Terquim	USD/metro-eslora (LOA)-hr	2.30	-3	237			-3,268
Panul	USD/metro-eslora (LOA)-hr	4.92	3	222			26,522
	USD/Ton	0.91	47		22,552,062	6,118	262,043
Puerto Central	USD/metro-eslora (LOA)-hr	1.75	3	222			9,434

Puerto	Unidad Cobro	Tarifa (USD)	Downtime (Hrs/Año)	Eslora (n)	Export/Import (Tons)	Ton Por Hora Efectiva	Pérdida (Usd/Año)
	USD/Ton	0.79	47		22,552,062	6,118	227,488
STI	USD/metro-eslora (LOA)-hr	1.80	3	222			9,703
	USD/Ton	0.75	47		22,552,062	6,118	215,969
Puerto Valparaíso	USD/Ton	0.46	-490		11,916,142	4,257	-958,738
Terminal Cerros de Valparaíso (TCVAL)	USD/metro-eslora (LOA)-hr	3.65	-9	278			-70,574
	USD/Ton	1.50	-490		11,916,142	4,257	-3,126,321
Terminal Pacífico sur de Valparaíso (TPS)	USD/metro-eslora (LOA)-hr	1.79	-9	278			-34,610
	USD/Ton	0.74	-490		11,916,142	4,257	-1,542,318
San Vicente STVI	USD/metro-eslora (LOA)-hr	3.36	-160	237			-635,623
	USD/Ton	3.36	78		10,582,003	1,839	479,696

5 CONCLUSIONES

5.1 ESTUDIO DE VIENTO Y OLAJE

El aumento de la temperatura ha generado cambios en el régimen de viento en las zonas de océano donde se genera oleaje. De acuerdo a los resultados generados en el presente estudio (Volumen 1: Amenazas), en los últimos 40 años las marejadas aumentaron en frecuencia e intensidad en todo el territorio nacional, período lo suficientemente largo como para vincular este fenómeno al cambio climático. Los cambios esperados en el viento y en el oleaje para la proyección (2026-2045) respecto del período histórico (1985-2004) se resumen en la Tabla 19.

Tabla 19: Resumen de diferencias de parámetros de viento y oleaje entre el período histórico (1985-2004) y la proyección (2026-2045) en las 4 zonas geográficas de Chile. Celdas sin descriptor representan cambios despreciables.

Parámetro	Percentil %	Zona Norte 19°S – 32°S	Zona Centro 32°S – 37°S	Zona Sur 37°S – 44°S	Zona Austral 44°S - 55°S
Viento	50	Aumento	Disminución	Disminución	Variable
	90	Aumento	Disminución	Disminución	Aumento
Altura significativa	50	-	-	-	Aumento
	90	Aumento	-	Aumento	Aumento
Período medio	50	Disminución	Aumento	Aumento	Aumento
	90	Aumento	Aumento	Aumento	Aumento
Dirección media	50	-	Giro al sur	Giro al sur	-

5.2 VULNERABILIDAD DE CIERRE DE PUERTOS

La información que contienen los certificados de cierres de puertos no es uniforme, siendo algunos certificados de puerto más detallados que otros. Al igual que en presente estudio, el estudio de Marítimo Portuario (2017) identifica bases incompletas, formatos incompatibles y no comparables de información para un análisis estadístico de los cierres de puertos en 10 puertos.

La cantidad de cierres de puerto entre los años 2008 y 2017 alcanzan a 9097 en las 19 capitanías expuestas al Océano Pacífico que respondieron al requerimiento de antecedentes solicitado en este estudio. Los puertos con mayor cantidad de cierres son Arica (850), Tocopilla (802) y Quintero (761). En este estudio se define, como primera aproximación, que un cierre de puerto ocurre cuando al menos uno de los terminales en un puerto está cerrado.

El cruce entre la estadística de cierres de puertos y los parámetros de oleaje en las cercanías de los puertos muestra que, aun cuando las capitanías tienen planes de alerta ante condiciones de tiempo adversas, los cierres por marejadas no se correlacionan bien con los parámetros de oleaje modelados.

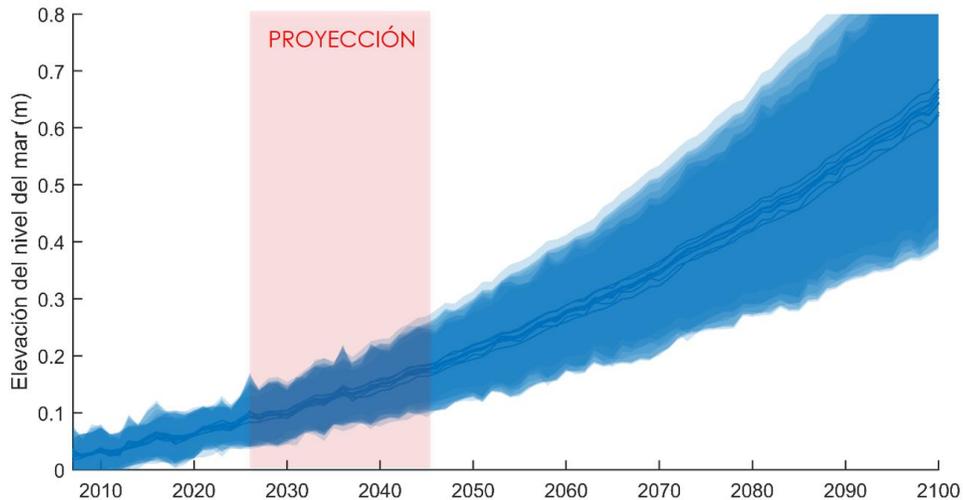
5.3 RIESGO DE CIERRE DE PUERTOS

5.3.1 Resultados

Del análisis de todos los puertos y límites operacionales, se concluye que algunos puertos mejorarán y otros empeorarán su operatividad. En concreto, los puertos del Norte (Arica, Iquique, Mejillones y Antofagasta) presentarán un aumento en el downtime para los límites operacionales asociados con la paralización de operaciones ($H_s \leq 0.5$ m). Para límites operacionales mayores asociados a atraque de buques ($H_s \geq 1.5$ m), sólo el puerto de Antofagasta mostrará un deterioro significativo en la operatividad. Los puertos de Coquimbo y Valparaíso presentarán una mejora en las condiciones asociadas con la paralización de operaciones ($H_s \leq 0.5$ m) y cambios menores en condiciones limitantes para el atraque. El Puerto de San Antonio solo tendrá cambios significativos para un límite operacional de $H_s = 1.5$ m en tanto que San Vicente empeorará sus condiciones de atraque y mejorar las restricciones asociadas a la paralización.

Asimismo, se constata que, para valores de altura por sobre límites operacionales definidos en la ROM 3.1-99 -esto es, cuando el puerto no opera por marejadas- la proyección muestra mayores alturas que el período histórico en todos los puertos. En Valparaíso, por ejemplo, sobre una altura significativa de 2 m ambas curvas se separan, siendo el clima extremo de la proyección más severo que la historia. Si bien el clima extremo no afecta el downtime pues los buques permanecen a la cuadra del puerto durante las marejadas, este incremento en las alturas extremas puede afectar la integridad de obras costeras, de abrigo, atraque y fondeo de las instalaciones portuarias. Por otra parte, el incremento de altura, sumado al aumento de los períodos medios atribuible a la migración al sur del Anticiclón del Pacífico Sur y al aumento del nivel medio del mar (Figura 21), generará un aumento del sobrepaso sobre las obras de defensa, que puede constituirse en una amenaza a la seguridad de las operaciones y daño en el equipamiento en zonas de recepción y acopio de mercancía. Desde la perspectiva de la gestión de la infraestructura, las autoridades portuarias debieran establecer planes de mantención y reparación de obras de atraque y abrigo que serán dañadas con más frecuencia en la medida que avance el siglo.

Figura 20: Valores de elevación del nivel del mar respecto al promedio 1986-2005 en [m], a partir de 21 modelos del CMIP5 (AR5) en los puertos de Arica, Iquique, Mejillones, Antofagasta, Coquimbo, Quintero, Valparaíso, San Antonio y San Vicente. Las líneas centrales corresponden a las medianas entre modelos. Las áreas celestes cubren el rango entre modelos para cada ubicación. Se superponen los resultados para todas las ubicaciones para ilustrar que no existe una variabilidad latitudinal importante en las proyecciones del nivel medio del mar.



5.3.2 Análisis crítico de la metodología y oportunidades de mejora

El estudio de downtime se basa en estadística del oleaje en la bocana de acceso de cada dársena portuaria (Arica, Iquique, Antofagasta, Valparaíso, San Antonio y San Vicente) o en puntos representativos de cada bahía (Mejillones, Coquimbo, Quintero) y por tanto no se basa en el clima de oleaje de los sitios de atraque. Debido a los efectos de difracción y reflexión que ocurren al interior de dársenas y bahías, la modificación del oleaje entre los puntos de análisis y los muelles es significativa. Ello redundará en una aproximación conservadora (por exceso) del downtime. Aun cuando esta aproximación se estima en forma conservadora el valor absoluto del downtime operacional, sí permite establecer cambios relativos y tendencias entre el período histórico (1985-2004) y la proyección (2026-2045). En caso de necesitar estimaciones absolutas del downtime futuro, se recomienda acoplar los resultados obtenidos en los nodos costeros con modelos de agitación portuaria de alta resolución dentro de la dársena.

El análisis de cierre de puertos se efectúa en forma gruesa utilizando condiciones límites de operación basadas en la altura significativa (PPEE, 1999). Asimismo, todos los sitios de atraque en cada puerto son analizados mediante sólo un punto representativo donde se computa el clima de oleaje, lo que excluye el cierre diferenciado que comienza a darse en algunos de los puertos más grandes en la actualidad. Este análisis puede ser mejorado considerando los movimientos aceptables en los buques en función de las características de los equipos utilizados en las diferentes operaciones (PIANC, 1995). El estudio se puede refinar aún más si se utilizan modelos de buque atracado en cada sitio que, en vez de estimar el downtime en función de un límite operacional de altura de oleaje, lo hagan en función de los movimientos máximos admisibles de la nave.

El estudio asume que las condiciones de vulnerabilidad del sistema (buque, sitio de atraque y sistema de amarre, entre otros) permanecen constantes entre ambos períodos de análisis. No obstante, la vulnerabilidad puede reducirse mediante el uso de obras de infraestructura, como la mejora de las condiciones de abrigo, o soluciones tecnológicas como la mejora de los sistemas de amarre de naves y el uso de sistemas de alerta temprana de marejadas a nivel local.

El estudio del downtime operacional no contempla el estudio de otras variables atmosféricas (viento, neblina), oceanográficas (nivel del mar, corrientes, mareas meteorológica, marea astronómica) ni la ocurrencia conjunta de alguna de estas. Tampoco se consideran las amenazas de índole geofísico, como los tsunamis y terremotos. El hecho de que los puertos chilenos han sufrido prolongadas paradas operativas debido a la ocurrencia de sismos²³ hace recomendable estudiar el riesgo de cierre de puertos desde la perspectiva de la multiamenaza.

5.4 IMPACTO ECONÓMICO DE CIERRE DE PUERTOS

Para el cálculo del impacto económico de cierre de puertos, se utiliza la diferencia de downtime asociado al oleaje entre la proyección y el período histórico, la que se multiplica por el valor económico del tiempo de perdido asociado al cobro por hora de atraque y metros de eslora y al cobro por movimiento de carga. Este procedimiento se aplica para los terminales ubicados en Arica, Iquique, Antofagasta, Mejillones, Coquimbo, San Antonio, Valparaíso y San Vicente. En términos económicos, el análisis se traduce en pérdidas totales de US\$ 4,12 millones debidas al aumento del downtime y ganancias por US\$ 6,34 millones anuales, dando como resultado unas ganancias netas de US\$ 2,22 millones anuales como efecto del cambio climático en la operación de los puertos analizados.

Esta primera aproximación se restringe a las posibles pérdidas (o ganancias) asociadas a los efectos del cambio climático en la operación de los puertos. Para realizar este análisis se han hecho simplificaciones y supuestos. En primer lugar, se utilizó la tarifa para aproximar la pérdida económica por los cierres de puertos, que no considera pérdidas que pueden ir más allá que la pérdida del servicio o el hecho que en algunos casos, como cuando el puerto opera con holguras, se podría recuperar estos servicios con posterioridad. Tampoco se han considerado otros servicios que podrían verse mermados como por ejemplo el practicaje y almacenamiento en tierra. Se debe notar también, que por tratarse de un trabajo exploratorio no se intentó hacer una proyección del comercio y movimiento de naves para hacerlo coincidir con el periodo futuro en que se han hecho las proyecciones climáticas.

Este análisis no contempla la evaluación del impacto económico asociado a la pérdida de bienes y servicios que se generan en la cadena logística del transporte. Tampoco se analiza el efecto que los eventos extremos tendrán en la infraestructura portuaria y costera, producto del efecto conjunto del aumento de la intensidad y frecuencia de las marejadas ni del aumento del nivel del mar.

²³ Valparaíso y San Antonio para el terremoto del 3/mar/1985 (Ortigosa, 1986), Talcahuano para el tsunami del 27/feb/2010 (Fritz et al., 2011), Iquique para el terremoto de 1/abr/2014 (Catalán et al., 2015) y Coquimbo para el tsunami del 16/sep/2015 (Contreras et al., 2016).

5.5 MEDIDAS DE ADAPTACIÓN

Según el IPCC (2014), la adaptación es el proceso de ajuste al clima real o proyectado y sus efectos. En los sistemas humanos, la adaptación trata de moderar o evitar los daños o aprovechar las oportunidades beneficiosas. En algunos sistemas naturales, la intervención humana puede facilitar el ajuste al clima proyectado y a sus efectos. La adaptación es específica de cada sector analizado. En el Plan de Adaptación y Mitigación de los Servicios de Infraestructura al Cambio Climático 2017-2022 (MOP y MMA, 2017), se reconoce a los puertos como infraestructura vulnerable debido a las siguientes características:

- Su vida útil es larga, superando en muchas ocasiones los 50 años, siendo entonces particularmente sensibles frente a los cambios futuros del clima.
- Por su localización en las costas, ríos o lagos, están expuestos a una gran cantidad de fenómenos producidos por variables climatológicas tales como aumento del nivel medio del mar, variaciones en marea meteorológica, oleaje, vientos, inundaciones fluviales, embancamientos y erosión. Además, están expuestas a tsunamis, alzamiento y subsidencia cosísmica producto de grandes terremotos.
- Las operaciones portuarias pueden verse afectadas por las condiciones climáticas, produciendo retrasos en la actividad comercial y/o de conectividad del puerto.

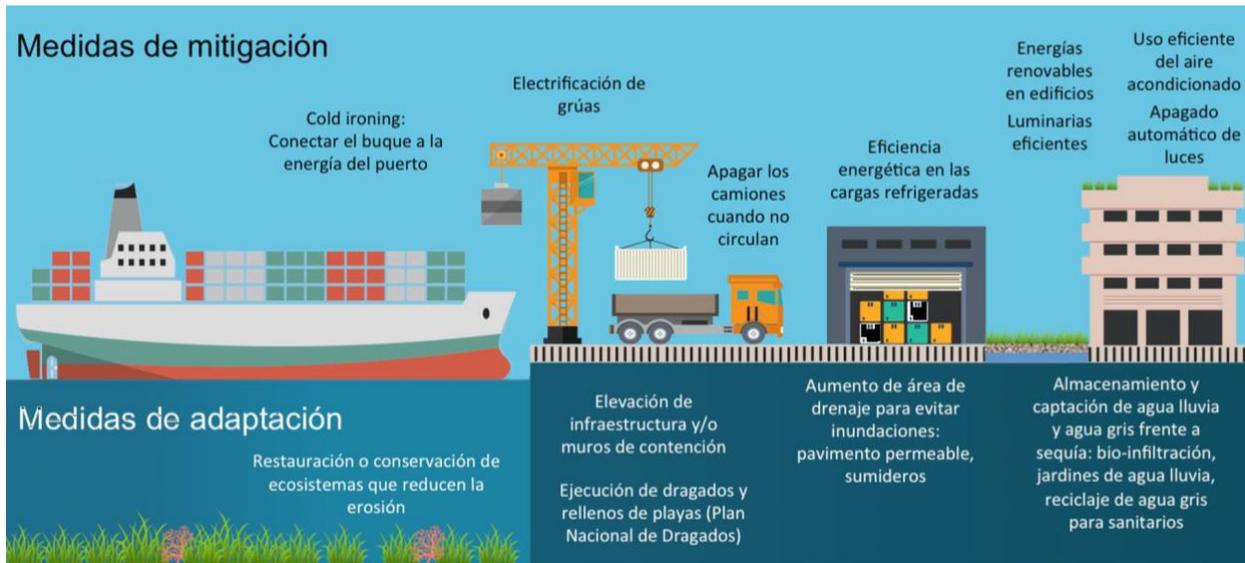
Existe consenso en la actualidad de que es necesario integrar la mitigación de gases de efecto invernadero (GEI) y la adaptación al cambio climático en todo el ciclo de vida de los puertos marítimos, en aras de promover su resiliencia ante el cambio climático (MinAmbiente, 2017). Ante este escenario, es previsible que los puertos que implementen medidas de mitigación y adaptación serán más competitivos. En este capítulo nos restringimos a presentar algunas de las medidas de adaptación que debieran contemplarse en los planes de desarrollo de los puertos chilenos. Las medidas se orientan a:

- Mejoras orientadas a la operación portuaria.
- Mejoras orientadas a la gestión de la infraestructura marítima.

Cabe mencionar que, en el marco de este estudio, se han utilizado los cierres de puerto como proxy para evaluar los efectos del cambio climático en la actividad portuaria y se ha relegado a un segundo lugar –pero no menos importante– las problemáticas asociadas a infraestructura. Por ende, las medidas de adaptación están sesgadas a la operación portuaria.

Por otra parte, no se presentan medidas de mitigación de GEI en zonas portuarias. El lector interesado en temas relacionados con la mitigación puede consultar la abundante literatura existente (e.g. MinAmbiente, 2017). La Figura 50 ilustra ejemplos de medidas de mitigación de GEI en zonas portuarias.

Figura 50: Arriba: Opciones de adaptación y mitigación de GEI en puertos. Abajo, medidas de mitigación de GEI para diferentes actores del sistema portuario. (MinAmbiente, 2017).



5.5.1 Mejoras orientadas a la operación portuaria

Los cierres de puertos generan mermas en toda la cadena logística de los productos que se importan y exportan a través de dichas instalaciones. En un mercado muy competitivo donde los puertos compiten por atraer a las líneas navieras, el garantizar seguridad en el atraque de la nave en un puerto es un requisito mínimo para subsistir. Aquellas instalaciones portuarias que generen planes de adaptación tanto de las operaciones (para reducir los cierres de puerto) como de la infraestructura al cambio climático tienen mejores perspectivas de mantener o incluso mejorar su posición relativa en el mercado.

Como medidas de mitigación orientadas a la operación portuaria, los puertos debieran optimizar los sistemas de amarre y atraque de las naves, mejorar las condiciones de abrigo o absorción de energía en los sitios expuestos e implementar sistemas de alerta temprana de marejadas que les permitan planificar sus operaciones con varios días de anticipación.

Una revisión de la experiencia mundial sobre materias relacionadas con la operatividad de los sitios de atraque en puertos da cuenta de los siguientes caminos típicos para reducir el downtime operacional de los sitios de atraque:

- Mejoramiento de condiciones de abrigo.
- Adecuación de instalaciones portuarias para minimizar sobrepaso y erosión costera.
- Mejoramiento de configuraciones de amarre de naves.²⁴
- Uso de sistemas de alerta temprana de marejadas a nivel local.²⁵
- Barreras de protección a través de manejo de ecosistemas costeros

Este tipo de medidas de adaptación se profundizan a continuación.

5.5.1.1 Condiciones de abrigo

El mejoramiento de condiciones de abrigo está normalmente asociado a la extensión de las obras de abrigo del puerto, buscando reducir los niveles de oleaje al interior de la dársena en que se sitúan los sitios de atraque, y con ello las amplitudes de movimiento de las naves atracadas y los esfuerzos en los elementos de amarre/atraque. En general es una alternativa de alto costo, y no del todo eficiente para atenuar la energía de oleajes de período alto.

²⁴ Este punto ha desarrollado a partir de estudios del especialista en Ingeniería Portuaria, Ing. Jaime Serrano.

²⁵ Este punto ha desarrollado junto al Ingeniero civil Oceánico y Director del Sistema de Alerta de Marejadas de la Universidad de Valparaíso, Prof. Mauricio Molina.

5.5.1.2 Sistemas de amarre de naves

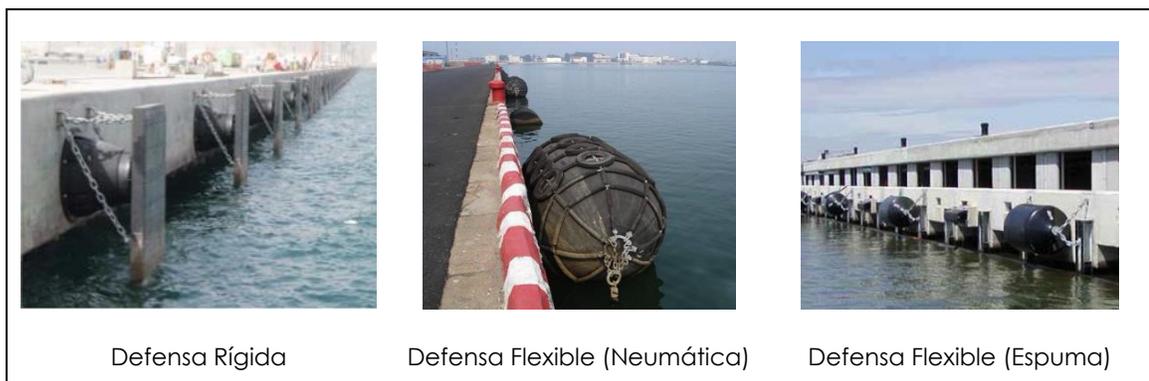
La mejora de configuraciones de amarre de naves se logra mediante las siguientes alternativas:

- **Uso de espías de alta resistencia y flexibilidad.** Esta solución está orientada a asegurar que las amarras de las naves sean ejecutadas con espías más resistentes y mejor mantenidas que las normalmente traen las naves.
- **Instalación de winches en las espías, que permitan mantener la tensión constante.** Esta solución permite mantener el buque apretado contra las defensas, reduciendo por tanto sus posibilidades de movimiento.
- **Reemplazo de defensas rígidas por defensas de respuesta amortiguada.** Esta solución guarda relación con que, generalmente, se utilizan defensas que trabajan por pandeo de su cuerpo de goma para absorber la energía de atraque de las naves y controlar la fuerza que se transmite al muelle, para lo cual son muy eficientes. Sin embargo, la rigidez inicial (a pequeñas compresiones) de este tipo de defensas es muy alta, lo que implica que en el proceso de apriete y soltura de la defensa tiende a producir un rebote hacia afuera de la nave, que hace que la misma se separe del sistema de defensas y navegue libremente. Estas defensas cuentan normalmente con un panel de bajo coeficiente de roce, que no ayuda a proporcionar resistencia contra el movimiento de vaivén de la nave. Defensas de menor rigidez típicas son las defensas cilíndricas ya sea de tipo neumáticas (con aire a presión en su interior) o rellenas de espuma, como las que se muestran en la Figura 51 en las que se ilustran también las defensas de tipo rígidas.

La sustitución de defensas es un tema que debe ser analizado caso a caso, en términos que para un mismo nivel de absorción de energía la fuerza transmitida por las defensas flexibles es en general superior que la asociada a la defensa rígida, y sus dimensiones superiores, separando por tanto la nave del muelle a una mayor distancia.

Una combinación del uso de espías de tensión constante y defensas flexibles puede conducir también a enfrentar de mejor forma el problema, alcanzando mayores niveles de reducción de los movimientos y menores cargas en las amarras.

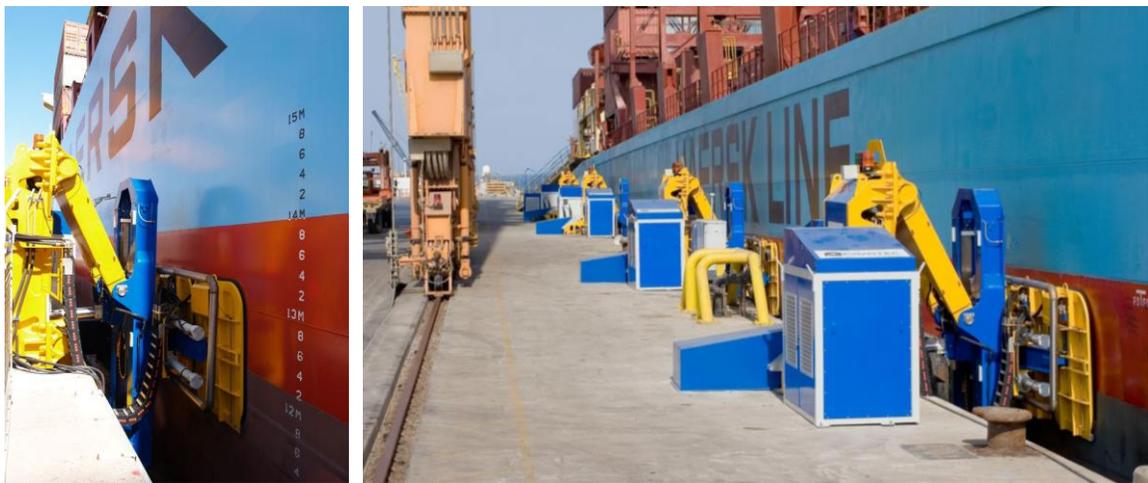
Figura 51: Tipos de defensas rígidas y flexibles.



- **Uso de sistemas nuevos de amarre, como MoorMaster, ShoreTension y DockLock.**

El sistema **MoorMaster** (Figura 52) es una tecnología desarrollada por Cavotec²⁶, consistente en paneles que, mediante generación de vacío se adhieren al casco de la nave y se encuentran a su vez conectados al muelle mediante un brazo hidráulico flexible. Los paneles pueden seguir libremente el movimiento de alteo (heave, de manera de ajustarse a las variaciones de marea y la carga/descarga de la nave), proporcionando rigidez y amortiguamiento a los movimientos de vaivén (surge) y deriva (sway) del buque. El sistema está basado en la filosofía de proveer una alta rigidez de manera que la nave no escale en la adquisición de momentum en sus movimientos, manteniendo estos dentro de pequeños márgenes. Para proporcionar un adecuado amortiguamiento, debe disponerse una cantidad suficiente de unidades a lo largo del muelle, de manera de no exceder las capacidades resistentes de las mismas. El sistema se encuentra instalado en diversos terminales del mundo, según puede observarse en información contenida en su sitio web.

Figura 52: Sistema de amarra tipo MoorMaster



El sistema **ShoreTension** (Figura 53) consiste de un cilindro que contiene un pistón hidráulicamente controlado, que puede desplazarse fuera y dentro de dicho cilindro. Se emplaza normalmente entre dos bitas del muelle y una espía rígida es guiada desde el cabezal del pistón por medio de una roldana hacia una bita de la nave. La idea es proporcionar a través de este sistema pretensión a las espías y amortiguamiento adicional. Este sistema fue recientemente implementado en el Puerto de Arica (Allende, 2018; Rozas et al., 2018). El sistema se encuentra instalado en diversos terminales del mundo, según puede observarse en información contenida en su sitio web.

²⁶ <http://www.cavotec.com/en/your-applications/ports-maritime/automated-mooring>

Figura 53: Sistema de amarra tipo Shore Tension.



El sistema **DockLock** (Figura 54) es un sistema empleado en la actualidad para asegurar el abarreamiento de naves para la transferencia de combustible, pero ha sido concebido para su uso también en muelles, con el objetivo de reducir el movimiento de los buques. Consiste en lo esencial en magnetos controlados electrónicamente a una unidad principal que cuenta con brazos hidráulicos, de manera similar al sistema MoorMaster. Es un sistema que se encuentra en etapas de desarrollo inicial para su puesta en marcha en muelles.

Figura 54: Sistema de amarra tipo DockLock.

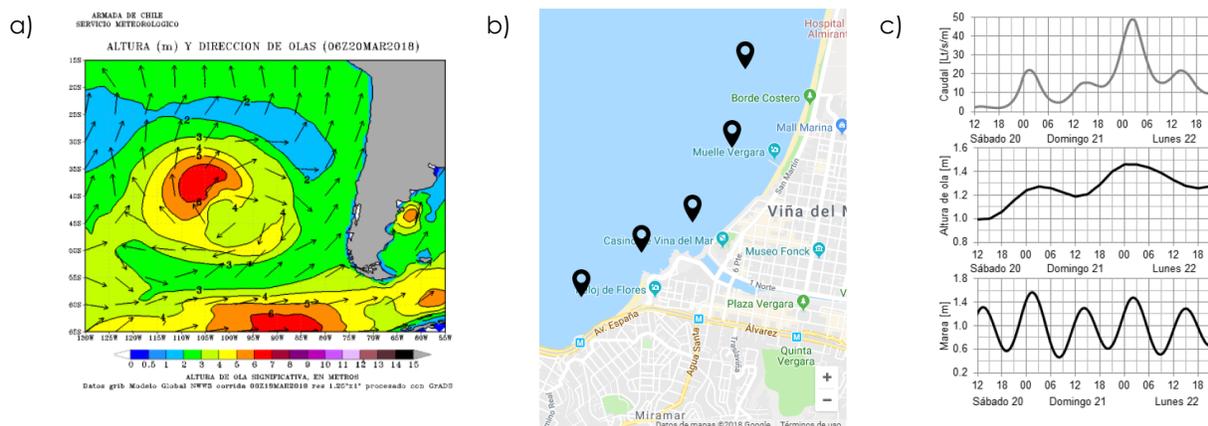


5.5.2 Sistemas de alerta temprana de marejadas

Las marejadas tienen impactos diferenciados en el borde costero, cuya predicción requiere de sistemas que cuantifiquen el oleaje a nivel local. A pesar de que el oleaje es una de las variables que condiciona las actividades marítimas, Chile no posee un sistema de alerta de marejadas

local que permita anticipar las condiciones en la costa a un nivel de detalle para estimar los impactos locales. En efecto, el pronóstico entregado por el Servicio Meteorológico de la Armada corresponde a un pronóstico realizado a partir de un modelo en aguas profundas y cobertura mundial (Figura 55a)²⁷ que no proporciona información detallada en el borde costero. Sobre esa base se sustenta la toma de decisiones respecto a la restricción temporal de actividades que puede, o ser excesiva en caso de que la predicción sea mayor al impacto real de la marejada, o insuficiente y riesgosa en caso contrario. Un sistema local de alerta de marejadas proporciona información útil, a nivel local y a tiempo para la gestión de la emergencia, la movilización de recursos y la rehabilitación de infraestructura.

Figura 55: a) Modelo de pronóstico global utilizado actualmente por el Servicio Meteorológico de la Armada para dar alerta de marejadas. b) Sistema local de alerta de marejadas de la Universidad de Valparaíso²⁸, donde se muestran puntos de pronóstico en la bahía de Valparaíso. c) Pronóstico de caudal de sobrepaso, altura de ola y marea en Av Perú efectuada mediante el sistema propuesto para la marejada del 22/01/2018.



A nivel mundial, por otro lado, cabe mencionar que los 28 países ribereños de la OECD cuentan con sistemas de pronóstico de oleaje de uso público y 24 de ellos incluyen pronósticos en la costa, entre los cuales Chile no está incluido. Los organismos más prestigiosos a nivel mundial son NOAA²⁹, Ifremer³⁰ y ECMWF³¹, que enfocan sus esfuerzos en la mejora continua de los pronósticos y publican en revistas indexadas. Los pronósticos se distribuyen usualmente en forma gratuita para la investigación y bajo un costo de licenciamiento para proyectos privados. La calibración de estos modelos se realiza en regiones específicas en Norteamérica y Europa, donde se dispone de redes de medición de oleaje. Los códigos fuente son de libre acceso, lo cual permite que sean ejecutables en cualquier centro de computación de alto rendimiento. No obstante, su limitación radica en la precaria validación de resultados de modelación cuando no se cuenta

²⁷ http://meteoarmada.directemar.cl/prontus_meteo/site/edic/base/port/inicio.html.

²⁸ www.marejadas.uv.cl

²⁹ National Oceanographic and Atmospheric Administration. NWW3 Project - <http://polar.ncep.noaa.gov/waves/index2.shtml>

³⁰ L'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer. IOWAGA Project - ftp.ifremer.fr

³¹ European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. ECMWF Operational Analysis - www.ecmwf.int/search/datasets/

con un número adecuado de mediciones locales, cuestión que Beyá et al. (2017) demostró al comparar estas bases de datos globales con las generadas en la costa de Chile y publicadas en el Atlas de Oleaje (Beyá et al. 2016).

A nivel local, existen también consultoras que ofrecen pronósticos bajo un costo de licencia para proyectos específicos³², pero que rara vez publican las metodologías de modelación, los periodos de observación utilizados para validar sus resultados y la incertidumbre asociada a sus predicciones. Desde 2016, la Escuela de Ingeniería Oceánica (EICO) de la Universidad de Valparaíso (UV) ha desarrollado una herramienta de pronóstico de oleaje en 61 nodos distribuidos a lo largo del país (Parra y Beyá, 2017)³³, que está aún en fase de prueba. Como plan piloto se han implementado 21 nodos virtuales sobre profundidades de 20 m en la bahía de Valparaíso, los que, junto a un pronóstico de marea, permiten evaluar el sobrepaso en sectores costeros. Recientemente se ha implementado una predicción de marea astronómica y un cálculo grueso del sobrepaso mediante funciones empíricas, cuyos resultados son muy preliminares. Actualmente el sistema i) adolece de una calibración y validación costera, ii) cubre solo 9 nodos ubicados frente a los principales puertos estatales y iii) no considera la interacción del oleaje con la marea, que en conjunto definen los impactos del oleaje sobre la seguridad de embarcaciones y bañistas, la desaparición temporal de playas, el sobrepaso que experimentan los paseos costeros y el daño de la infraestructura portuaria y costera.

En conclusión, se recomienda desarrollar y difundir el uso de un Sistema local de Alerta de Marejadas (SAM) basado en un modelo de pronóstico de oleaje costero en 19 ciudades de Chile³⁴, validado mediante altimetría satelital en aguas profundas y con batimetría de alta resolución e instrumentos de observación de oleaje costero.

5.5.3 Mejoras orientadas a la gestión de la infraestructura marítima

En Chile hay alrededor de 170 instalaciones portuarias -entre grandes puertos estatales, muelles industriales y sistemas de amarre con boyas- que cumplen un rol esencial para el desarrollo económico y el bienestar de la población. El desempeño de la infraestructura es directa o indirectamente afectada por las condiciones climáticas existentes, y también lo será por los posibles cambios en la frecuencia y magnitud o intensidad de los eventos extremos producto del cambio climático (Gironás y Yáñez, 2019). En la práctica actual, los valores de diseño y la incertidumbre asociada se evalúan bajo condiciones de estacionaridad, es decir, suponiendo que durante la vida útil de una obra marítima existirá un clima estadísticamente equivalente al ocurrido en el pasado, y que se caracteriza mediante registros históricos. No obstante, el cambio climático introduce cambios tanto en las tendencias como en la variabilidad, razón por la cual esta debiera considerarse en todas las etapas de un proyecto de obras marítimas: planificación, prefactibilidad, factibilidad, diseño, ejecución, operación, mantención, reparación y

³² Oceanweather (Canada), Metocean Solution (Nueva Zelanda), Baird and Associates (Canadá), PRDW (Sudáfrica), SIPROL (Chile, Prototipos de Innovación Empresarial de InnovaChile) y NEREO-Port21 (España).

³³ www.marejadas.uv.cl

³⁴ Arica, Iquique, Tocopilla, Antofagasta, TalTal, Caldera, Huasco, Coquimbo, Los Vilos, Quintero, Concón, Valparaíso, San Antonio, Constitución, Talcahuano, Puerto Saavedra, Corral, Ancud, Juan Fernández y Rapa Nui.

desmantelamiento de la infraestructura

Desde la perspectiva de la gestión de la infraestructura, las empresas portuarias estatales, los concesionarios y los ministerios competentes en la materia³⁵ debieran establecer planes de mantención y reparación de obras costeras, de atraque y abrigo que serán dañadas con más frecuencia en la medida que avance el siglo. Según Gironás y Yáñez (2019), la planificación de infraestructura en el MOP ha comenzado a considerar el cambio climático mediante el Plan de Adaptación y Mitigación de los Servicios de Infraestructura al Cambio Climático (MOP y MMA, 2017). Dicho plan considera 23 medidas en las líneas de acción en los ejes de Adaptación al Cambio Climático (Tabla 20), Mitigación al Cambio Climático (Tabla 21) y Gestión del Conocimiento (Tabla 22), dentro de las cuales destacan las siguientes medidas específicas para infraestructura marítima:

- Incorporación de cambios metodológicos en la etapa de desarrollo de obras de infraestructura en zonas costeras (Tabla 23). El documento reconoce que *“se requiere desarrollar metodología para evaluar el clima de oleaje en el futuro, considerando la incertidumbre climática y sus implicancias en las variables oceanográficas, para evaluar los diseños de obras, su nivel de servicio y/o alternativas de adaptación a lo largo de su vida útil”*. En ese sentido, aún existe la necesidad de desarrollar, implementar y evaluar metodologías no estacionarias (Gironás y Yáñez, 2019) para incorporar el cambio climático en todas las fases de un proyecto de obras marítimas.
- Mejoras en monitoreo de amenazas costeras (Tabla 24).
- Incorporación de monitoreo semi-continuo del impacto de obras de infraestructura costera (Tabla 25).

Estas medidas apuntan en la dirección correcta, de ser implementadas, redundarán en una reducción en la vulnerabilidad del sistema portuario en Chile.

³⁵ El Ministerio de Obras Públicas (MOP) es la Secretaría de Estado encargada del planeamiento, estudio, proyección, construcción, ampliación, reparación, conservación y explotación de las obras públicas y fiscales. Dentro del MOP, la Dirección de Obras Portuarias (DOP), ejecuta los siguientes programas:

- Conservación de Infraestructura Portuarias y Costeras (\$16.166 millones)
- Infraestructura de Mejoramiento del Borde Costero (\$14.554 millones)
- Infraestructura Portuaria de Conectividad (\$9.837 millones)
- Infraestructura Portuaria de Ribera (\$882 millones)
- Infraestructura Portuaria para Turismo y Deportes Náuticos (\$4.544 millones)
- Programa de Infraestructura Portuaria Pesquera Artesanal (\$20.438 millones)

Donde el paréntesis corresponde a la inversión en 2016. Mayores antecedentes de estas inversiones en www.dop.cl/planesinversion/Paginas/default.aspx. Según Gironás y Yáñez (2019), *“Los planes de infraestructura del MOP deben considerar los planes de desarrollo de otros ministerios /.../ los Instrumentos de Planificación Territorial (IPT) del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, los Planes de Transporte Integrado del Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, los Planes de Ordenamiento de Uso del Borde Costero de la Subsecretaría de Fuerzas Armadas del Ministerio de Defensa, los Planes Regionales de Ordenamiento Territorial (PROT) de la Subsecretaría de Desarrollo Regional del Ministerio del Interior /.../ la evaluación socio-económica /.../ del Ministerio de Desarrollo Social /.../ y el Servicio de Evaluación Ambiental”*.

Tabla 20: Líneas de acción en el Eje de Adaptación al Cambio Climático, cuyo objetivo es Adaptar los servicios de infraestructura a los impactos proyectados por Cambio Climático, bajo un enfoque de blindaje climático preventivo.

<p>LÍNEA DE ACCIÓN 1 Cambios metodológicos para incorporar la gestión del riesgo hidrológico futuro en la evaluación, diseño y planificación de servicios de infraestructura.</p>	<p>MEDIDA 1: Incorporación de cambios metodológicos en la evaluación económica de obras de infraestructura con perspectivas de largo plazo. MEDIDA 2: Incorporación de cambios metodológicos en las etapas de desarrollo de obras de infraestructura asociadas a la provisión de recursos hídricos: Embalses de Regadío. MEDIDA 3: Incorporación de cambios metodológicos en la etapa de desarrollo de obras de infraestructura en zonas costeras. MEDIDA 4: Incorporación de cambios metodológicos en la etapa de diseño de obras de infraestructura asociadas a conectividad y de protección del territorio que se pueden ver afectadas por eventos extremos de origen hidrometeorológico. MEDIDA 5: Generar programas de protección del territorio frente a lluvias intensas.</p>
<p>LÍNEA DE ACCIÓN 2 Monitoreo de amenazas.</p>	<p>MEDIDA 6: Mejoras en monitoreo en disponibilidad de recursos hídricos: Ampliar la densidad de estaciones en glaciares, cuenca y sub -cuencas de zonas con cobertura de nieve. MEDIDA 7: Mejoras en monitoreo de caudales extremos. MEDIDA 8: Mejoras en monitoreo de amenazas costeras.</p>
<p>LÍNEA DE ACCIÓN 3 Monitoreo de vulnerabilidad de la infraestructura.</p>	<p>MEDIDA 9: Revisión periódica de obras fluviales, de drenaje y viales. MEDIDA 10: Incorporación de monitoreo semi-continuo del impacto de obras de infraestructura costera.</p>
<p>LÍNEA DE ACCIÓN 4 Incorporación en los procesos de planificación ministerial de las implicancias del Cambio Climático para los servicios de infraestructura del Ministerio de Obras Públicas.</p>	<p>MEDIDA 11: Incorporar en todas las escalas de planificación ministerial los efectos de Cambio Climático.</p>

Tabla 21: Líneas de acción en el Eje Mitigación al Cambio Climático, cuyo objetivo es Propender hacia la construcción de las obras de infraestructura MOP baja en carbono.

<p>LINEA DE ACCIÓN 5 Mitigación de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en la construcción de infraestructura y edificación pública. Contabilidad de reducción de Gases de Efecto Invernadero.</p>	<p>MEDIDA 12: Incorporación de Energías Renovables No Convencionales (ERNC) en el desarrollo de infraestructura pública MOP. MEDIDA 13: Incorporación de eficiencia energética y confort ambiental en la edificación pública que ejecuta el MOP. MEDIDA 14: Medición y gestión de la Huella de Carbono en la obras de infraestructura y edificación pública que ejecuta el MOP. MEDIDA 15: Reducción de GEI en la maquinaria del MOP.</p>
<p>LINEA DE ACCIÓN 6 Contabilidad de reducción de Gases de Efecto Invernadero.</p>	<p>MEDIDA 16: Contar con una plataforma que permita medir y contabilizar la reducción de GEI desde el Ministerio de Obras Públicas.</p>

Tabla 22: Líneas de acción en el Eje Gestión del Conocimiento, cuyo objetivo es Generar capacidades e institucionalidad en materia de Cambio Climático en el MOP, para las áreas de adaptación y mitigación.

<p>LINEA DE ACCIÓN 7 Coordinación Intra e Interministerial del Cambio Climático.</p>	<p>MEDIDA 17: Coordinación interministerial. MEDIDA 18: Coordinación con Plan Nacional de Adaptación, Plan de Acción Nacional y Planes Sectoriales de Adaptación.</p>
<p>LINEA DE ACCIÓN 8 Gestión del Conocimiento en Cambio Climático.</p>	<p>MEDIDA 19: Creación de la Unidad de Cambio Climático. MEDIDA 20: Generación de capacidades en Cambio Climático. MEDIDA 21: Gestión del Cambio Climático en el territorio. MEDIDA 22: Cambio en normas y estándares</p>
<p>LINEA DE ACCIÓN 9 Promoción de la innovación tecnológica para la adaptación al Cambio Climático.</p>	<p>MEDIDA 23: Incorporación de innovación tecnológica en adaptación y mitigación al Cambio Climático.</p>

Tabla 23: Ficha de medida M3: Incorporación de cambios metodológicos en la etapa de desarrollo de obras de infraestructura en zonas costeras (MOP y MMA, 2017).

NOMBRE DE LA MEDIDA	M3: Incorporación de cambios metodológicos en la etapa de desarrollo de obras de infraestructura en zonas costeras: Revisión y actualización de normativas vigentes y metodologías de análisis estadísticos de series de tiempo.
INSTITUCIÓN RESPONSABLE	DOP INH
SOCIO COLABORADOR	
PRODUCTO ESPERADO	Contar con metodologías que integren el Cambio Climático en el diseño de los productos estratégicos de la DOP. Incorporación de normas y estándares con integración del Cambio Climático.
PLAZO ESTIMADO	5 AÑOS 2-4 AÑOS
MECANISMO DE FINANCIAMIENTO	Sectorial MOP y fondos internacionales
INDICADOR DE CUMPLIMIENTO	- N° de proyectos DOP que integren el Cambio Climático en el diseño de las obras. - N° de estándares y normas ajustadas a los impactos del Cambio Climático.
DESCRIPCIÓN	Se requiere generar información de climas de oleaje en aguas profundas, además de desarrollar bases de datos de climas de oleaje futuro, considerando la incertidumbre climática y sus implicancias en las variables oceanográficas, para evaluar los diseños de obras, su nivel de servicio y/o alternativas de adaptación a lo largo de su vida útil. Además, es necesario establecer metodologías más adecuadas para actualizar las normativas en conjunto con efectuar una capacitación de profesionales de la DOP para evaluar los estudios realizados por terceros.
META	<ul style="list-style-type: none"> • 2018- 2022: Incremento de 20% anual en iniciativas de inversión que incorporen metodologías asociadas a cambio climático • 2018-2022: Actualización del 100% de manuales DOP que incorporen análisis de cambio climático.

Tabla 24: Ficha de medida M8: Mejoras en monitoreo de amenazas costeras.

NOMBRE DE LA MEDIDA	M8: Mejoras en monitoreo de amenazas costeras.
INSTITUCIÓN RESPONSABLE	DOP -INH
SOCIO COLABORADOR	SHOA
PRODUCTO ESPERADO	Contar con mayor número de boyas que monitoreen el clima de oleaje
PLAZO ESTIMADO	+5 AÑOS
MECANISMO DE FINANCIAMIENTO	Fondos Sectoriales SHOA -MOP financiamiento internacional
INDICADOR DE CUMPLIMIENTO	N° de boyas instaladas a lo largo de las costas chilena.
DESCRIPCIÓN	En Chile existen importantes carencias respecto del conocimiento del clima de oleaje, parámetro fundamental para el diseño de obras marítimas. Las observaciones directas del oleaje son escasas, no existiendo en la actualidad una red de boyas estable de operación continua en el tiempo. Respecto a la medida b) se considera un sistema similar al actualmente en operación en el Puerto de San Antonio, que incluye un equipo ADCP fondeado en las cercanías del puerto y un sistema de transmisión y explotación de datos. Se considera la expansión de este modelo al sistema de puertos del Estado bajo la tutela del SEP, es decir cuatro puertos en la zona norte, dos en la zona centro y cuatro en la zona sur.
META	<ul style="list-style-type: none"> • Contar con la instalación de 5 boyas distribuidas territorialmente según lo descrito en la medida al año 2022.

Tabla 25: Ficha de medida M3: Incorporación de cambios metodológicos en la etapa de desarrollo de obras de infraestructura en zonas costeras (MOP y MMA, 2017).

NOMBRE DE LA MEDIDA	M10: Incorporación de un monitoreo semi-continuo del impacto de obras de infraestructura costera.
INSTITUCIÓN RESPONSABLE	DOP
SOCIO COLABORADOR	DIRECTEMAR
PRODUCTO ESPERADO	Contar con un sistema de monitoreo
PLAZO ESTIMADO	5 AÑOS
MECANISMO DE FINANCIAMIENTO	Fondos sectoriales MOP y financiamiento internacional
INDICADOR DE CUMPLIMIENTO	Tótems instalados en las obras DOP del borde costero
DESCRIPCIÓN	Instalación de tótems de captura de imágenes para que las personas usen sus propios celulares para la toma de fotos en una dirección única respecto del punto de observación, enfocado en las zonas de interés.
META	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Al 25% de las iniciativas que contemplen ejecución de las obras incorporen un tótem al año 2018 ▪ 40% de las iniciativas que contemplen ejecución de las obras incorporen un tótem al año 2019 ▪ 60% de las iniciativas que contemplen ejecución de las obras incorporen un tótem al año 2020 ▪ 75% de las iniciativas que contemplen ejecución de las obras incorporen un tótem al año 2021 ▪ 100% de las iniciativas que contemplen ejecución de las obras incorporen un tótem al año 2022

6 REFERENCIAS

Allende, J. (2018). Implementación de sistema de amarra hidráulico: Shore Tension. VIII Seminario Internacional de Ingeniería y Operación Portuaria. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica.

ASCE (2013). Chile earthquake and tsunami of 2010. Performance of coastal infrastructure. ASCE, COPRI. Edited by B. Edge.

Becker, A. H., Acciaro, M., Asariotis, R., Cabrera, E., Cretegny, L., Crist, P., ... & Ng, A. K. (2013). A note on climate change adaptation for seaports: a challenge for global ports, a challenge for global society. *Climatic Change*, 120(4), 683-695.

CAMPORT (2017). Memoria Anual N°73. Cámara Marítima y Portuaria de Chile.

Camus, P., I. J., Losada, C., Izaguirre, A., Espejo, M., Menéndez, and J., Pérez (2017). Statistical wave climate projections for coastal impact assessments, *Earth's Future*, 5, 918-933, doi:10.1002/2017EF000609.

Catalán, P. A., et al. (2015). The 1 April 2014 Pisagua tsunami: Observations and modeling, *Geophys. Res. Lett.*, 42, doi:10.1002/2015GL063333.

Contreras-López, M.; Winckler, P.; Sepúlveda, I.; Andaur, A.; Cortés, F.; Guerrero, C.; Mizobe, C.; Iguait, F.; Breuer, W.; Beyá, J.; Vergara, H. and Figueroa, R. (2016). Field Survey of the 2015 Chile tsunami with emphasis on coastal wetland and conservation areas. *Pure and Applied Geophysics*. 173(2): 349-367.

CORFO (1950). Geografía económica de Chile. 3 vols. (1.ª edición). Santiago de Chile: Editorial Universitaria.

DIRECTEMAR. (2013). Análisis estadístico actividades portuarias 2013. Obtenido de www.directemar.cl/directemar/site/artic/20180605/asocfile/20180605104241/boletin_actividades_portuarias_2013.pdf

DIRECTEMAR. (2014). Análisis estadísticos portuarias 2014. Obtenido de www.directemar.cl/directemar/site/artic/20180605/asocfile/20180605104152/bep2014.pdf

DIRECTEMAR. (2015). Análisis estadísticos portuarias 2015. Obtenido de www.directemar.cl/directemar/site/artic/20180605/asocfile/20180605104113/beap2015.pdf

DIRECTEMAR. (2016). Análisis estadísticos portuarias 2016. Obtenido de www.directemar.cl/directemar/site/artic/20180605/asocfile/20180605104015/aep2016.pdf

DIRECTEMAR. (2017). Análisis estadísticos portuarias 2017. Obtenido de www.directemar.cl/directemar/site/artic/20180628/asocfile/20180628083809/aep2017.pdf

DIRECTEMAR. (2018). Análisis estadísticos portuarias 2018. Obtenido de www.directemar.cl/directemar/site/artic/20180628/asocfile/20180628084317/aep2018.pdf

DIRECTEMAR. (2019). Análisis estadísticos portuarias 2019. Obtenido de www.directemar.cl/directemar/site/artic/20190701/asocfile/20190701162305/aep2019_baja.pdf

DIRECTEMAR. (2017). Plan subsidiario de alerta ante condiciones de tiempo adversas en la jurisdicción de la capitania de puerto de Quellón. Obtenido de www.directemar.cl/directemar/site/artic/20170802/asocfile/20170802134342/3750_9_110717_quellon.pdf

Fritz, H.; Petroff, C.; Catalán, P.; Cienfuegos, R.; Winckler, P.; Kalligeris, N.; Weiss, R.; Barrientos, S.; Meneses, G.; Valderas-Bermejo C.; Ebeling, C.; Papadopoulos, T.; Contreras, M.; Almar, R.; Domínguez, J.; Synolakis, C. (2011). Field Survey of the 27 February 2010 Chile Tsunami. *Pure and Applied Geophysics*. 168 (11):1989-2010.

Gironás, J. y Yáñez, G. Capítulo 18. Impactos y Adaptación en Infraestructura. En Cambio Climático en Chile: Ciencia,

Mitigación y Adaptación. Castilla, J. C., Meza, F., Vicuña, S., Marquet, P. A., Montero, J.-P. (eds.). Ediciones UC. Santiago, Chile, 2019, p. 480.

Hasselmann, K. (1973). Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift Reihe A(8)* (Nr. 12), p.95. .

Hippe, A.; Becker, A. Fischer, M. and Schwegler, B. (2015). Estimation of Cost Required to Elevate US Ports in Response to Climate Change: A Thought Exercise for Climate Critical Resources. CIFE Working Paper #WP138. Stanford University.

Holthuijsen, L., Herman, A., & Booij, N. (2003). Phase decoupled refraction-diffraction for spectral wave models. *Coastal Engineering Journal*. Vol 49, 291-305.

International Transport Forum's (2016). Ports Policy Review of Chile. Case-Specific Policy Analysis. OECD.

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)

Massel, S. (1996). Ocean Surface Waves: Their Physics and Prediction. Australian Institute of Marine Science: Advanced Series on Ocean Engineering: Volume 11.

McCarron, B., Giunti, A. & Tan, S. (2018). Climate Costs for Asia Pacific Ports. ARE. Commissioned by HSBC.

MinAmbiente (2017). Plan de gestión del cambio climático para los puertos marítimos de Colombia. Informe elaborado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Ministerios de Transporte e Invemar.

MOP y MMA (2017). Plan de adaptación y mitigación de los servicios de infraestructura al cambio climático 2017-2022. Obtenido de <http://www.dgop.cl/Documents/PlanAccionMop.pdf>

Ng, A. K., Chen, S. L., Cahoon, S., Brooks, B., & Yang, Z. (2013). Climate change and the adaptation strategies of ports: The Australian experiences. *Research in Transportation Business & Management*, 8, 186-194.

PIANC (1995). Criteria for movements of moored ships in harbours.

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).

Ortigosa, P. (1986). Algunos Efectos Geotécnicos. Cap. 11. En *El Sismo de Marzo 1985, Chile*. Ed. Monge, Joaquín. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Universidad de Chile,

Puelma, A; Vásquez, J. Y Guerrero, F. (2016). Marejadas costa afuera, pronósticos de oleaje local y cierres de puerto. VII Seminario Internacional De Ingeniería Y Operación Portuaria. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica

Rozas, C.; García, R.; Swiegers, P. y Carrión, B. (2018). Análisis para la implementación de dispositivos ShoreTension. VIII Seminario Internacional de Ingeniería y Operación Portuaria. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica.

Universidad de Cantabria. (2000). Documento de referencia. Volumen 1.

US Army Corps of Engineers. (1984). Shore protection manual. Volumen I. Washington DC.

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. *Progress in oceanography*, 151, 38-48.

Yang, Z., Ng, A. K., Lee, P. T. W., Wang, T., Qu, Z., Rodrigues, V. S., ... & Lau, Y. Y. (2018). Risk and cost evaluation of port adaptation measures to climate change impacts. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 61, 444-458.

7 ANEXOS

7.1 TERMINALES EN LOS 9 PUERTOS EN ESTUDIO

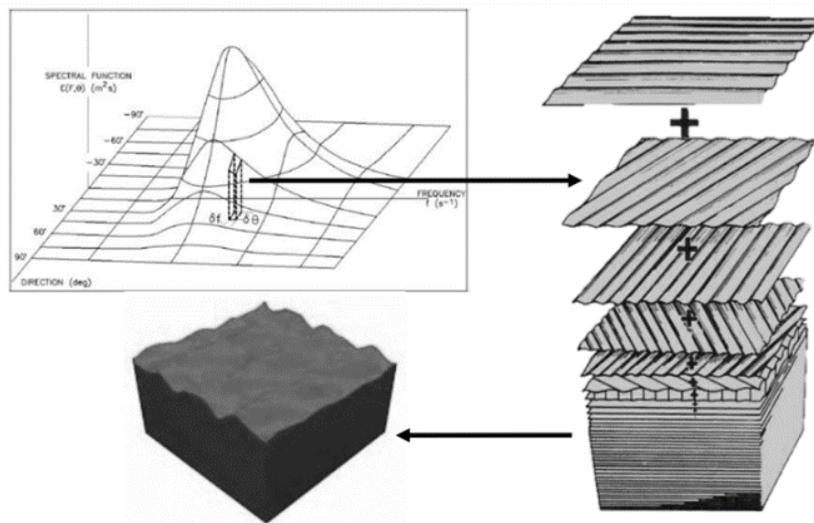
Puerto	Terminales	Sitio
Arica	Terminal Puerto Arica (TPA)	1, 2a, 2b, 3, 4, 5, 7
	ENAPU	7
Iquique	Empresa Portuaria de Iquique (EPI)	1, 2, 3, 4
Mejillones	Michilla	2 boyas
	Minera Esperanza Shore Terminal (Centinela)	
	Angamos	1, 2, 3, 4
	Terminal Interacid	1, 2
	Terminal Marítimo Terquim	2
	Puerto Mejillones	1, 2
	Oxiquim S.A	3 boyas
	Enaex	5 boyas
	GNL Mejillones S.A.	1, 2
	Terminal Graneles del Norte S.A.	
Antofagasta	Empresa Portuaria Antofagasta (EPA)	1, 2, 3
	Antofagasta Terminal Internacional (ATI)	4, 5, 6, 7
Coquimbo	Empresa Portuaria de Coquimbo (EPCO)	1, 2
Quintero	Ventanas	1, 2, 3, 4
	Terminal Marítimo Monoboya Quintero	
	Oxiquim S.A	Norte/Sur
	Terminal Marítimo LPG	3 boyas, 2 rejeras
	Terminal Marítimo Multicrudo	3 boyas
	Terminal Marítimo Barcaza	3 boyas
	El Bato	3 boyas
	GNL Quintero	
	Asimar Berth	1
Valparaíso	Terminal Pacífico Sur Valparaíso (TPSV)	1, 2, 3, 4, 5
	Terminal Cerros de Valparaíso (TCVAL)	6, 7, 8
San Antonio	San Antonio Terminal Internacional (STI)	1, 2, 3
	Puerto Central S.A. (PCE)	4, 5, 6, 7
	Panul	8
	Empresa Portuaria San Antonio (EPSA)	9
San Vicente	San Vicente Terminal Internacional (SVTI)	1, 2, 3

7.2 METODOLOGÍA DE TRASFORMACIÓN DE OLAJE

Para estudiar el oleaje en las zonas portuarias, se transfirieron las series de tiempo de los estados de mar desde aguas profundas a los 9 puertos estatales para el período histórico y la proyección. Las series corresponden a espectros bidimensionales, cada 3 horas, de 1 hindcast forzado con vientos CFSR y los 6 GCM simulados en este estudio. Se utilizó el modelo numérico SWAN (Massey et al. 2011), el cual utiliza como dato de entrada los espectros irregulares de oleaje en aguas profundas sin necesidad de utilizar parametrizaciones en su distribución de frecuencias o direcciones. Dado el volumen de los datos de oleaje de aguas profundas³⁶, se optó por aplicar una técnica desarrollada por Massel (1989) e implementada y validada por Nicolau del Roure (2010) y Puelma (2015). Esta técnica consiste en la transformación de una serie de espectros sintéticos de altura unitaria ($H_{m0} = 1$ m)³⁷ cuyas características principales (período pico y dirección de incidencia en aguas profundas) abarcan el 100% de las componentes activas de los espectros de oleaje (Figura 56).

Como resultado del proceso de transferencia del oleaje, se obtiene una serie de tiempo en la bocana de cada puerto, en la forma de espectros bidimensionales de oleaje. A partir de estos espectros se pueden calcular alturas espectrales H_{m0} , periodos y direcciones medias T_m del oleaje frente a los puertos. Esta técnica, denominada "transformación pseudo-espectral", se detalla a continuación.

Figura 56: Espectro bidimensional de oleaje. Fuente: Puelma (2015).



El método pseudo-espectral se basa en el supuesto de que la altura significativa espectral en la bocana de entrada de una dársena portuaria H_{local} se representa como la altura significativa en aguas profundas H_{ap} multiplicada por un coeficiente de agitación $K_a(T, \theta)$, el cual es

³⁶ La cantidad de datos es del orden de cientos de miles de estados de mar.

³⁷ Esta condición permite que el oleaje sea lineal en aguas profundas y mantenga su linealidad al ser propagado al sitio de estudio.

dependiente del periodo T y la dirección de incidencia del oleaje θ .

$$H_{local} = H_{ap} \times K_a$$

Dicho supuesto es válido siempre y cuando el oleaje es lineal (Massel et al., 1989). De la definición de altura significativa espectral dada en la literatura (ej. Hothuijsen, 2007) la ecuación anterior se puede reescribir como:

$$4\sqrt{m_0}_{local} = 4\sqrt{m_0}_{ap} \times K_a$$

Donde m_0 es el momento de orden cero del espectro bidimensional $S(f, \theta)$, definido en términos de la frecuencia f y la dirección θ , el cual se define como:

$$m_0 = \int_0^{2\pi} \int_{f_{min}}^{f_{max}} S(f, \theta) df d\theta$$

Por lo cual la ecuación (1), puede reescribirse como:

$$\sqrt{\int_0^{2\pi} \int_{f_{min}}^{f_{max}} S(f, \theta) df d\theta}_{local} = \sqrt{\int_0^{2\pi} \int_{f_{min}}^{f_{max}} S(f, \theta) df d\theta}_{ap} \times K_a$$

o

$$\left\{ \int_0^{2\pi} \int_{f_{min}}^{f_{max}} S(f, \theta) df d\theta \right\}_{local} = \left\{ \int_0^{2\pi} \int_{f_{min}}^{f_{max}} S(f, \theta) df d\theta \right\}_{ap} \times K_a^2$$

La ecuación anterior se puede reescribir en términos diferenciales:

$$\{S(f, \theta) d\theta\}_{local} = \{S(f, \theta) d\theta\}_{ap} \times K_a^2$$

Finalmente, la expresión anterior se puede reescribir en términos diferenciales:

$$S(f, \theta) = K_a^2 * S(f, \theta) \frac{d\theta_{ap}}{d\theta_{local}}$$

El coeficiente $K_a(T, \theta)$ representa físicamente la variación porcentual del bin de energía que arriba al sector de interés, y el término

$$\frac{d\theta_{ap}}{d\theta_{local}}$$

representa la variación direccional del bin de energía local respecto al bin de energía del mismo espectro en aguas profundas.

El coeficiente de agitación $K_a(T, \theta)$ se puede generar por medio de funciones de transferencia lineales, a partir de la propagación de un conjunto de espectros sintéticos unitarios ($H_{m0} = 1 m$) representativos de las componentes energéticas activas del espectro de oleaje offshore que potencialmente pueden arribar al interior de los puntos de interés.

Para discretizar el espectro y generar la transformación de cada una de sus componentes, en este trabajo se utilizan un total de 96 espectros sintéticos unitarios del tipo JONSWAP (Hasselmann et al. 1973), abarcando periodos desde los 4 s hasta los 26 s discretizados cada 2 s y direcciones entre la 202.5° hasta la 360° discretizadas cada 22.5° .

7.3 CARACTERIZACIÓN DE LA FLOTA EN LOS PUERTOS DE CHILE

Tabla 26: Recaladas por tipo de nave en el puerto de Arica (DIRECTEMAR, 2019).

Año	Portacontenedores	Carga general	Petrolero	Granelero	Roll on- roll off	Tanque químico	Frigorífico	Pasajeros	Tanque líquido específico	Pesquero	Gasero	Científico	Otros
2012	174	117	35	32	-	13	-	11	3	-	-	1	-
2013	225	173	31	42	1	3	-	13	6	-	-	1	-
2014	202	54	157	22	3	10	1	10	4	-	-	3	-
2015	224	59	139	40	6	5	5	3	12	-	-	3	1
2016	209	96	21	57	9	4	-	14	8	-	-	2	-
2017	146	139	27	27	25	9	2	15	3	-	-	3	1
2018	155	129	25	34	20	9	-	12	2	-	1	-	3
Total	1335	767	435	254	64	53	8	78	38	-	1	13	5

Tabla 27: Recaladas por tipo de nave en el puerto de Iquique (DIRECTEMAR, 2019).

Año	Portacontenedores	Carga general	Petrolero	Granelero	Roll on- roll off	Tanque químico	Frigorífico	Pasajeros	Tanque líquido específico	Pesquero	Gasero	Científico	Otros
2012	272	56	76	10	161	25	11	8	3	3	-	-	1
2013	257	69	59	8	161	13	14	4	1	-	-	-	2
2014	243	5	49	56	152	11	7	4	9	-	-	-	2
2015	260	8	47	65	7	135	8	6	0	-	-	-	1
2016	243	57	66	9	134	5	7	1	6	-	-	-	3
2017	72	208	60	6	137	12	5	7	9	7	-	-	4
2018	83	156	54	7	143	28	1	6	7	0	1	-	13
Total	1430	559	411	161	895	229	53	36	35	10	1	-	26

Tabla 28: Recaladas por tipo de nave en el puerto de Mejillones (DIRECTEMAR, 2019).

Año	Portacontenedores	Carga general	Petrolero	Granelero	Roll on- roll off	Tanque químico	Frigorífico	Pasajeros	Tanque liquido específico	Pesquero	Gasero	Científico	Otros
2012	205	248	219	125	1	95	8	-	47	-	17	-	-
2013	185	247	221	129	6	112	8	-	44	-	15	-	-
2014	189	155	249	185	10	128	7	-	39	-	19	-	-
2015	187	171	235	173	165	1	39	6	-	-	14	-	6
2016	166	298	97	165	4	200	3	-	49	-	11	-	1
2017	267	124	141	168	1	168	3	-	64	-	7	-	2
2018	264	121	129	151	2	198	-	1	34	-	-	10	12
Total	1463	1364	1291	1096	189	902	68	7	277	-	83	10	21

Tabla 29: Recaladas por tipo de nave en el puerto de Antofagasta (DIRECTEMAR, 2019).

Año	Portacontenedores	Carga general	Petrolero	Granelero	Roll on- roll off	Tanque químico	Frigorífico	Pasajeros	Tanque liquido específico	Pesquero	Gasero	Científico	Otros
2012	129	132	67	93	2	16	-	6	4	-	-	-	1
2013	131	160	57	101	6	6	-	4	4	1	-	-	23
2014	112	88	142	52	2	9	-	1	6	-	-	-	5
2015	98	110	114	51	10	-	3	-	3	-	-	5	247
2016	104	129	51	95	-	10	-	4	7	-	-	-	346
2017	140	93	35	73	-	12	-	2	8	-	-	-	3
2018	141	102	25	86	-	21	-	3	1	-	5	-	3
Total	855	814	491	551	20	74	3	20	33	1	5	5	628

Tabla 30: Recaladas por tipo de nave en el puerto de Coquimbo (DIRECTEMAR, 2019).

Año	Portacontenedores	Carga general	Petrolero	Granelero	Roll on- roll off	Tanque químico	Frigorífico	Pasajeros	Tanque liquido específico	Pesquero	Gasero	Científico	Otros
2012	2	40	19	72	1	23	51	14	-	1	-	-	-
2013	9	72	31	41	-	11	39	16	1	-	-	-	-
2014	6	48	47	32	-	20	43	12	-	-	-	-	-
2015	2	41	28	41	7	-	4	16	12	-	-	-	2
2016	4	35	41	47	-	2	11	14	3	-	-	-	-
2017	59	-	40	32	-	8	15	18	1	-	-	-	1
2018	39	3	41	24	-	16	-	18	2	-	9	-	3
Total	121	239	247	289	8	80	163	108	19	1	9	-	6

Tabla 31: Recaladas por tipo de nave en el puerto de Quintero (DIRECTEMAR, 2019).

Año	Portacontenedores	Carga general	Petrolero	Granelero	Roll on- roll off	Tanque químico	Frigorífico	Pasajeros	Tanque liquido específico	Pesquero	Gasero	Científico	Otros
2012	-	57	548	123	-	96	-	-	49	-	51	-	-
2013	2	61	559	140	-	69	-	-	33	-	48	-	-
2014	3	165	43	599	-	102	-	-	44	-	52	-	-
2015	-	148	59	531	76	-	54	-	-	-	63	-	-
2016	2	83	429	102	-	127	-	-	73	-	61	-	1
2017	104	-	466	99	-	132	-	-	94	-	53	-	2
2018	105	1	439	126	-	133	-	-	67	-	-	44	7
Total	216	515	2543	1720	76	659	54	-	360	-	328	44	10

Tabla 32: Recaladas por tipo de nave en el puerto de San Antonio (DIRECTEMAR, 2019).

Año	Portacontenedores	Carga general	Petrolero	Granelero	Roll on- roll off	Tanque químico	Frigorífico	Pasajeros	Tanque liquido específico	Pesquero	Gasero	Científico	Otros
2012	580	143	115	196	139	13	1	-	19	-	-	-	7
2013	582	160	110	144	152	12	24	-	20	-	-	-	78
2014	527	150	133	111	158	9	0	-	16	-	2	-	1
2015	547	153	126	87	22	177	14	-	0	-	-	-	6
2016	509	191	41	128	174	67	1	-	25	-	-	-	3
2017	280	422	31	107	191	60	-	11	29	-	-	-	13
2018	389	428	46	113	192	58	-	26	25	-	-	-	20
Total	3414	1647	602	886	1028	396	40	37	134	-	2	-	128

Tabla 33: Recaladas por tipo de nave en el puerto de San Vicente (DIRECTEMAR, 2019).

Año	Portacontenedores	Carga general	Petrolero	Granelero	Roll on- roll off	Tanque químico	Frigorífico	Pasajeros	Tanque liquido específico	Pesquero	Gasero	Científico	Otros
2012	281	59	217	121	1	49	8	-	7	-	6	-	-
2013	212	73	251	91	-	24	5	-	18	-	5	-	-
2014	227	87	53	213	-	38	-	-	16	-	3	-	-
2015	205	90	56	250	24	-	21	-	-	-	4	-	-
2016	179	77	224	80	-	58	-	-	22	-	2	-	2
2017	111	164	198	64	-	63	-	-	44	8	2	-	-
2018	104	143	246	59	-	72	8	-	21	-	-	-	1
Total	1319	693	1245	878	25	304	42	-	128	8	22	-	3

Tabla 34: Numero de naves recaladas por rango TRG en el puerto de Arica (DIRECTEMAR 2019).

Año	Menos de 10.000	10.000 a 20.000	20.000 a 30.000	30.000 a 40.0000	Más de 40.000
2012	124	69	103	42	48
2013	156	123	121	35	60
2014	114	129	119	49	55
2015	84	132	142	67	72
2016	31	118	131	72	68
2017	51	62	133	100	51
2018	45	57	155	98	35
Total	605	690	904	463	389

Tabla 35: Numero de naves recaladas por rango TRG en el puerto de Iquique (DIRECTEMAR 2019).

Año	Menos de 10.000	10.000 a 20.000	20.000 a 30.000	30.000 a 40.0000	Más de 40.000
2012	32	78	76	82	358
2013	23	88	94	40	343
2014	23	74	92	34	315
2015	29	70	104	40	294
2016	16	88	128	20	279
2017	41	58	131	30	267
2018	23	55	123	34	264
Total	187	511	748	280	2120

Tabla 36: Numero de naves recaladas por rango TRG en el puerto de Mejillones (DIRECTEMAR 2019).

Año	Menos de 10.000	10.000 a 20.000	20.000 a 30.000	30.000 a 40.0000	Más de 40.000
2012	282	247	182	93	161
2013	260	242	195	106	164
2014	250	227	209	110	185
2015	267	216	202	99	213
2016	244	186	220	126	218
2017	203	172	225	147	198
2018	173	192	204	145	208
Total	1679	1482	1437	826	1347

Tabla 37: Numero de naves recaladas por rango TRG en el puerto de Antofagasta (DIRECTEMAR 2019).

Año	Menos de 10.000	10.000 a 20.000	20.000 a 30.000	30.000 a 40.000	Más de 40.000
2012	51	139	160	73	27
2013	107	120	124	92	50
2014	62	107	120	85	43
2015	299	87	126	81	48
2016	384	81	121	126	34
2017	39	50	111	130	36
2018	27	61	100	140	59
Total	969	645	862	727	297

Tabla 38: Numero de naves recaladas por rango TRG en el puerto de Coquimbo (DIRECTEMAR 2019).

Año	Menos de 10.000	10.000 a 20.000	20.000 a 30.000	30.000 a 40.000	Más de 40.000
2012	47	63	51	32	30
2013	35	79	49	31	26
2014	17	82	49	42	18
2015	26	45	55	15	12
2016	8	31	65	34	19
2017	9	31	69	44	21
2018	13	29	59	31	23
Total	155	360	397	229	149

Tabla 39: Numero de naves recaladas por rango TRG en el puerto de Quintero (DIRECTEMAR 2019).

Año	Menos de 10.000	10.000 a 20.000	20.000 a 30.000	30.000 a 40.000	Más de 40.000
2012	201	130	265	210	118
2013	214	114	247	186	151
2014	292	111	242	182	181
2015	221	100	281	143	186
2016	189	68	308	132	181
2017	182	83	318	169	198
2018	169	79	278	182	214
Total	1468	685	1939	1204	1229

Tabla 40: Numero de naves recaladas por rango TRG en el puerto de San Antonio (DIRECTEMAR 2019).

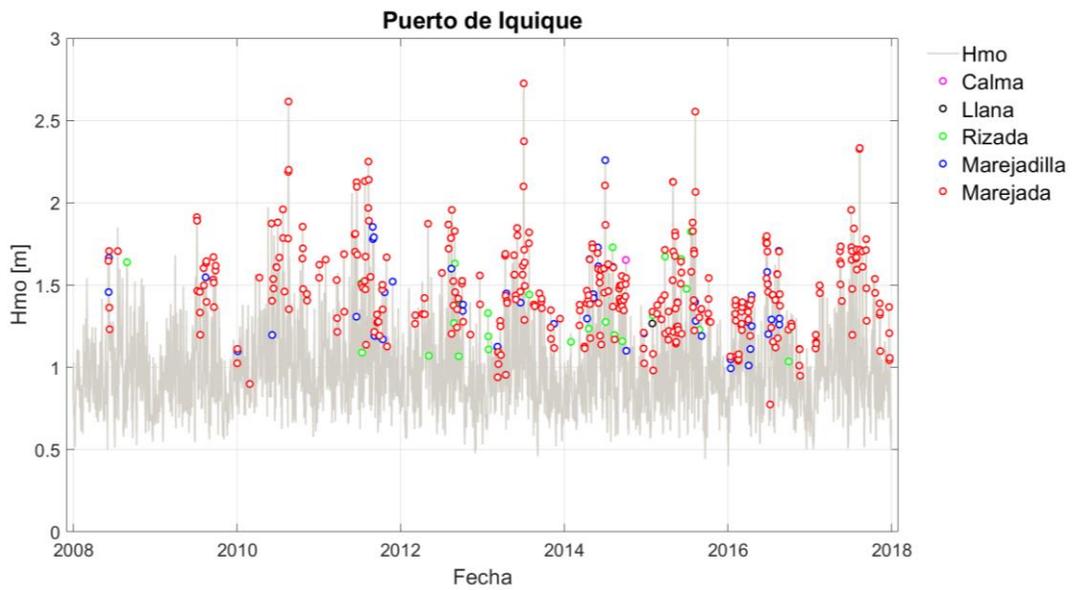
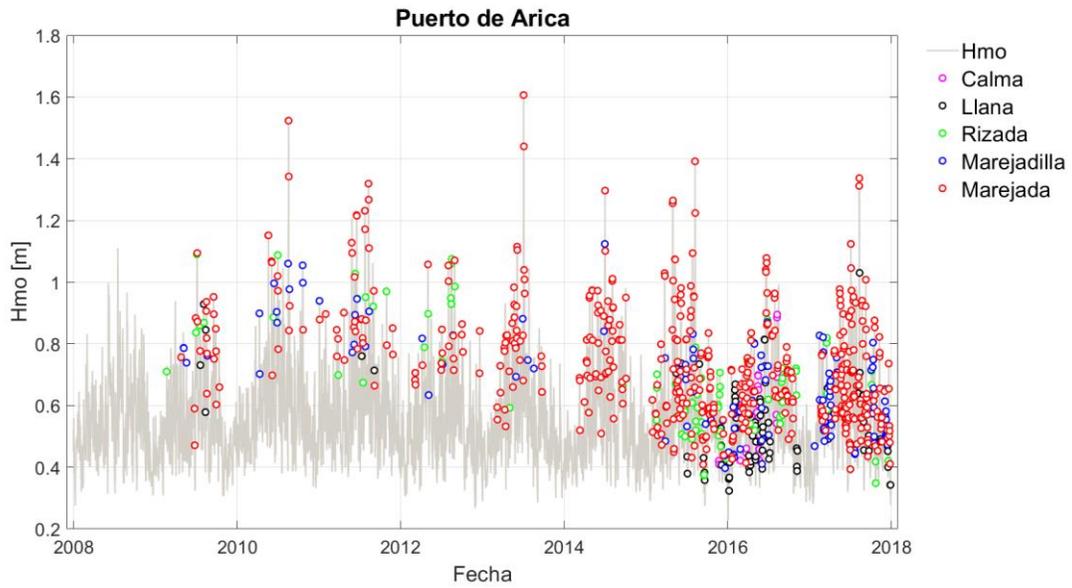
Año	Menos de 10.000	10.000 a 20.000	20.000 a 30.000	30.000 a 40.0000	Más de 40.000
2012	102	210	340	168	393
2013	175	248	229	154	476
2014	108	218	204	124	453
2015	74	230	187	144	497
2016	60	189	182	170	538
2017	64	139	201	214	526
2018	52	123	206	237	679
Total	635	1357	1549	1211	3562

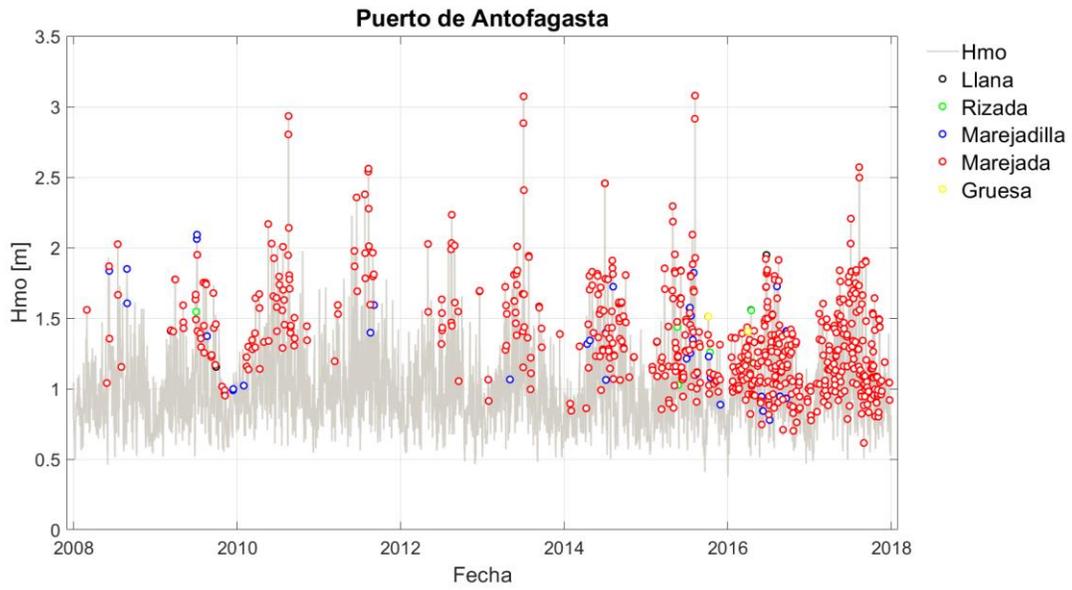
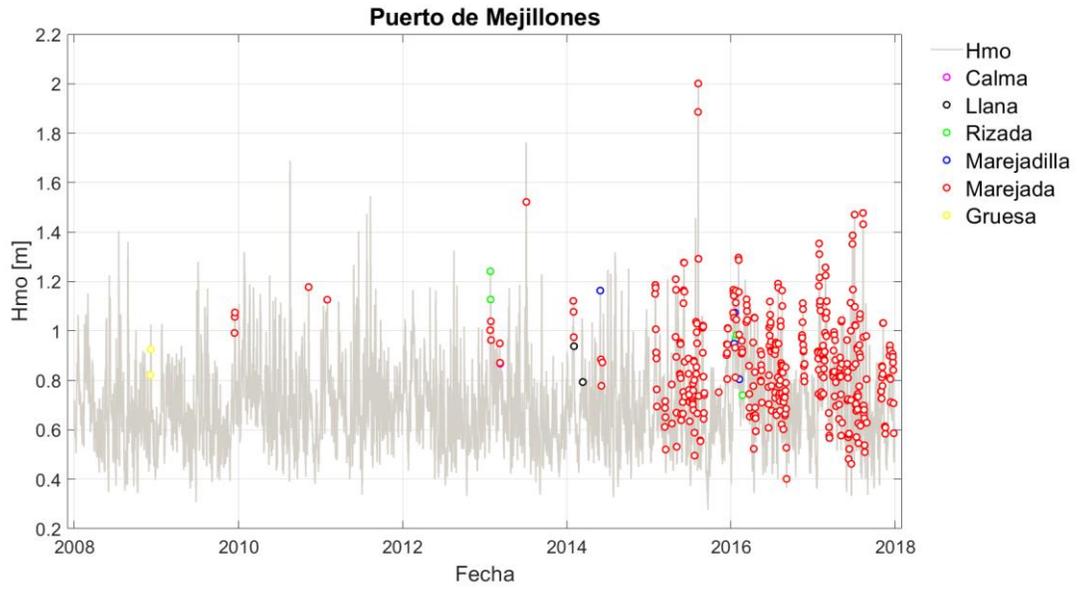
Tabla 41: Numero de naves recaladas por rango TRG en el puerto de San Vicente (DIRECTEMAR 2019).

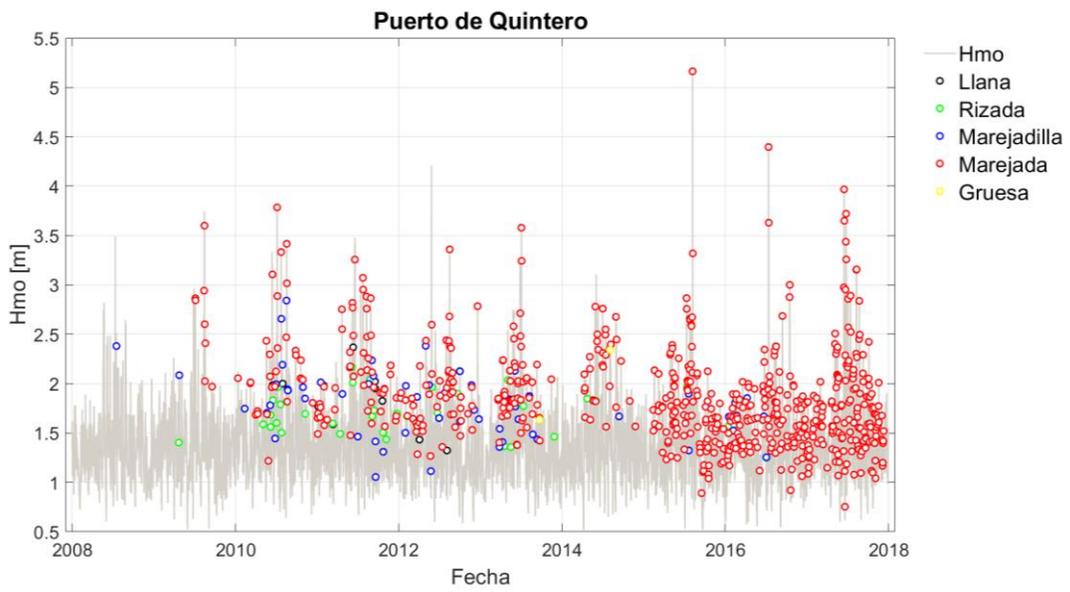
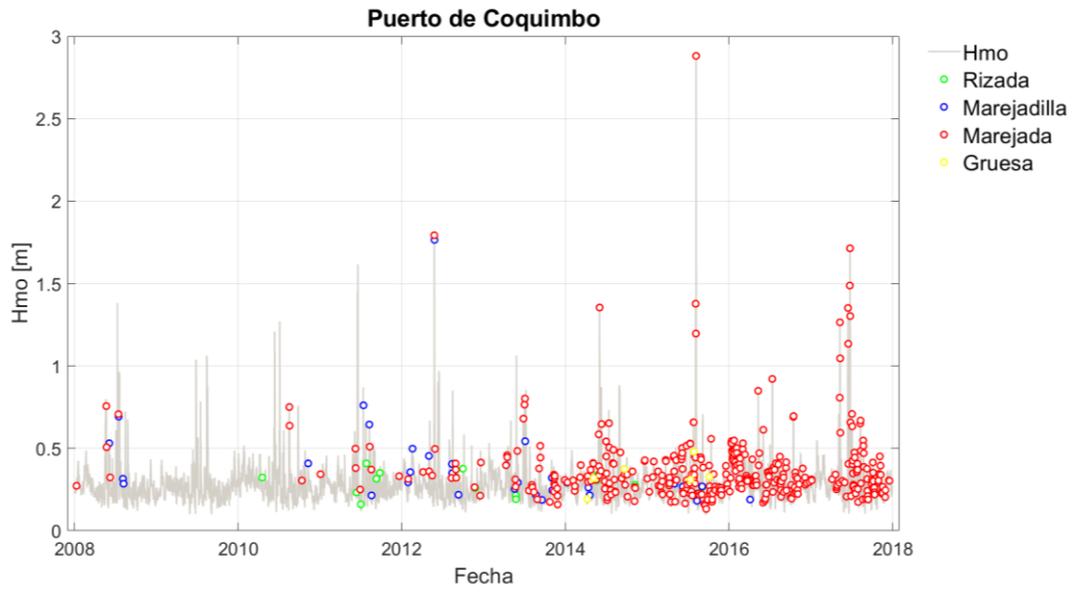
Año	Menos de 10.000	10.000 a 20.000	20.000 a 30.000	30.000 a 40.0000	Más de 40.000
2012	120	47	236	196	150
2013	91	42	205	160	181
2014	88	68	117	129	235
2015	82	94	107	108	259
2016	63	75	122	110	274
2017	55	81	118	128	272
2018	82	59	165	110	238
Total	581	466	1070	941	1609

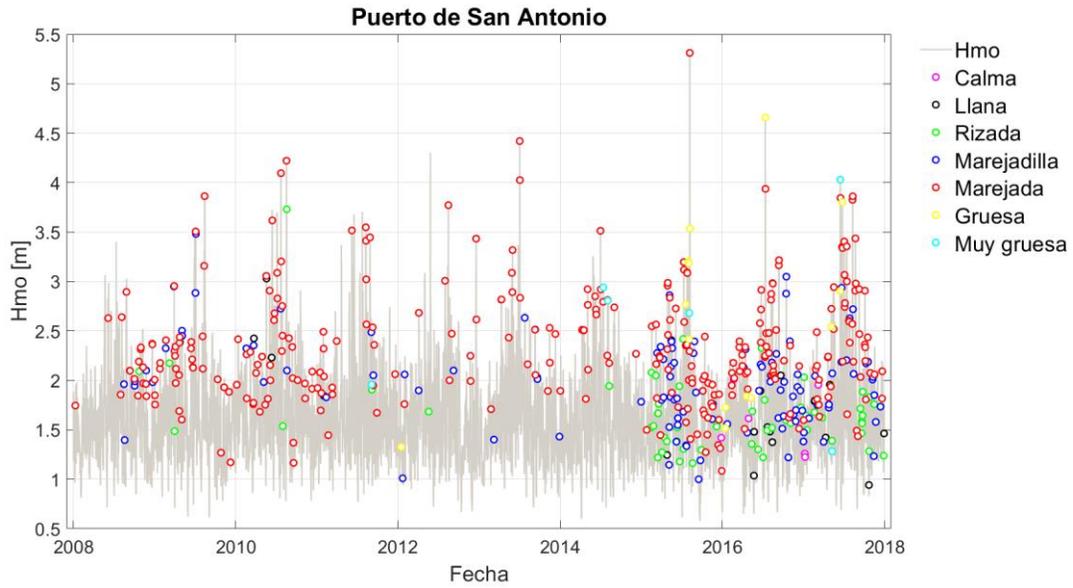
7.3.1 ANÁLISIS HISTÓRICO DE CIERRES DE PUERTOS EN 9 PUERTOS ESTATALES

7.3.2 Cruce de información cierre de puertos versus Hmo.

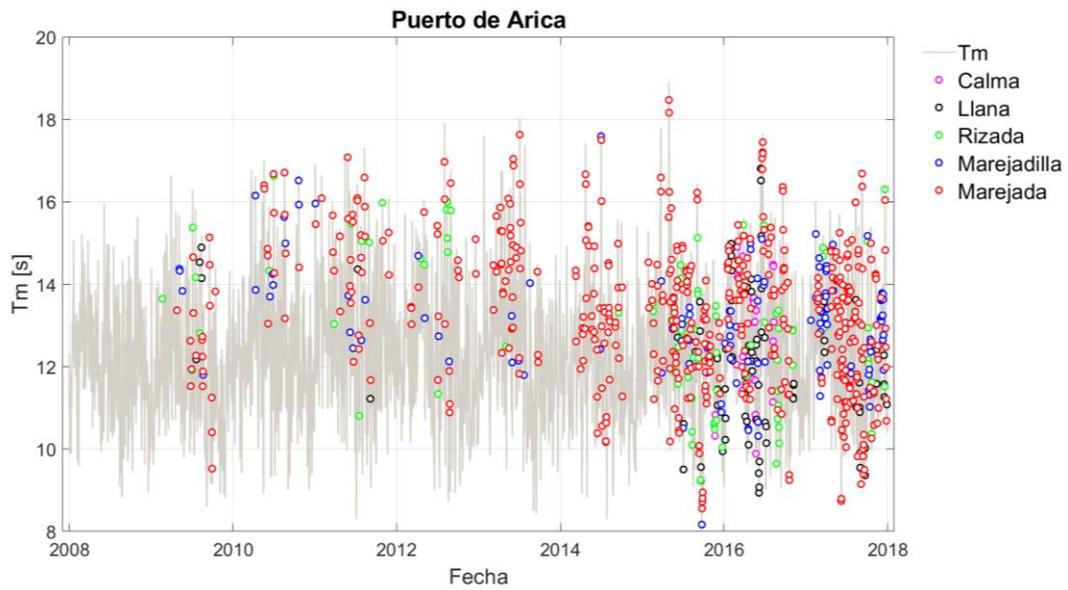


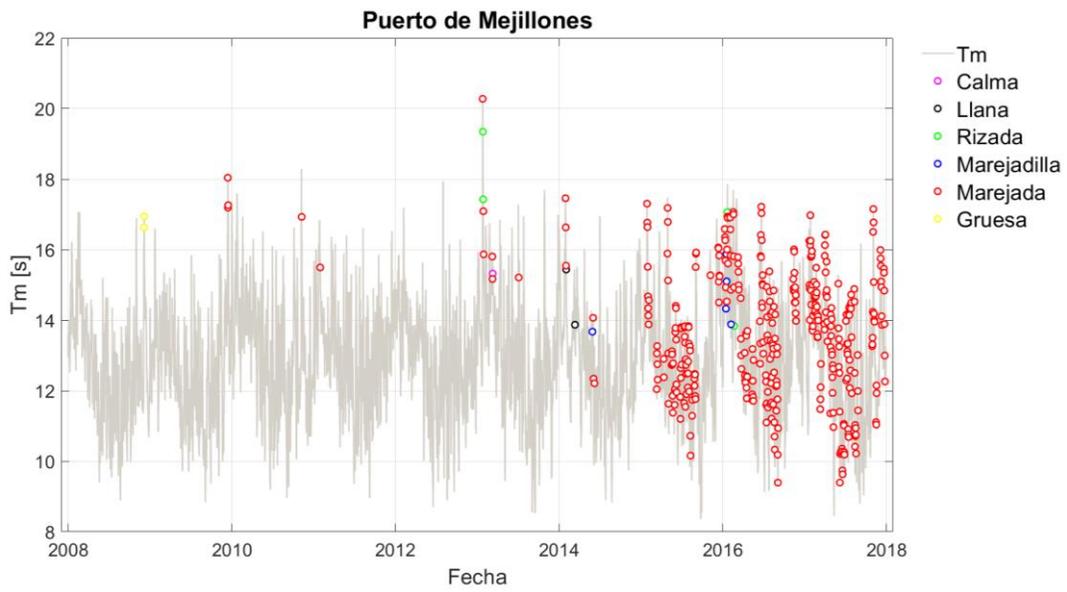
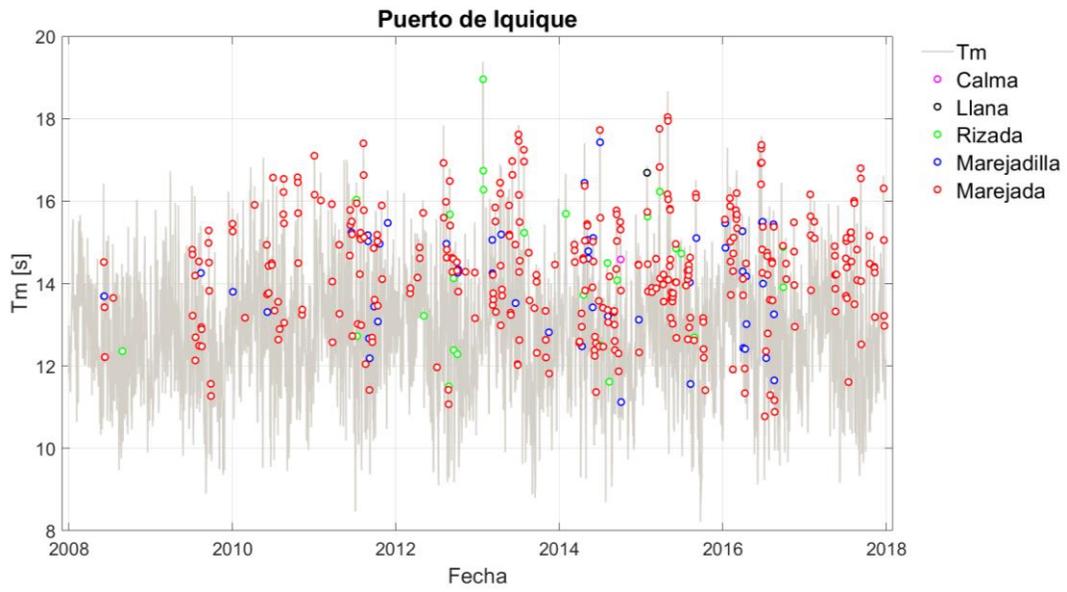


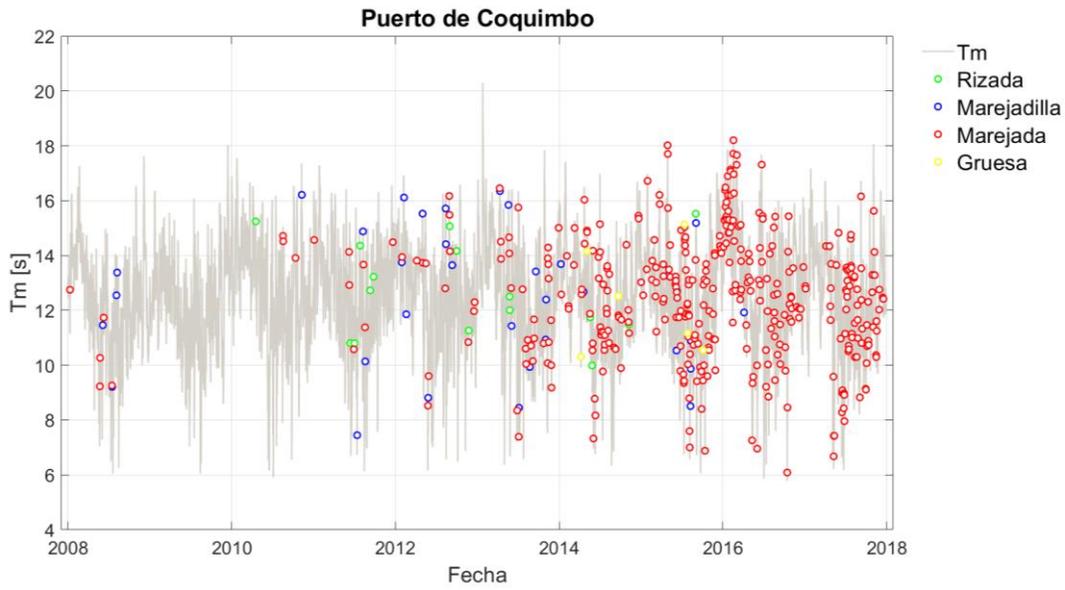
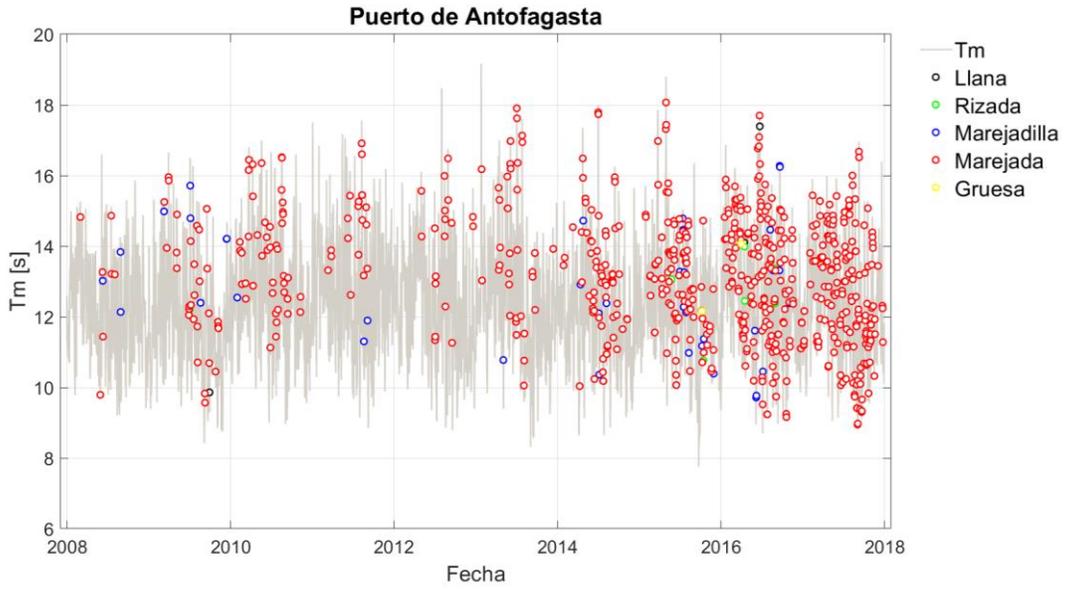


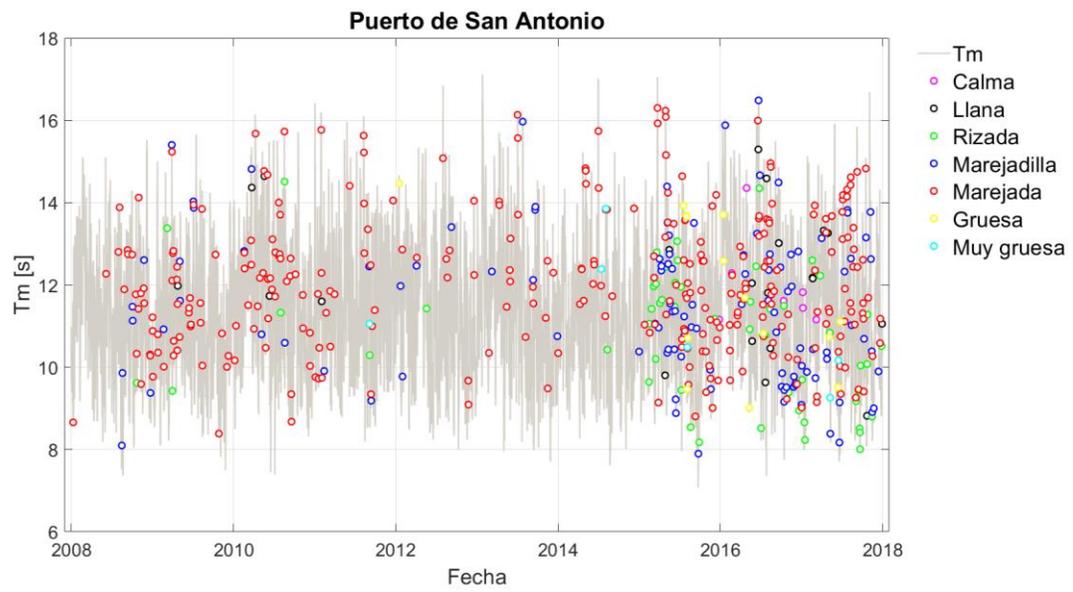
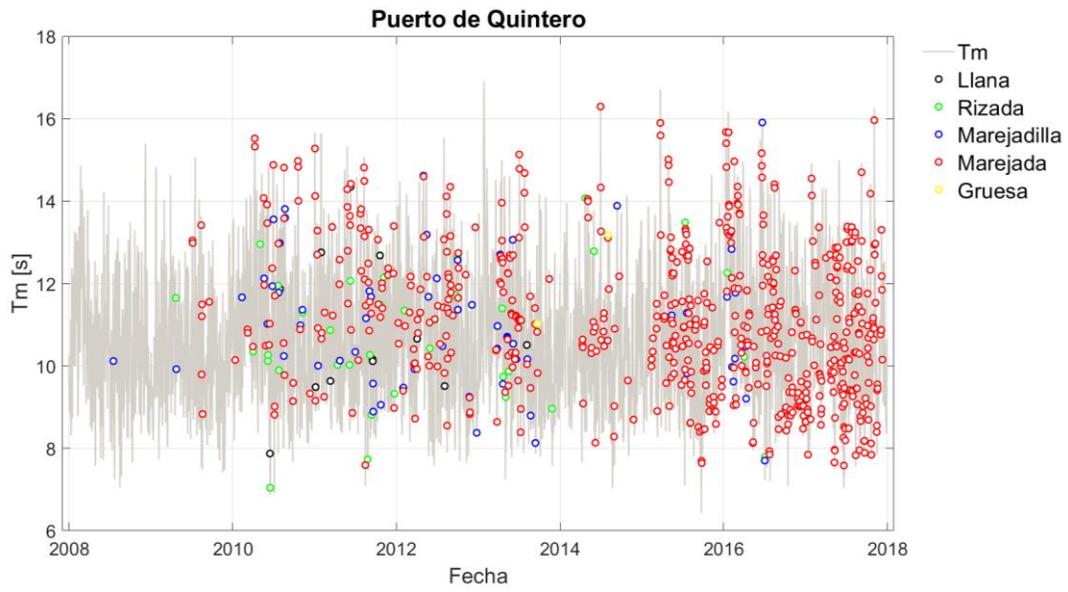


7.3.3 Cruce de información cierre de puertos versus T_m .

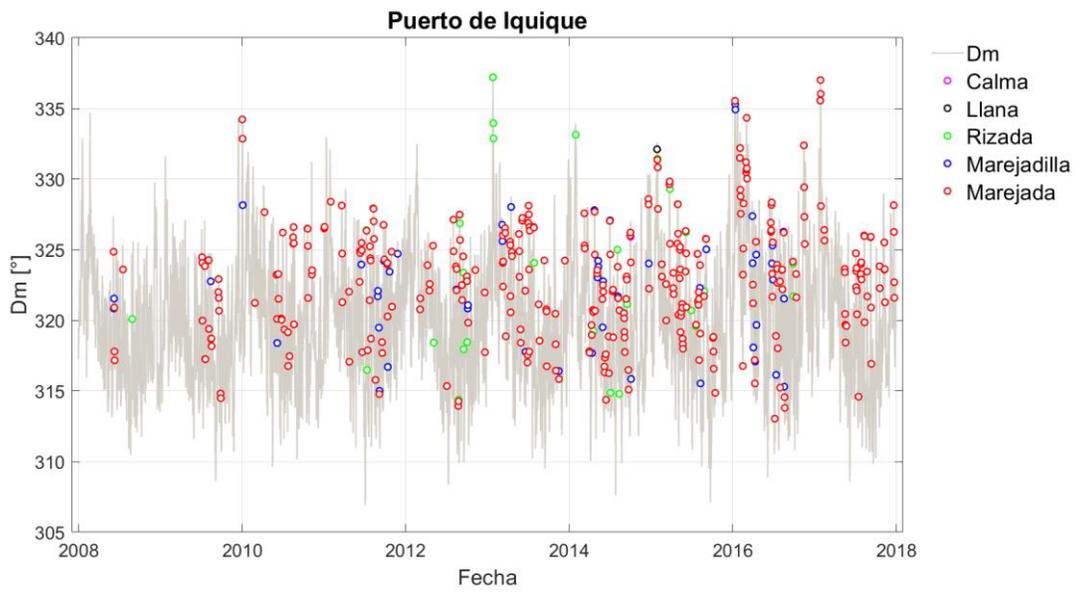
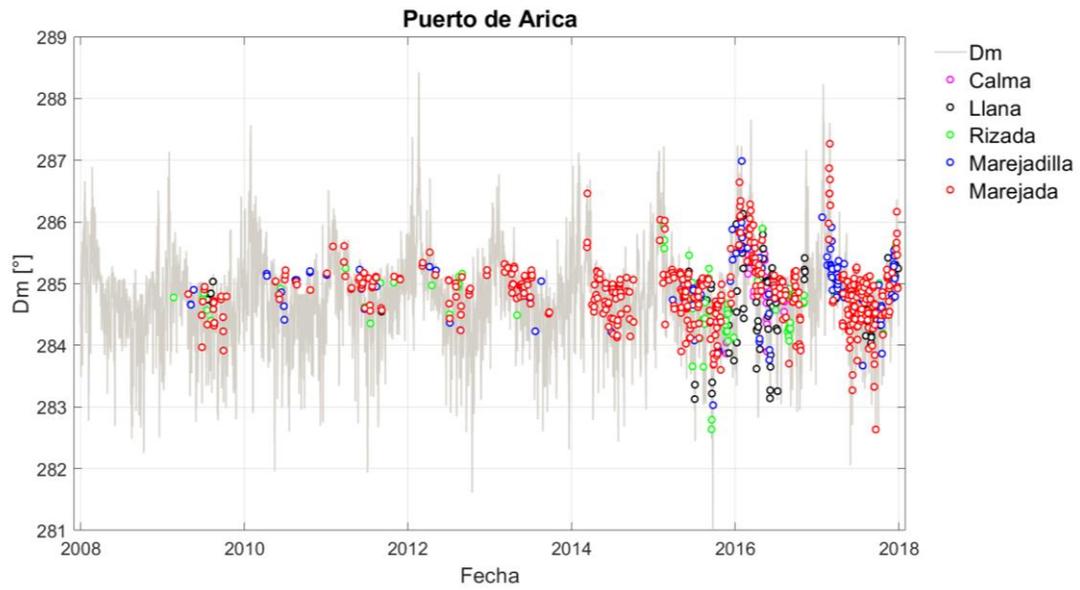


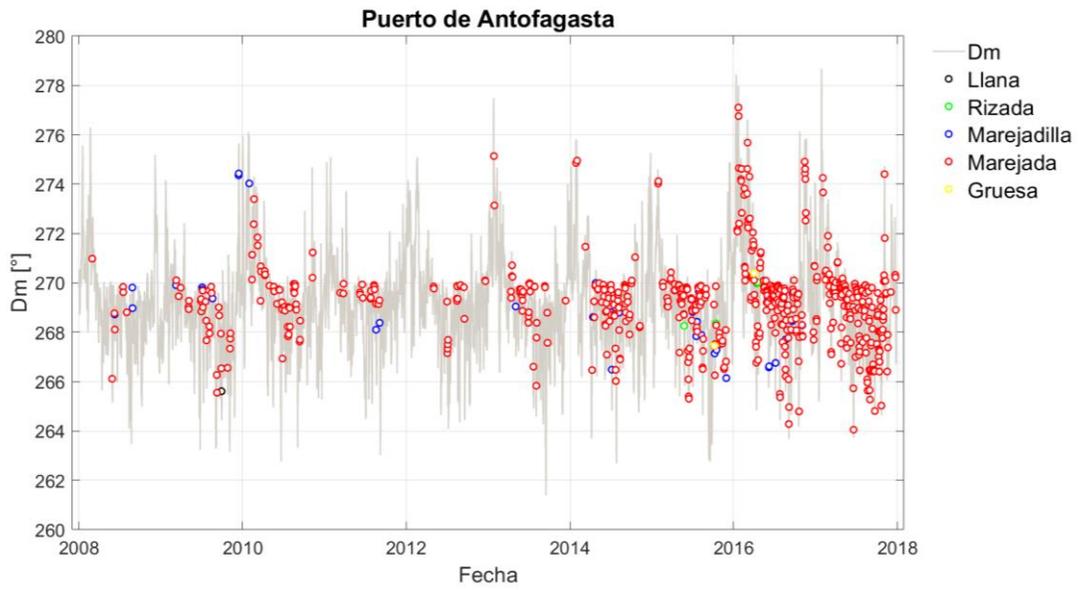
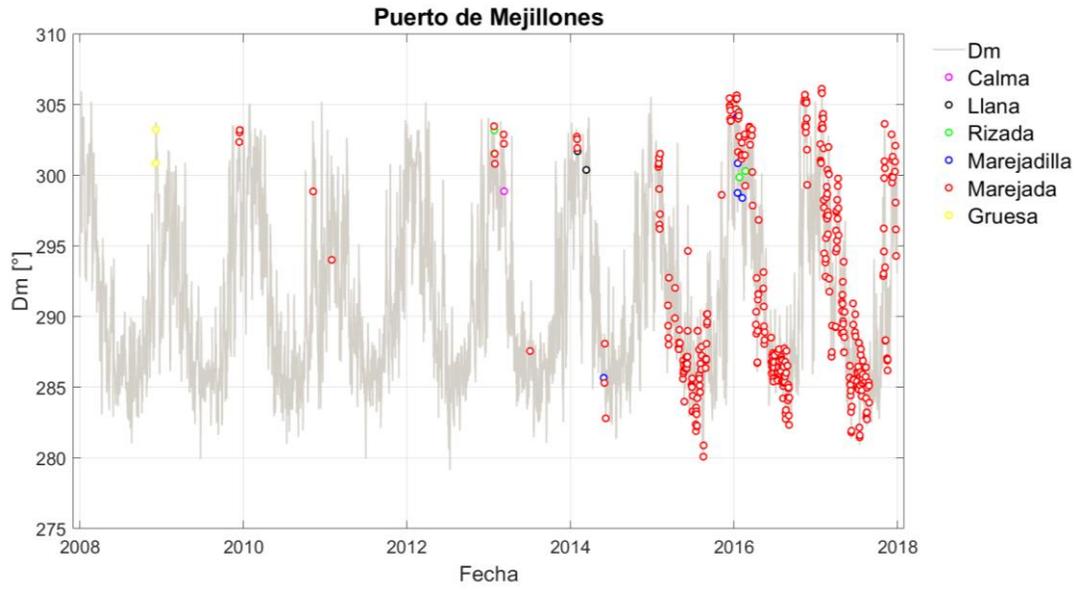


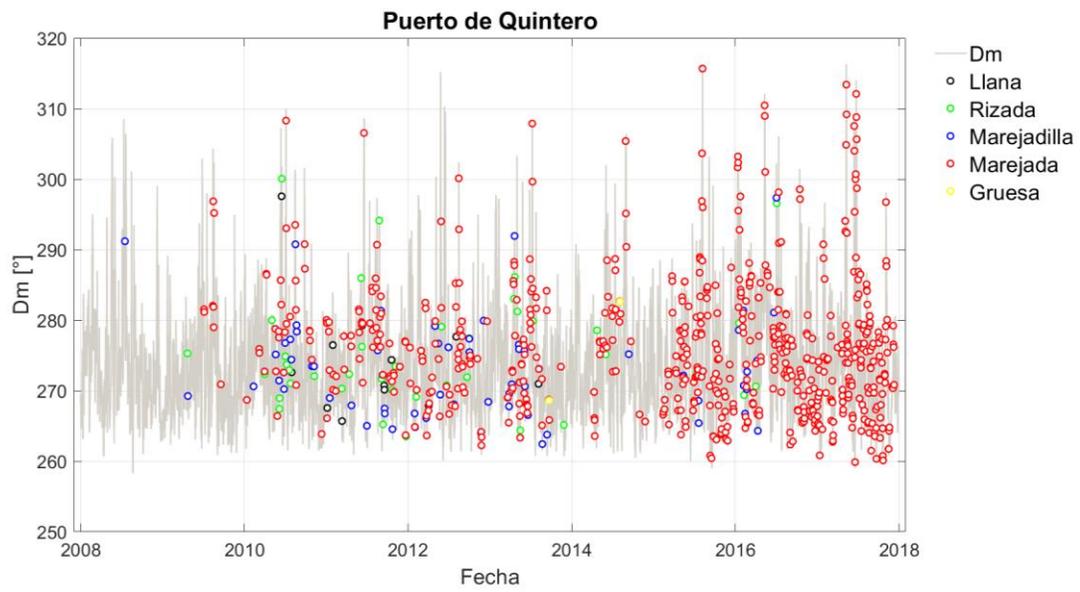
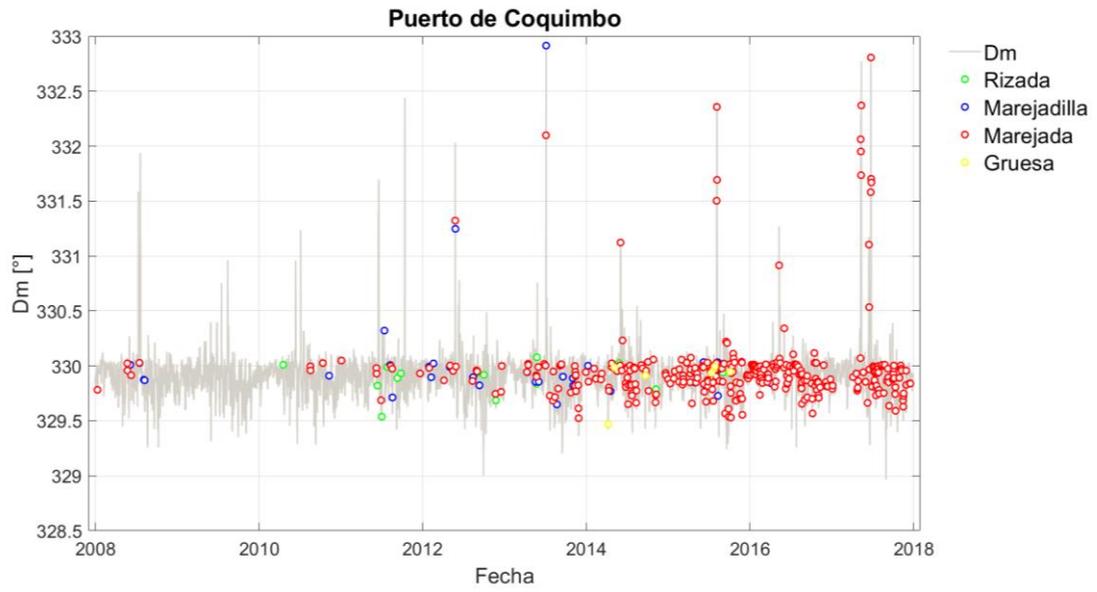


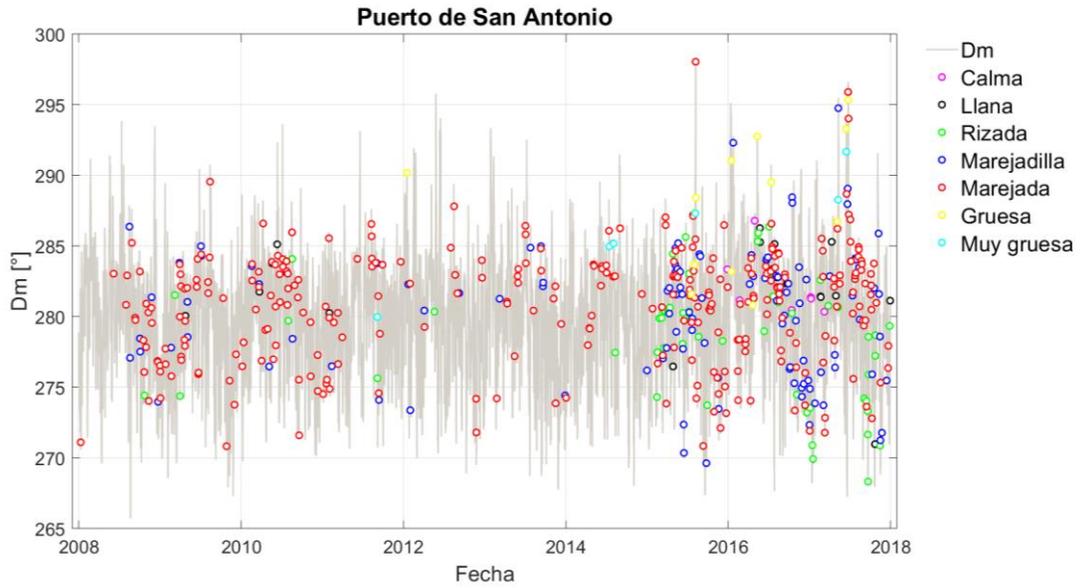


7.3.4 Cruce de información cierre de puertos versus Dm.

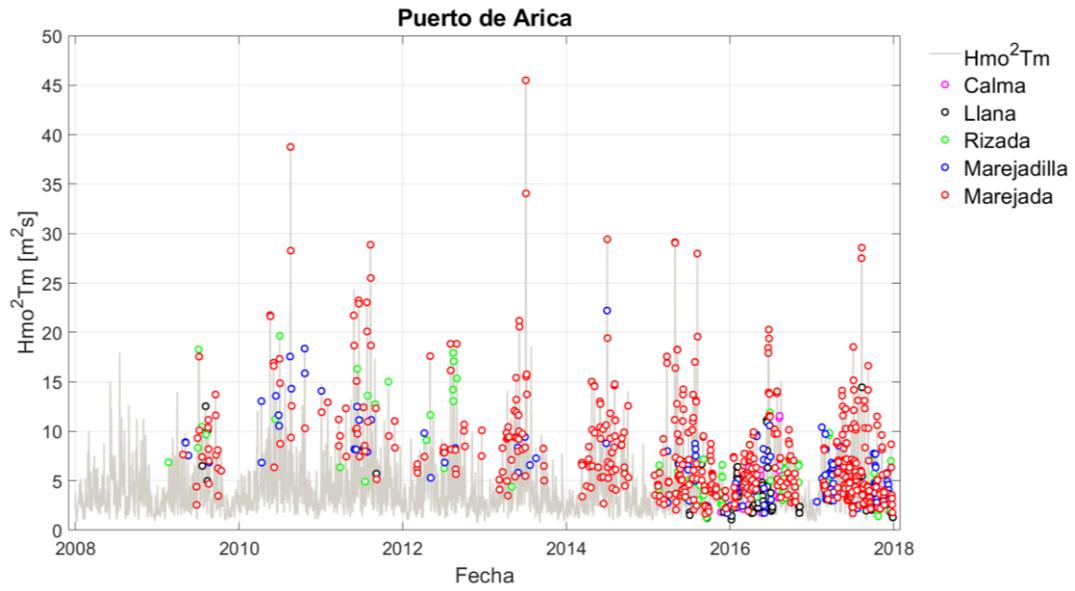


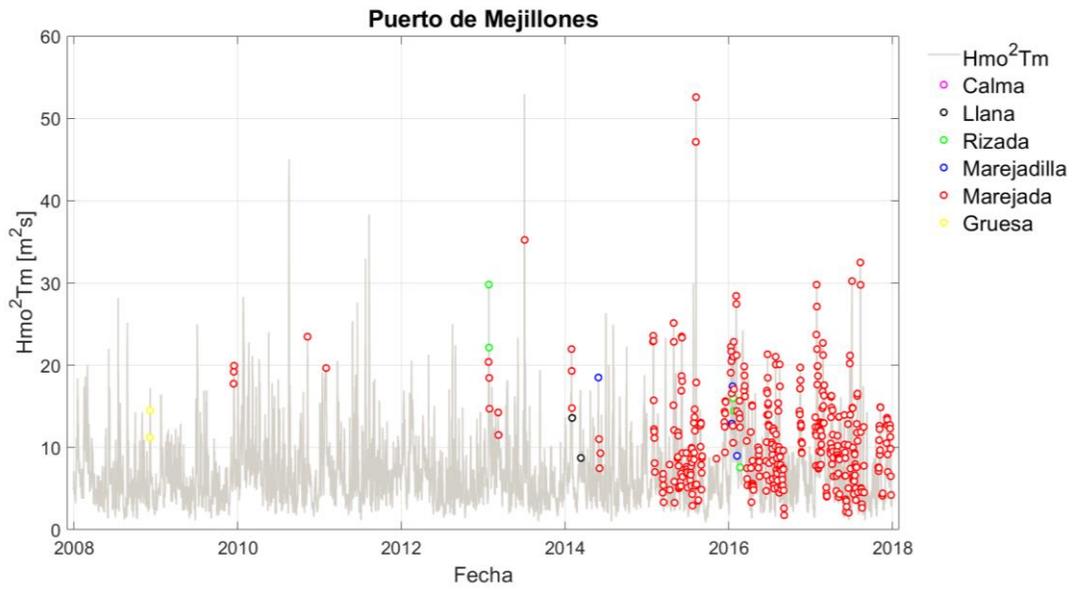
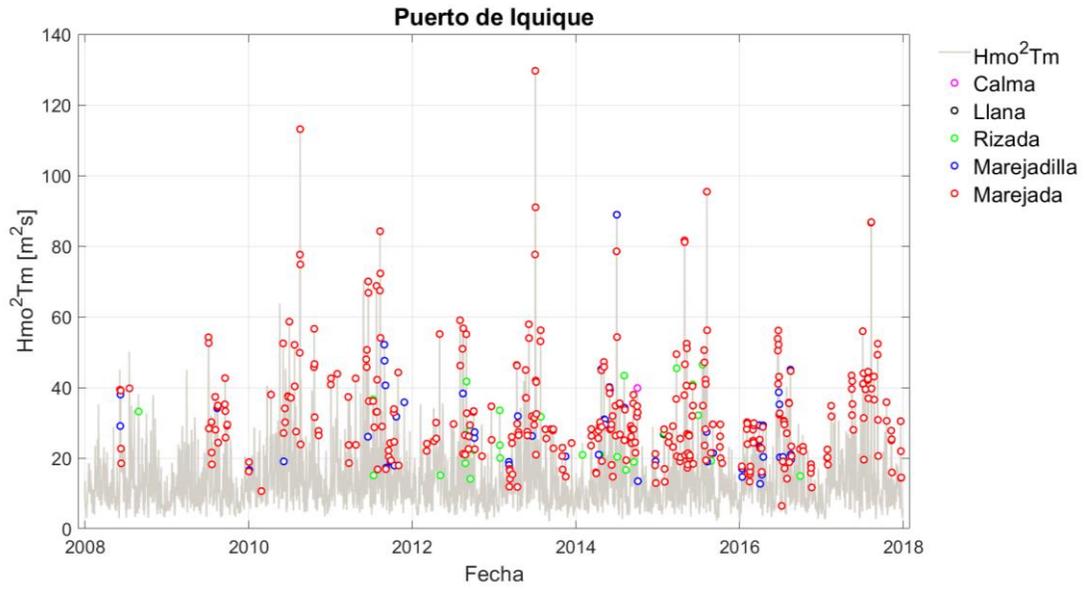


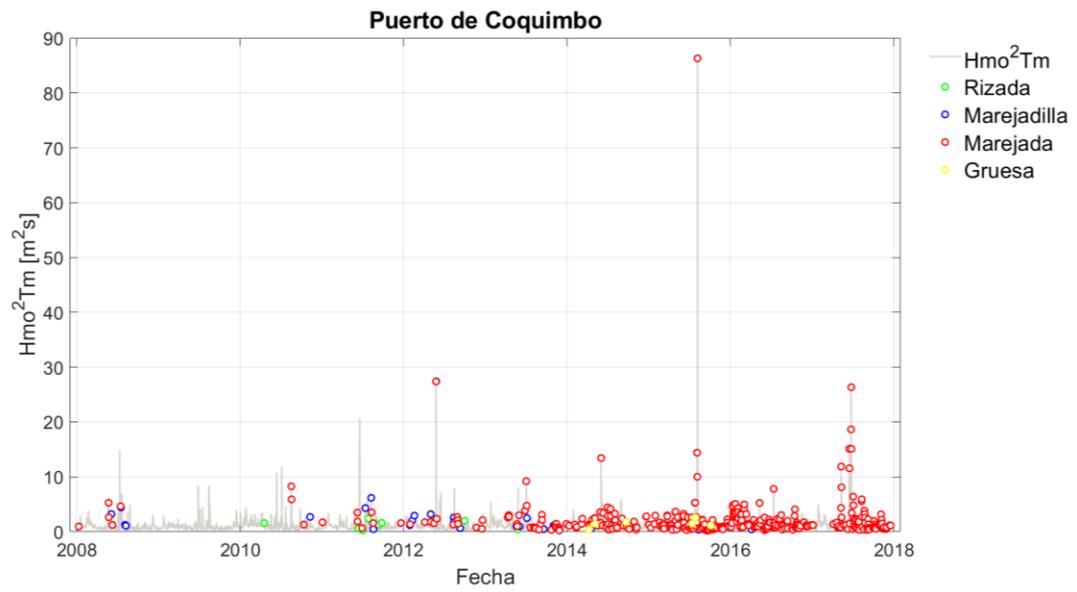
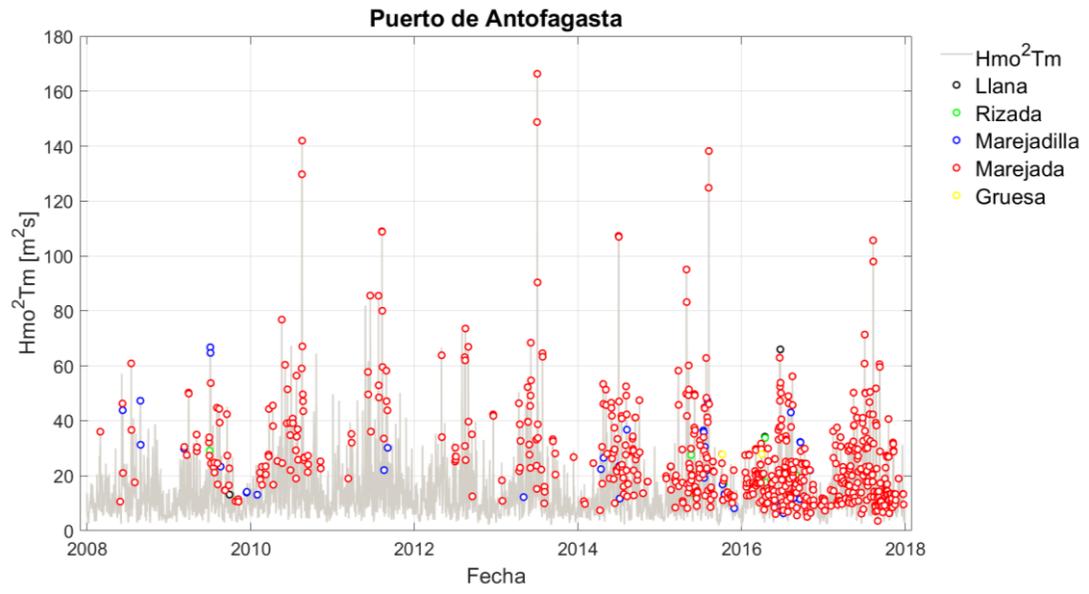


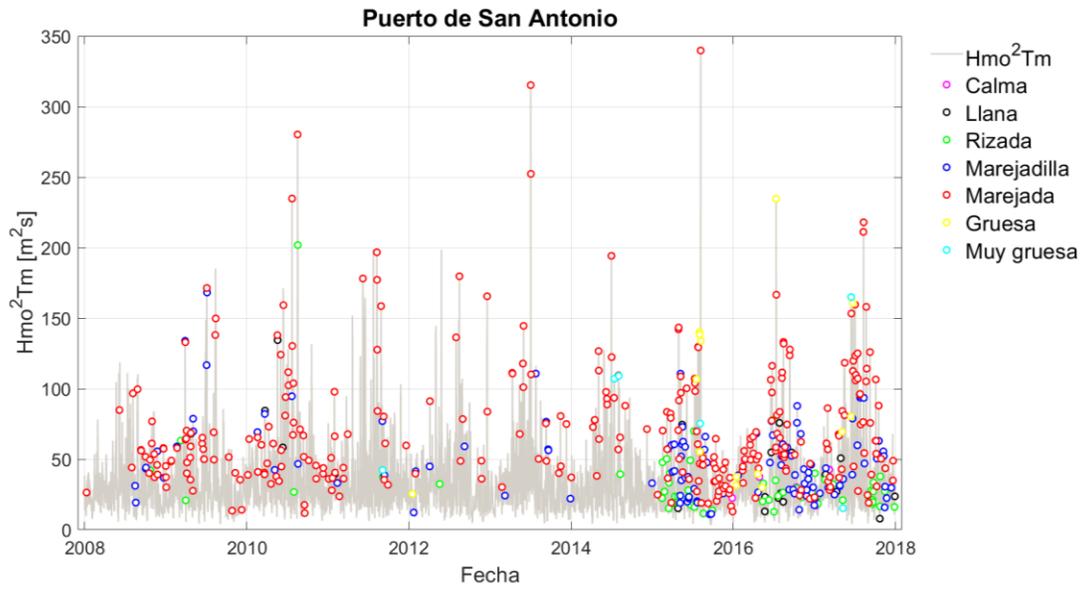
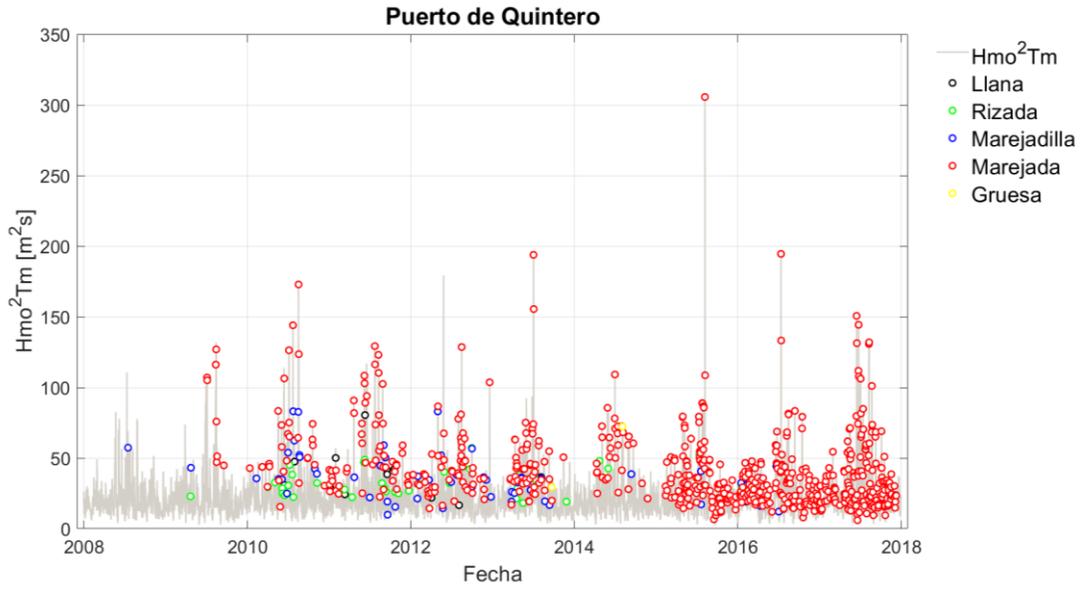


7.3.5 Cruce de información cierre de puertos versus potencia.

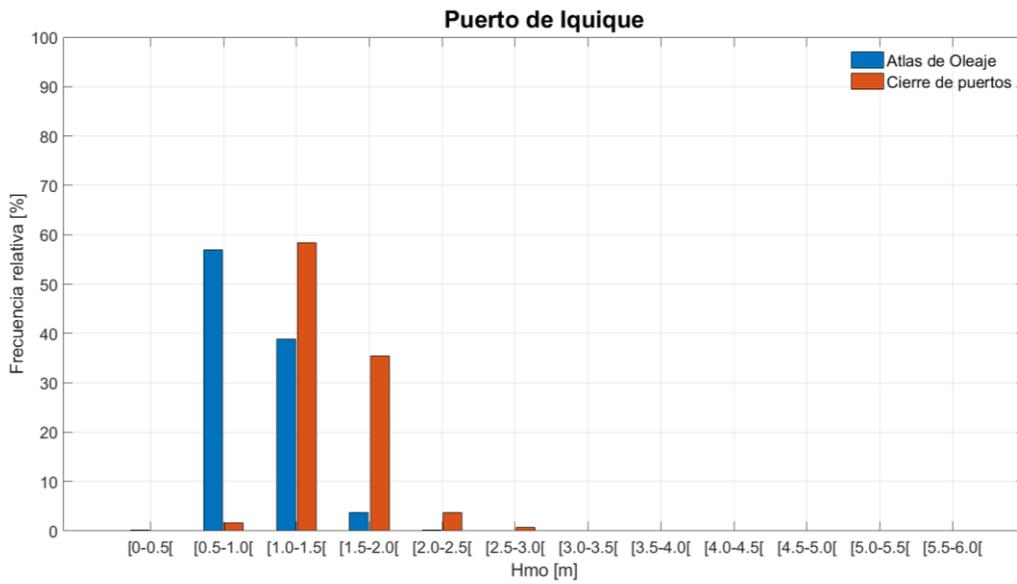
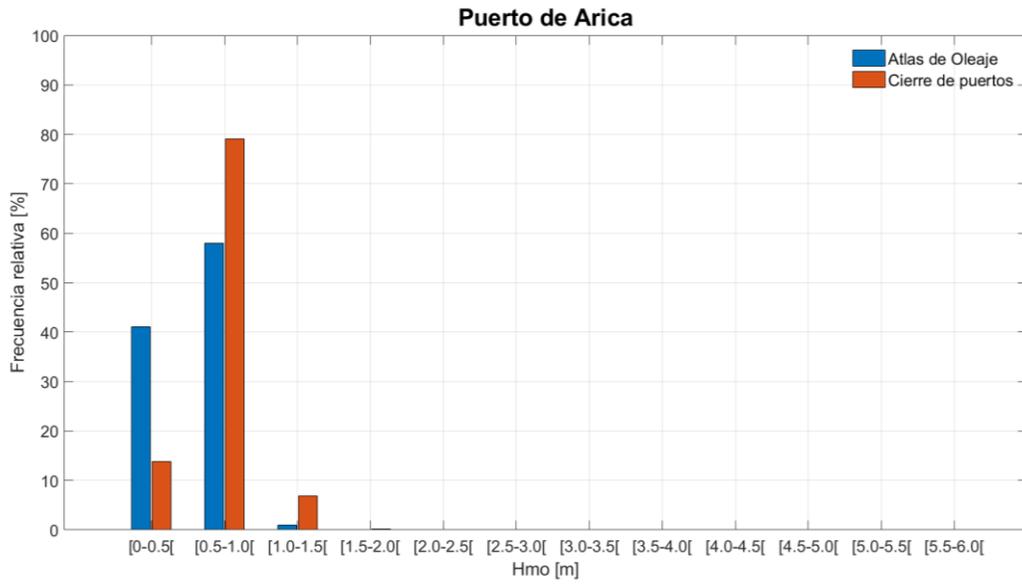




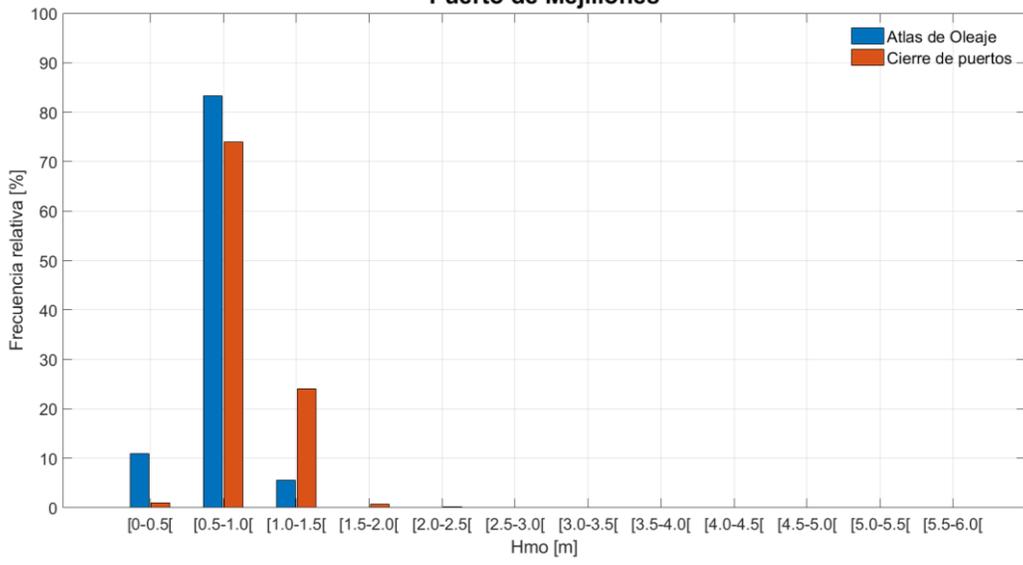




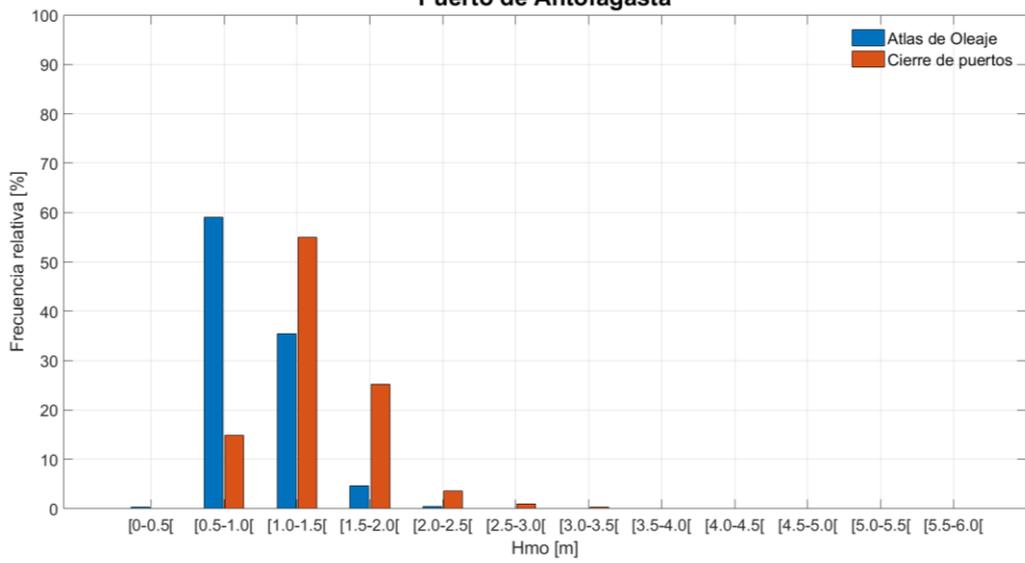
7.3.6 Histogramas cierre de puertos versus Hmo.



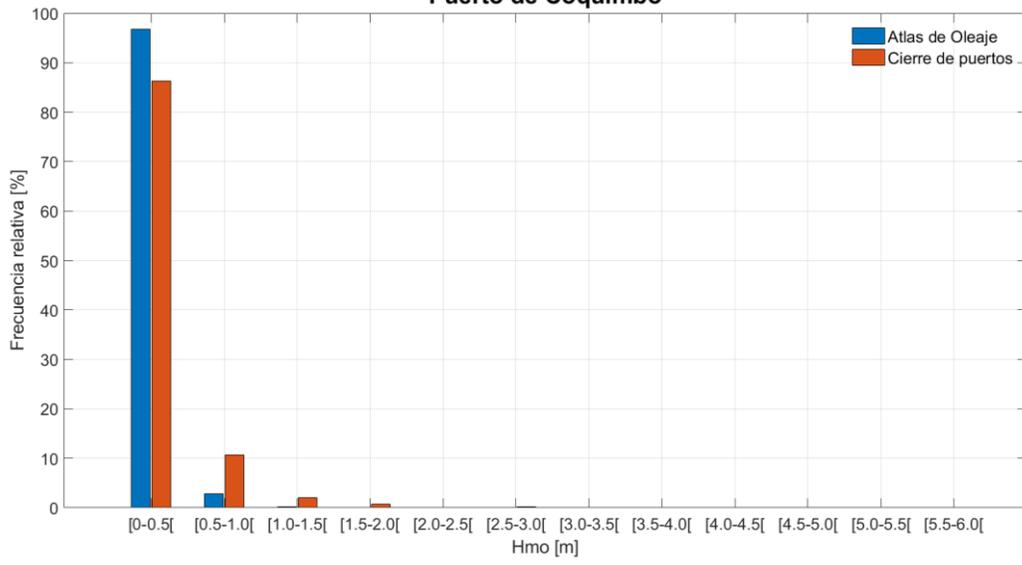
Puerto de Mejillones



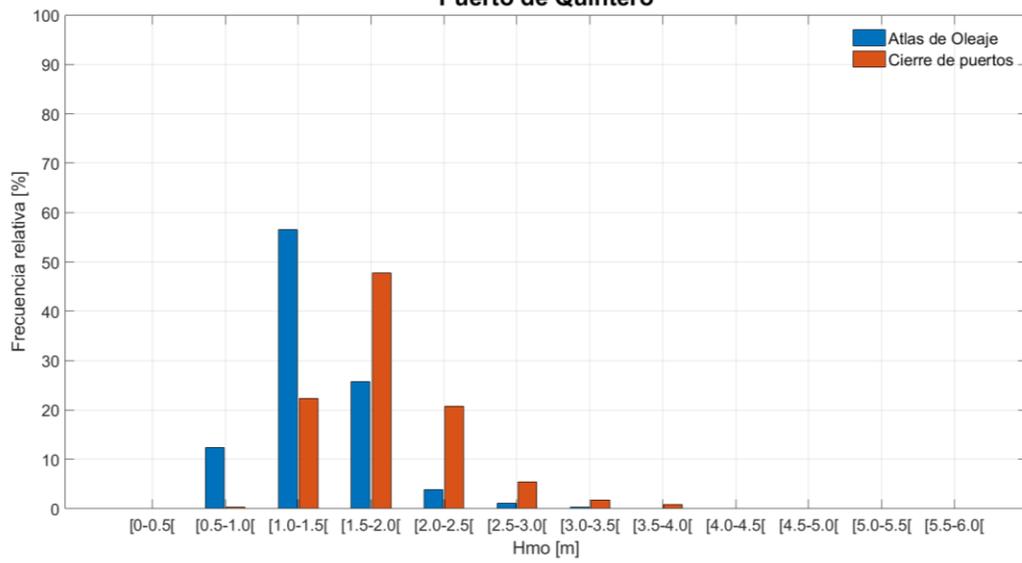
Puerto de Antofagasta

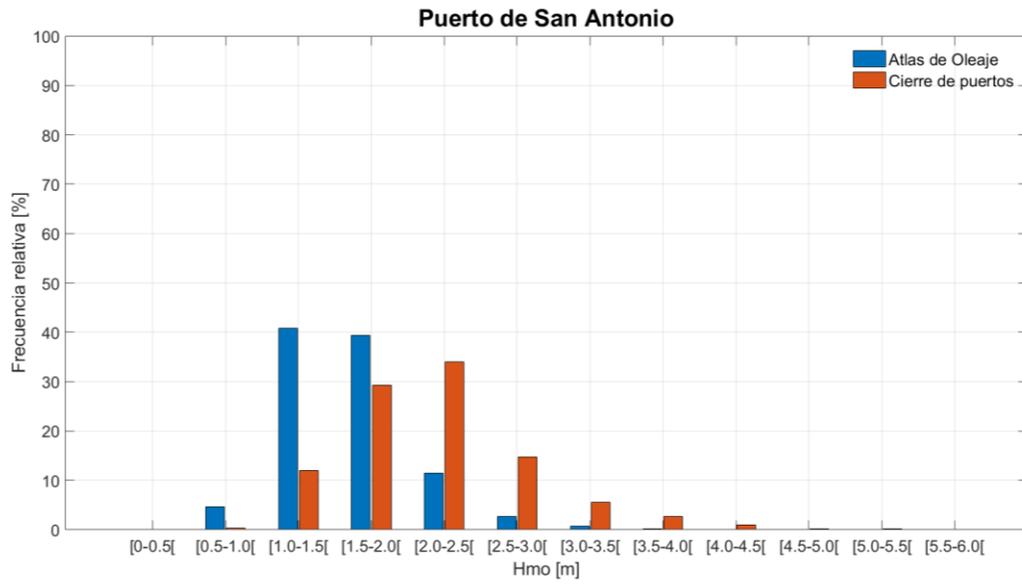
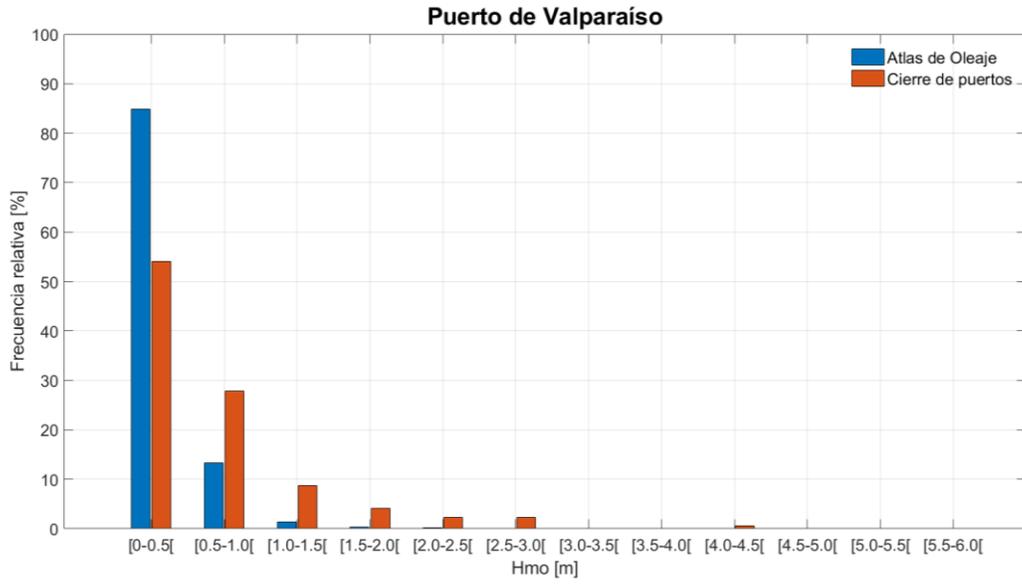


Puerto de Coquimbo

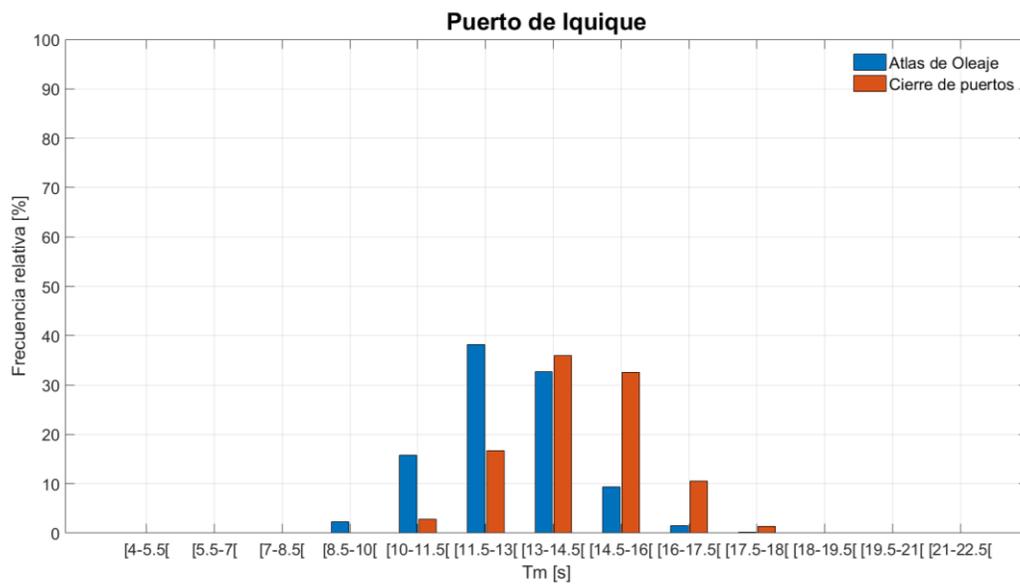
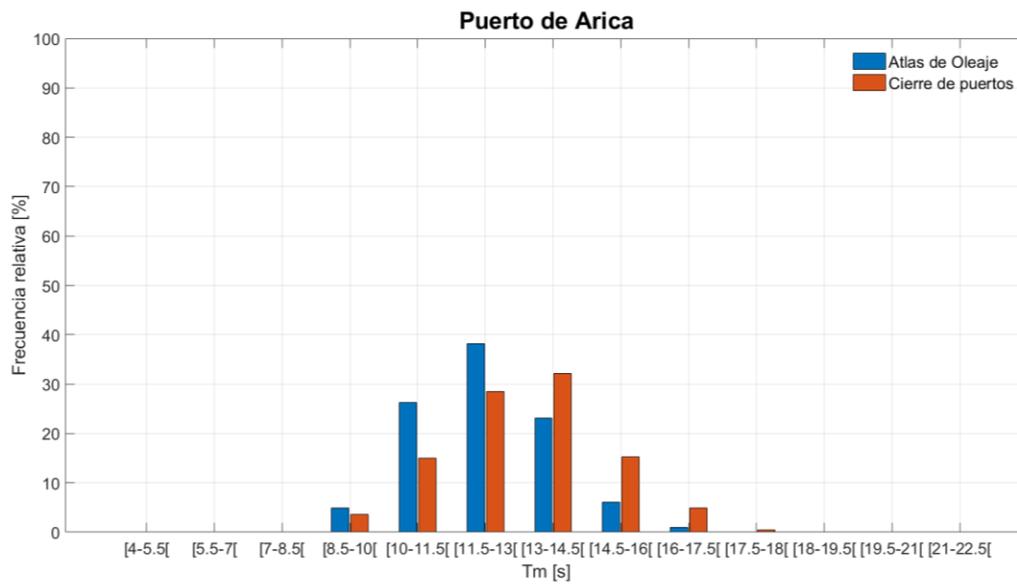


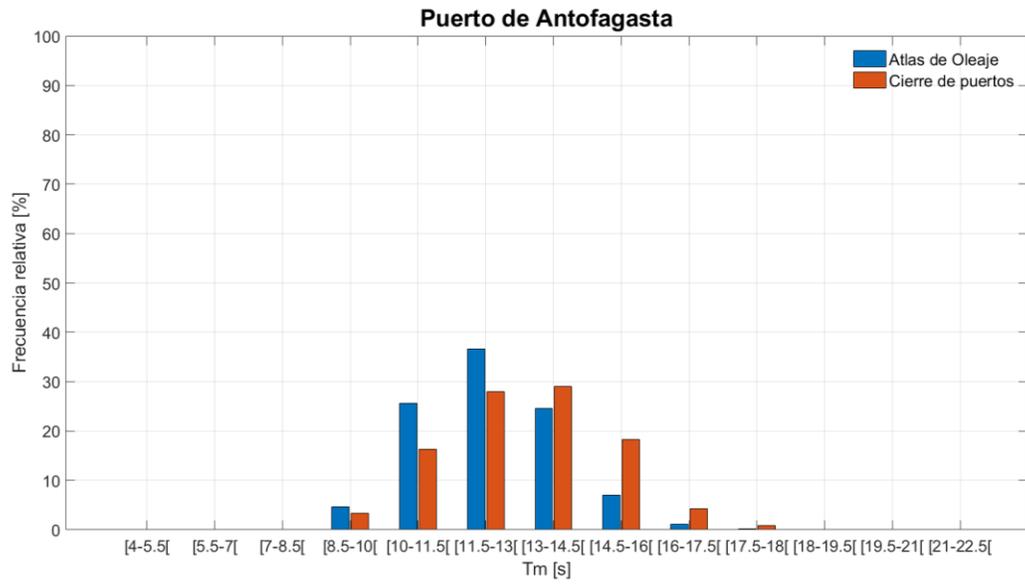
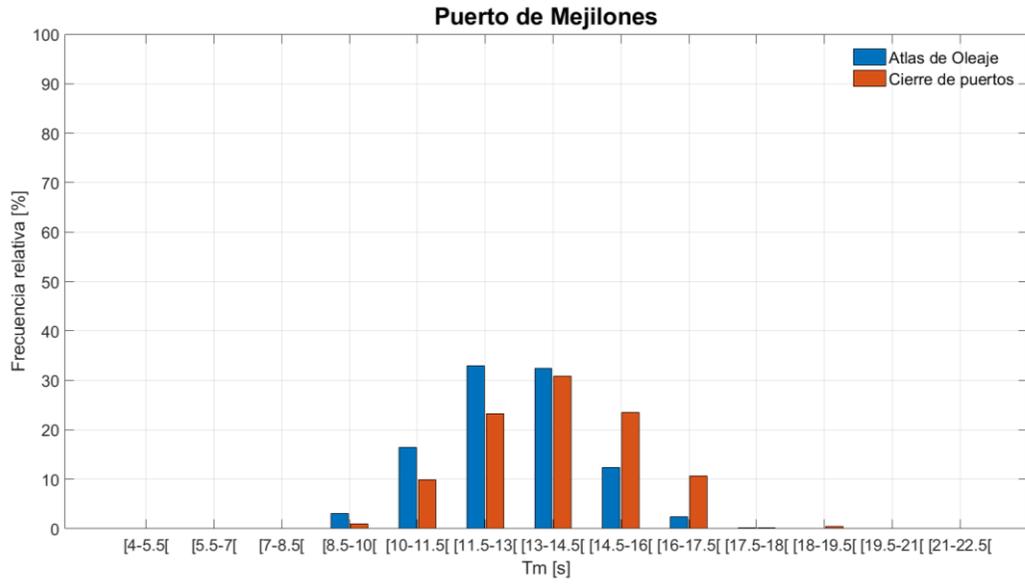
Puerto de Quintero

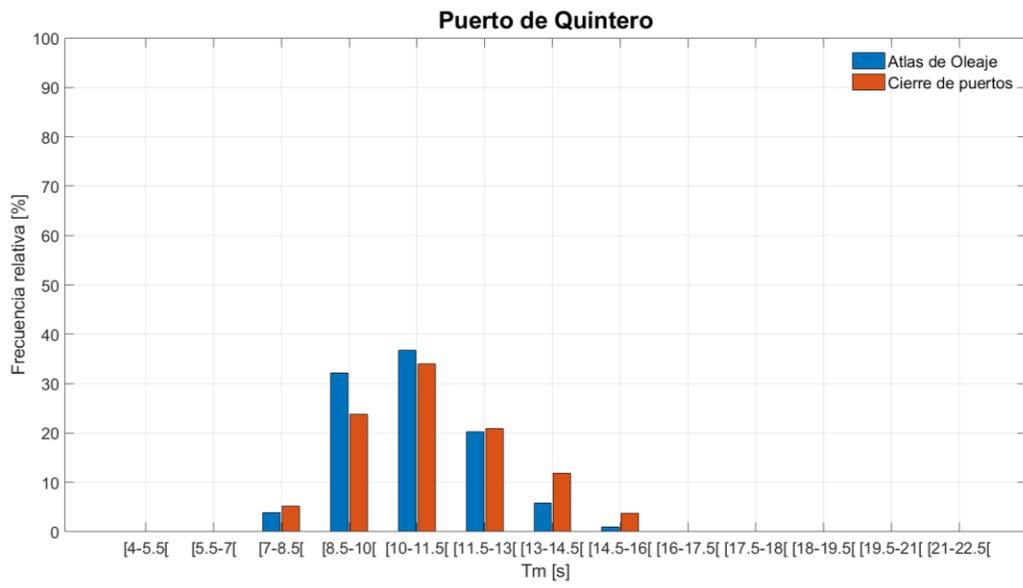
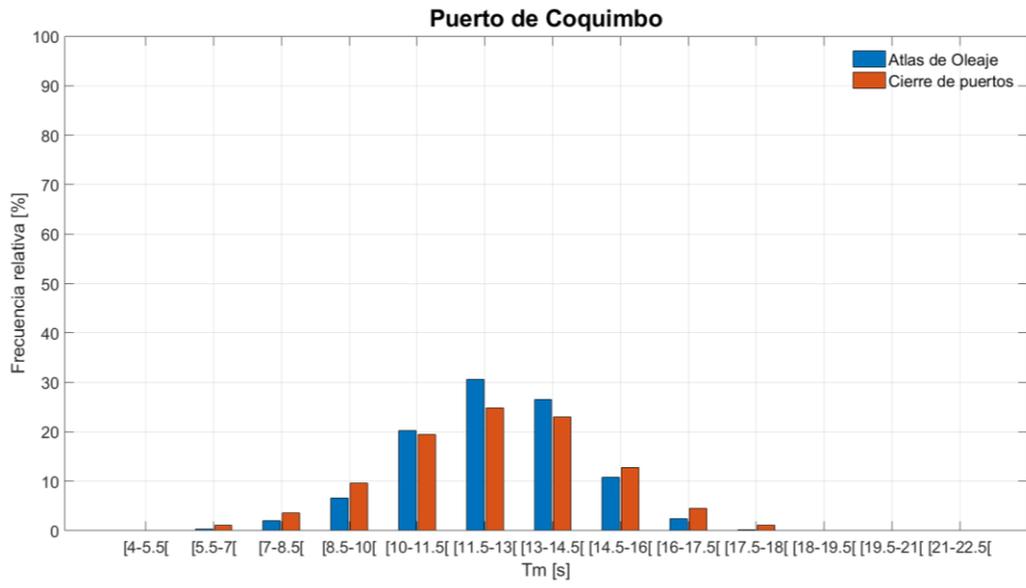


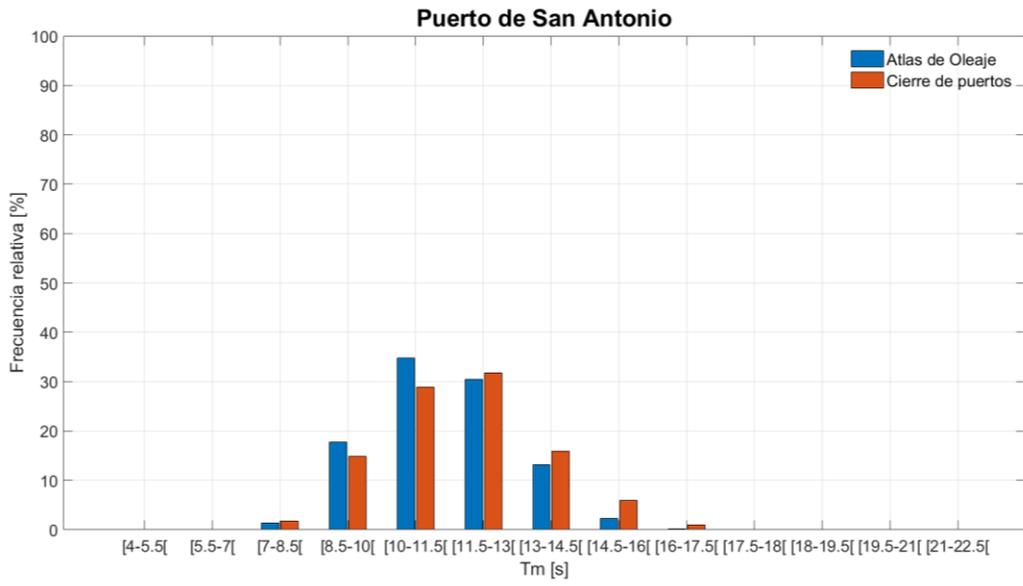
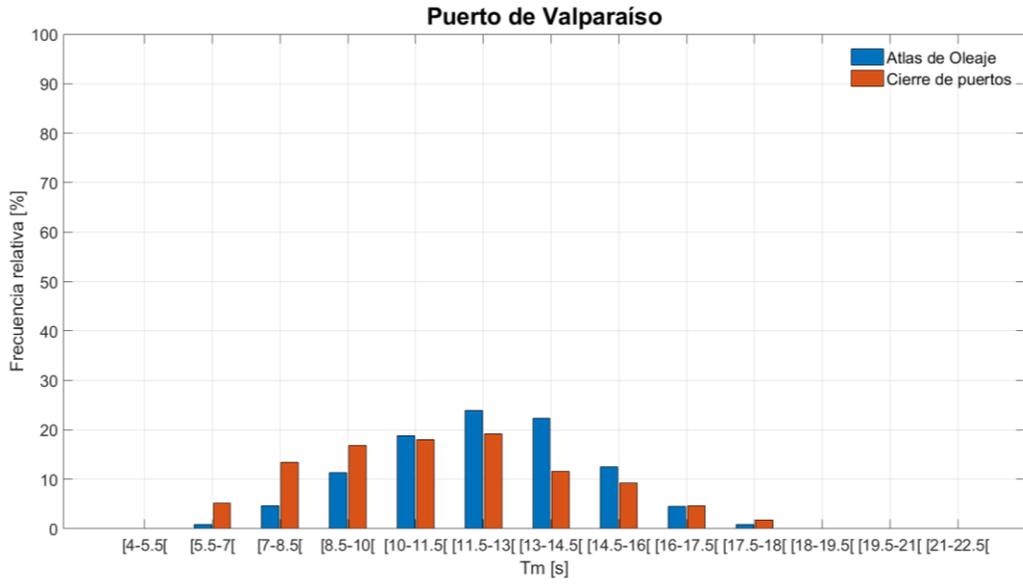


7.3.7 Histogramas cierre de puertos versus Tm.

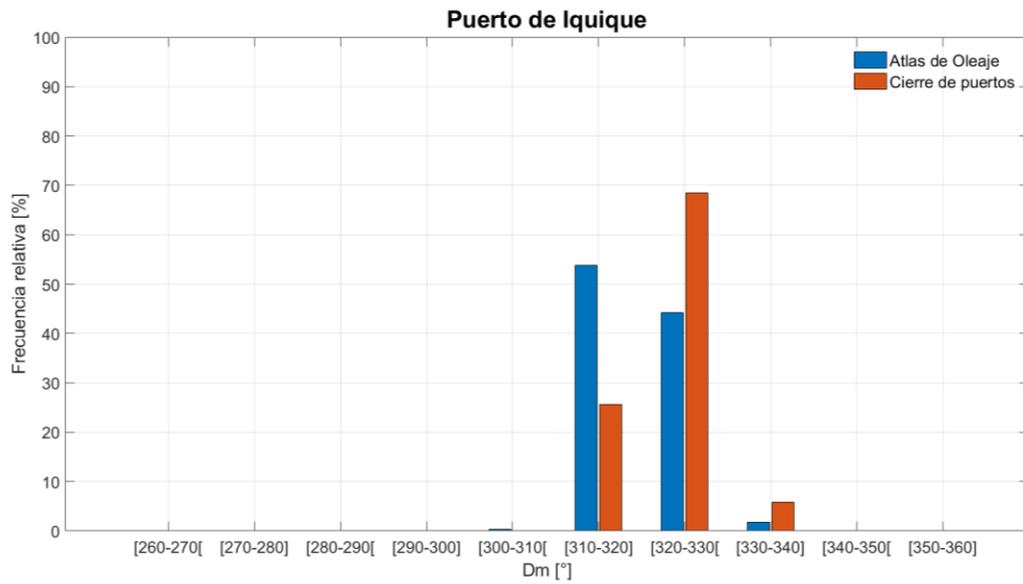
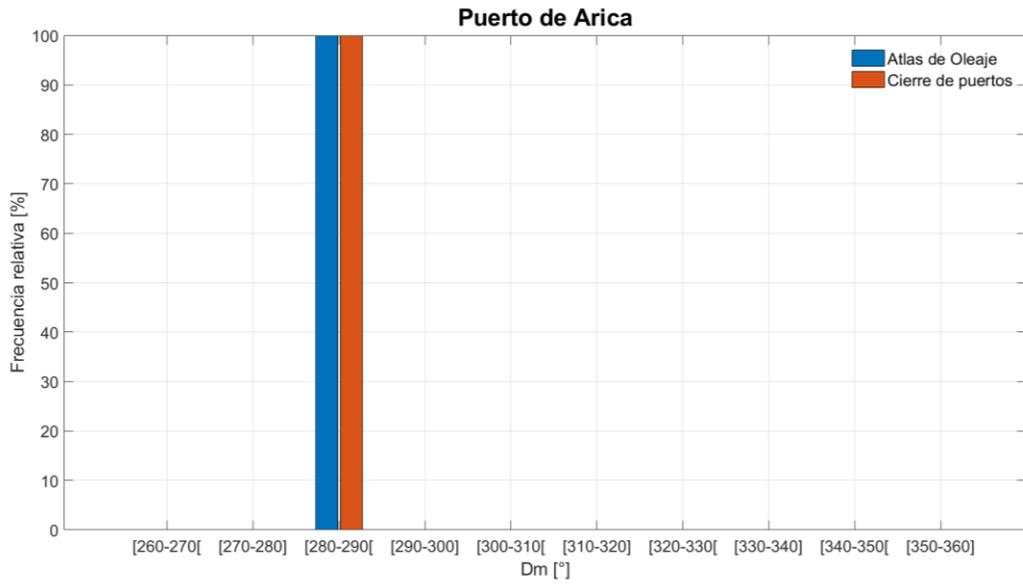




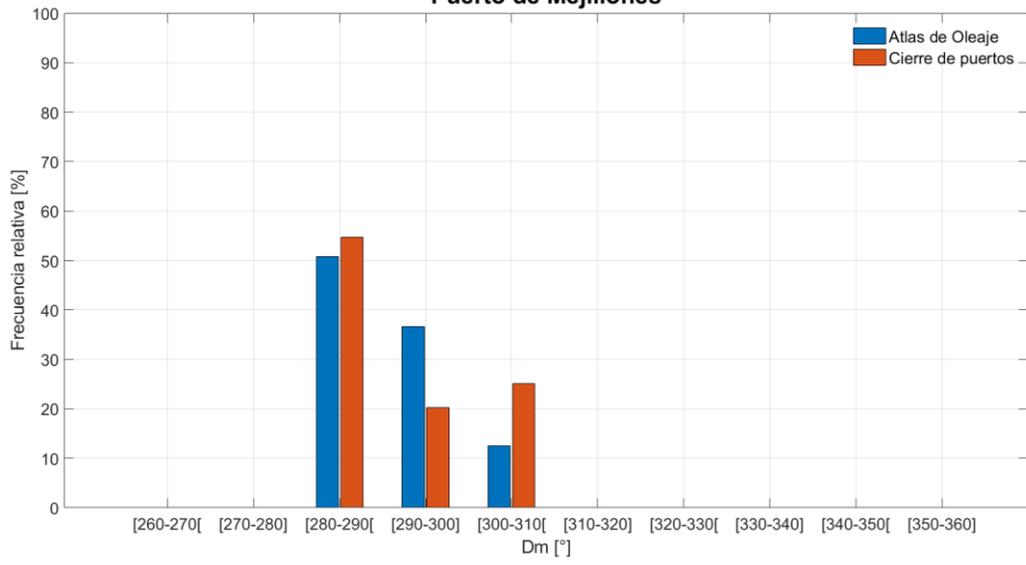




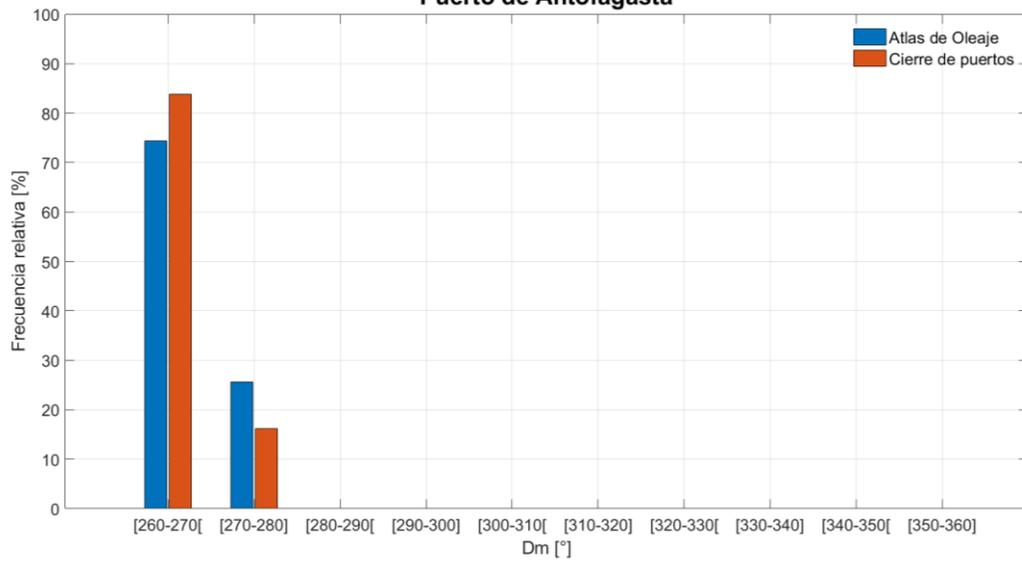
7.3.8 Histogramas cierre de puertos versus Dm.



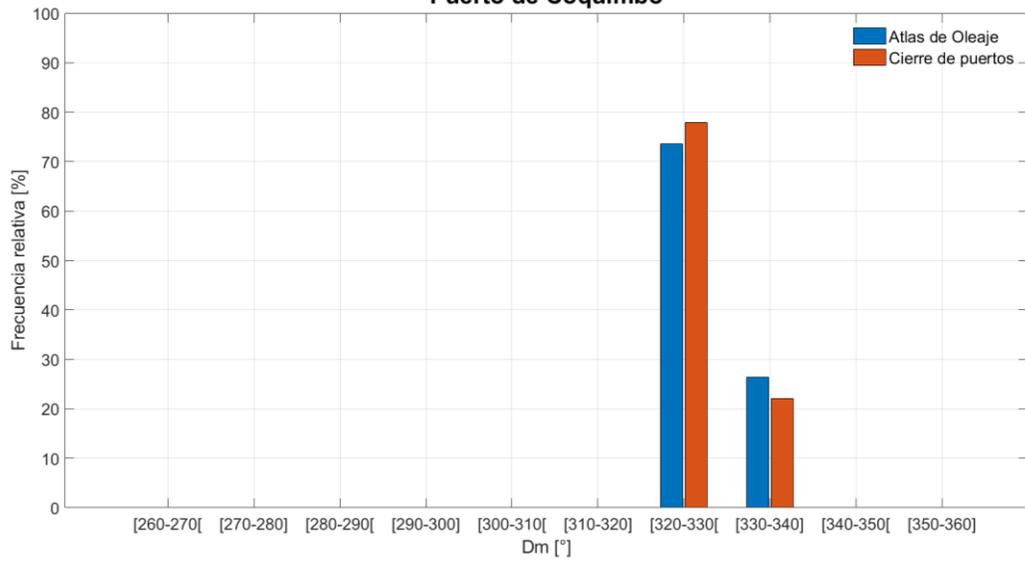
Puerto de Mejillones



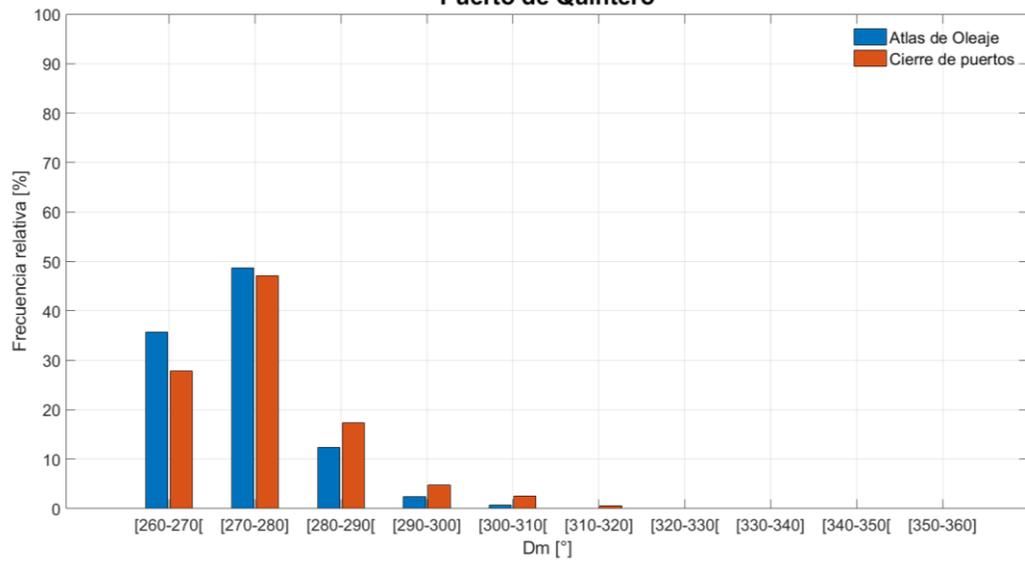
Puerto de Antofagasta



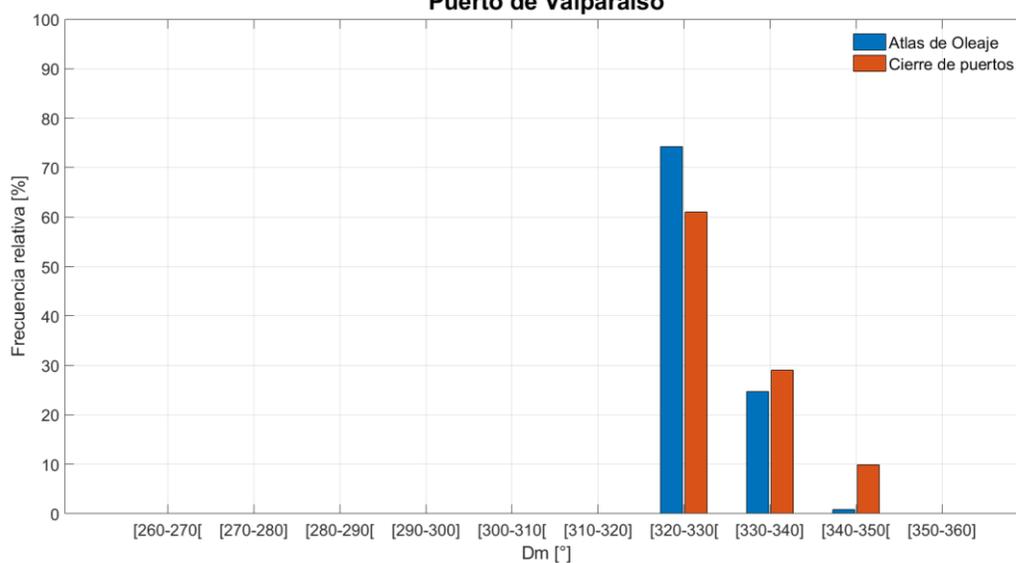
Puerto de Coquimbo



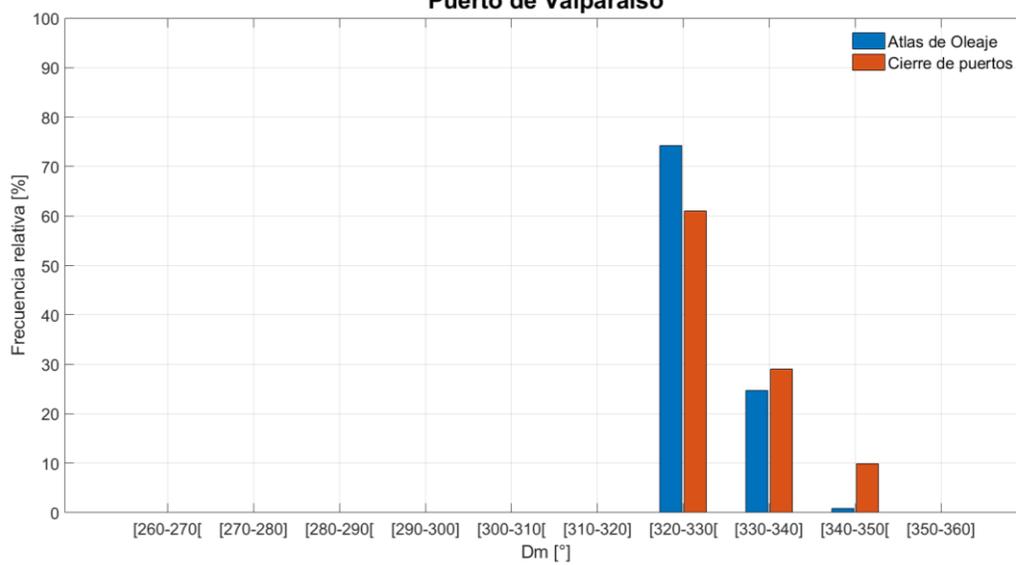
Puerto de Quintero



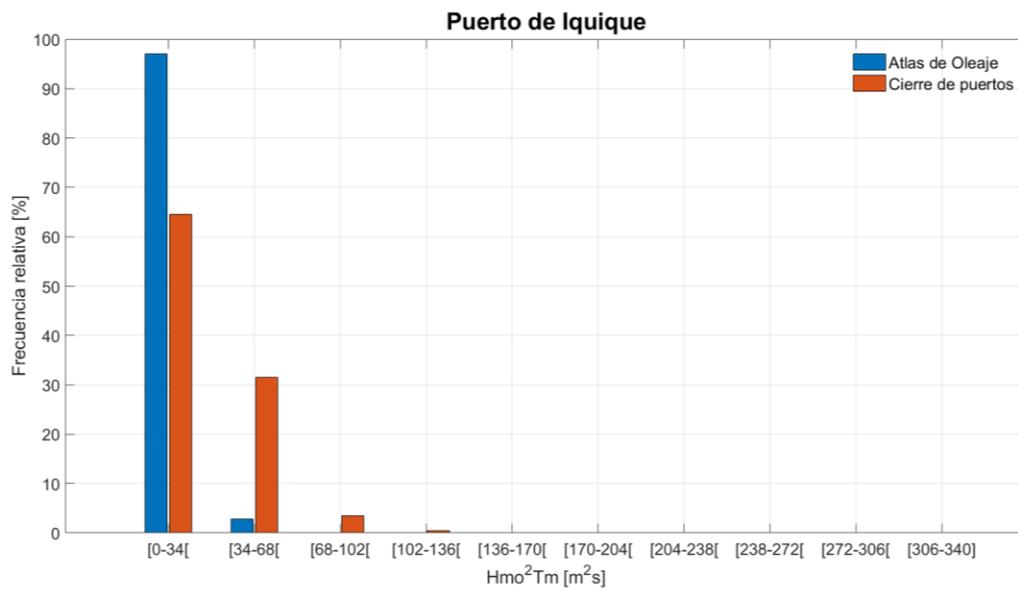
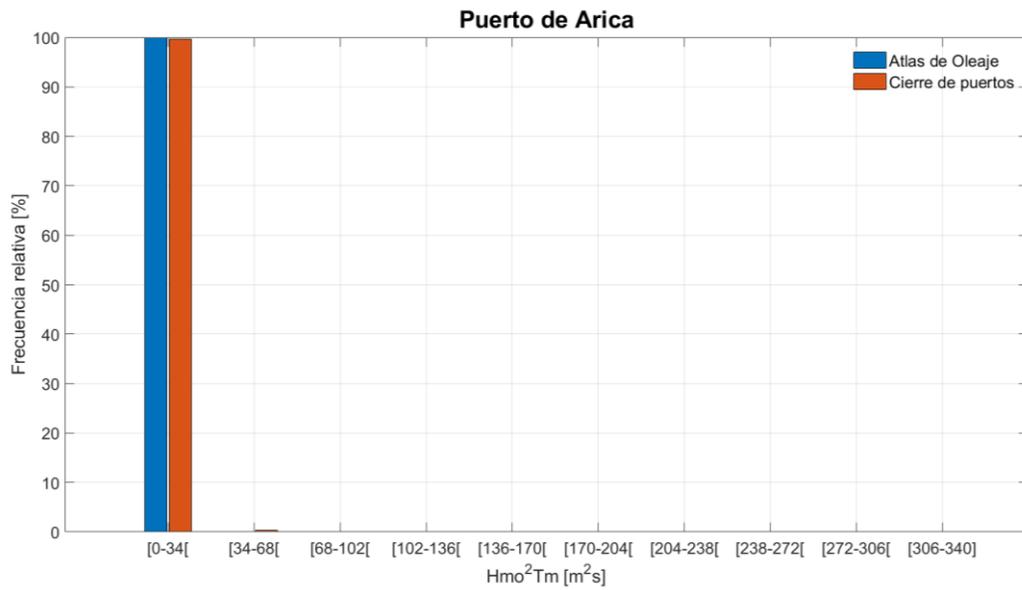
Puerto de Valparaíso

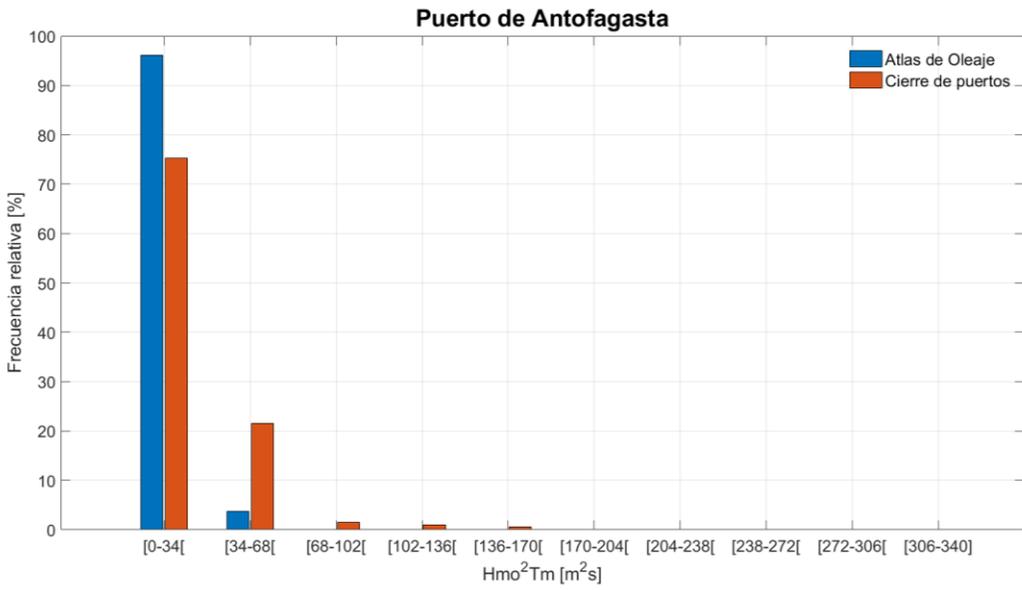
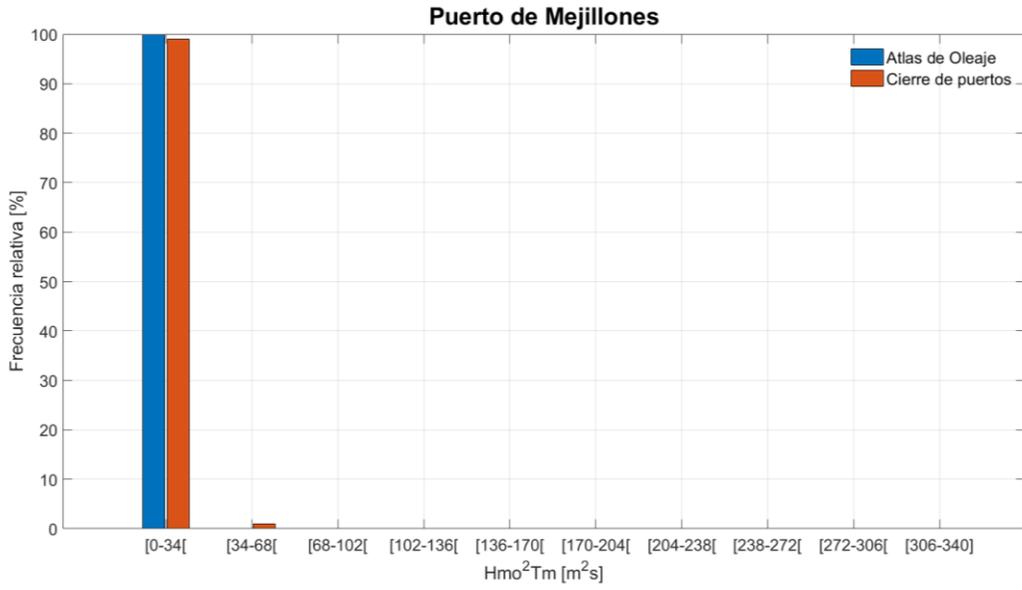


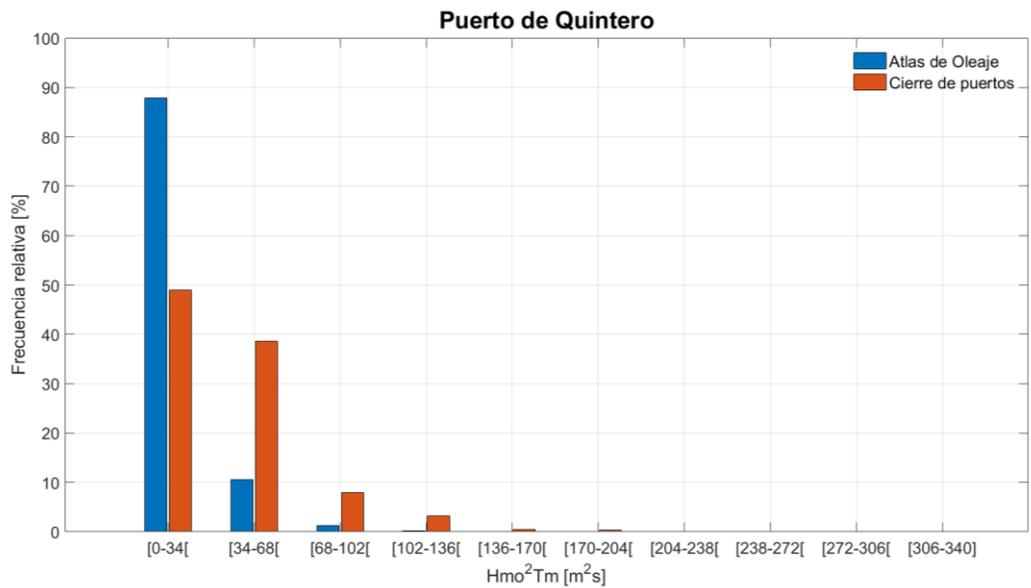
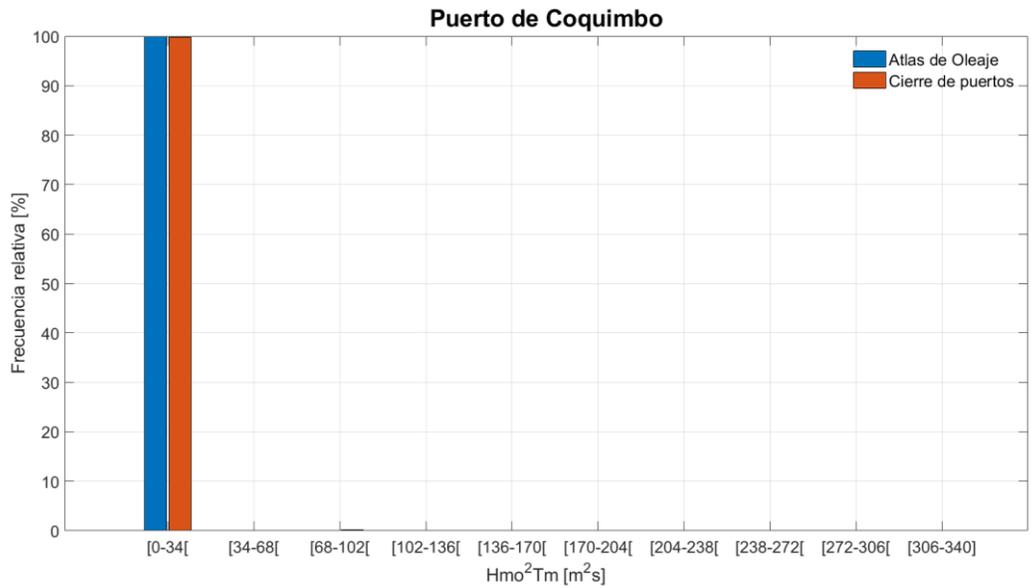
Puerto de Valparaíso

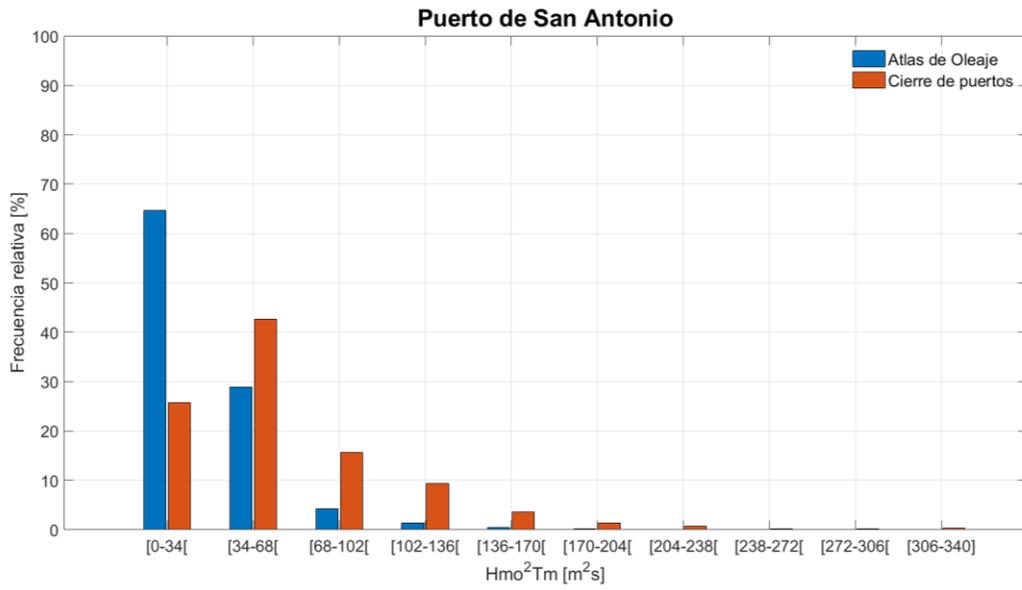
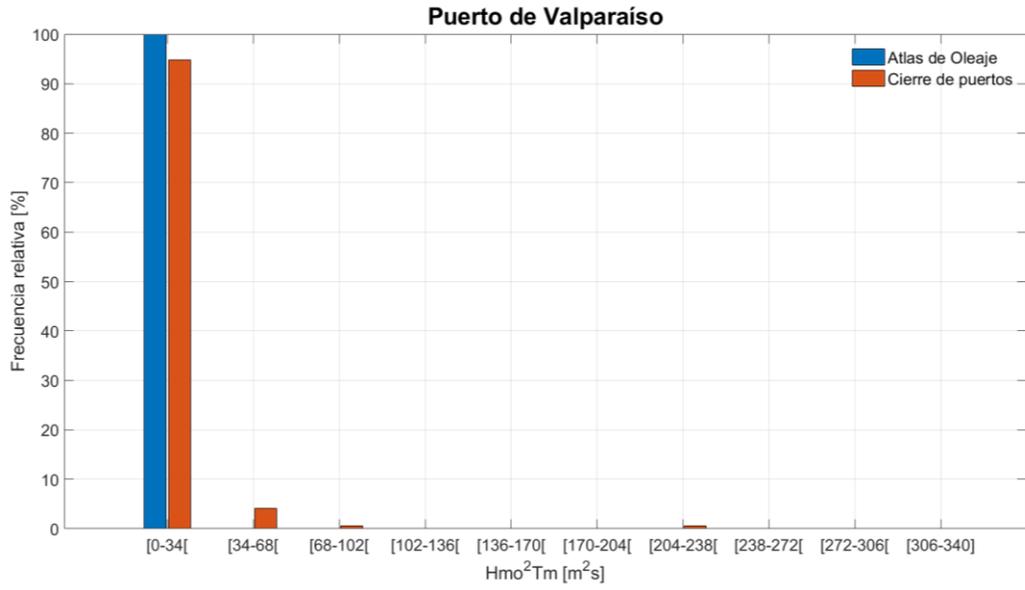


7.3.9 Histogramas cierre de puertos versus potencia



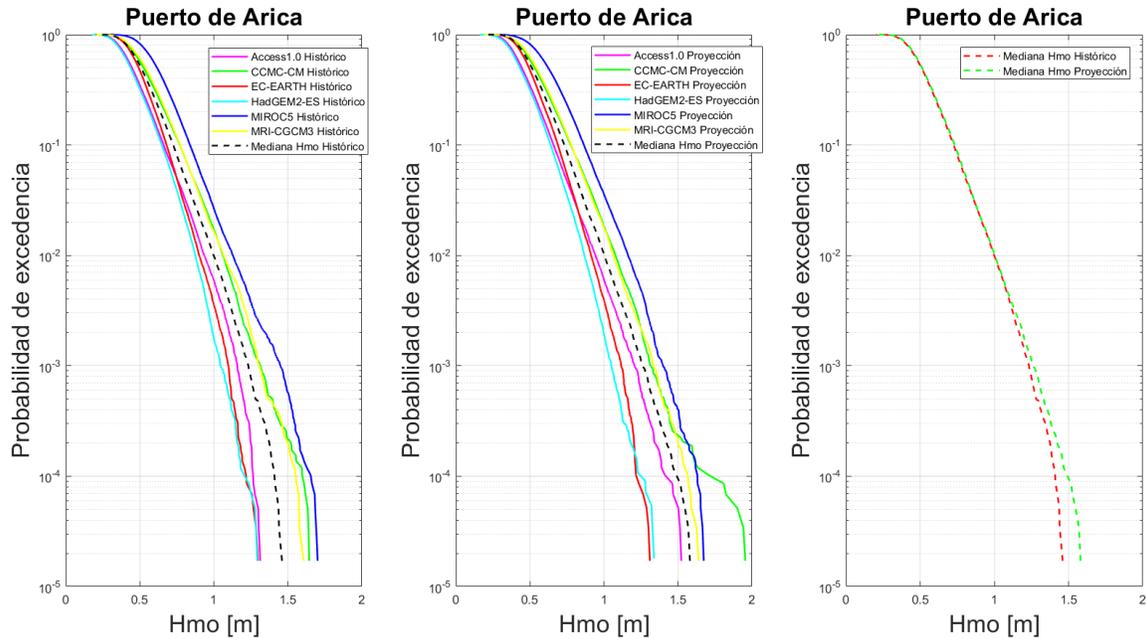




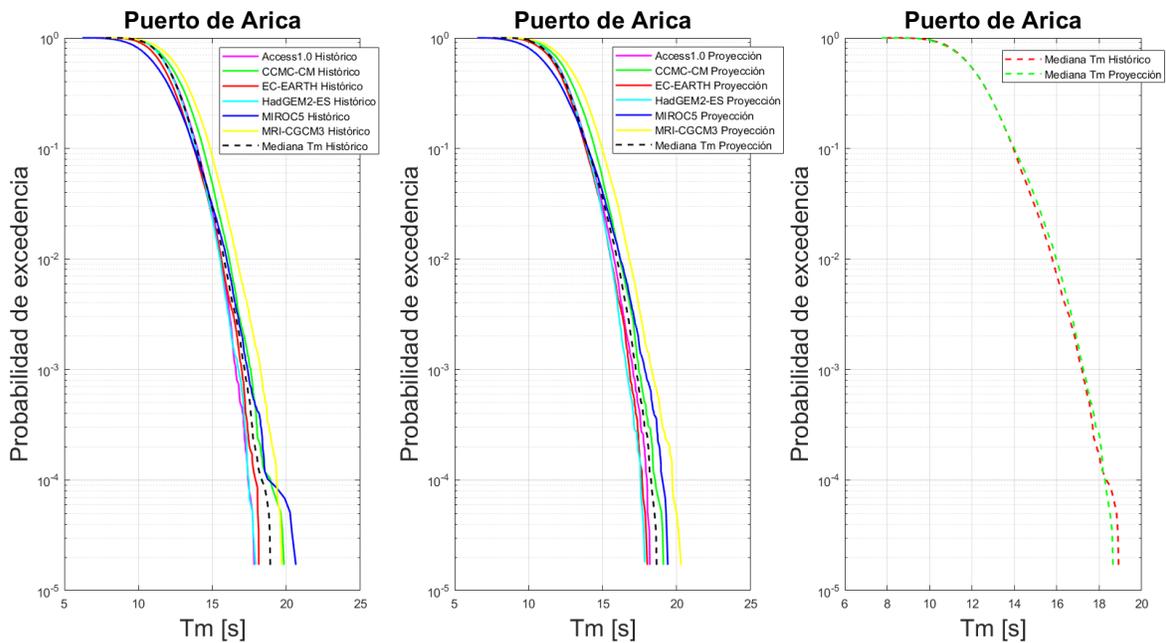


7.4 CURVAS DE EXCEDENCIA DE OLAJE

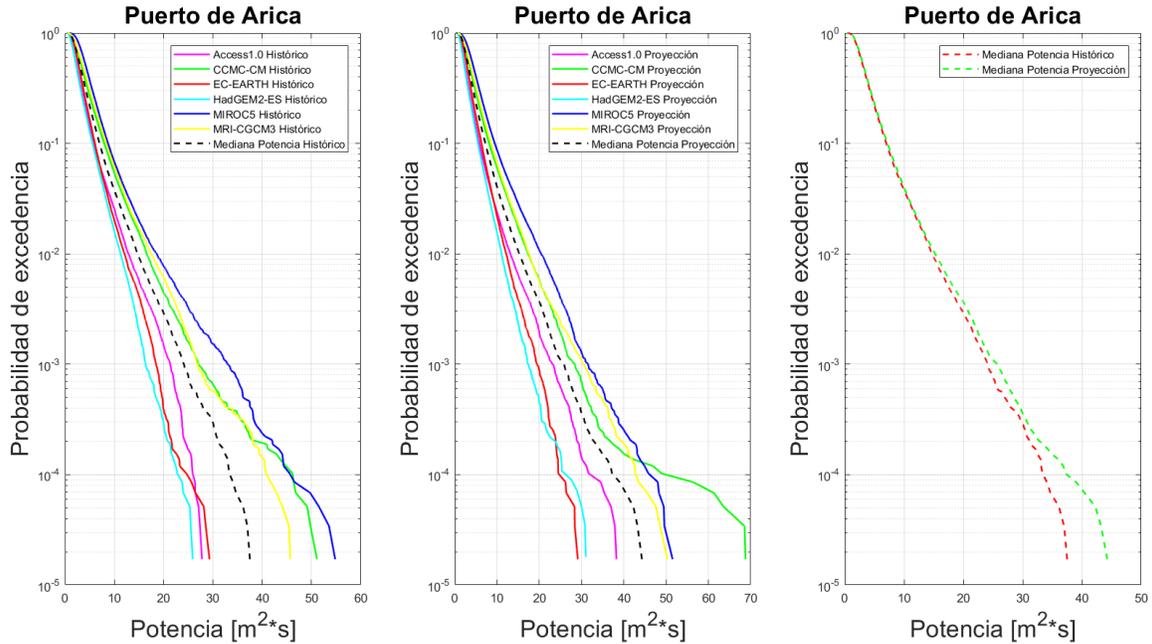
Probabilidad de excedencia altura significativa (H_{mo}) en el puerto de Arica para los 6 modelos y mediana en el período histórico 1985-2004 (izquierda) y proyección 2026-2045 (centro). La figura de la derecha muestra la diferencia entre las medianas históricas y de la proyección.



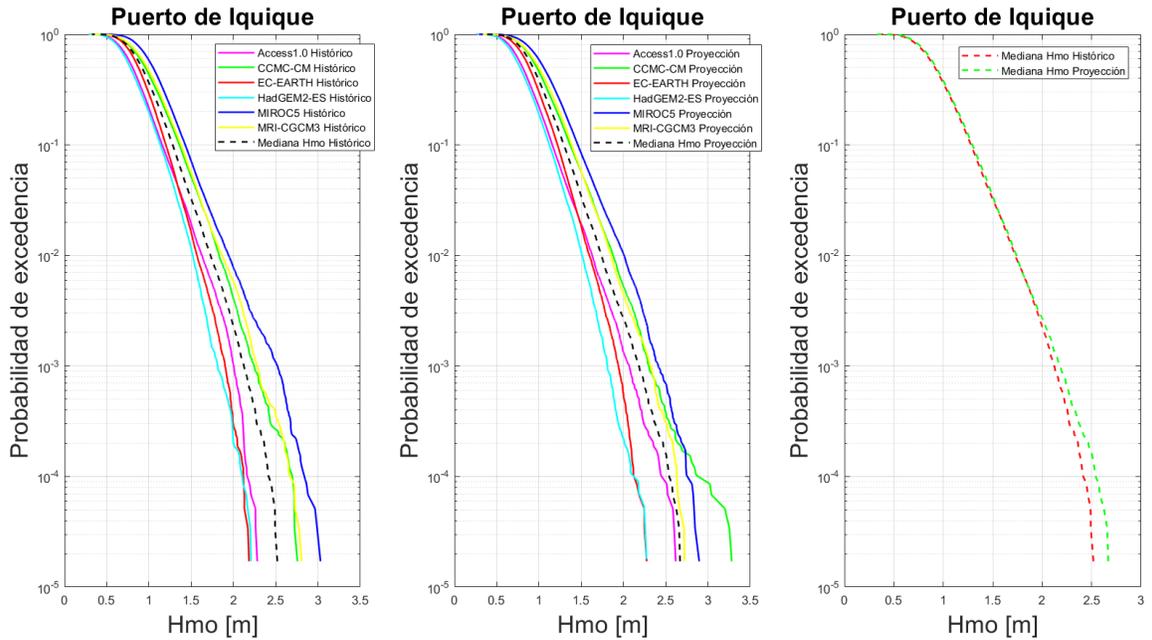
Probabilidad de excedencia período medio (T_m) en el puerto de Arica para los 6 modelos y mediana en el período histórico 1985-2004 (izquierda) y proyección 2026-2045 (centro). La figura de la derecha muestra la diferencia entre las medianas históricas y de la proyección.



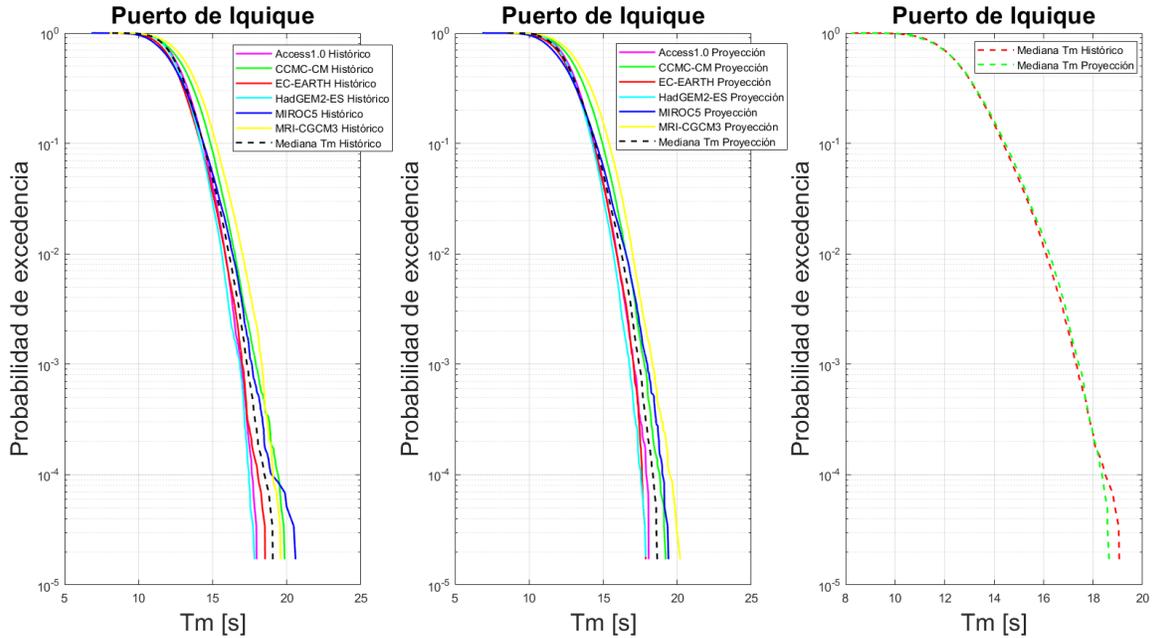
Probabilidad de excedencia potencia normalizada (Hmo2Tm) en el puerto de Arica para los 6 modelos y mediana en el período histórico 1985-2004 (izquierda) y proyección 2026-2045 (centro). La figura de la derecha muestra la diferencia entre las medianas históricas y de la proyección.



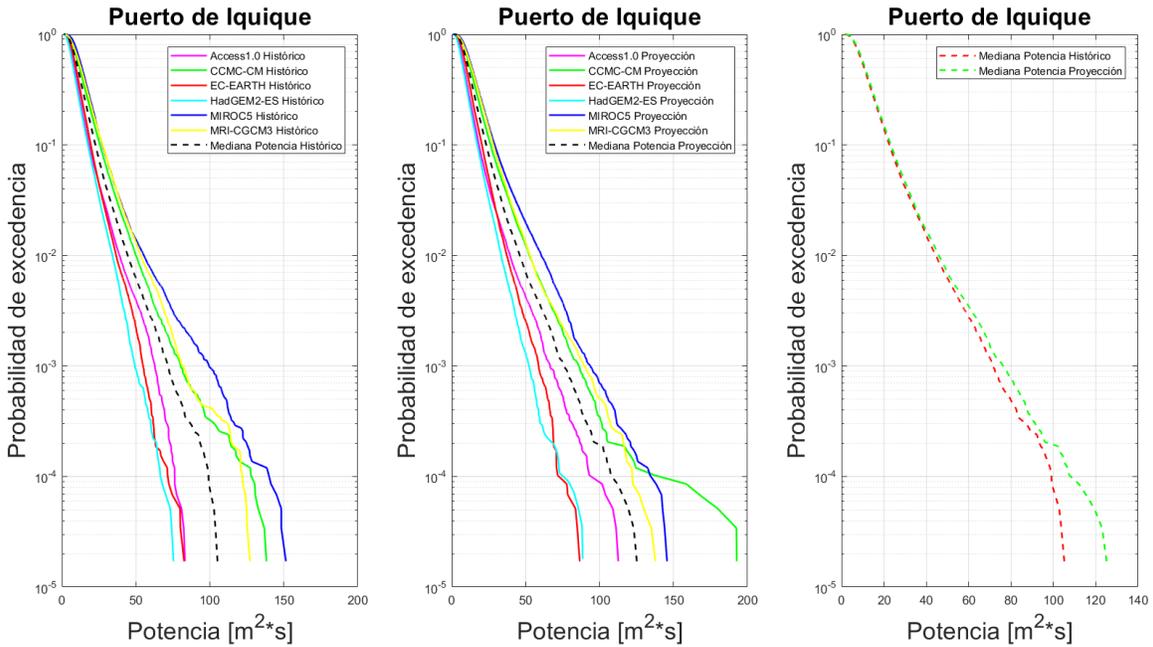
Probabilidad de excedencia altura significativa (Hmo) en el puerto de Iquique para los 6 modelos y mediana en el período histórico 1985-2004 (izquierda) y proyección 2026-2045 (centro). La figura de la derecha muestra la diferencia entre las medianas históricas y de la proyección.



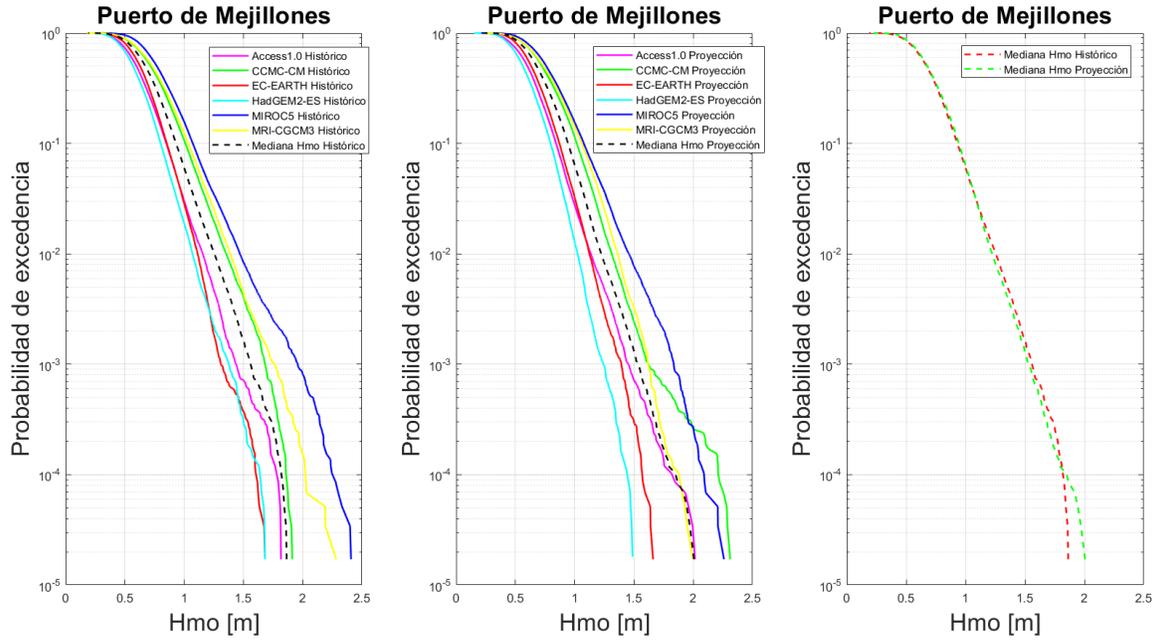
Probabilidad de excedencia período medio (T_m) en el puerto de Iquique para los 6 modelos y mediana en el período histórico 1985-2004 (izquierda) y proyección 2026-2045 (centro). La figura de la derecha muestra la diferencia entre las medianas históricas y de la proyección.



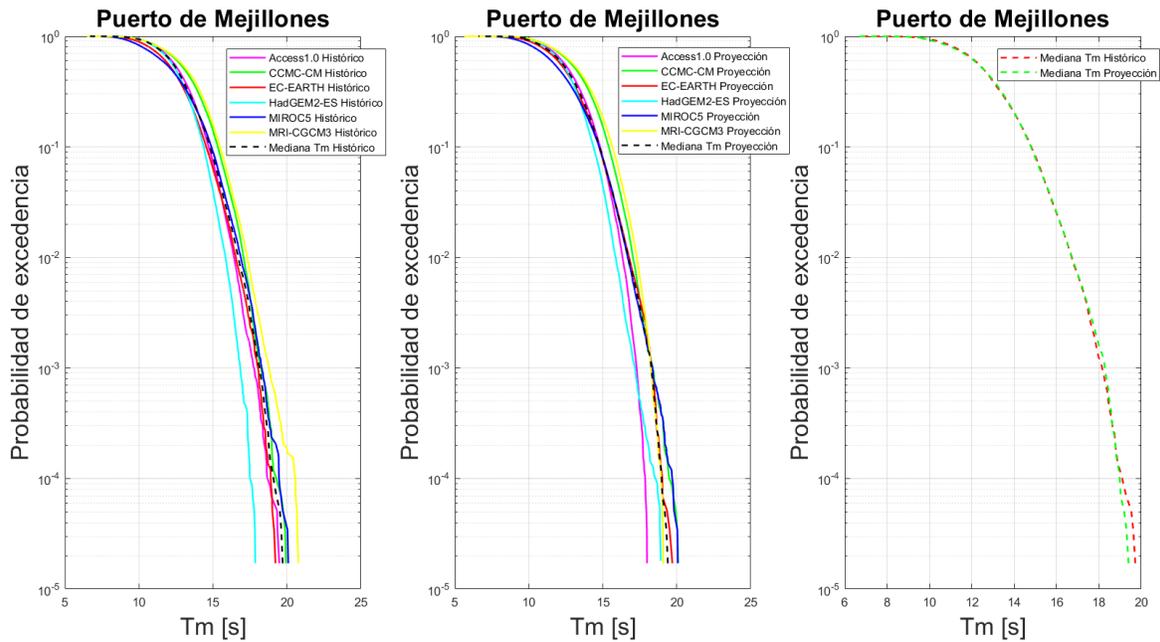
Probabilidad de excedencia potencia normalizada ($H_{m0}2T_m$) en el puerto de Iquique para los 6 modelos y mediana en el período histórico 1985-2004 (izquierda) y proyección 2026-2045 (centro). La figura de la derecha muestra la diferencia entre las medianas históricas y de la proyección.



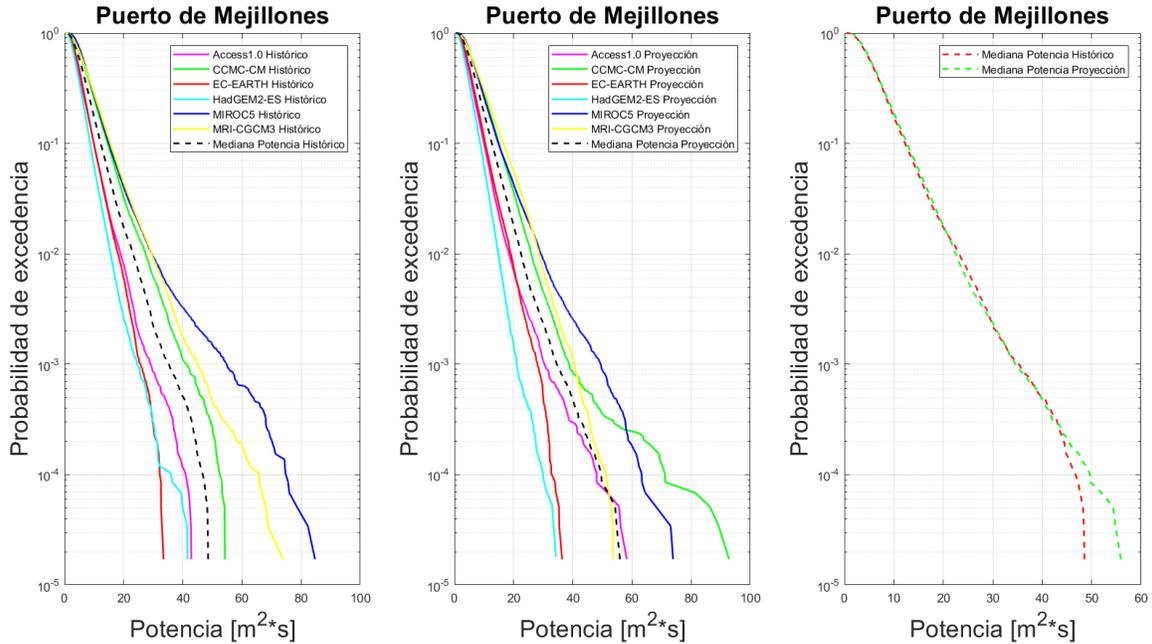
Probabilidad de excedencia altura significativa (Hmo) en el puerto de Mejillones para los 6 modelos y mediana en el período histórico 1985-2004 (izquierda) y proyección 2026-2045 (centro). La figura de la derecha muestra la diferencia entre las medianas históricas y de la proyección.



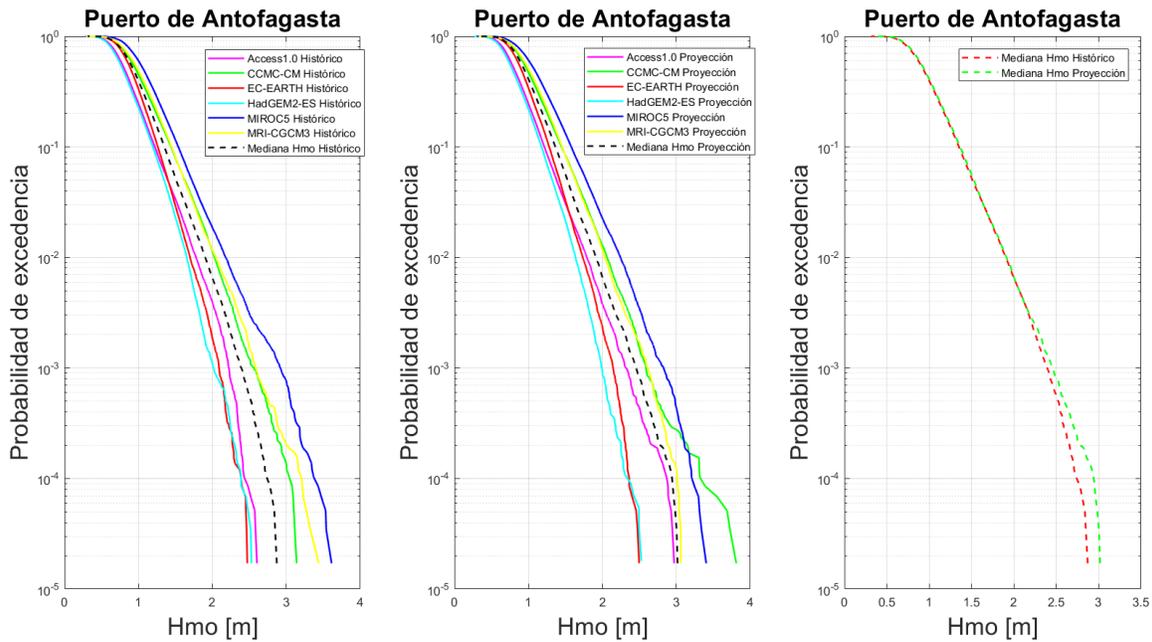
Probabilidad de excedencia período medio (Tm) en el puerto de Mejillones para los 6 modelos y mediana en el período histórico 1985-2004 (izquierda) y proyección 2026-2045 (centro). La figura de la derecha muestra la diferencia entre las medianas históricas y de la proyección.



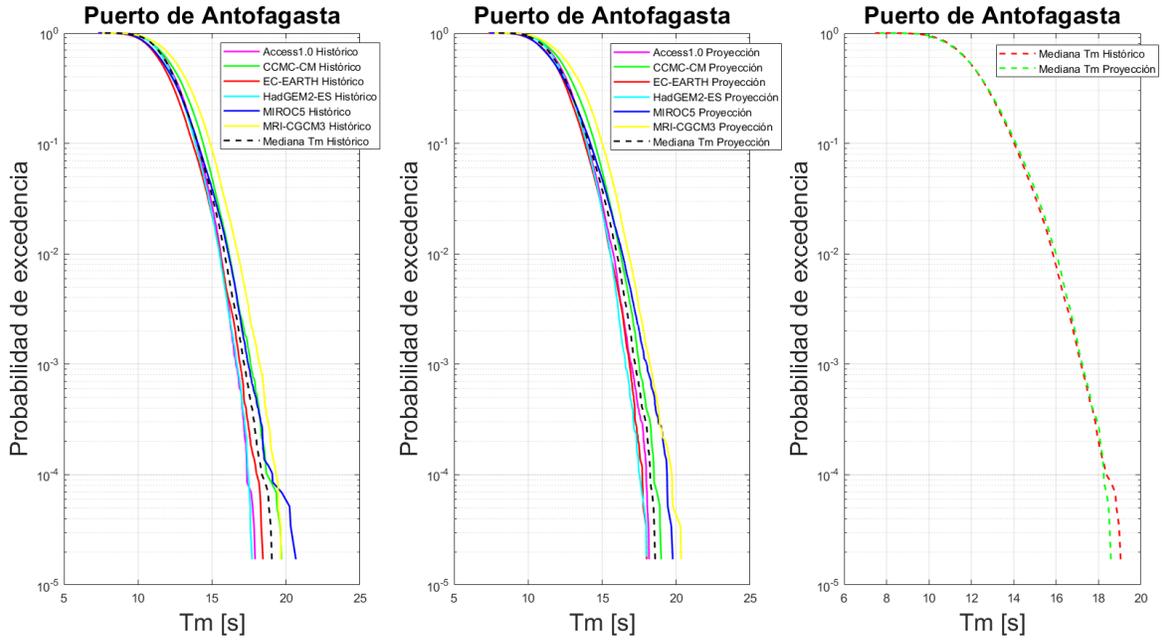
Probabilidad de excedencia potencia normalizada (Hmo2Tm) en el puerto de Mejillones para los 6 modelos y mediana en el período histórico 1985-2004 (izquierda) y proyección 2026-2045 (centro). La figura de la derecha muestra la diferencia entre las medianas históricas y de la proyección.



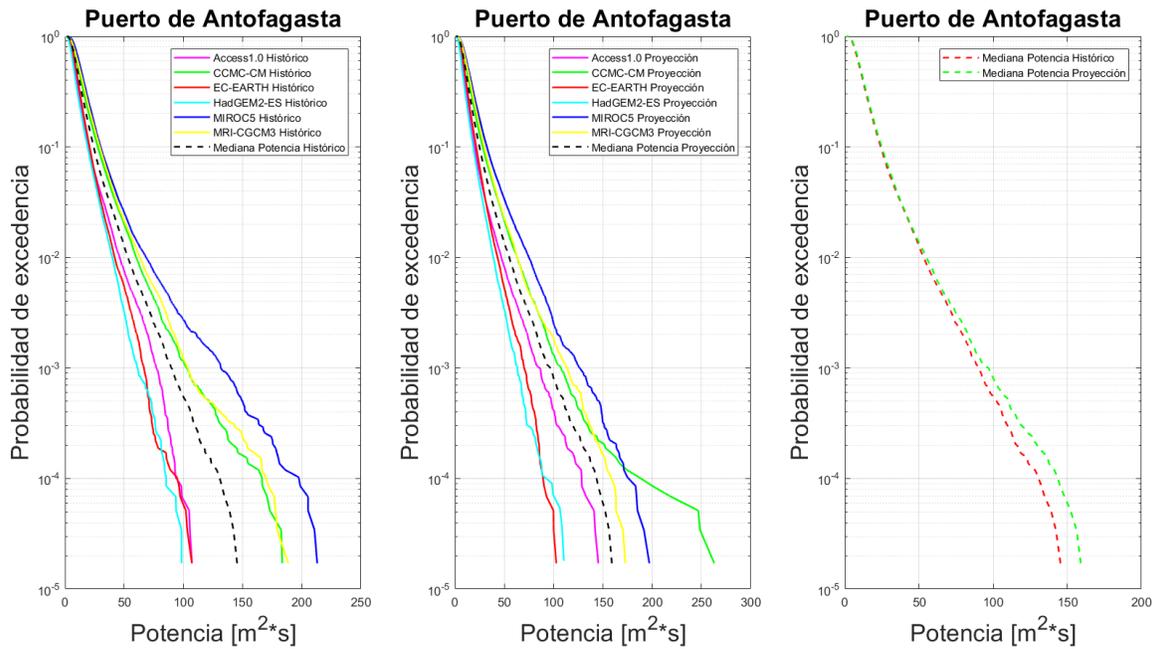
Probabilidad de excedencia altura significativa (Hmo) en el puerto de Antofagasta para los 6 modelos y mediana en el período histórico 1985-2004 (izquierda) y proyección 2026-2045 (centro). La figura de la derecha muestra la diferencia entre las medianas históricas y de la proyección.



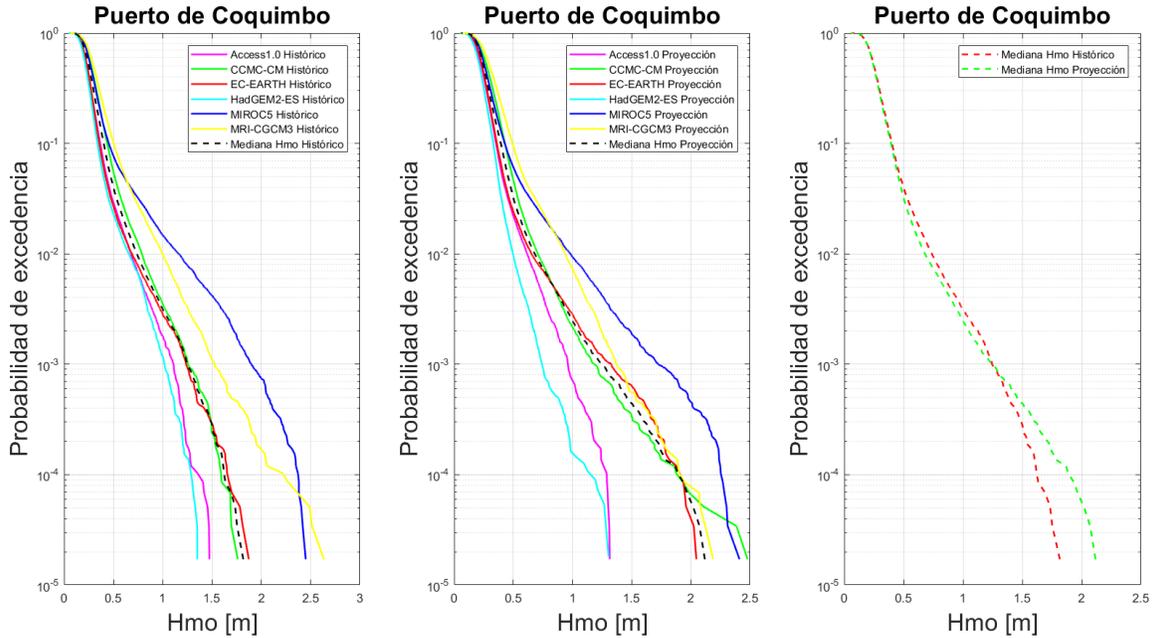
Probabilidad de excedencia período medio (T_m) en el puerto de Antofagasta para los 6 modelos y mediana en el período histórico 1985-2004 (izquierda) y proyección 2026-2045 (centro). La figura de la derecha muestra la diferencia entre las medianas históricas y de la proyección.



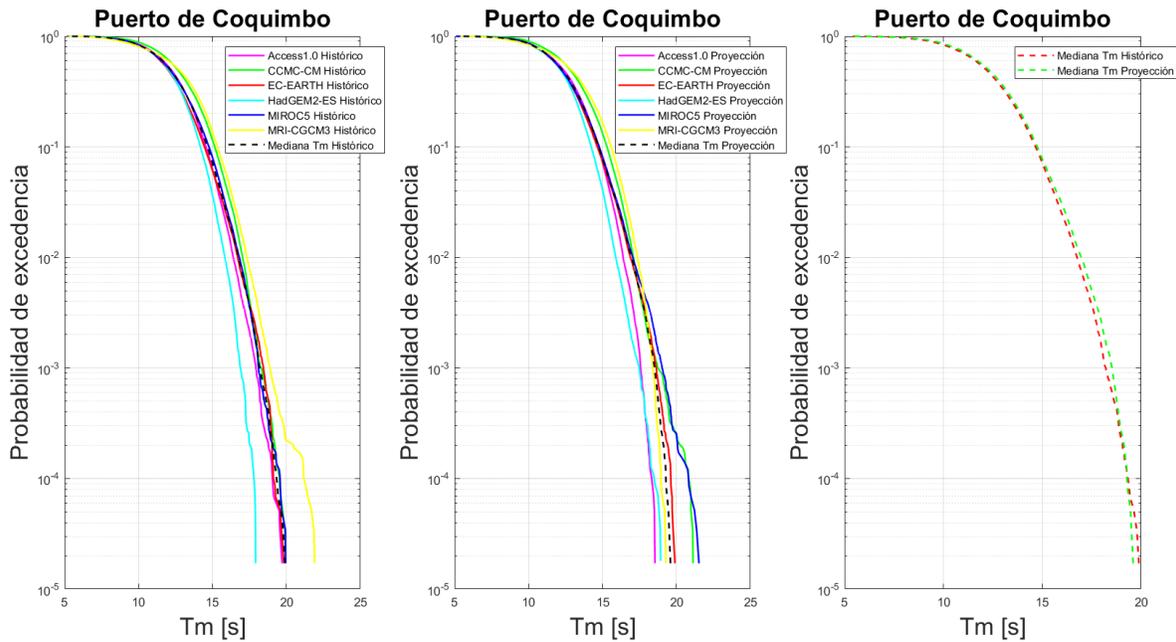
Probabilidad de excedencia potencia normalizada ($H_{m0}2T_m$) en el puerto de Antofagasta para los 6 modelos y mediana en el período histórico 1985-2004 (izquierda) y proyección 2026-2045 (centro). La figura de la derecha muestra la diferencia entre las medianas históricas y de la proyección.



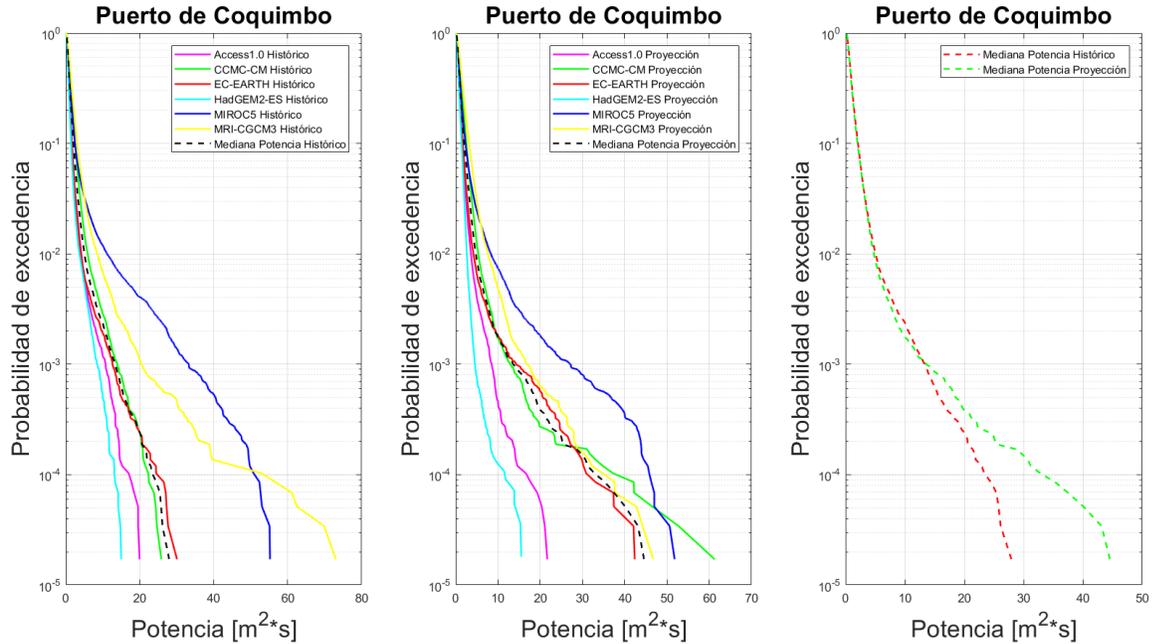
Probabilidad de excedencia altura significativa (Hmo) en el puerto de Coquimbo para los 6 modelos y mediana en el período histórico 1985-2004 (izquierda) y proyección 2026-2045 (centro). La figura de la derecha muestra la diferencia entre las medianas históricas y de la proyección.



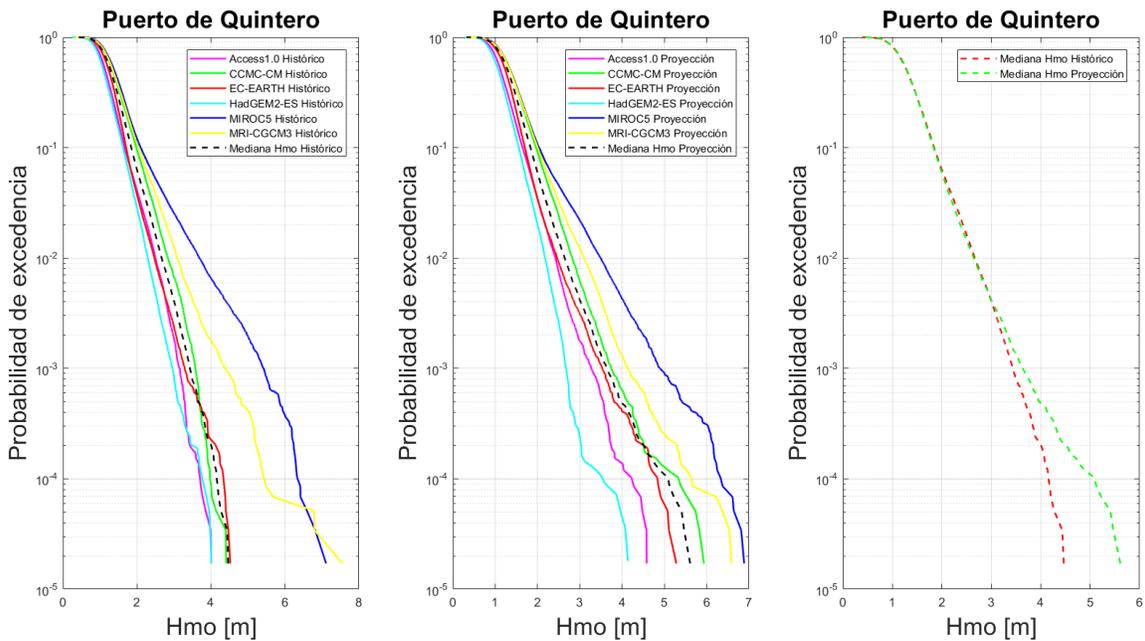
Probabilidad de excedencia período medio (Tm) en el puerto de Coquimbo para los 6 modelos y mediana en el período histórico 1985-2004 (izquierda) y proyección 2026-2045 (centro). La figura de la derecha muestra la diferencia entre las medianas históricas y de la proyección.



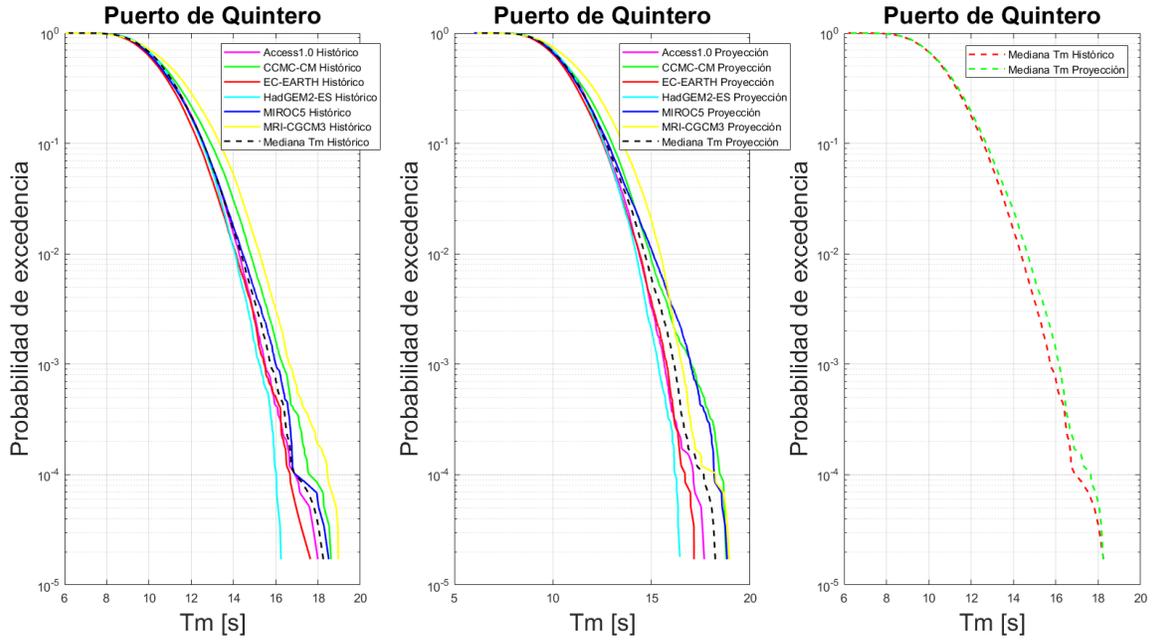
Probabilidad de excedencia potencia normalizada (Hmo2Tm) en el puerto de Coquimbo para los 6 modelos y mediana en el período histórico 1985-2004 (izquierda) y proyección 2026-2045 (centro). La figura de la derecha muestra la diferencia entre las medianas históricas y de la proyección.



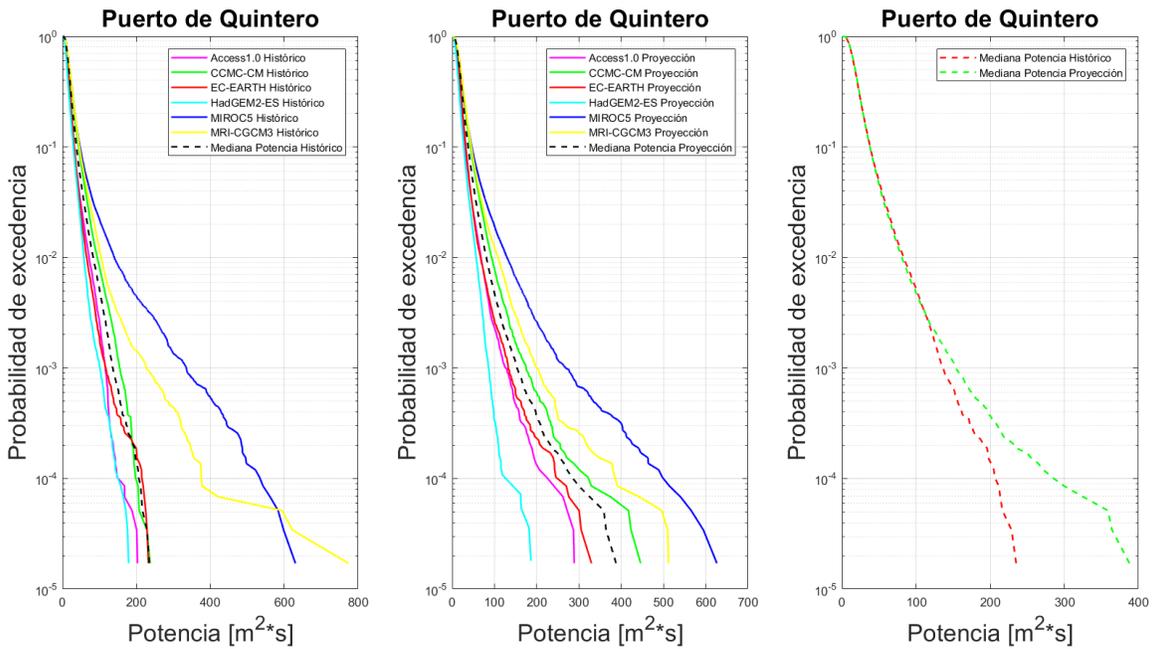
Probabilidad de excedencia altura significativa (Hmo) en el puerto de Quintero para los 6 modelos y mediana en el período histórico 1985-2004 (izquierda) y proyección 2026-2045 (centro). La figura de la derecha muestra la diferencia entre las medianas históricas y de la proyección.



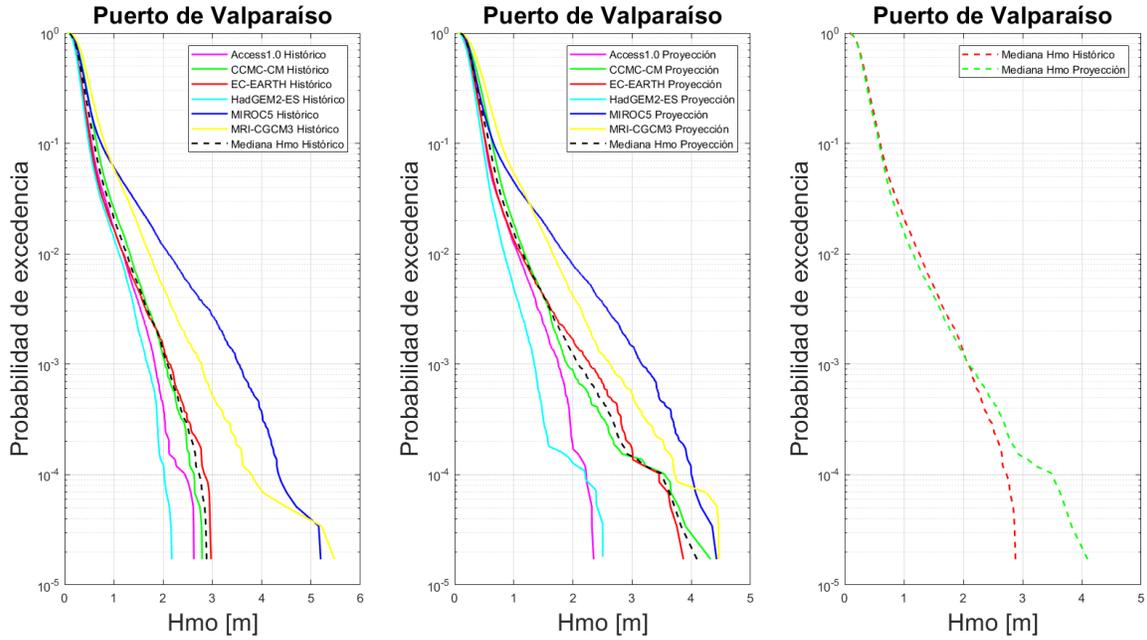
Probabilidad de excedencia período medio (T_m) en el puerto de Quintero para los 6 modelos y mediana en el período histórico 1985-2004 (izquierda) y proyección 2026-2045 (centro). La figura de la derecha muestra la diferencia entre las medianas históricas y de la proyección.



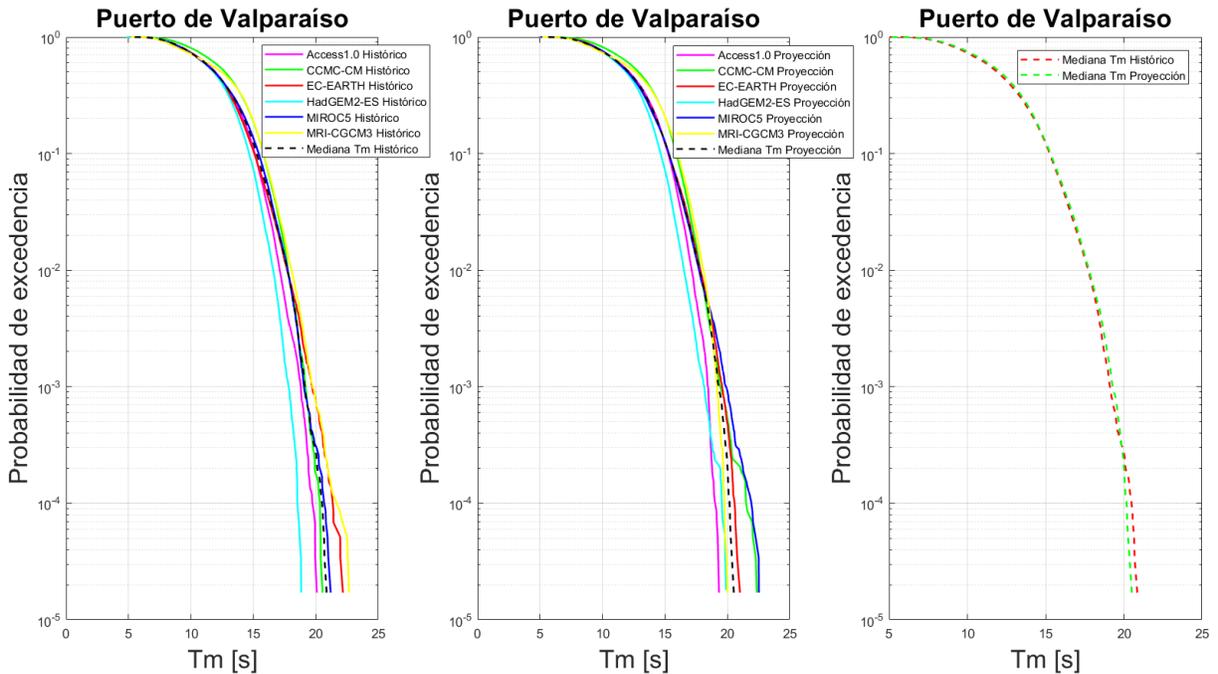
Probabilidad de excedencia potencia normalizada (H_{mo2Tm}) en el puerto de Quintero para los 6 modelos y mediana en el período histórico 1985-2004 (izquierda) y proyección 2026-2045 (centro). La figura de la derecha muestra la diferencia entre las medianas históricas y de la proyección.



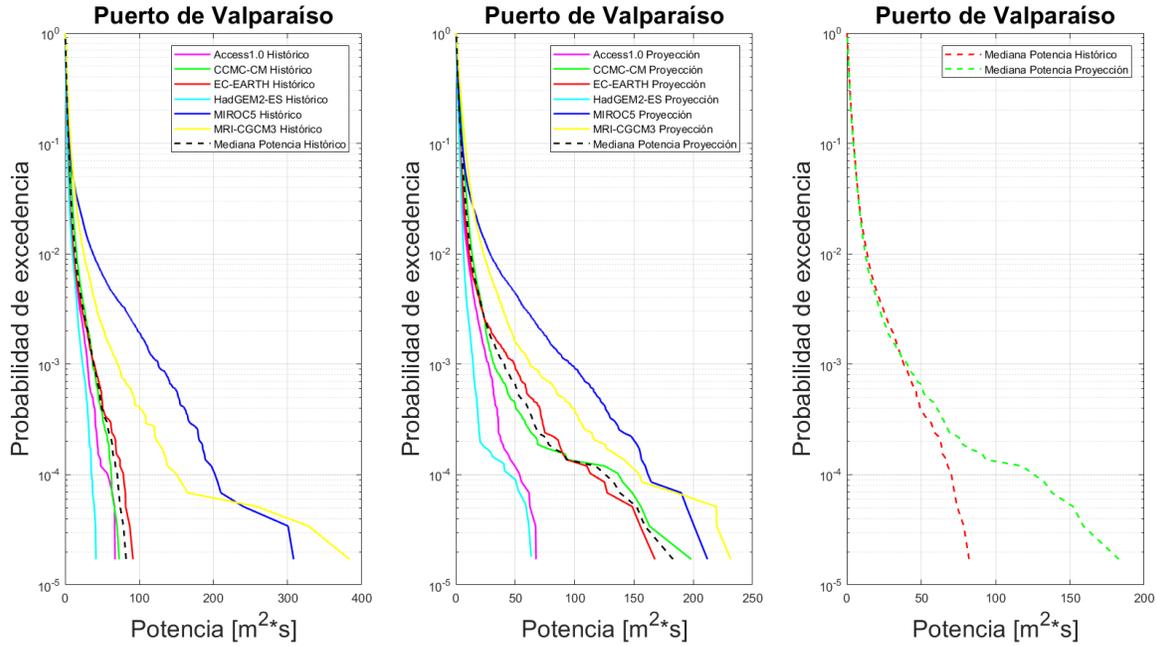
Probabilidad de excedencia altura significativa (Hmo) en el puerto de Valparaíso para los 6 modelos y mediana en el período histórico 1985-2004 (izquierda) y proyección 2026-2045 (centro). La figura de la derecha muestra la diferencia entre las medianas históricas y de la proyección.



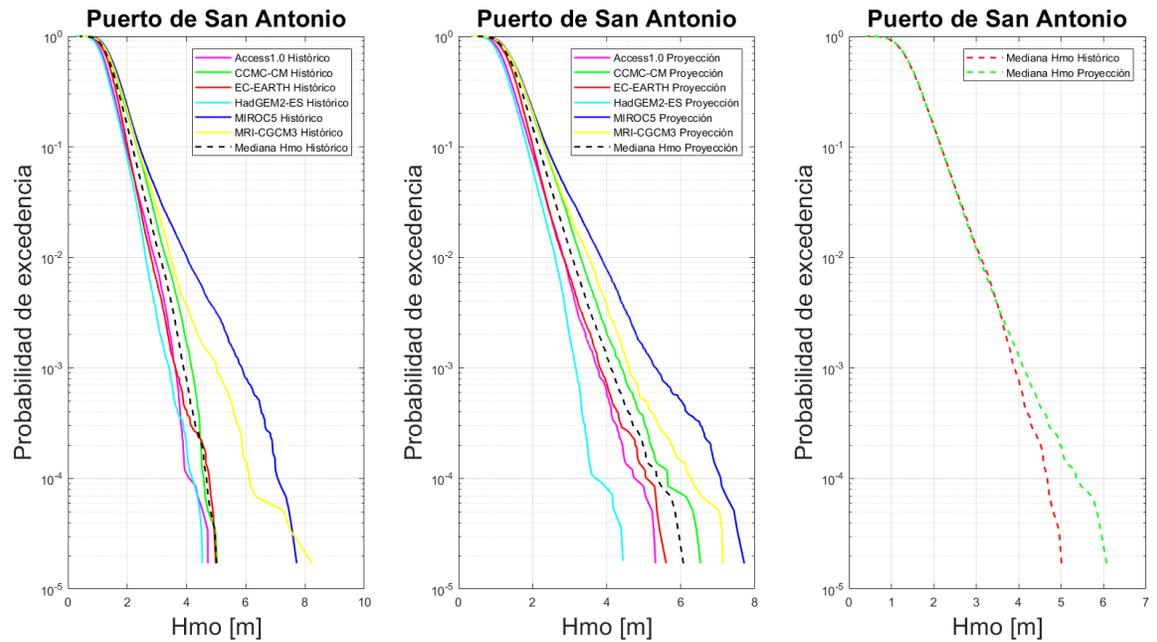
Probabilidad de excedencia período medio (Tm) en el puerto de Valparaíso para los 6 modelos y mediana en el período histórico 1985-2004 (izquierda) y proyección 2026-2045 (centro). La figura de la derecha muestra la diferencia entre las medianas históricas y de la proyección.



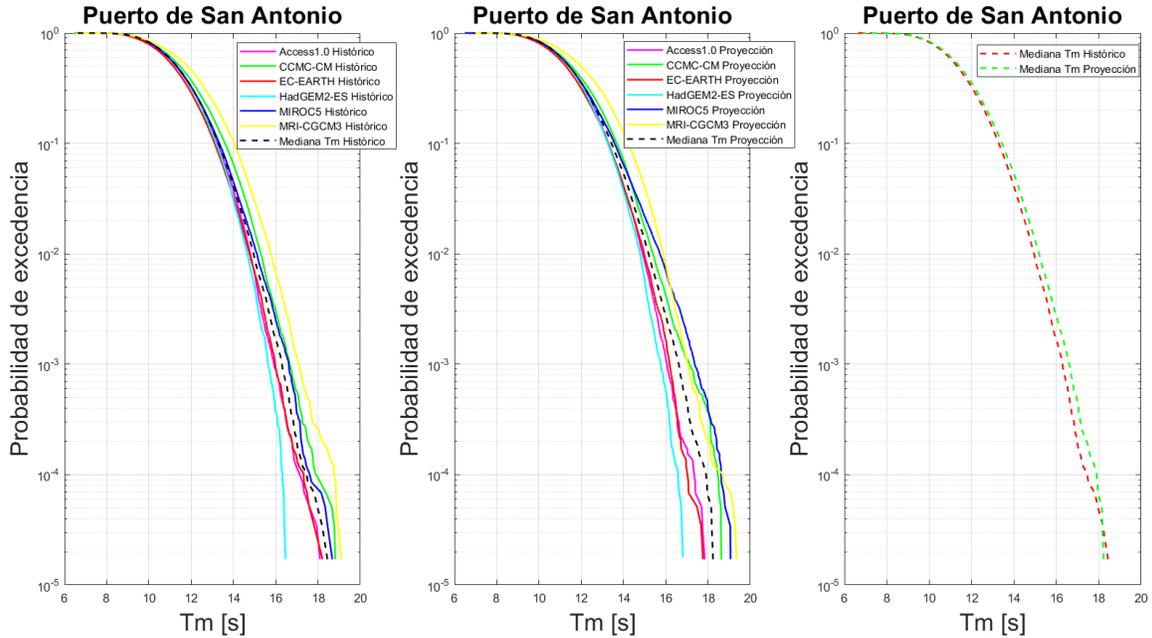
Probabilidad de excedencia potencia normalizada (Hmo2Tm) en el puerto de Valparaíso para los 6 modelos y mediana en el período histórico 1985-2004 (izquierda) y proyección 2026-2045 (centro). La figura de la derecha muestra la diferencia entre las medianas históricas y de la proyección.



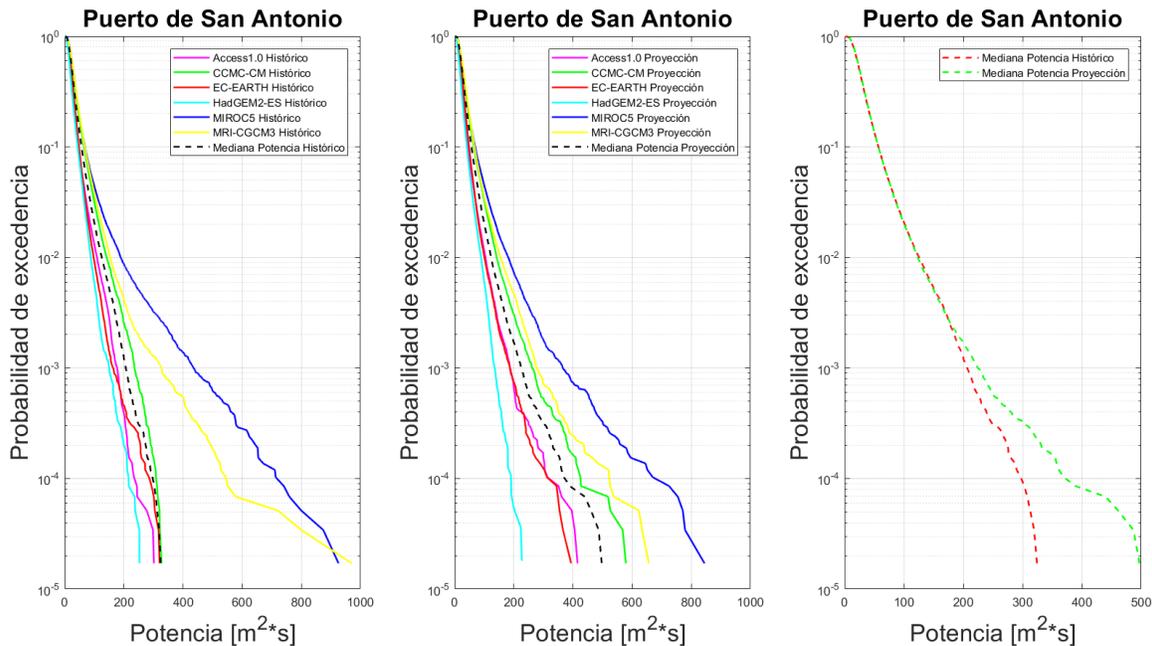
Probabilidad de excedencia altura significativa (Hmo) en el puerto de San Antonio para los 6 modelos y mediana en el período histórico 1985-2004 (izquierda) y proyección 2026-2045 (centro). La figura de la derecha muestra la diferencia entre las medianas históricas y de la proyección.



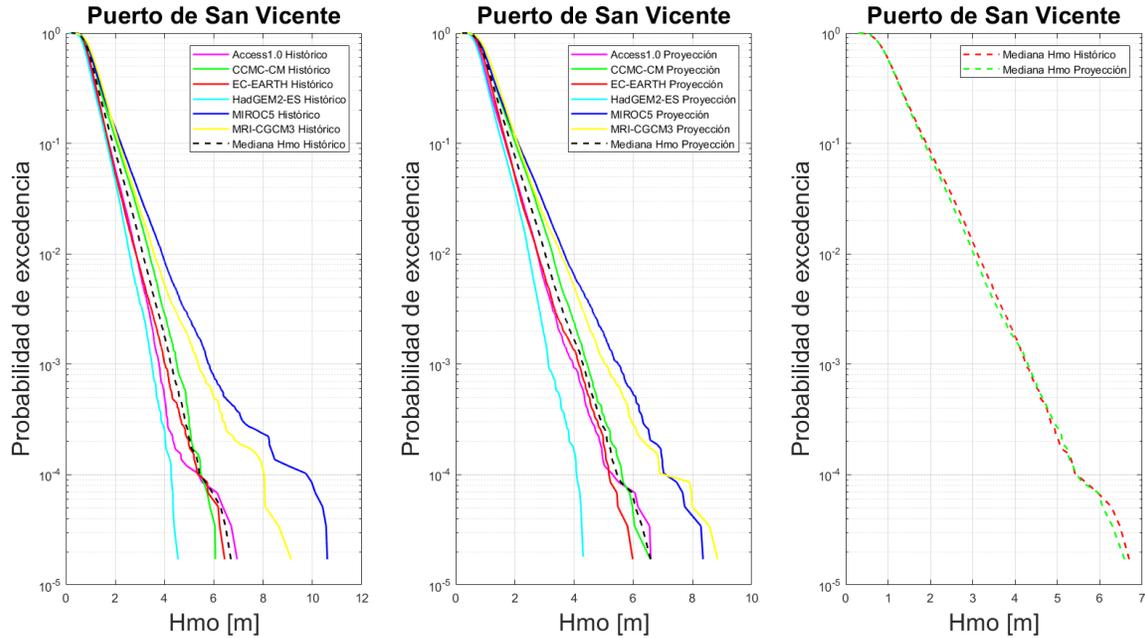
Probabilidad de excedencia período medio (T_m) en el puerto de San Antonio para los 6 modelos y mediana en el período histórico 1985-2004 (izquierda) y proyección 2026-2045 (centro). La figura de la derecha muestra la diferencia entre las medianas históricas y de la proyección.



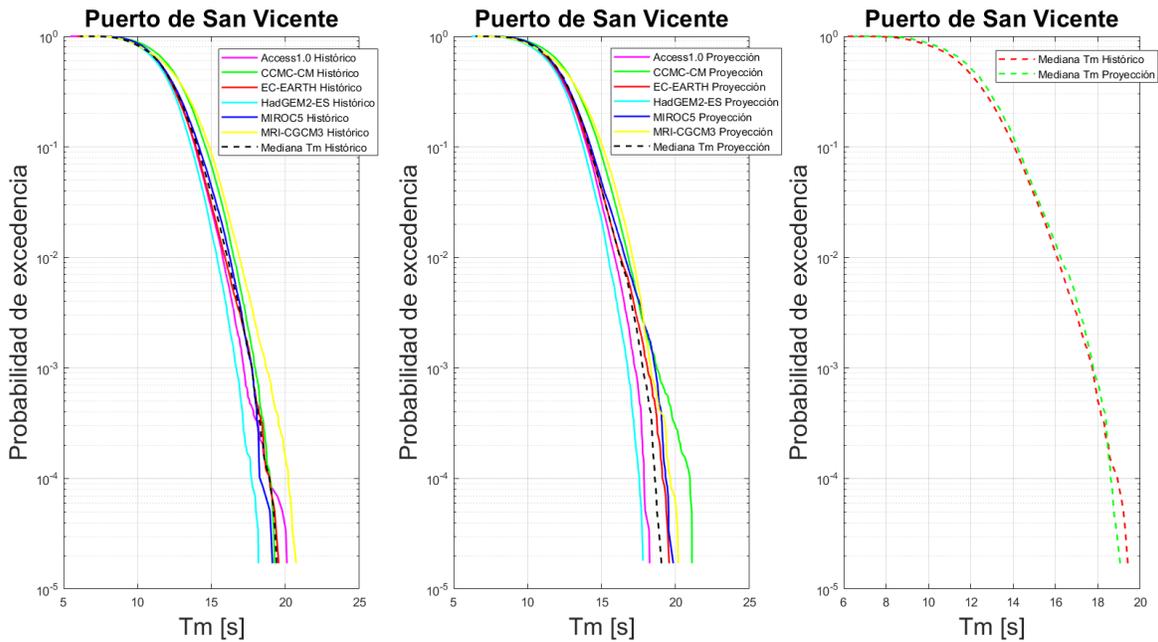
Probabilidad de excedencia potencia normalizada (H_{m02Tm}) en el puerto de San Antonio para los 6 modelos y mediana en el período histórico 1985-2004 (izquierda) y proyección 2026-2045 (centro). La figura de la derecha muestra la diferencia entre las medianas históricas y de la proyección.



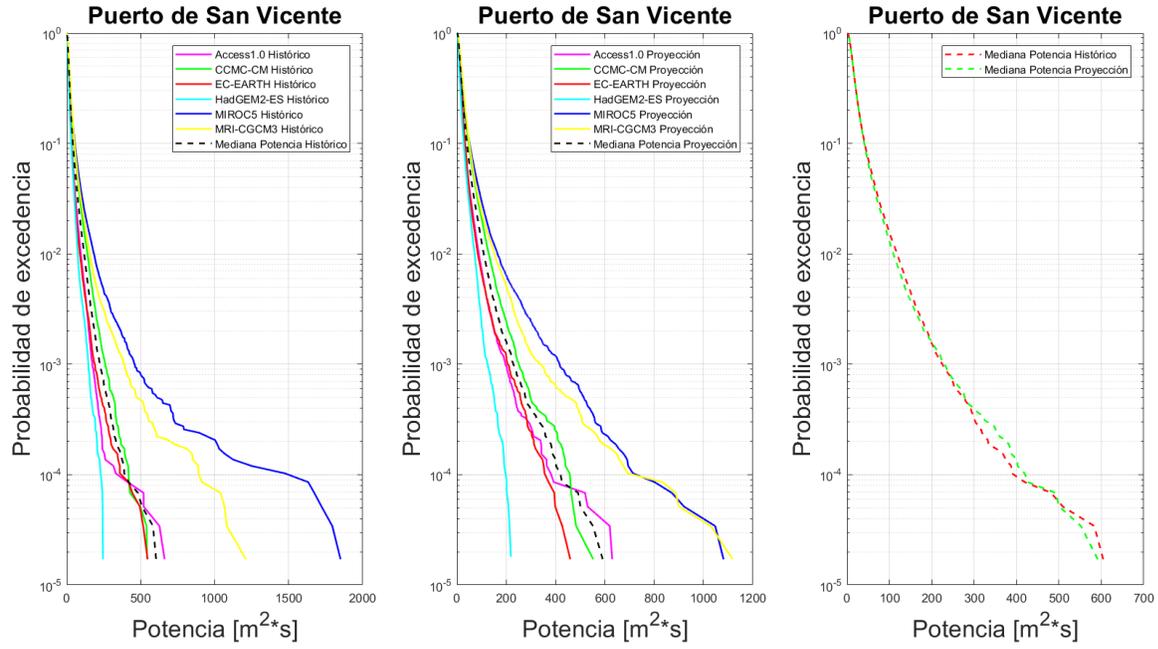
Probabilidad de excedencia altura significativa (Hmo) en el puerto de San Vicente para los 6 modelos y mediana en el período histórico 1985-2004 (izquierda) y proyección 2026-2045 (centro). La figura de la derecha muestra la diferencia entre las medianas históricas y de la proyección.



Probabilidad de excedencia período medio (Tm) en el puerto de San Vicente para los 6 modelos y mediana en el período histórico 1985-2004 (izquierda) y proyección 2026-2045 (centro). La figura de la derecha muestra la diferencia entre las medianas históricas y de la proyección.



Probabilidad de excedencia potencia normalizada (Hmo2Tm) en el puerto de San Vicente para los 6 modelos y mediana en el período histórico 1985-2004 (izquierda) y proyección 2026-2045 (centro). La figura de la derecha muestra la diferencia entre las medianas históricas y de la proyección.



7.1 DOWNTIME HISTÓRICOS Y PROYECTADOS PARA LOS 9 PUERTOS

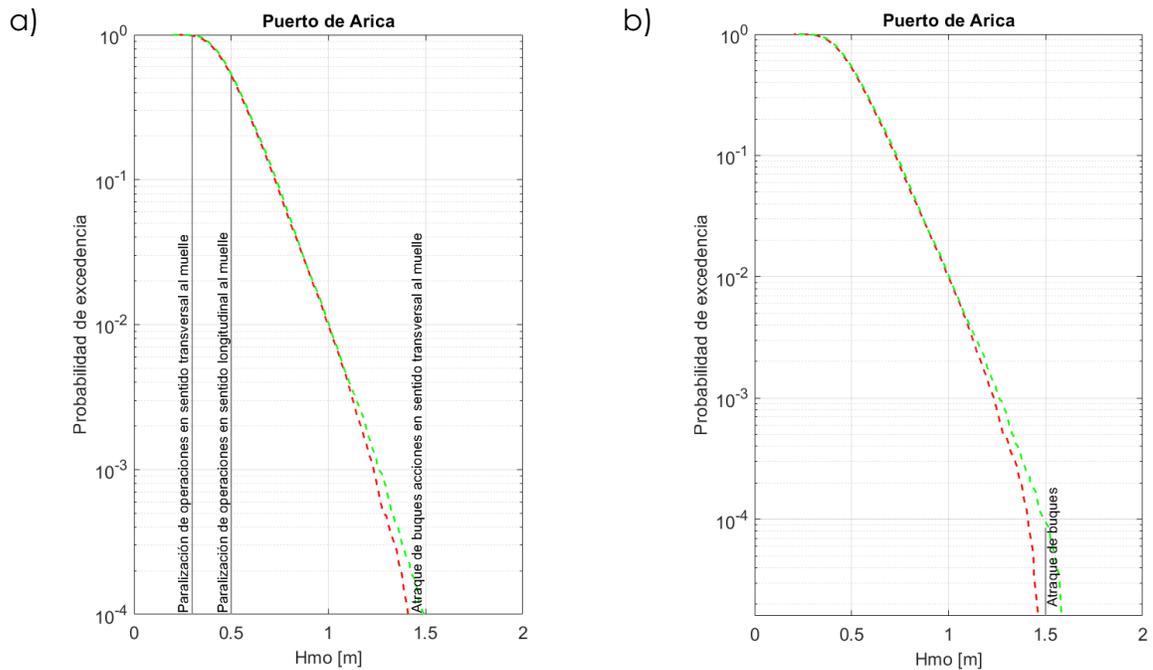
Downtime puerto de Arica. Umbrales definidos por la ROM 3.1-99 (PPEE, 1999).

Descripción umbral	Hs umbral (m)	P _{excedencia} 1985-2004	P _{excedencia} 2026-2045	Downtime 1985-2004 [Horas/año]	Downtime 2026-2045 [Horas/año]	Downtime Diferencia [Horas/año]
Paralización de operaciones. Acciones en sentido transversal al muelle	0.3	98.58%	99.13%	99.13%	8636	8684
Paralización de operaciones. Acciones en sentido longitudinal al muelle	0.5	52.62%	54.00%	54.00%	4609	4730
Atraque de buques. Acciones en sentido transversal al muelle	1.5	-	0.01%	8.56E-05	-	1
Atraque de buques. Acciones en sentido longitudinal al muelle	2.0	-	-	-	-	-

Downtime puerto de Arica. Umbrales definidos por Capitanía de Puerto.

Descripción umbral	Hs umbral (m)	P _{excedencia} 1985-2004	P _{excedencia} 2026-2045	Downtime 1985-2004 [Horas/año]	Downtime 2026-2045 [Horas/año]	Downtime Diferencia [Horas/año]
Maniobras de atraque / amarre	1,5	-	8,56E-05	-	1	-
Maniobras de desatraque/ desamarre	Sin restricción	-	-	-	-	-
Permanencia en sitio o terminal marítimo	Sin restricción	-	-	-	-	-
Ejecución de faenas de carga y / o descarga	Sin restricción	-	-	-	-	-

Probabilidad de excedencia de medianas históricas (rojo) y proyecciones (verde) de la altura significativa (Hmo) en el puerto de Arica. Umbrales a a) partir de ROM y b) Capitanías de Puerto.



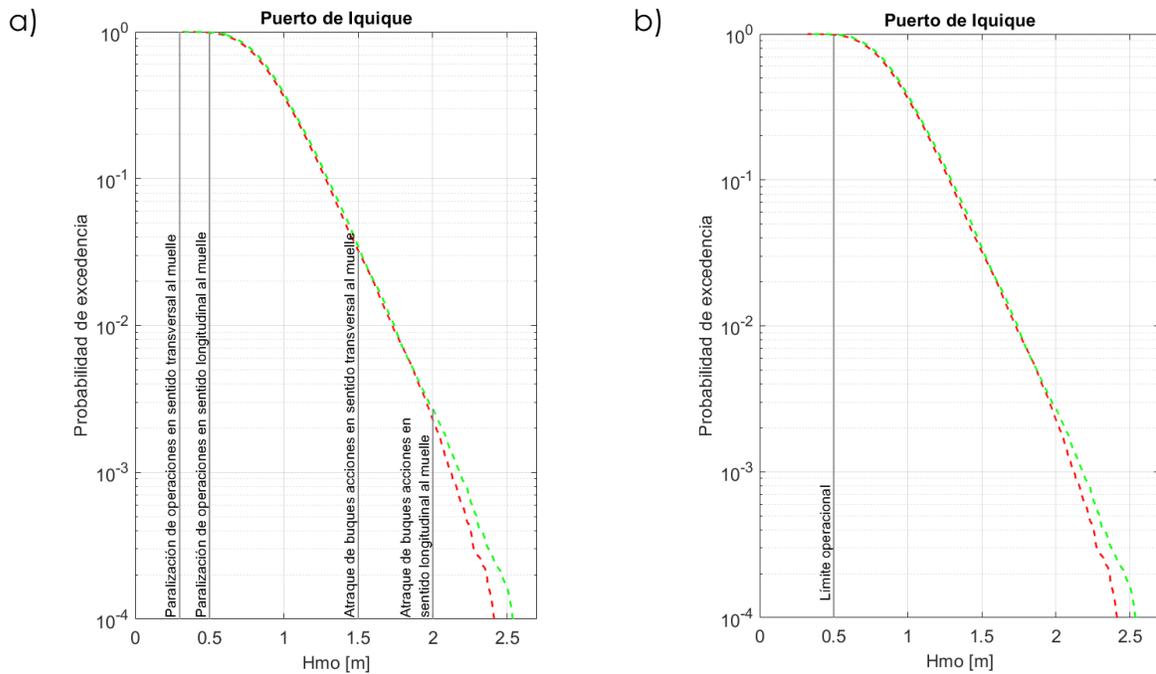
Downtime puerto de Iquique. Umbrales definidos por la ROM 3.1-99 (PPEE, 1999).

Descripción umbral	Hs umbral (m)	P _{excedencia} 1985-2004	P _{excedencia} 2026-2045	Downtime 1985-2004 [Horas/año]	Downtime 2026-2045 [Horas/año]	Downtime Diferencia [Horas/año]
Paralización de operaciones. Acciones en sentido transversal al muelle	0.3	-	-	-	-	-
Paralización de operaciones. Acciones en sentido longitudinal al muelle	0.5	99.38%	98.87%	8661	8706	45
Atraque de buques. Acciones en sentido transversal al muelle	1.5	3.44%	3.23%	283	302	19
Atraque de buques. Acciones en sentido longitudinal al muelle	2.0	0.27%	0.23%	20	24	4

Downtime puerto de Iquique. Umbrales definidos por Capitanía de Puerto.

Descripción umbral	Hs umbral (m)	P _{excedencia} 1985-2004	P _{excedencia} 2026-2045	Downtime 1985-2004 [Horas/año]	Downtime 2026-2045 [Horas/año]	Downtime Diferencia [Horas/año]
Naves de eslora < 270 [m]	0,5	98,87%	99,38%	8661	8706	45
Naves de eslora > 270 y < 304 [m]	0,5	98,87%	99,38%	8661	8706	45
Naves de eslora > 304 y < 348,5 [m]	0,5	98,87%	99,38%	8661	8706	45

Probabilidad de excedencia de medianas históricas (rojo) y proyecciones (verde) de la altura significativa (Hmo) en el puerto de Iquique. Umbrales a a) partir de ROM y b) Capitanías de Puerto.



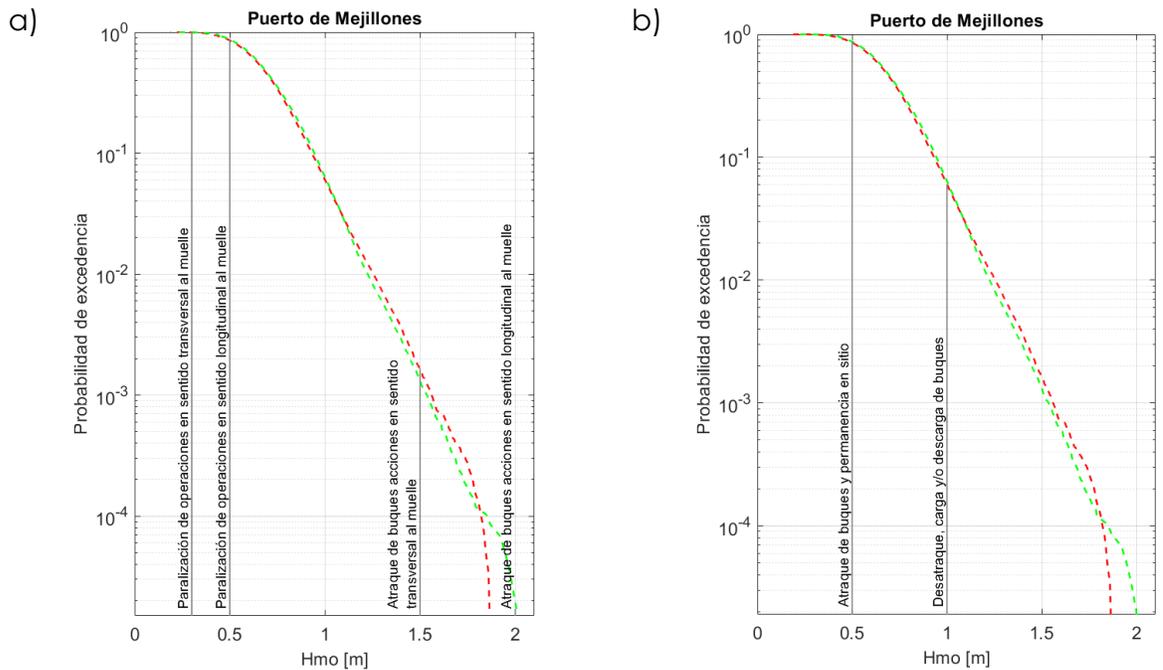
Downtime puerto de Mejillones. Umbrales definidos por la ROM 3.1-99 (PPEE, 1999).

Descripción umbral	Hs umbral (m)	P _{excedencia} 1985-2004	P _{excedencia} 2026-2045	Downtime 1985-2004 [Horas/año]	Downtime 2026-2045 [Horas/año]	Downtime Diferencia [Horas/año]
Paralización de operaciones. Acciones en sentido transversal al muelle	0.3	99.53%	99.75%	8719	8738	19
Paralización de operaciones. Acciones en sentido longitudinal al muelle	0.5	85.46%	86.98%	7486	7619	133
Atraque de buques. Acciones en sentido transversal al muelle	1.5	0.17%	0.13%	15	12	-3
Atraque de buques. Acciones en sentido longitudinal al muelle	2.0	-	0.00%	-	0	-

Downtime puerto de Mejillones. Umbrales definidos por Capitanía de Puerto.

Descripción umbral	Hs umbral (m)	P _{excedencia} 1985-2004	P _{excedencia} 2026-2045	Downtime 1985-2004 [Horas/año]	Downtime 2026-2045 [Horas/año]	Downtime Diferencia [Horas/año]
Maniobras de atraque / amarre	0,5	85,46%	86,98%	7486	7619	133
Maniobras de desatraque/ desamarre	1,0	6,00%	6,37%	526	558	32
Permanencia en sitio o terminal marítimo	0,5	85,46%	86,98%	7486	7619	133
Ejecución de faenas de carga y / o descarga	1,0	6,00%	6,37E-02	526	558	32

Probabilidad de excedencia de medianas históricas (rojo) y proyecciones (verde) de la altura significativa (Hmo) en el puerto de Mejillones. Umbrales a a) partir de ROM y b) Capitanías de Puerto.



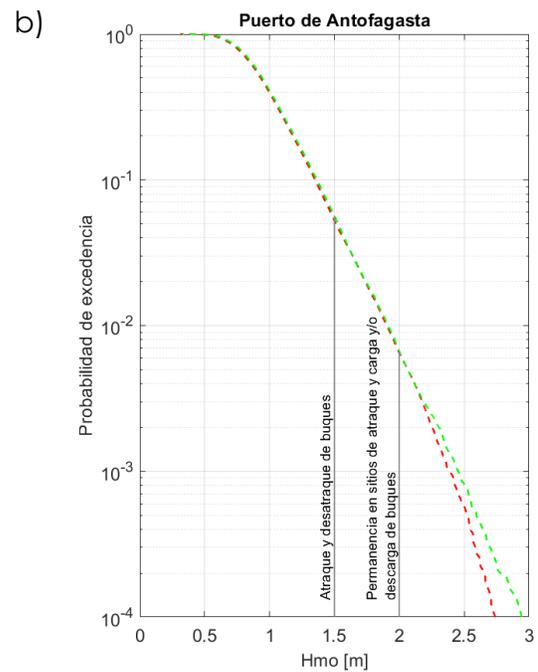
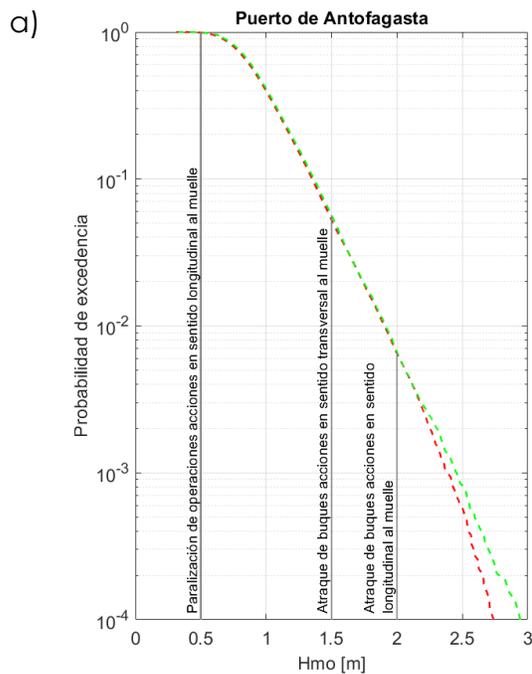
Downtime puerto de Antofagasta. Umbrales definidos por la ROM 3.1-99 (PPEE, 1999).

Descripción umbral	HS umbral (m)	P _{excedencia} 1985-2004	P _{excedencia} 2026-2045	Downtime 1985-2004 [Horas/año]	Downtime 2026-2045 [Horas/año]	Downtime Diferencia [Horas/año]
Paralización de operaciones. Acciones en sentido transversal al muelle	0.3	-	-	-	-	-
Paralización de operaciones. Acciones en sentido longitudinal al muelle	0.5	99.01%	99.44%	8673	8711	38
Atraque de buques. Acciones en sentido transversal al muelle	1.5	5.25%	5.66%	460	496	36
Atraque de buques. Acciones en sentido longitudinal al muelle	2.0	0.65%	0.67%	57	58	2

Downtime puerto de Antofagasta. Umbrales definidos por Capitanía de Puerto.

Descripción umbral	HS umbral (m)	P _{excedencia} 1985-2004	P _{excedencia} 2026-2045	Downtime 1985-2004 [Horas/año]	Downtime 2026-2045 [Horas/año]	Downtime Diferencia [Horas/año]
Maniobras de atraque	1,5	5,25%	5,66%	460	496	36
Maniobras de desatraque	1,5	5,25%	5,66%	460	496	36
Permanencia en sitio	2,0	0,65%	0,67%	57	58	2
Ejecución de faenas de carga y / o descarga	2,0	0,65%	0,67%	57	58	2

Probabilidad de excedencia de medianas históricas (rojo) y proyecciones (verde) de la altura significativa (Hmo) en el puerto de Antofagasta. Umbrales a a) partir de ROM y b) Capitanías de Puerto.



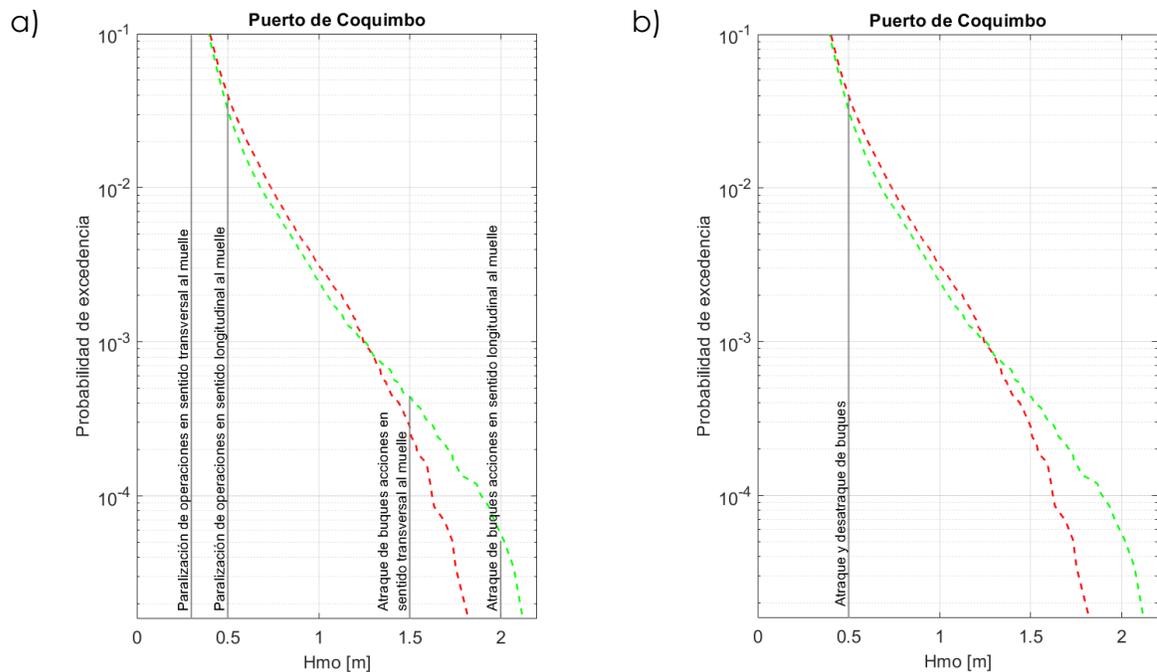
Downtime puerto de Coquimbo. Umbrales definidos por la ROM 3.1-99 (PPEE, 1999).

Descripción umbral	Hs umbral (m)	P _{excedencia} 1985-2004	P _{excedencia} 2026-2045	Downtime 1985-2004 [Horas/año]	Downtime 2026-2045 [Horas/año]	Downtime Diferencia [Horas/año]
Paralización de operaciones. Acciones en sentido transversal al muelle	0.3	29.88%	27.91%	2618	2445	-173
Paralización de operaciones. Acciones en sentido longitudinal al muelle	0.5	3.99%	3.21%	350	281	-69
Atraque de buques. Acciones en sentido transversal al muelle	1.5	0.03%	0.04%	2	4	1
Atraque de buques. Acciones en sentido longitudinal al muelle	2.0	-	5.13E-05	-	0	-

Downtime puerto de Coquimbo. Umbrales definidos por Capitanía de Puerto.

Descripción umbral	Hs umbral (m)	P _{excedencia} 1985-2004	P _{excedencia} 2026-2045	Downtime 1985-2004 [Horas/año]	Downtime 2026-2045 [Horas/año]	Downtime Diferencia [Horas/año]
Maniobras de atraque / amarre	0,5	3,99%	3,21%	350	281	-69
Maniobras de desatraque/ desamarre	0,5	3,99%	3,21%	350	281	-69

Probabilidad de excedencia de medianas históricas (rojo) y proyecciones (verde) de la altura significativa (Hmo) en el puerto de Coquimbo. Umbrales a a) partir de ROM y b) Capitanías de Puerto.



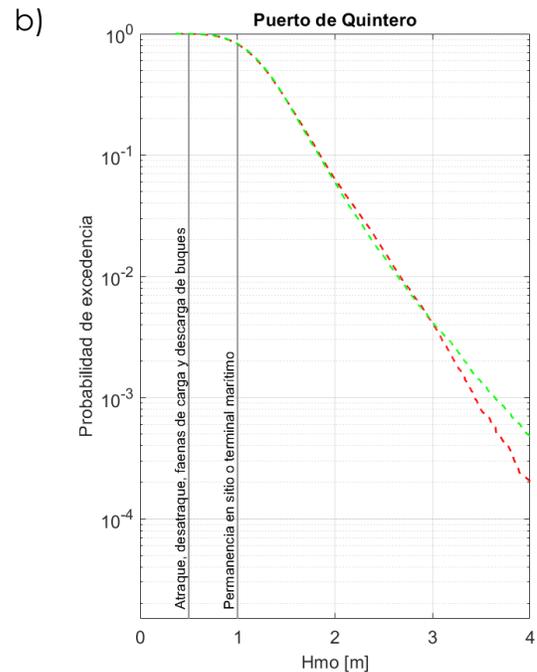
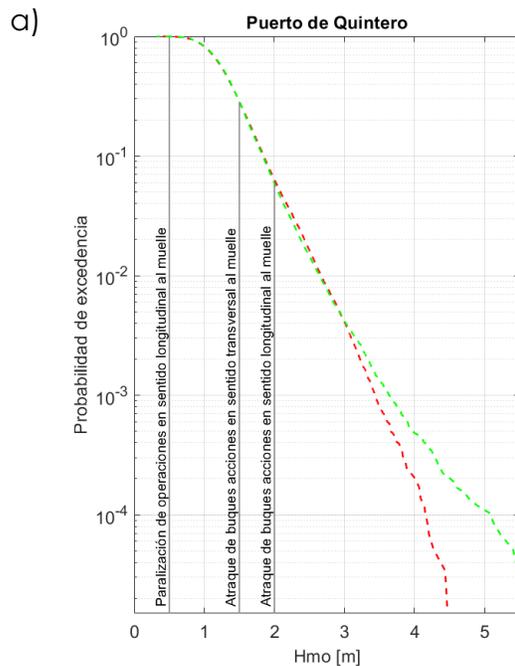
Downtime puerto de Quintero. Umbrales definidos por la ROM 3.1-99 (PPEE, 1999).

Descripción umbral	HS umbral (m)	P _{excedencia} 1985-2004	P _{excedencia} 2026-2045	Downtime 1985-2004 [Horas/año]	Downtime 2026-2045 [Horas/año]	Downtime Diferencia [Horas/año]
Paralización de operaciones. Acciones en sentido transversal al muelle	0.3	-	-	-	-	-
Paralización de operaciones. Acciones en sentido longitudinal al muelle	0.5	99.79%	99.86%	8741	8748	7
Atraque de buques. Acciones en sentido transversal al muelle	1.5	28.50%	28.39%	2497	2487	-9
Atraque de buques. Acciones en sentido longitudinal al muelle	2.0	6.32%	5.95%	553	521	-32

Downtime puerto de Quintero. Umbrales definidos por Capitanía de Puerto.

Descripción umbral	HS umbral (m)	P _{excedencia} 1985-2004	P _{excedencia} 2026-2045	Downtime 1985-2004 [Horas/año]	Downtime 2026-2045 [Horas/año]	Downtime Diferencia [Horas/año]
Maniobras de atraque / amarre	1,0	99.79%	99.86%	8741	8748	7
Maniobras de desatraque/ desamarre	1,0	99.79%	99.86%	8741	8748	7
Permanencia en sitio o terminal marítimo	1,0	82.11%	82.71%	7193	7245	52
Ejecución de faenas de carga y / o descarga	1,0	99.79%	99.86%	8741	8748	7

Probabilidad de excedencia de medianas históricas (rojo) y proyecciones (verde) de la altura significativa (Hmo) en el puerto de Quintero. Umbrales a a) partir de ROM y b) Capitanías de Puerto.



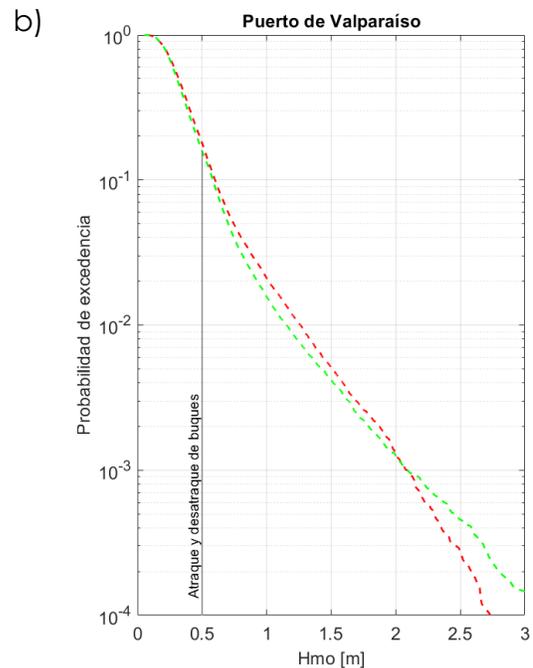
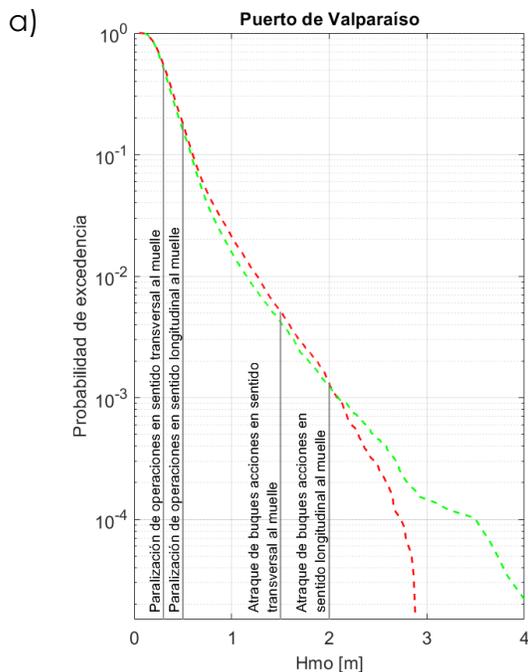
Downtime puerto de Valparaíso. Umbrales definidos por la ROM 3.1-99 (PEE, 1999).

Descripción umbral	Hs umbral (m)	P _{excedencia} 1985-2004	P _{excedencia} 2026-2045	Downtime 1985-2004 [Horas/año]	Downtime 2026-2045 [Horas/año]	Downtime Diferencia [Horas/año]
Paralización de operaciones. Acciones en sentido transversal al muelle	0.3	55.05%	51.58%	4823	4518	-304
Paralización de operaciones. Acciones en sentido longitudinal al muelle	0.5	18.00%	15.89%	1577	1392	-185
Atraque de buques. Acciones en sentido transversal al muelle	1.5	0.51%	0.42%	45	37	-8
Atraque de buques. Acciones en sentido longitudinal al muelle	2.0	0.13%	0.12%	12	11	-1

Downtime puerto de Valparaíso. Umbrales definidos por Capitanía de Puerto.

Descripción umbral	Hs umbral (m)	P _{excedencia} 1985-2004	P _{excedencia} 2026-2045	Downtime 1985-2004 [Horas/año]	Downtime 2026-2045 [Horas/año]	Downtime Diferencia [Horas/año]
Maniobras de atraque / amarre	0,5	18,00%	15,89%	1577	1392	-185
Maniobras de desatraque/ desamarre	0,5	18,00%	15,89%	1577	1392	-185

Probabilidad de excedencia de medianas históricas (rojo) y proyecciones (verde) de la altura significativa (Hmo) en el puerto de Valparaíso. Umbrales a a) partir de ROM y b) Capitanías de Puerto.



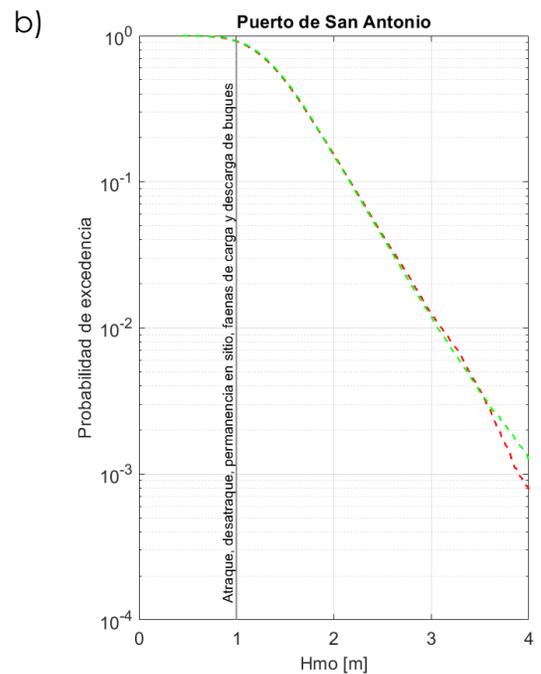
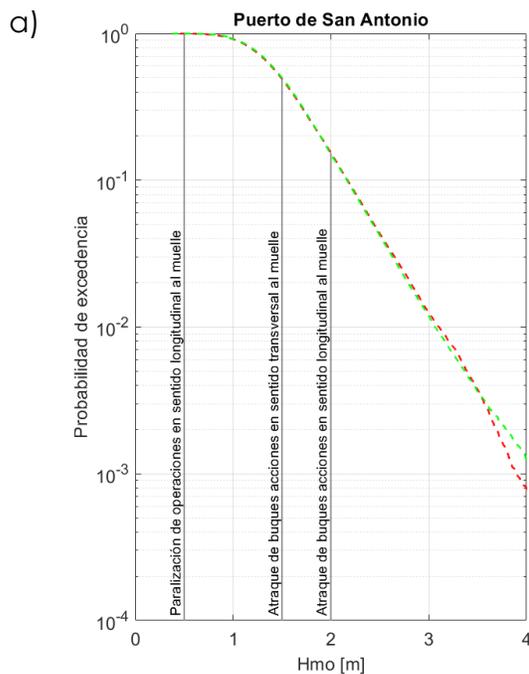
Downtime puerto de San Antonio. Umbrales definidos por la ROM 3.1-99 (PPEE, 1999).

Descripción umbral	Hs umbral (m)	P _{excedencia} 1985-2004	P _{excedencia} 2026-2045	Downtime 1985-2004 [Horas/año]	Downtime 2026-2045 [Horas/año]	Downtime Diferencia [Horas/año]
Paralización de operaciones. Acciones en sentido transversal al muelle	0.3	-	-	-	-	-
Paralización de operaciones. Acciones en sentido longitudinal al muelle	0.5	99.93%	99.96%	8754	8757	3
Atraque de buques. Acciones en sentido transversal al muelle	1.5	49.06%	49.89%	4298	4371	73
Atraque de buques. Acciones en sentido longitudinal al muelle	2.0	15.39%	15.09%	1348	1322	-26

Downtime puerto de San Antonio. Umbrales definidos por Capitanía de Puerto.

Descripción umbral	Hs umbral (m)	P _{excedencia} 1985-2004	P _{excedencia} 2026-2045	Downtime 1985-2004 [Horas/año]	Downtime 2026-2045 [Horas/año]	Downtime Diferencia [Horas/año]
Maniobras de atraque / amarre	1,0	91,52%	91,93%	8017	8053	36
Maniobras de desatraque/ desamarre	1,0	91,52%	91,93%	8017	8053	36
Permanencia en sitio o terminal marítimo	1,0	91,52%	91,93%	8017	8053	36
Ejecución de faenas de carga y / o descarga	1,0	91,52%	91,93%	8017	8053	36

Probabilidad de excedencia de medianas históricas (rojo) y proyecciones (verde) de la altura significativa (Hmo) en el puerto de San Antonio. Umbrales a a) partir de ROM y b) Capitanías de Puerto.



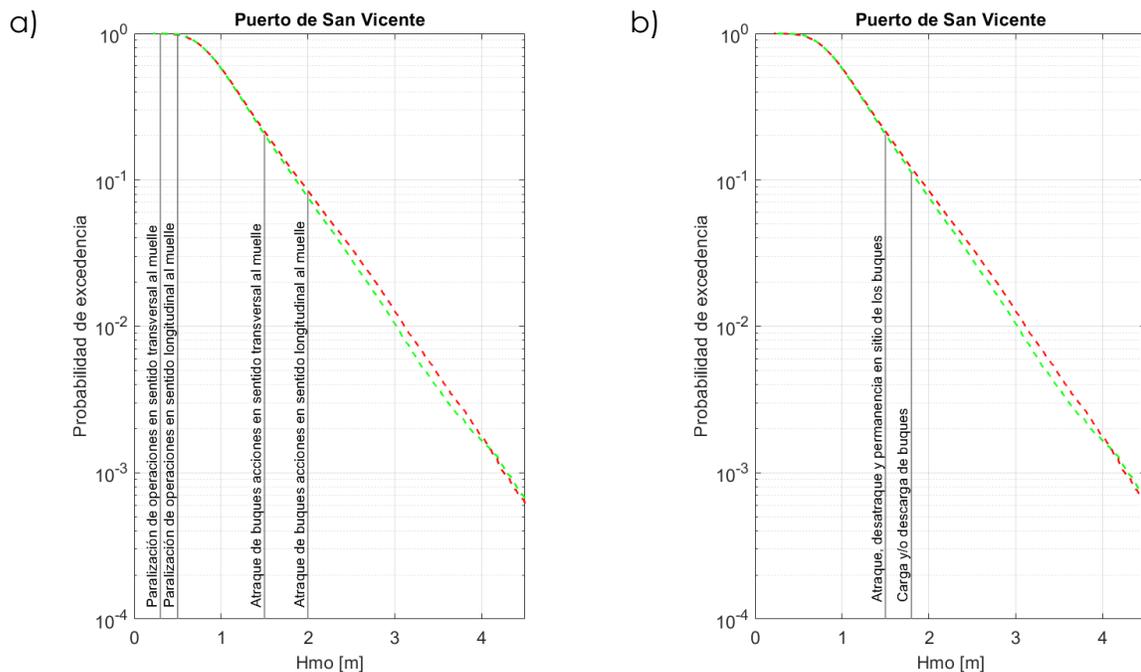
Downtime puerto de San Vicente. Umbrales definidos por la ROM 3.1-99 (PPEE, 1999).

Descripción umbral	HS umbral (m)	P excedencia 1985-2004	P excedencia 2026-2045	Downtime 1985-2004 [Horas/año]	Downtime 2026-2045 [Horas/año]	Downtime Diferencia [Horas/año]
Paralización de operaciones. Acciones en sentido transversal al muelle	0.3	-	-	-	-	-
Paralización de operaciones. Acciones en sentido longitudinal al muelle	0.5	99.93%	99.96%	8754	8757	3
Atraque de buques. Acciones en sentido transversal al muelle	1.5	49.06%	49.89%	4298	4371	73
Atraque de buques. Acciones en sentido longitudinal al muelle	2.0	15.39%	15.09%	1348	1322	-26

Downtime puerto de San Vicente. Umbrales definidos por Capitanía de Puerto.

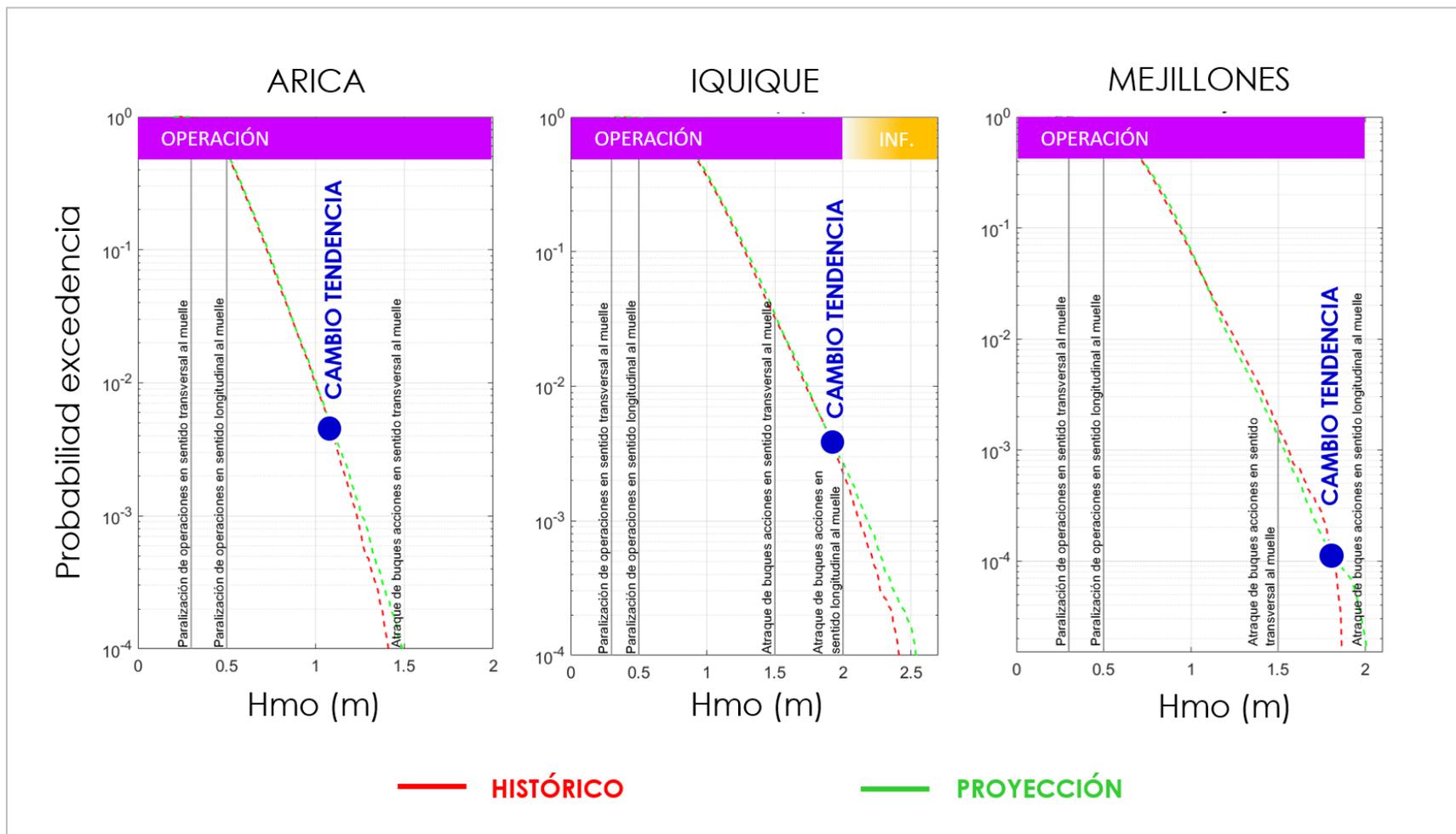
Descripción umbral	HS umbral (m)	P excedencia 1985-2004	P excedencia 2026-2045	Downtime 1985-2004 [Horas/año]	Downtime 2026-2045 [Horas/año]	Downtime Diferencia [Horas/año]
Maniobras de atraque / amarre	1,5	21,50%	20,54%	1883	1799	-84
Maniobras de desatraque/ desamarre	1,5	21,50%	20,54%	1883	1799	-84
Permanencia en sitio o terminal marítimo	1,8	12,06%	11,24%	1057	985	-72
Ejecución de faenas de carga y / o descarga	1,5	21,50%	20,54%	1883	1799	-84

Probabilidad de excedencia de medianas históricas (rojo) y proyecciones (verde) de la altura significativa (Hmo) en el puerto de San Vicente. Umbrales a a) partir de ROM y b) Capitanías de Puerto.

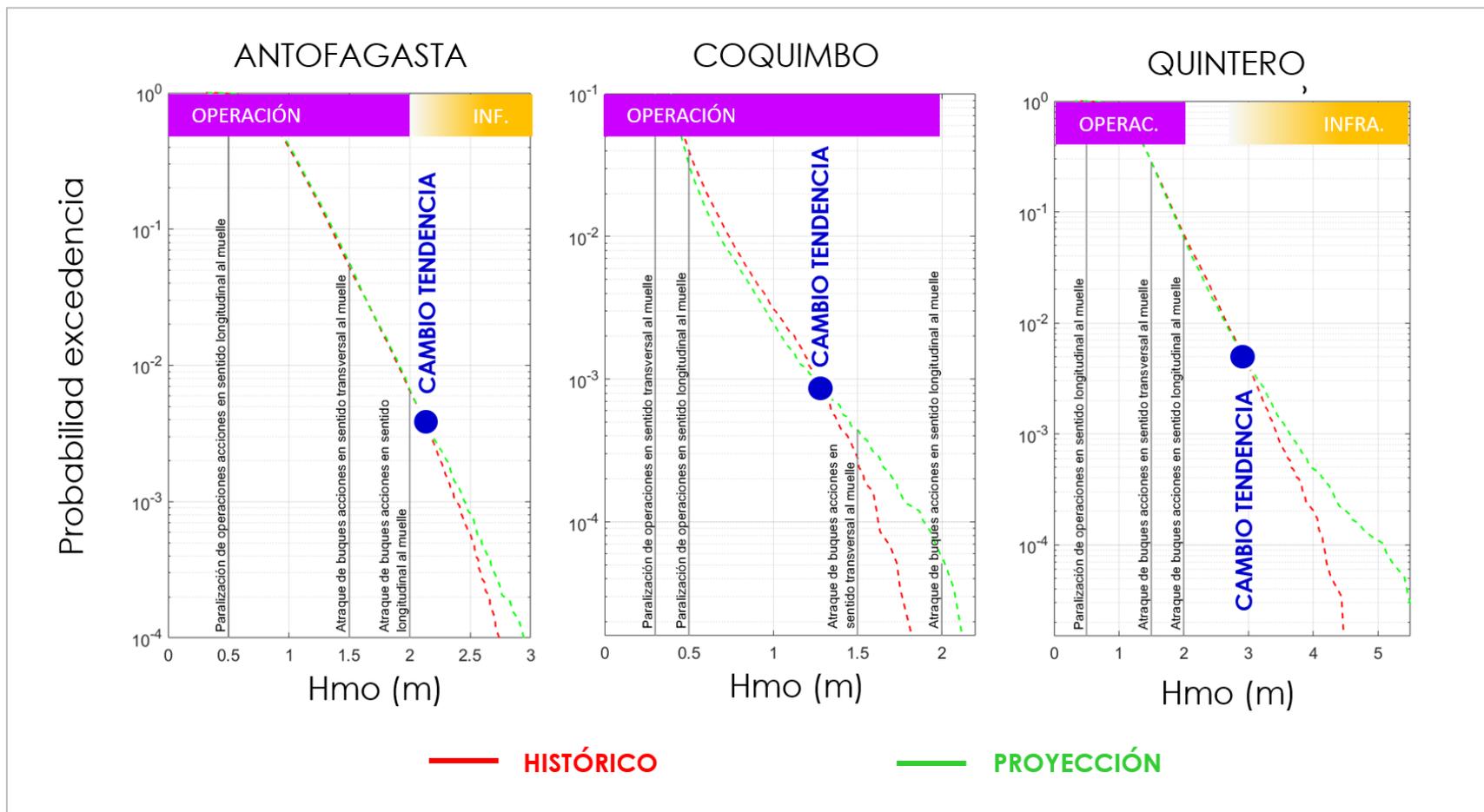


7.2 CRUCE ENTRE CRITERIOS DE CIERRE DE PUERTOS Y ESTADÍSTICA DE OLAJE

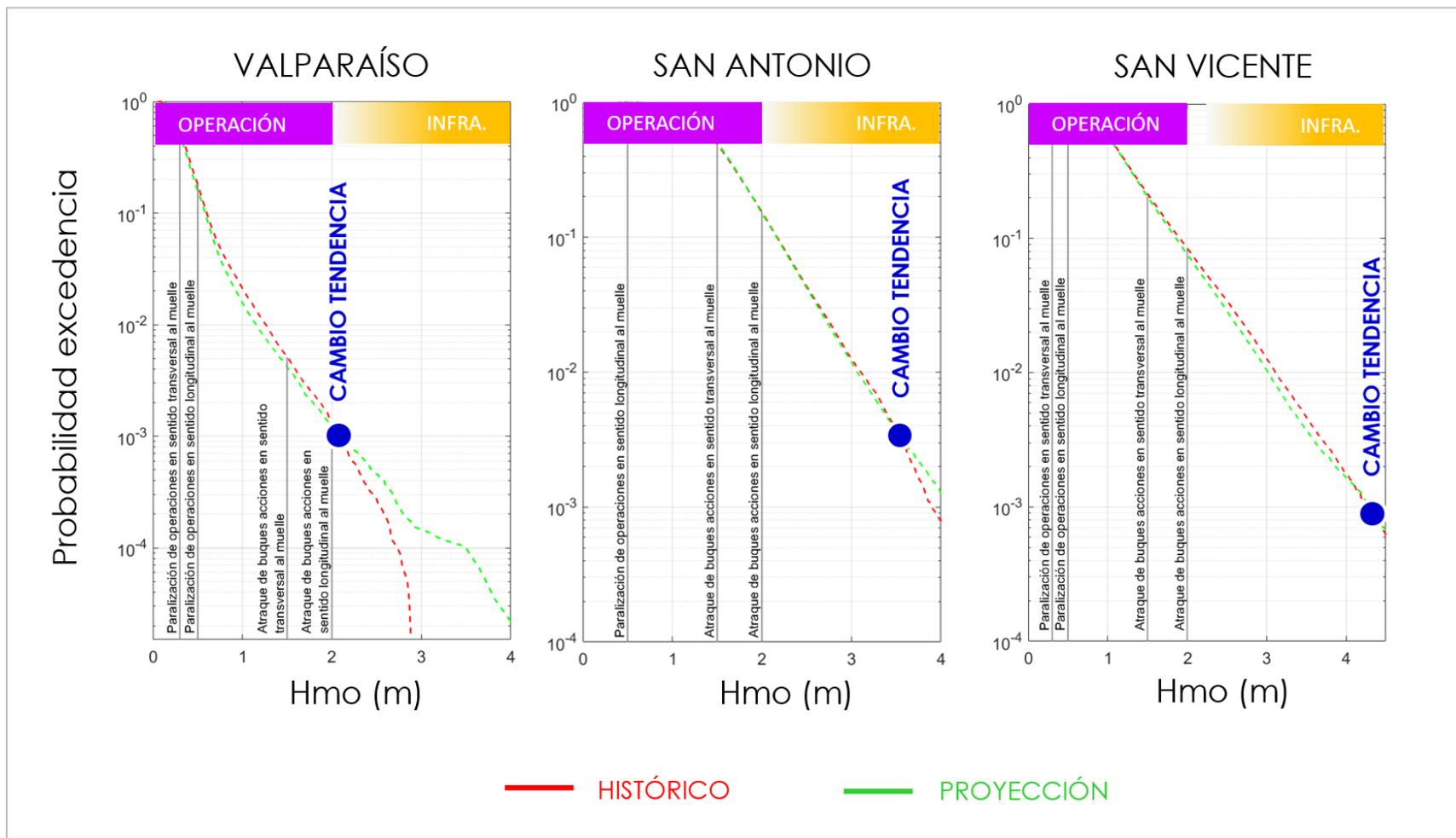
Cruce entre criterios de cierre de puertos definidos por la ROM 3.1-99 (PPEE, 1999) y curvas de excedencia de medianas históricas (rojo) y proyecciones (verde) de la altura significativa (Hmo) en los puertos de Arica, Iquique y Mejillones. Se muestra el cambio de tendencia donde la proyección comienza a ser más intenso que el período histórico. Se indica el rango operacional (bajo Hmo = 2m) y el rango que es relevante para la gestión de la infraestructura portuaria.



Cruce entre criterios de cierre de puertos definidos por la ROM 3.1-99 (PPEE, 1999) y curvas de excedencia de medianas históricas (rojo) y proyecciones (verde) de la altura significativa (H_{mo}) en los puertos de Antofagasta, Coquimbo y Quintero. Se muestra el cambio de tendencia donde la proyección comienza a ser más intenso que el período histórico. Se indica el rango operacional (bajo $H_{mo} = 2\text{m}$) y el rango que es relevante para la gestión de la infraestructura portuaria.



Cruce entre criterios de cierre de puertos definidos por la ROM 3.1-99 (PPEE, 1999) y curvas de excedencia de medianas históricas (rojo) y proyecciones (verde) de la altura significativa (Hmo) en los puertos de Valparaíso, Valparaíso, San Antonio y San Vicente. Se muestra el cambio de tendencia donde la proyección comienza a ser más intenso que el período histórico. Se indica el rango operacional (bajo $H_{mo} = 2\text{m}$) y el rango que es relevante de cara a la gestión de la infraestructura portuaria.



7.3 CERTIFICADOS DE CIERRES DE PUERTOS

Nota: En la versión digital, este anexo no se incluye debido a su excesiva extensión.

