Universidad de Valparaíso
CHILE
Facultad de Ingeniería

Memoria del proyecto para optar al Título
de Ingeniera Civil Oceánica

EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL OLEAJE Y VIENTO OPERACIONAL QUE SE PRESENTA EN EL PUERTO DE SAN ANTONIO

Alexandra Antonia Bruna Torres

Enero 2023

APROBACIÓN

EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL OLEAJE Y VIENTO OPERACIONAL QUE SE PRESENTA EN EL PUERTO DE SAN ANTONIO

Alexandra Antonia Bruna Torres

Comisión Revisora	Nota	Firma
Sergio Bidart Revisor	_____	_____
Mauricio Reyes Revisor	_____	_____
Patricio Winckler Revisor	_____	_____

DECLARACIÓN

Este trabajo, o alguna de sus partes, no ha sido presentado anteriormente en la Universidad de Valparaíso, institución universitaria chilena o extranjera u organismo de carácter estatal, para evaluación, comercialización u otros propósitos. Salvo las referencias citadas en el texto, confirmo que el contenido intelectual de este Proyecto de Título es resultado exclusivamente de mis esfuerzos personales.

La Universidad de Valparaíso reconoce expresamente la propiedad intelectual del autor sobre esta Memoria de Titulación. Sin embargo, en caso de ser sometida a evaluación para los propósitos de obtención del Título Profesional de Ingeniera Civil Oceánica, el autor renuncia a los derechos legales sobre la misma y los cede a la Universidad de Valparaíso, la que estará facultada para utilizarla con fines exclusivamente académicos.

AGRADECIMIENTOS

Un año intenso y satisfactorio, donde culmina el primero de muchos desafíos. Quiero agradecer a Felipe Berrios y José Aldunate de EPSA por proporcionarme la información necesaria y la idea del proyecto, a Carlos Bidart por introducirme al tema de practicaje, a Javiera Mora por enseñarme de un principio la metodología para obtener proyecciones y por siempre brindarme su ayuda, a Cesar Esparza por compartir resultados de su trabajo para clima de oleaje, a Pablo Córdova por brindarme las herramientas necesarias en la programación y unas interesantes conversaciones. Agradecer también al profesor Mauricio Reyes que a pesar de exigirme en el trabajo se daba el tiempo de escuchar mi día a día. Al profesor Patricio Winckler agradecida de guiarme en este estudio, buscando todas las maneras de que me quedara el aprendizaje y que me siguiera motivando en el tema.

En este apartado también quiero agradecer a todas las personas que han sido parte de este proceso universitario. Mis padres, pilares fundamentales, agradecida de su apoyo ante cualquier adversidad y por darme las herramientas y la libertad de crecer como persona, a mi hermana por ser esa compañera que siempre está para mí, a mis bebes Emi y Bambi, mi todo. A mis tatas, que siempre han estado en todas conmigo, y aunque les repita mil veces que seguía estudiando ahora les puedo decir, sí, ya terminé la Universidad.

También agradecida de los grandes amigos que me ha dado la universidad, los que me han apoyado desde un principio y siguen demostrando su alegría de que este finalizando esta etapa. A mi amigo Matías que ha estado desde el primer día que vendíamos choripanes en el Roma hasta ahora donde discutimos sobre nuestro curriculums, a mi amigo Michel que me ha motivado y me ha tirado siempre flores, a la Monse y a la Cami que siempre son las primeras en estar. En fin, no terminaría nunca, agradecida de todos mis compañeros por esas noches de estudio tanto presencial como virtual que terminaban con buenas conversaciones. Agradecida de mi amigo Hugo que fue fundamental este año, el cual me distrajo de que no cayera en el estrés del tiempo. Gracias por esta maravillosa etapa. Piquitos al cielo.

CONTENIDOS

RESUMEN VIII

1 INTRODUCCIÓN 1

2 OBJETIVOS 2

3 MARCO TEÓRICO 3

3.1 CAMBIO CLIMÁTICO 3

3.1.1 ESCENARIOS DE MODELACIÓN 4

3.1.2 MODELOS DE CIRCULACIÓN GENERAL (GCM) 6

3.2 VARIABLES DE ESTUDIO 8

3.2.1 OLEAJE 8

3.2.2 VIENTO 10

3.3 PUERTO DE SAN ANTONIO 11

3.3.1 ZONA DE ESPERA DE PRÁCTICOS 12

3.3.2 RESTRICCIONES OPERACIONALES 13

4 METODOLOGÍA 16

4.1 ESTUDIO DE VIENTOS 16

4.1.1 BASES DE DATOS DE VIENTOS 16

4.1.2 ANÁLISIS DE DOWNTIME POR VIENTO 20

4.2 ESTUDIO DE OLEAJE 20

4.2.1 BASES DE DATOS DE OLEAJE 20

4.2.2 ANÁLISIS DE DOWNTIME POR OLEAJE 21

5 RESULTADOS 23

5.1 ESTUDIO DE VIENTO 23

5.1.1 SELECCIÓN DE MODELOS GCM 23

5.1.2 PROYECCIONES A ESCALA OCEÁNICA 24

5.1.3 PROYECCIONES EN EL PUERTO SAN ANTONIO 27

5.1.4 ANÁLISIS DE DOWNTIME POR VIENTO 31

5.2 ESTUDIO DE OLEAJE 39

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 44

7 REFERENCIAS 47

8 ANEXO 51

8.1 CORRECCIONES DE MAGNITUDES DE VIENTO 51
8.2 UMBRALES DE OPERACIÓN 55
8.3 RESULTADOS: SERIE DE TIEMPO VIENTO 58
8.4 Resultados proyecciones para el periodo peak 61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Componentes de forzamiento radiativo 5

Figura 2: Matriz de escenarios SSP. RCP que ilustra las simulaciones CMIP. Cada celda indica una combinación de vía de desarrollo económico (SSP) y un clima basado en un forzamiento radiativo 6

Figura 3: Esquema de grilla de un GCM 7

Figura 4 Campo de T_M (A.) y H_{m0} (b.) en el puerto de San Antonio 9

Figura 5 Cierre de Puerto de San Antonio por eventos de marejadas 9

Figura 6: Rosa de vientos anual para el puerto de San Antonio 10

Figura 7: Instalaciones del Puerto de San Antonio. (1) San Antonio Terminal Internacional, protegido por el molo sur. (2) DP World San Antonio, (3) Puerto Panul, (4) QC Policarpo Toro Y (5) Terquim 12

Figura 8: Embarque de práctico en el puerto de San Antonio 13

Figura 9: Metodología para estudio de vientos 16

Figura 10: Intervalo de tiempo base de datos magnitud de viento 19

Figura 11: Esquema de cálculo de cambios en la altura de ola para la proyección del escenario RCP8.5 (2026-2045) respecto al periodo histórico (1985-2004) 22

Figura 12: Esquema general de efectos del cambio climático en la magnitud del viento para la proyección del escenario SSP5-8.5 (2026-2045) respecto al periodo histórico (1985-2004) 25

Figura 13: Comparación de la magnitud del viento para el periodo histórico y proyección a mediados de siglo, además de la diferencia entre ambos 26

Figura 14: Comparación de la magnitud del viento para el periodo histórico y proyección a fin de siglo, además de la diferencia entre ambos 26

Figura 15: Ubicación nodos GCM y Puerto 27

Figura 16: Esquema de interpolación de datos de un GCM al puerto de San Antonio 28

Figura 17: Serie de tiempo modelos GCM y reemplazo de gaps en los modelo M3 y M4 30

Figura 18: Cruce de curvas de excedencia de la magnitud del viento en el periodo histórico (1985-2004). Umbrales definidos por la Capitanía de Puerto.....32

Figura 19: Cruce de curvas de excedencia de la magnitud del viento en la proyección a mediados de siglo (2026-2045). Umbrales definidos por la Capitanía de Puerto 33

Figura 20: Cruce de curvas de excedencia de la magnitud del viento en la proyección a fin de siglo (2081-2100). Umbrales definidos por la Capitanía de Puerto 33

Figura 21: Mediana de los Modelos GCM de viento por periodos de tiempo 34

Figura 22: Cruce de curvas de excedencia de la magnitud del viento en el periodo histórico (1985-2004). Umbrales definidos por la ROM 3.1-99 36

Figura 23: Cruce de curvas de excedencia de la magnitud del viento en la proyección a mediados de siglo (2026-2045). Umbrales definidos por la ROM 3.1-99 37

Figura 24: Cruce de curvas de excedencia de la magnitud del viento en la proyección a fin de siglo (2081-2100). Umbrales definidos por la ROM 3.1-99.....37

Figura 25: Cruce de curvas de excedencia de la altura de ola para cada modelo en el periodo histórico con las condiciones límites de operación 40

Figura 26: Cruce de curvas de excedencia de la altura de ola para cada modelo en el periodo medio siglo (2026-2045) con las condiciones límites de operación 41

Figura 27: Cruce de curvas de excedencia de la altura de ola para cada modelo en el periodo fin siglo (2026-2045) con las condiciones límites de operación 41

Figura 28: Mediana de los Modelos GCM de altura de ola por periodos de tiempo 42

Figura 29: Relación entre la velocidad del viento de cualquier duración ($\boldsymbol{Ut}$) y la velocidad del viento de 1 hora($\boldsymbol{U3600}$).....52

Figura 30:Relación ($\boldsymbol{RL}$) entre la velocidad del viento sobre el agua ($\boldsymbol{UW}$) y la velocidad del viento sobre la tierra ($\boldsymbol{UL}$) 53

Figura 31: Relación de amplificación ($\boldsymbol{RT}$) de $\boldsymbol{Wc}$ (velocidad del viento que tiene en cuenta la diferencia de temperatura entre el aire y mar) a $\boldsymbol{Ww}$ (velocidad del viento sobre el agua sin efectos de temperatura).....54

Figura 32: Serie de tiempo periodo Histórico (1985-2004) 58

Figura 33: Serie de tiempo para proyección SSP5-8.5 (2026-2045) 59

Figura 34: Serie de tiempo para proyección SSP5-8.5 fin de siglo (2081-2100) 60

Figura 35: Cruce de curvas de excedencia del periodo peak del oleaje en el periodo histórico (1085-2004) 61

Figura 36: Cruce de curvas de excedencia del periodo peak del oleaje en la proyección a mediados de siglo (2026-2045). 61

Figura 37: Cruce de curvas de excedencia del periodo peak del oleaje en la proyección a fin de siglo (2081-2100). 62

Figura 38: Cruce de curvas de excedencia del periodo peak. Mediana de todos los horizaontes de evaluación 62

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Umbrales Operacionales Puerto de San Antonio 14

Tabla 2: Modelos GCM del CMIP6 seleccionados para el estudio de vientos 24

Tabla 3: Factores de corrección de la magnitud del viento 29

Tabla 4: Umbrales de operacionales para el viento definidos por la Capitanía de Puerto 31

Tabla 5: Umbrales de operacionales para el viento definidos por la ROM 3.1-99 31

Tabla 6: Resultados Downtime operacional. Umbral de 5,14 [m/s] definido por Capitanía de Puerto 35

Tabla 7: Resultados Downtime operacional. Umbral de 7,71 [m/s] definido por Capitanía de Puerto 35

Tabla 8: Resultados downtime operacional por viento. Umbrales definidos por la ROM 3.1-99 38

Tabla 9: Modelos GCM del CMIP5 seleccionados y *hindcast* histórico 39

Tabla 10: Resultados de downtime operacional por altura de ola. Umbrales establecidos por la Capitanía de Puerto 43

RESUMEN

El Puerto de San Antonio se encuentra totalmente expuesto al viento y oleaje reinante generado en el Océano Pacífico. Las horas de cierre del puerto debido a condiciones meteorológicas adversas han generado pérdidas del orden de millones de dólares tanto para la cadena logística como para la economía del país. En este trabajo se efectúa un análisis de largo plazo, considerando los efectos del cambio climático, en dos variables relevantes que considera la Autoridad Marítima para emitir un cierre de puerto: el viento en la dársena principal del puerto de San Antonio y el oleaje en la zona de embarque de prácticos.

El estudio se basa en el cálculo estadístico del *downtime* operacional a partir de una serie de modelos de circulación general (GCMs) en tres horizontes de evaluación: un periodo histórico (1985-2004) que sirve de base comparación, y dos proyecciones a horizontes a mediados de siglo (2026-2045) y a fin de siglo (2081-2100). El *downtime* operacional se define en este trabajo como el porcentaje de tiempo en que una operación portuaria no puede hacerse debido a condiciones desfavorables de viento u oleaje, y se asume como un estimador de las horas de cierre de puerto emitidos por la Autoridad Marítima.

Para el viento se utilizan 4 GCMs disponibles en el escenario SSP5-8.5 del CMIP6, el cual corresponde a un escenario conservador (esto es, asociado a un cálculo del *downtime* comparativamente alto), donde el desarrollo económico y social se combina con la explotación de abundantes recursos de combustibles fósiles. Para el oleaje se utilizan 6 GCMs asociados al escenario RCP8.5 del CMIP5, cuyo procesamiento fue desarrollado por la Escuela de Ingeniería Civil Oceánica en el marco de varios estudios previos. La selección de una base de datos más antigua para el oleaje se basa en la nula disponibilidad de estos datos en el CMIP6.

En términos metodológicos, el cálculo del *downtime* operacional se basa en el cruce de las curvas de excedencia asociadas a una cierta magnitud para cada variable (magnitud del viento y altura significativa de oleaje) con los umbrales de operación establecidos por la Autoridad Marítima en la Resolución de Operaciones C.P.S.A ORDINARIO N°12.600/91 VRS, que habilita las Instalaciones Portuarias del Puerto de San Antonio en función de las dimensiones y tipo de nave. El cálculo se efectúa tanto para el periodo histórico como para

ambas proyecciones, en forma independiente para el viento y para el oleaje. A modo de comparación, se utilizan también umbrales admisibles de operación disponibles en las recomendaciones de obras marítimas ROM 3.1 (PPEE, 1999), que son bastante más rigurosos -y por tanto generan valores bastante menores en el *downtime*- para el caso de San Antonio.

Los resultados indican que para un umbral de operación de 7,71 [m/s] de la magnitud del viento, el puerto aumentaría el *downtime* a mediados y fin de siglo respecto al periodo histórico, con 24 horas y 42 horas de diferencia respectivamente. Esto solo si se considera como criterio de cierre el viento operacional. La probabilidad de excedencia de este umbral ronda en los 5%.

En cuanto al oleaje operacional en la zona de espera de práctico, la probabilidad de excedencia de la altura significativa tiende a disminuir, obteniendo una disminución *downtime* de 14 horas para mediados de siglo y 85 horas para fin de siglo en comparación al periodo histórico. Sin embargo, estas diferencias se consideran despreciables, pues la probabilidad de tiempo que excede la altura significativa en muy alto (cerca del 71%). Esto significa, aunque se proyecte una disminución del *downtime* por oleaje, todavía existe una alta probabilidad de interrupción en la operatividad del puerto debido a las condiciones de esta variable.

Finalmente, se esbozan (pero no analizan) algunas medidas de adaptación que podrían ser adoptadas para reducir el *downtime* operacional en las operaciones de transferencia de carga y en la zona de embarque de prácticos. Y para el viento es necesario considerar otros criterios para definir el umbral, como los movimientos de la nave.

"Pese a los notables avances, contribuciones técnicas y científicas, así como evaluaciones en los procesos de diseño y construcción, el ingeniero marítimo, mirando al mar debe ser prudente, consiente y sensible de su limitado saber y de la ignorancia que todavía se envuelve" – Vicente Negro

1 INTRODUCCIÓN

Los puertos tienen un papel fundamental en la economía mundial, pues transfieren aproximadamente el 90% del comercio internacional (MMA, 2019). Sin embargo, a pesar del avance de la tecnología e infraestructura portuaria, la eficiencia en su operatividad se ha visto amenazada por el incremento de marejadas e intensas rachas de vientos, fenómenos que se relacionan a los efectos del cambio climático (Winckler et al., 2020).

Los impactos del cambio climático sobre los sistemas humanos y naturales son evidentes, por lo que la necesidad de analizar y evaluar su comportamiento se hace fundamental. En consecuencia, hay organizaciones internacionales que han congregado a expertos para estudiar de forma periódica el estado del conocimiento científico, técnico y socioeconómico del cambio climático, dando cuenta del impacto que ocasiona, y generando medidas de adaptación y mitigación para enfrentarlo (IPCC, 2022).

Uno de los sistemas habitualmente afectado por el cambio climático es el sistema portuario, en particular de aquellos puertos chilenos expuestos al Océano Pacífico. El puerto de San Antonio, ubicado al sur de la región de Valparaíso, es considerado uno de los puertos principales de Chile (CEPAL, 2022). Debido a su emplazamiento, está expuesto a marejadas y vientos costeros que afectan su operatividad. Durante los últimos años, se han incrementado las horas de suspensión de actividades del puerto (MMA, 2019), debido a que se presentan escenarios de mal tiempo que superan los niveles operacionales impuestos para distintas maniobras. La suspensión de actividades portuarias influye tanto en la logística del puerto como en la economía nacional e internacional (CAMPORT, 2021).

El puerto de San Antonio es uno de los puertos chilenos que acumula más horas de cierre por mal tiempo (Portuario, 2021), esto debido a los intensos vientos que generan problemas cuando las naves ya están atracadas o existe inoperatividad cuando el práctico no puede embarcar a la nave debido a las condiciones de oleaje. Estos son solo algunos de los factores que impiden una operación continua. En este proyecto se desarrolla un análisis de la evolución del oleaje y viento que se tendrá en los próximos años en el puerto de San Antonio, bajo un escenario de cambio climático, a partir del cual se analiza el porcentaje de inoperatividad de naves en diferentes etapas de operación.

2 OBJETIVOS

El objetivo general del proyecto es determinar las condiciones futuras del oleaje y viento operacional del puerto de San Antonio, considerando escenarios de cambio climático.

Los objetivos específicos son:

- Definir condiciones de umbrales de operación, maniobras de practicaje y para buque atracado.
- Caracterizar el clima de viento histórico y futuro en el Puerto de San Antonio.
- Caracterizar el clima de oleaje histórico y futuro en la zona de embarque de prácticos del Puerto de San Antonio.
- Calcular el *downtime* operacional[1] producto del viento y oleaje en el Terminal Puerto Central y en la zona de embarque de prácticos, respectivamente.

[1] El *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 (MMA, 2019). Para efectos de este estudio, solo se evalúa el *downtime* asociado al viento y al oleaje.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 CAMBIO CLIMÁTICO

Según la Organización Meteorológica Mundial, el clima se define como el estado promedio del tiempo en un lugar y periodo determinado, el cual se describe mediante datos estadísticos en términos del valor medio y variabilidad de los elementos climáticos (OMM, s.f.).

El responsable de la variación del estado del clima es el cambio climático, fenómeno que se identifica en la alteración del valor medio de las variables y del incremento de intensos eventos climáticos (IPCC, 2018). Este cambio se atribuye a los procesos naturales de la tierra o a forzamientos externos, como también a la acción tanto directa como indirecta de las actividades humanas (Vivanco, 2019).

Algunos efectos del cambio climático se observan a nivel mundial, como el aumento promedio de la temperatura del océano, el deshielo de los glaciares y el consecuente aumento del nivel del mar. Chile no queda ajeno a sus consecuencias, pues cuenta con bordes costeros de baja cota, zonas áridas, semiáridas y de bosques susceptibles a desastres naturales, áreas propensas a sequías, entre otras. Además, cabe destacar que existe una fuerte dependencia climática para las principales actividades socioeconómicas del país (Meza, 2019).

Con estos antecedentes se evidencia que el cambio climático no es un asunto lejano, sino que un tema existente, con un alto nivel de incertidumbre que es preciso cuantificar y analizar mediante evaluaciones periódicas. En consecuencia, en 1988 se crea el Panel Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), que desarrolla informes con una base científica, permitiendo a los gobiernos trabajar en políticas basadas en el cambio climático. El panel está compuesto por 195 miembros de diferentes países (IPCC, 2021). El IPCC ha realizado seis informes de evaluación (AR), dos de los cuales (AR5 Y AR6) se utilizan en este proyecto.

3.1.1 ESCENARIOS DE MODELACIÓN

Los escenarios son fundamentales para la investigación del cambio climático, pues ayudan a comprender las consecuencias a largo plazo de las decisiones presentes y futuras, permitiendo a los expertos explorar diferentes futuros posibles en contexto de la incertidumbre (Riahi, 2017). Para el desarrollo de este proyecto se consideran dos escenarios: Trayectorias de Concentraciones Representativas (RCP[2], disponibles en el AR5) y Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP[3], disponibles en el AR6), las cuales proyectan ciertos caminos que puede tomar la humanidad en función de la cantidad futura de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), de medidas de mitigación y del grado de adaptación al cambio climático.

3.1.1.1 TRAYECTORIAS DE CONCENTRACIÓN REPRESENTATIVAS

Las Trayectorias de Concentración Representativas se utilizaron para elaborar las proyecciones del CMIP5[4], que son escenarios que abarcan series temporales de emisiones y concentraciones de una gama completa de gases de efecto invernadero (GEI), aerosoles y gases químicamente activos (Moss et at., 2008). Cada trayectoria representa uno de los muchos escenarios que simulan las características específicas del forzamiento radiativo total para el año 2100, que varía desde 2,6 a 8,5 W/m^2. Un forzamiento radiativo en el clima hace referencia a cualquier cambio de radiación entrante o saliente de un sistema climático. La Figura 1 resume los componentes principales del forzamiento radiativo. Estos ocurren debido a uno o más factores que afectan el clima, que se relacionan con las actividades humanas o procesos naturales. Un forzamiento positivo tiende a calentar el sistema dado que es mayor la energía recibida que la emitida y un forzamiento negativo lo enfría (Meza, 2019).

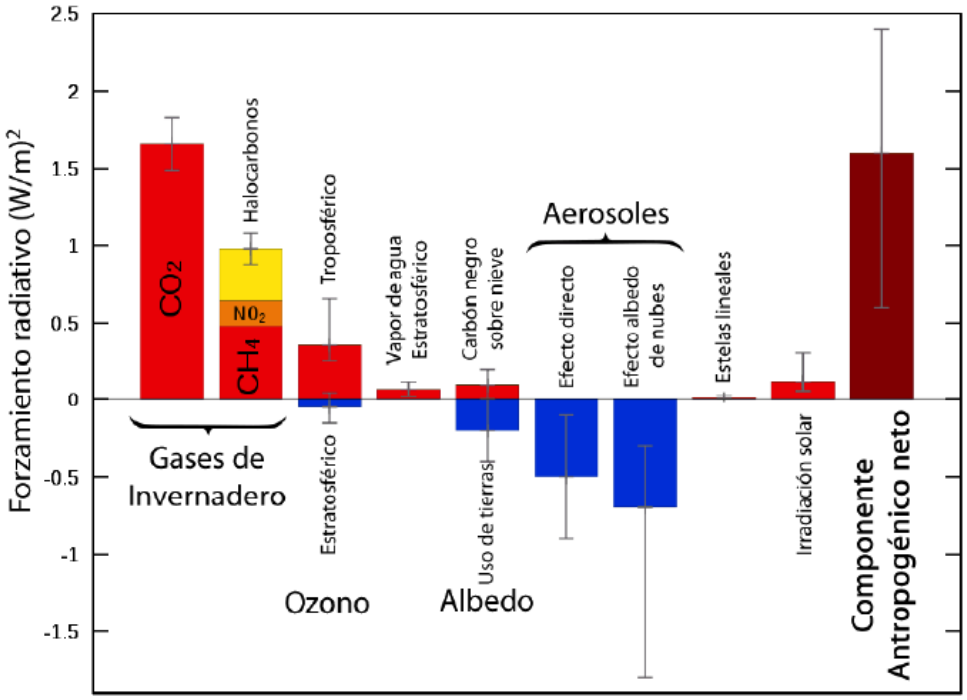
---

[2] RCP: Representative Concentration Pathways.

[3] SSP: Shared Socioeconomic Pathways

[4] CMIP5: Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 es una plataforma de cooperación internacional que define protocolos, nomenclatura y evaluación de modelos de clima acoplados para el diagnóstico objetivo de los impactos históricos y proyecciones del cambio climático. Está adoptado para la mejorar los sucesivos modelos de clima e informar a las agencias nacionales e internacionales acerca de acciones para mitigar los efectos del cambio climático.

FIGURA 1: COMPONENTES DE FORZAMIENTO RADIATIVO



Fuente: IPCC (2013).

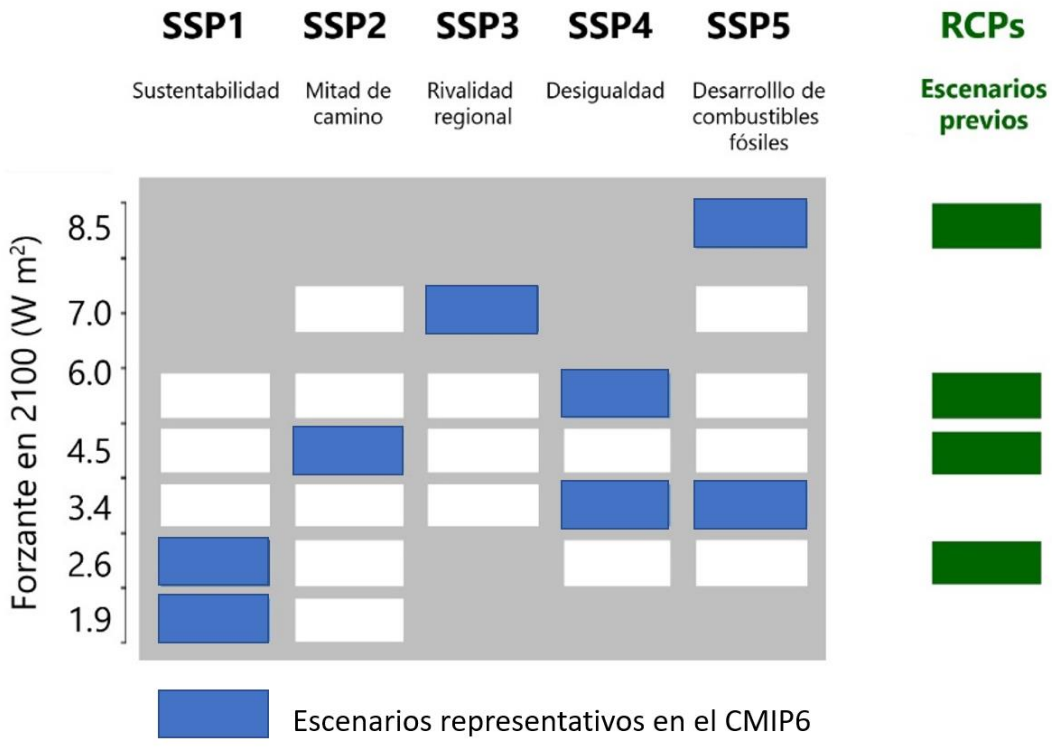
3.1.1.2 TRAYECTORIAS SOCIOECONÓMICAS COMPARTIDAS

Para el Proyecto de Inter comparación de Modelos de Clima Acoplados del sexto informe (CMIP6), se construyeron los escenarios de Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP). Las SSP consideran un crecimiento poblacional y económico, además de un avance de tecnología, educación y urbanización con distintos desafíos socioeconómicos de adaptación y mitigación (Riahi et al., 2017).

Las SSP describen futuros sostenibles entre países y en los países en los que los desafíos para la adaptación y mitigación son bajos (SSP1) o altos considerando rivalidades regionales, donde se hacen notar las brechas socioeconómicas y prácticas destructivas con el medio ambiente (SSP3). Además, representan escenarios que combinan desafíos altos para la mitigación y bajos para la adaptación (SSP5), y viceversa (SSP4). Finalmente, se describe un escenario con desafíos intermedios tanto para la adaptación como para la mitigación (SSP2) (Riahi et al., 2017).

Para establecer los impactos del cambio climático en los futuros asociados se requiere una combinación de las SSP con las RCP a través de un enfoque de matriz (Vuuren, 2014). Esto permite determinar las medidas de mitigación requeridas para llegar al nivel de forzante radiativo, así como también las medidas de adaptación que permitan paliar los efectos futuros del cambio climático. En la Figura 2 se ilustra la combinación de escenarios y el resultado entre ellos los cuales pertenecen al CMIP6.

FIGURA 2: MATRIZ DE ESCENARIOS SSP. RCP QUE ILUSTRA LAS SIMULACIONES CMIP. CADA CELDA INDICA UNA COMBINACIÓN DE VÍA DE DESARROLLO ECONÓMICO (SSP) Y UN CLIMA BASADO EN UN FORZAMIENTO RADIATIVO



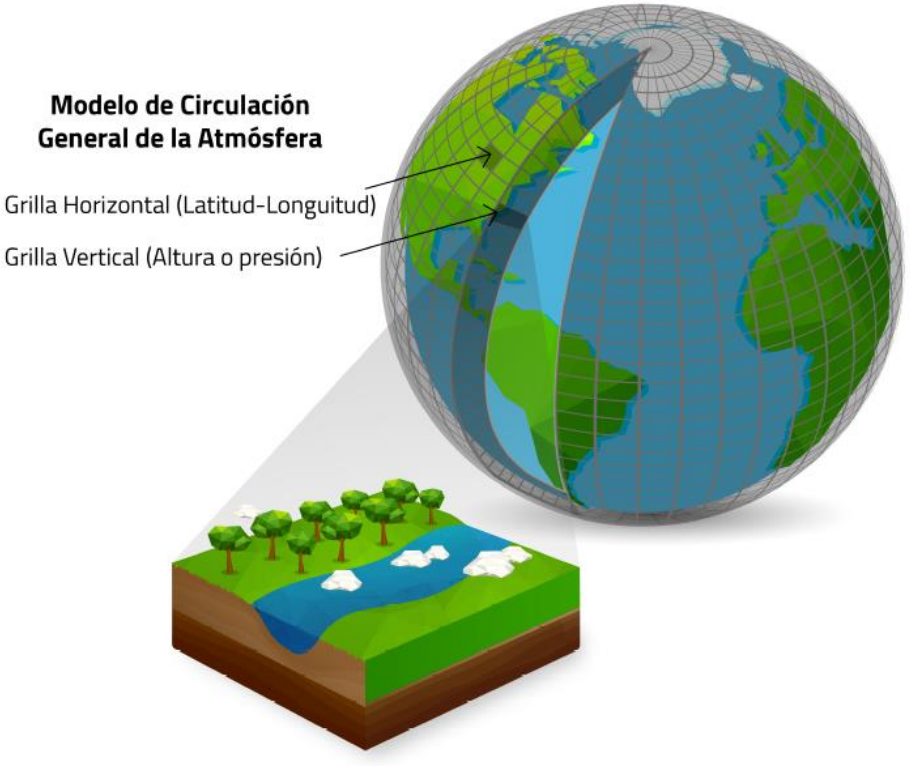
Fuente: Adaptado por Winckler (2022), basado a partir de O'neil et al. (2016).

3.1.2 MODELOS DE CIRCULACIÓN GENERAL (GCM)

Para entender los procesos involucrados en el clima se dispone de Modelos de Circulación General (GCM), que permiten simular un conjunto de procesos acoplados en un código

computacional. Estos modelos calculan soluciones provenientes de ecuaciones de movimiento de fluidos y termodinámica para obtener resultados de variables en un cierto lugar en el futuro, ya sea de la temperatura, vientos, humedad, presión atmosférica o variables en el océano. Los GCM consideran una grilla tridimensional que rodea el planeta (Figura 3), discretizado en cuadrículas, donde se resuelven los procesos atmosféricos y oceánicos de manera aproximada. Estos modelos son predictivos en escala de días a semanas (pronóstico meteorológico) hasta periodos de siglos (pronóstico climático de largo plazo), siendo una herramienta de ayuda en proyecciones del cambio climático (Bambach, 2022).

FIGURA 3: ESQUEMA DE GRILLA DE UN GCM



Fuente: NOAA (s.f).

3.2 VARIABLES DE ESTUDIO

A continuación, se describen las variables que se analizan en el proyecto, y su respectiva caracterización en la zona de estudio, el puerto de San Antonio.

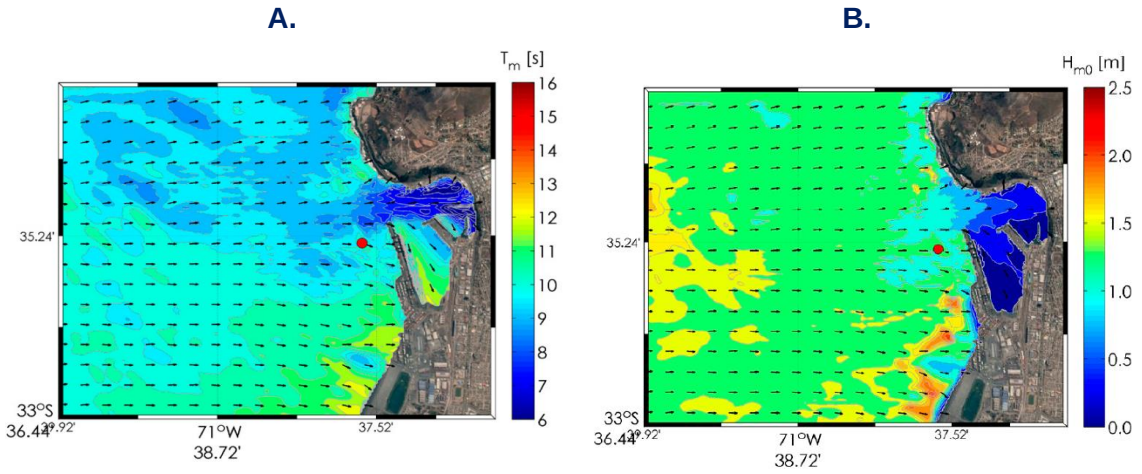
3.2.1 OLEAJE

El oleaje corresponde a oscilaciones periódicas en la superficie del mar generadas por el viento, que varían entre periodos de 3 a 30 s (Beyá J., 2016). Sus condiciones se atribuyen a tres factores: la velocidad media del viento, la duración en que actúa y la distancia en que se efectúa la transferencia de energía del viento al oleaje (*fetch*). El oleaje se caracteriza en dos tipos: mar de viento (*sea*), mar de fondo (*swell*), o una combinación de estos. En el *sea*, la altura y el periodo del oleaje aumentan con la intensidad y el *fetch* del viento, en tanto que el *swell* disminuye su altura y aumenta su periodo a medida que se aleja de la zona de generación (Beyá J., 2016).

El oleaje reinante en aguas profundas frente a San Antonio (sección 3.3) proviene del Suroeste con alturas significativas (H_{m0}) de 1,8 a 2,4 m, periodos medios de (T_m) de 8,8 s y periodo picos (T_p) de 12,8 s (Beyá J., 2016). Al llegar a la bocana del puerto, el oleaje cambia su dirección debido a la refracción y difracción generada por el cañón submarino (Figura 4). El puerto de San Antonio está frecuentemente expuesto a olas de gran altura, formadas por fuertes vientos en distintas zonas de generación frente a las costas de Chile, por lo que su propagación impacta a los sectores costeros. Estos eventos son conocidos como marejadas, las cuales hoy tienen una mayor periodicidad en las costas (DIRECTEMAR, 2020). Además, el puerto está expuesto a oleajes del Noreste, Oeste y Suroeste, las cuales afectan directamente en las operaciones portuarias.

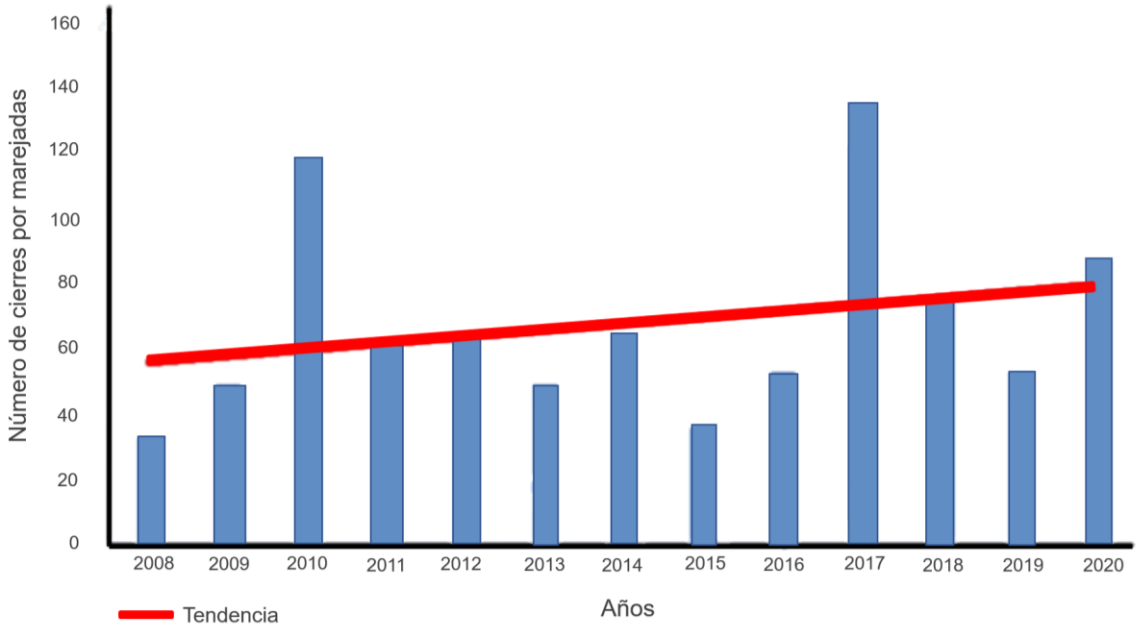
En la Figura 5 de ilustra la cantidad de veces en que el puerto de San Antonio ha sido cerrado para la operación producto de las marejadas, dando a conocer una tendencia desfavorable para el puerto. Cabe mencionar, que el cierre de puertos es una facultad de los Capitanes de Puerto que se rigen por el Reglamento General de Orden, Seguridad y Disciplina en las Naves y Litoral de la República (Art.151). En el Art. 152, señala que existen dos tipos de suspensión, parcial o general, siendo la primera una restricción en la operación de las naves menores, y la general una suspensión total de todo tráfico y de faenas de carga y descarga.

FIGURA 4 CAMPO DE T_M (A.) Y H_{M0} (B.) EN EL PUERTO DE SAN ANTONIO



Fuente: Atlas de oleaje, 2016.

FIGURA 5 CIERRE DE PUERTO DE SAN ANTONIO POR EVENTOS DE MAREJADAS



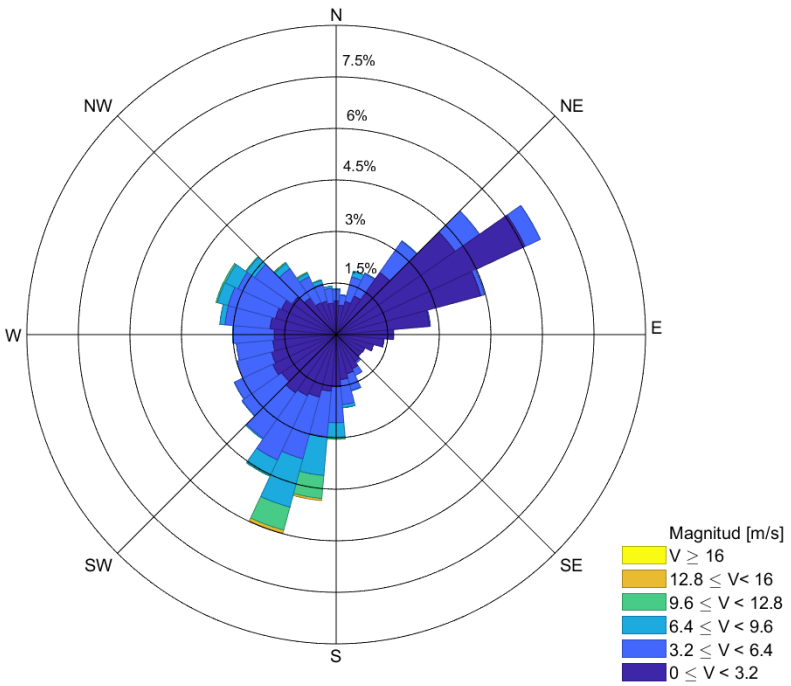
Fuente: DIRECTEMAR, 2020.

3.2.2 VIENTO

Los factores que influyen en la generación del viento son el calentamiento de la superficie terrestre, el cual crea diferencias de presión, la distribución desigual de la radiación solar y las diferentes propiedades térmicas de las superficies terrestres y oceánicas. Como el aire fluye desde áreas de alta presión a áreas de baja presión, el viento es el resultado de diferencias de presión y gradientes térmicos (Sarochar, 2013). Como se mencionó, el viento es el principal generador de oleaje, y puede afectar directamente cuando alcanza grandes velocidades en los puertos y sectores costeros.

Los vientos dominantes en San Antonio dependen de la época del año, en verano e invierno soplan con mayor intensidad del Suroeste. La Figura 6 muestra los vientos anuales a través de una rosa, en ella se aprecia que los vientos más intensos vienen del Suroeste. En ocasiones, estos vientos dificultan las faenas, especialmente en el frente de atraque 2 (Figura 7).

FIGURA 6: ROSA DE VIENTOS ANUAL PARA EL PUERTO DE SAN ANTONIO



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del Explorador Eólico (2022).

3.3 PUERTO DE SAN ANTONIO

En el año 1910 comenzó la construcción del puerto en la localidad de San Antonio (33°35′18,55″S 71°36′56,79″O), ventajosa ubicación que cumplía con las necesidades que demandaba el país. Al igual que todo puerto, sus características geográficas son factores determinantes al momento de planificar y diseñar las obras de defensa y construcción del puerto (Tobar, 2019).

El Puerto se ubica al sur de la región de Valparaíso y se emplaza a 2 [km] de la desembocadura del río Maipo, fuente de alimentación de sedimento del litoral central. Sin embargo, el movimiento de estas arenas es limitado, pues dada la batimetría del lugar (existencia del cañón submarino[5]) se produce una zona de confluencia de oleaje, lo que impide a las arenas avanzar hacia el norte y traspasar el referido cañón (EPSA, 2013). El puerto es abrigado por la Punta de Panul por el norte y protegido por el Molo Sur al otro extremo (Figura 7), con profundidades que varían entre 10 y 50 [m] en la dársena y 110 [m] en aguas profundas al oeste (EPSA, 2013).

La Empresa Portuaria San Antonio (en adelante EPSA), es el ente administrativo del puerto que está bajo el mando del Estado (EPSA, Memoria Anual 2021, 2021). La empresa realiza sus tareas a través de terceros mediante cinco concesiones portuarias: San Antonio Terminal Internacional (STI), DP World San Antonio, Puerto Panul, QC Policarpo Toro y Terquim.

[5] El cañón San Antonio bordea el lado sur de la cuenca Valparaíso. Tiene un largo sobre 170 [km], una pendiente de 2º desde su cabeza hasta unos 80 [km] de la costa y luego cambia a 6, 3º hasta su desembocadura). El cañón es aparentemente alimentado por los sedimentos provenientes del río Maipo durante períodos de alta descarga (Hagen et al., 1996).

FIGURA 7: INSTALACIONES DEL PUERTO DE SAN ANTONIO. (1) SAN ANTONIO TERMINAL INTERNACIONAL, PROTEGIDO POR EL MOLO SUR. (2) DP WORLD SAN ANTONIO, (3) PUERTO PANUL, (4) QC POLICARPO TORO Y (5) TERQUIM

Fuente: Adaptado de EPSA (2021)

3.3.1 ZONA DE ESPERA DE PRÁCTICOS

El practicaje es un servicio de asesoramiento prestado a bordo a capitanes de un buque, con el fin de facilitar la entrada y salida de la embarcación en el puerto. Esta maniobra tiene una zona geográfica establecida para el embarque de prácticos, determinada para las condiciones de cada puerto, tomando en cuenta siempre parámetros de seguridad. La Dirección General del Transporte Marítimo y de Marina Mercante (DIRECTEMAR) es la encargada de establecer las zonas de practicaje, esto mediante un estudio de maniobras el cual define condiciones de operatividad óptimas para la seguridad de los trabajadores. Además, DIRECTEMAR es la encargada de determinar las naves en que se debe transportar el práctico.

En el puerto de San Antonio, el práctico viaja en una lancha Pilot Dalcahue 2 millas náuticas afuera del puerto, con condiciones de oleaje caracterizadas por una altura de ola máxima de 2 [m]. A medida que se acerca la lancha a la embarcación, se esperar que se presente la cresta de la ola, momento en que el práctico sube a la escala de gato del buque de

destino (Figura 8). Estando en la embarcación, el práctico asesora al capitán de buque, que además cuenta con la guía de remolcadores, cuya cantidad depende del tamaño de la nave.

FIGURA 8: EMBARQUE DE PRÁCTICO EN EL PUERTO DE SAN ANTONIO

Fuente: (G5, 2021)

3.3.2 RESTRICCIONES OPERACIONALES

El puerto de San Antonio cuenta con una Resolución de Operaciones C.P.S.A ORDINARIO N° 12.600/91 VRS, que habilita las Instalaciones Portuarias del Puerto de San Antonio. Donde establecen las condiciones límites de operación para distintos tipos de naves, condiciones establecidas por DIRECTEMAR. Estas restricciones se definen para diferentes tipos de naves en función de valores umbrales de operación tanto para vientos como oleaje, las que son utilizadas en el presente trabajo para calcular el *downtime* operacional.

TABLA 1: UMBRALES OPERACIONALES PUERTO DE SAN ANTONIO

Eslora y Manga	Naves Tipo	Dirección y Velocidad Máx. del Viento (nudos)	Altura de la Ola (Hs) (metros) y Período	Otras Limitaciones
Hasta 253 metros, cuya manga ≤ 32,2 metros	Todas, excepto RO-RO y Pasajes	Norte ≤15 Otras direcciones hasta 20	Hs ≤ 2,0. Periodo ≤ 12 seg.	• Para corrida de nave Sitio N° 8: Altura de Ola ≤ 1 metro frente al sitio de atraque; Viento ≤ 15 nudos de cualquier dirección. • Permanencia en su sitio: Altura de Ola ≤ 1 metro en los Sitios N° 1 al N° 7 y Muelle Costanera (C1 y C2), y 2 metros en los Sitios N° 8 y N° 9. • Ejecución de faenas de carga y/o descarga: 1 metro en los Sitios N° 1 al N° 7 y Muelle Costanera (C1 y C2), y 2 metros en los Sitios N° 8 y N° 9.
≥ a 253 y hasta 367 metros, cuya manga > 32,2 metros	Todas, excepto Naves de Pasajes	Cualquier dirección ≤ 15	(Hs) ≤ 1,8. Periodo ≤ 12 seg.	Para aquellas naves que operen hacia o desde el Sitio N° 2, STI deberá levantar los brazos de las Grúas Gantry del Sitio N° 1, antes del inicio de la maniobra y no los podrá bajar hasta que el Práctico lo autorice.
		Cualquier dirección ≤ 10	1,8 < Hs ≤ 2,0. periodo ≤ 12 seg.	
≤ a 237 metros, cuya manga ≤ a 38 metros.	RO-RO	Cualquier dirección ≤ 10	(Hs) ≤ 2,0 mts. Periodo ≤ 12 seg.	• Sólo podrán operar en los Sitios N° 1 al N° 4-5 y Muelle Costanera C1 y C2. • Se deben utilizar 2 remolcadores ASD, de a lo menos 40 toneladas de Bollard Pull cada uno en todas sus maniobras. • Utilizar 2 lanchas de amarre, pudiendo dispensarse una de ellas solo para las maniobras de zarpe de los Sitios N° 4-5, cuando la nave se encuentre atracada por su banda de estribor y su eslora sea inferior a 200 metros.
≤ a 300 metros	Pasajes	Cualquier dirección ≤ 15	(Hs) ≤ 1,5 mts. Periodo ≤ 12 seg.	• Sólo podrán operar en los Sitios N° 4-5 y Muelle Costanera C1 y C2. • Deberá utilizar 2 remolcadores tomados y dos lanchas de amarre, independiente de la eslora de la nave (hasta 300 metros).

Fuente: DIRECTEMAR, Habilita la Operación del Puerto de San Antonio, C.P. S.A. ORD. N° 12.000/__91_/ VRS (2022).

En este estudio también se analizan los umbrales de operación definidos por la ROM (PPEE, 2000), que son utilizados para la navegación y maniobras de buques. Estos criterios consideran las condiciones de atraque de buques, paralización de las operaciones de carga y descarga, y permanencia de los buques en el muelle, siendo estas también dependientes de otros factores además del propio buque.

Los umbrales de operación definidos en la tabla 8.1 (Anexo 8.2) de la ROM (PPEE, 2000) indican que:

- Para el atraque de buques portacontenedores y Ro-Ros la magnitud del viento no debe superar los 17 [m/s] para las acciones en sentido longitudinal al muelle y 10 [m/s] a las acciones en sentido transversal al muelle.
- En la operación de carga y descarga los buques portacontenedores, Ro-Ros y cruceros no deben superar los 22 [m/s] de magnitud de viento en acciones tanto de sentido longitudinal como transversal al muelle.

- Para la permanencia de cruceros en el muelle la magnitud del viento no debe superar los 22 [m/s].

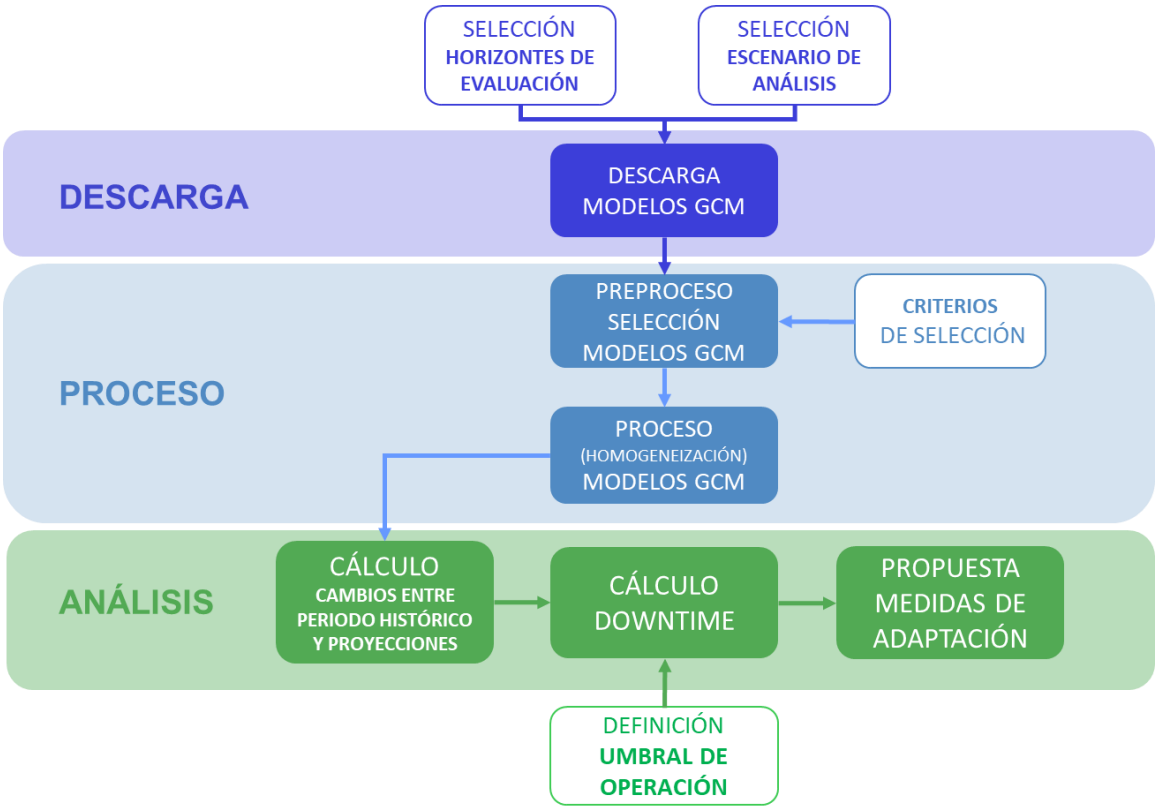
La ROM también define umbrales de operación para el clima de oleaje, sin embargo, a efectos de este estudio no se consideran, pues son umbrales establecidos en el muelle, y en este trabajo se busca conocer el clima de oleaje en la zona de embarque de prácticos, la cual se encuentra a 2 [km] hacia aguas profundas.

4 METODOLOGÍA

4.1 ESTUDIO DE VIENTOS

En esta sección se describe el proceso para caracterizar el clima futuro de los vientos en el puerto de San Antonio. La Figura 9 sintetiza las actividades que se deben desarrollar.

FIGURA 9: METODOLOGÍA PARA ESTUDIO DE VIENTOS



Fuente: Elaboración propia.

4.1.1 BASES DE DATOS DE VIENTOS

La base de datos que se utiliza en este proyecto se compone de campos de vientos provenientes de GCM, para una ventana histórica, y proyecciones a medio y fin de siglo. Los GCM corresponden a un conjunto de multi-modelos CMIP6 que se obtiene de la base

de datos *World Climate Research Programme*[6] *(*WCRP). La descarga de modelos depende de la disponibilidad según escenario de horizontes de evaluación. Dado que los modelos poseen una resolución horizontal gruesa en celdas que comprenden desde los 100 km a los 500 km de extensión, se procede a filtrar los modelos mediante criterios de selección, con el fin de escoger los modelos GCM que más se ajusten.

a. **Selección de escenarios de cambio climático**

Para efectos de este proyecto se utiliza un escenario SSP con la finalidad de entregar información de la variabilidad del viento a nivel espacial como temporal. El escenario más desfavorable en términos de impactos generados por el cambio climático es el SSP5-8.5, el cual corresponde a una actualización del escenario RCP8.5 del AR5. El SSP5-8.5 asume una economía fuertemente basada en combustibles fósiles. De concretarse este escenario de altas emisiones se produciría un forzante radioativo de 8.5 W/m^2 en el año 2100 (O'Neill B. C., 2016).

b. **Periodos de evaluación**

Los periodos de evaluación son una ventana histórica (1985 – 2004), una proyección a un horizonte cercano (2026 – 2045) y una proyección a un horizonte lejano (2081 – 2100).

c. Criterios de selección

Una vez obtenida la descarga de los GCM para el escenario y horizonte de evaluación, se procede a su selección mediante los siguientes criterios:

- ✓ **Variantes del modelo base:** Una característica de los GCM es que se ejecutan diferentes versiones de un mismo modelo para un mismo escenario SSP, lo que se conoce como un *ensemble*. A cada versión se le introduce una perturbación levemente diferente. Esto se debe a que el sistema climático es caótico y, por lo tanto, pequeños cambios en las condiciones iniciales dan lugar a resultados diferentes (PNUDECU et. al, 2022). La nomenclatura utilizada en el proyecto CMIP6 establece que cada miembro del *ensemble* debe indicarse según la denominación:

[6] Descarga base de datos modelos GCM: https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/

$r\langle k \rangle$	: realización	*realization index*
$i\langle l \rangle$	: inicialización	*initialization index*
$p\langle m \rangle$	: parametrización física	*physics index*
$f\langle n \rangle$	: forzamiento	*forcing index*

- ✓ **Frecuencia de muestreo:** La frecuencia de un GCM sigue la nomenclatura:

  1hr : cada 1 hora
  3hr : cada 3 horas
  3hrPT : cada 3 horas en el punto especificado dentro del periodo de tiempo
  6hr : cada 6 horas
  6hrPT : cada 6 horas en el punto especificado dentro del periodo de tiempo
  Day : medias diarias
  Mon : medias mensuales
  MonC : climatología mensual calculada a partir de medias mensuales

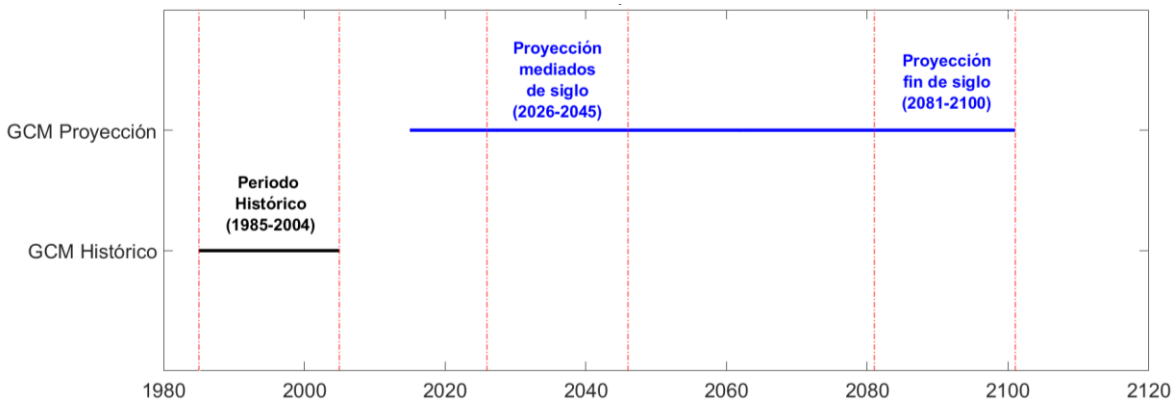
- ✓ **Identificador de cuadrícula:** El tipo de grilla de un GCM se sigue la nomenclatura:

  Gn : grilla nativa. Algunas veces a este tipo de grilla se le agrega una z, a o g para indicar cuadriculas limitadas a la Antártida o a Groenlandia.
  Gr : las salidas del modelo no se informan en una cuadricula nativa, si no que se han vuelto a cuadricular a una cuadricula principal.

4.1.1.1 DISPONIBILIDAD DE LA BASE DE DATOS

El intervalo de duración de las bases de datos de viento (GCM) usadas en este estudio se presentan en la Figura 10.

FIGURA 10: INTERVALO DE TIEMPO BASE DE DATOS MAGNITUD DE VIENTO



Fuente: Elaboración propia.

4.1.1.2 CORRECCIÓN DE LA BASE DE DATOS

La corrección de los datos de vientos se basa en homogeneizar toda la data a una altura de 10 [m] y a una ráfaga de 1 minuto, con el fin de aplicar las condiciones límites de operación de buques en el frente de atraque. Esta sección se realiza al registro de viento *in situ*, a la base de datos del Explorador Eólico y a los modelos GCM. La corrección se basa en la metodología de USACE (2008) siguiendo las siguientes correcciones:

a. Corrección por elevación (Fz)
b. Corrección por duración (Fd)
c. Corrección por temperatura (Ft)
d. Corrección por ubicación (Fu)

La magnitud del viento corregida (U^c) se calcula según la expresión:

$$U^c = U * Fz * Fd * Ft * Fu \quad \text{EC. 1}$$

La metodología empleada para la corrección de los factores se detalla en el ANEXO 8.1.

4.1.2 ANÁLISIS DE DOWNTIME POR VIENTO

Para el cálculo del *downtime* operacional, se elaboran curvas de excedencia con la magnitud del viento para cada GCM, las cuales se intersecan con los umbrales de operación definidos para el Puerto de san Antonio. Estos umbrales son definidos en función de factores como la profundidad del agua, la altura, el tamaño y el peso de los barcos, y otros aspectos que afectan a la seguridad y eficiencia de la operación del puerto y de los barcos que la utilizan. Una vez definido el umbral para las restricciones operacionales del puerto de San Antonio, se procede a calcular la probabilidad de excedencia de ambos periodos, obteniendo así el porcentaje de inoperatividad del puerto debido a la variable de viento.

4.2 ESTUDIO DE OLEAJE

Para cuantificar las condiciones futuras del oleaje en la zona de embarque de prácticos (desde ahora zona de interés) se utilizan modelos GCM para la generación de oleaje en aguas profundas, para así evaluar el clima de oleaje en dos ventanas de tiempo futuras. Utilizando una metodología similar que el estudio de viento.

4.2.1 BASES DE DATOS DE OLEAJE

Los GCM utilizados corresponden a los del proyecto “Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile” (MMAa, 2019) y fueron desarrollados específicamente para caracterizar el clima de oleaje frente a las costas de Chile. Estos modelos se basan en una base de datos de aguas profundas y utilizan un conjunto de multi-modelos CMIP5 para predecir el clima futuro. Los GCM se calibran con un *hindcast* histórico, según se describe en Winckler et al. (2022). La descarga de modelos depende de la disponibilidad según el escenario y los horizontes de evaluación.

a. Selección de escenarios de cambio climático

Para este proyecto se utiliza el escenario RCP8.5 debido a que la última plataforma CMIP6 aún no presenta datos de viento y hielo oceánico que permiten generar datos de oleaje. El escenario RCP8.5 es un escenario de alto impacto del cambio climático. Se basa en supuestos de que la población y el PIB crecerán a tasas relativamente bajas, y que no se

implementarán políticas de cambio climático. Como resultado, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) seguirán siendo altas y el cambio climático tendrá un impacto significativo en el planeta (Castilla et al., 2019). Este escenario se utiliza a menudo como un “peor caso” para evaluar cómo el cambio climático podría afectar al planeta en el futuro y para tomar medidas para reducir el impacto.

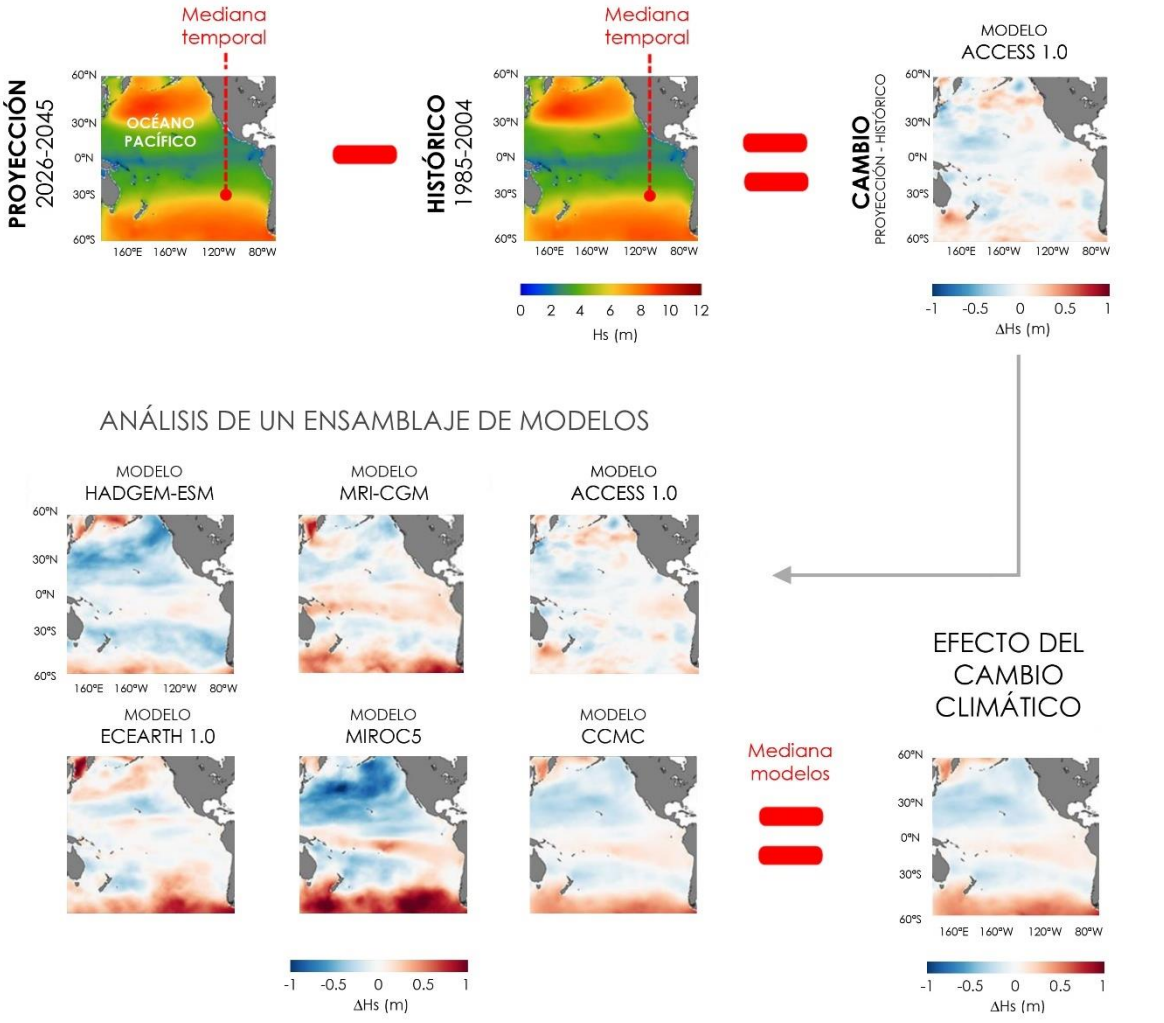
b. Horizontes de análisis

Los periodos de evaluación son una ventana histórica (1985-2004), una proyección a un horizonte cercano (2026-2045) y una proyección a un horizonte lejano (2081-2100).

4.2.2 ANÁLISIS DE DOWNTIME POR OLEAJE

Para analizar los cambios y la incertidumbre en las proyecciones de oleaje, se combinan las predicciones de varios GCM. La Figura 11 muestra la metodología que se emplea para ello. Arriba se muestra el cálculo de la mediana temporal de un GCM para el periodo histórico y la proyección a medio siglo, además de la diferencia entre medianas atribuida al cambio climático. Abajo se muestra la diferencia entre medianas para los 6 GCM, a partir de la cual se calcula la mediana entre GCM. Este procedimiento se repite para la proyección a fin de siglo. Las proyecciones se comparan con los umbrales máximos admisibles de altura de olas establecidos para la zona de espera de prácticos (Tabla 4), a partir de lo cual se evalúa el tiempo disponible para su operación segura.

FIGURA 11: ESQUEMA DE CÁLCULO DE CAMBIOS EN LA ALTURA DE OLA PARA LA PROYECCIÓN DEL ESCENARIO RCP8.5 (2026-2045) RESPECTO AL PERIODO HISTÓRICO (1985-2004)



Fuente: GEOlibros No 38 (2022)

5 RESULTADOS

5.1 ESTUDIO DE VIENTO

5.1.1 SELECCIÓN DE MODELOS GCM

Al escoger los GCM se consideran criterios de selección que aseguran su idoneidad para el propósito del estudio. Estos criterios consideran la precisión, la resolución espacial, la resolución temporal, la capacidad de representar procesos físicos clave y la capacidad de reproducir el clima observado. Estos criterios se resumen en las siguientes características:

MIP	: CMIP6
Experimento	: SSP5-8.5
Variable	: *Wind Speed*
Ensemble	: r1i1p1f1
Frecuencia	: 3 hrs
Grillado	: Gn

En este caso, se seleccionaron cuatro modelos que cumplen con estas características y están disponibles para el periodo histórico (1985-2004), mediados de siglo (2026-2045) y fin de siglo (2081-2100). Los modelos se presentan en la Tabla 2 y la data se descargó del servidor de dicho proyecto CMIP6[7].

Cabe notar que seleccionar más de un GCM es una buena práctica para predicciones climatológicas, ya que cada modelo puede tener ventajas y desventajas, y proporcionar información adicional y útil. Además, comprar los resultados de diferentes modelos puede ayudar a tener una visión más completa y precisa del comportamiento del viento.

[7] https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/

TABLA 2: MODELOS GCM DEL CMIP6 SELECCIONADOS PARA EL ESTUDIO DE VIENTOS

Símbolo	Modelo	Centro de modelado	Resolución Atmosférica (Lon x Lat)	Periodo histórico	Proyección SSP5-8.5
M1	MIROC6[8]	JAMSTEC, Japón	1.4°x1.4°	1850-2014	2015-2100
M2	MPI-ESM1-2-LR[9]	MPI-M, Alemania.	1.9°x1.9°	1850-2014	2015-2100
M3	CMCC-CM2-SR5[10]	CMCC, Italia.	1.25°x1°	1850-2014	2015-2100
M4	CMCC-ESM2	CMCC, Italia.	1.25°x1°	1850-2014	2015-2100

Fuente: Elaboración propia.

5.1.2 PROYECCIONES A ESCALA OCEÁNICA

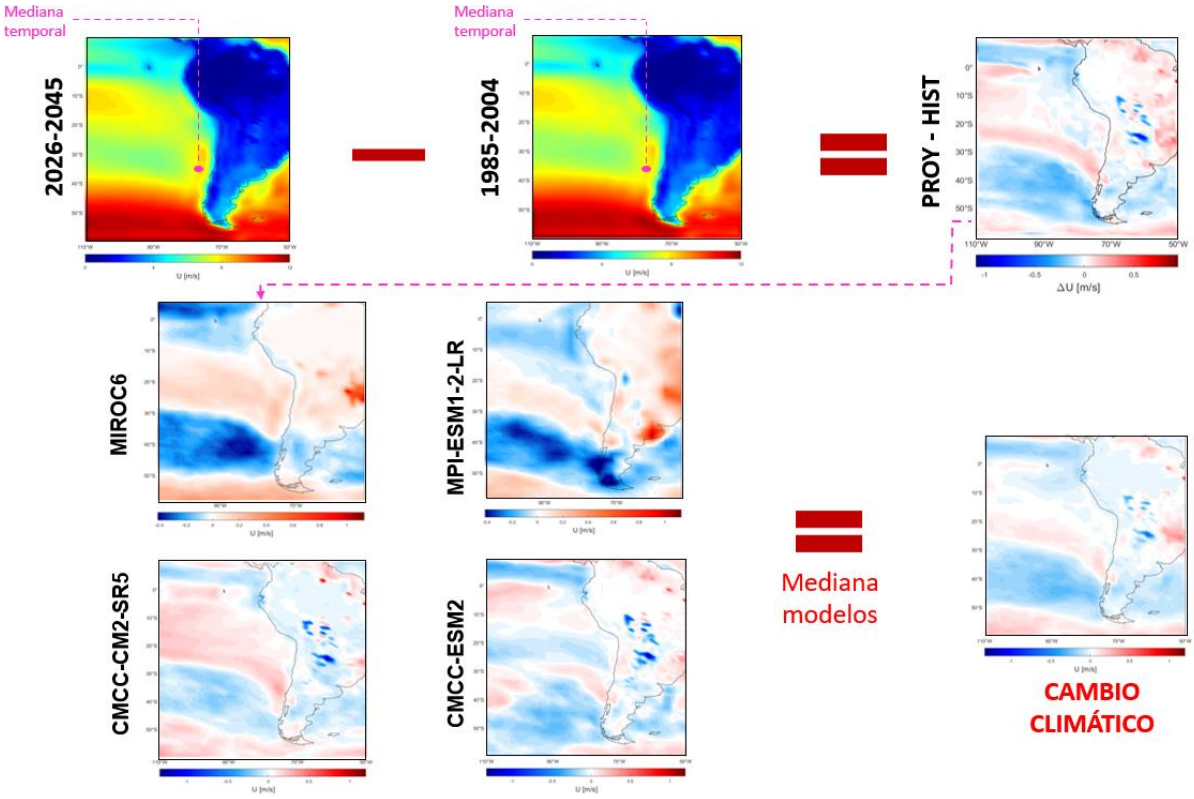
Para analizar y comparar la magnitud del viento en una región de Océano Pacífico, incluyendo América del Sur, se utiliza un ensamblaje de modelos y se limita la resolución espacial a la zona específica. La metodología de cálculo se presenta en la Figura 12, que muestra la mediana para el periodo histórico y para mediados de siglo, así como su diferencia atribuida al cambio climático. Además, se calcula la diferencia de magnitud entre medianas para cada modelo y se obtiene la mediana entre modelos. Este proceso se repite para el periodo a fin de siglo.

[8] Para más información consultar a la referencia (Tatebe, 2019).

[9] Para más información consultar a la referencia (Mauritsen, 2019).

[10] Para más información consultar a la referencia (Xu, y otros, 2021)

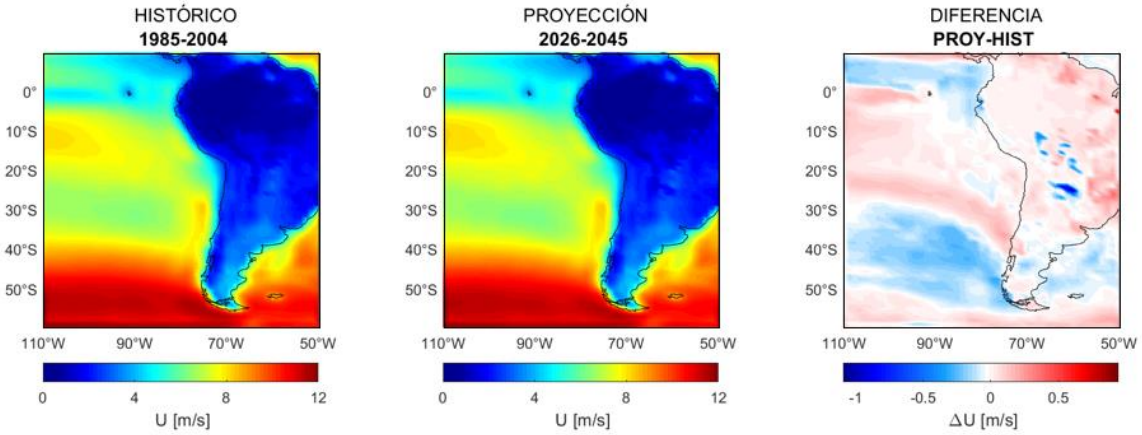
FIGURA 12: ESQUEMA GENERAL DE EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA MAGNITUD DEL VIENTO PARA LA PROYECCIÓN DEL ESCENARIO SSP5-8.5 (2026-2045) RESPECTO AL PERIODO HISTÓRICO (1985-2004)



Fuente: Adaptado de MMAa (2019).

La Figura 13 muestra una diferencia en la magnitud del viento entre el periodo histórico y la proyección a mediados de siglo en diferentes zonas de latitud en el Océano Pacífico. En las latitudes comprendidas entre 0° y 10°S, se observa un leve aumento en la magnitud del viento de aproximadamente 0.5 [m/s]. Entre 10°S y 50°S, se observa una disminución en la magnitud del viento, alcanzado una diferencia inferior a 0.5 [m/s]. Por último, en las latitudes más australes, desde 50°S, se observa un aumento en la magnitud del viento.

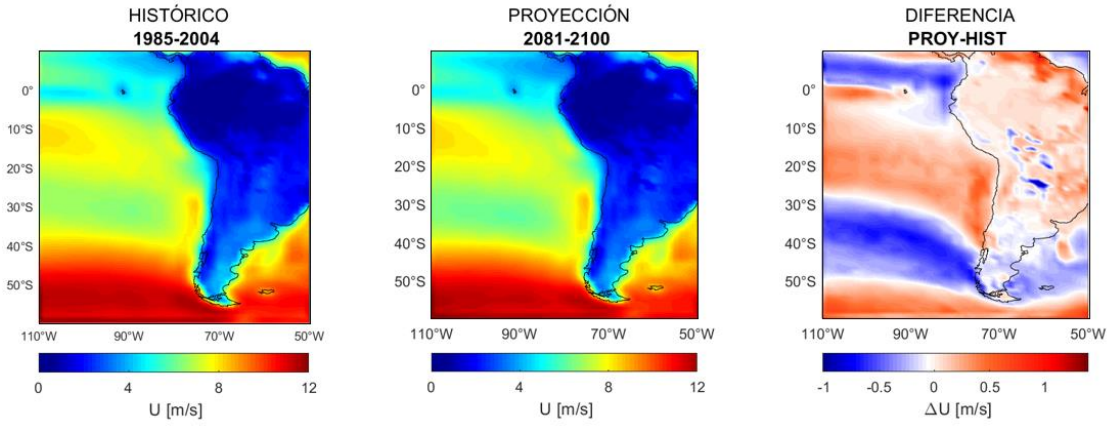
FIGURA 13: COMPARACIÓN DE LA MAGNITUD DEL VIENTO PARA EL PERIODO HISTÓRICO Y PROYECCIÓN A MEDIADOS DE SIGLO, ADEMÁS DE LA DIFERENCIA ENTRE AMBOS



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 14 muestra que hay una diferencia en la magnitud entre el viento periodo histórico y la proyección a fin de siglo en diferentes zonas de latitud del Océano Pacífico. Las diferencias tienen resultados similares a las zonas mostradas en la Figura 13, pero en este caso, se intensifican en magnitud.

FIGURA 14: COMPARACIÓN DE LA MAGNITUD DEL VIENTO PARA EL PERIODO HISTÓRICO Y PROYECCIÓN A FIN DE SIGLO, ADEMÁS DE LA DIFERENCIA ENTRE AMBOS

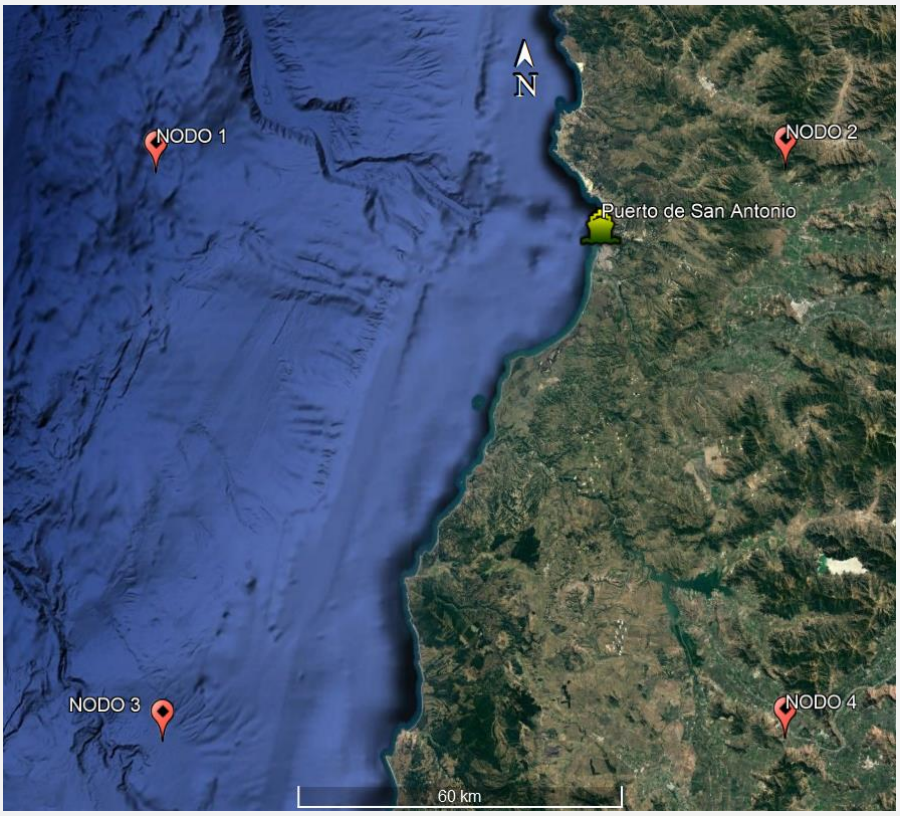


Fuente: Elaboración propia.

5.1.3 PROYECCIONES EN EL PUERTO SAN ANTONIO

Para obtener predicciones de la magnitud del viento en el puerto de San Antonio, se realiza una interpolación espacial a partir de los nodos de GCM cercanos al puerto (Figura 15).

FIGURA 15: UBICACIÓN NODOS GCM Y PUERTO

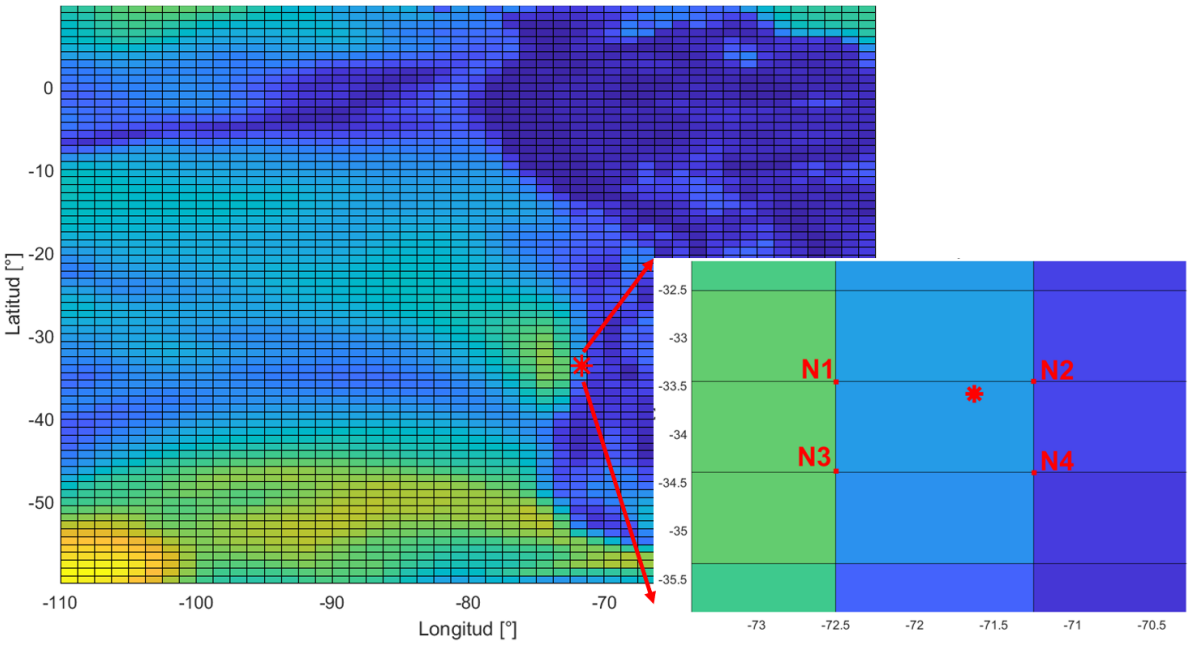


Sitio	Latitud	Longitud
Punto de interés (*)	33°35'11.22"S	71°37'25.77"O
Nodo 1 (N1)	33°27'19.79"S	72°30'0.00"O
Nodo 2 (N2)	33°27'19.79"S	71°15'0.00"O
Nodo 3 (N3)	34°23'52.46"S	72°30'0.00"O
Nodo 4 (N4)	34°23'52.46"S	71°15'0.00"O

Fuente: Elaboración propia mediante Google Earth.

Cada GCM tiene grillas distintas, por lo que se identifican los cuatro nodos más cercanos en cada GCM a partir de los cuales se hace una interpolación lineal en el puerto de San Antonio. La Figura 16 muestra los nodos de la grilla del modelo M1 (MIROC6), y se puede ver claramente el Océano Pacífico con el continente.

FIGURA 16: ESQUEMA DE INTERPOLACIÓN DE DATOS DE UN GCM AL PUERTO DE SAN ANTONIO



Fuente: Elaboración propia.

Una vez interpolada la magnitud del viento en la bocana del puerto, se procede a realizar la homogeneización de datos, es decir, se ajustan los datos a las recomendaciones establecidas por el USACE (2006), que incluyen llevar toda la data a 10 [m] de altura y a una ráfaga de 1 minuto. En este caso, los GCM solo necesitan aplicar un factor de corrección por duración, utilizando la Ec. 1. Los factores de corrección para cada modelo se presentan en la Tabla 3.

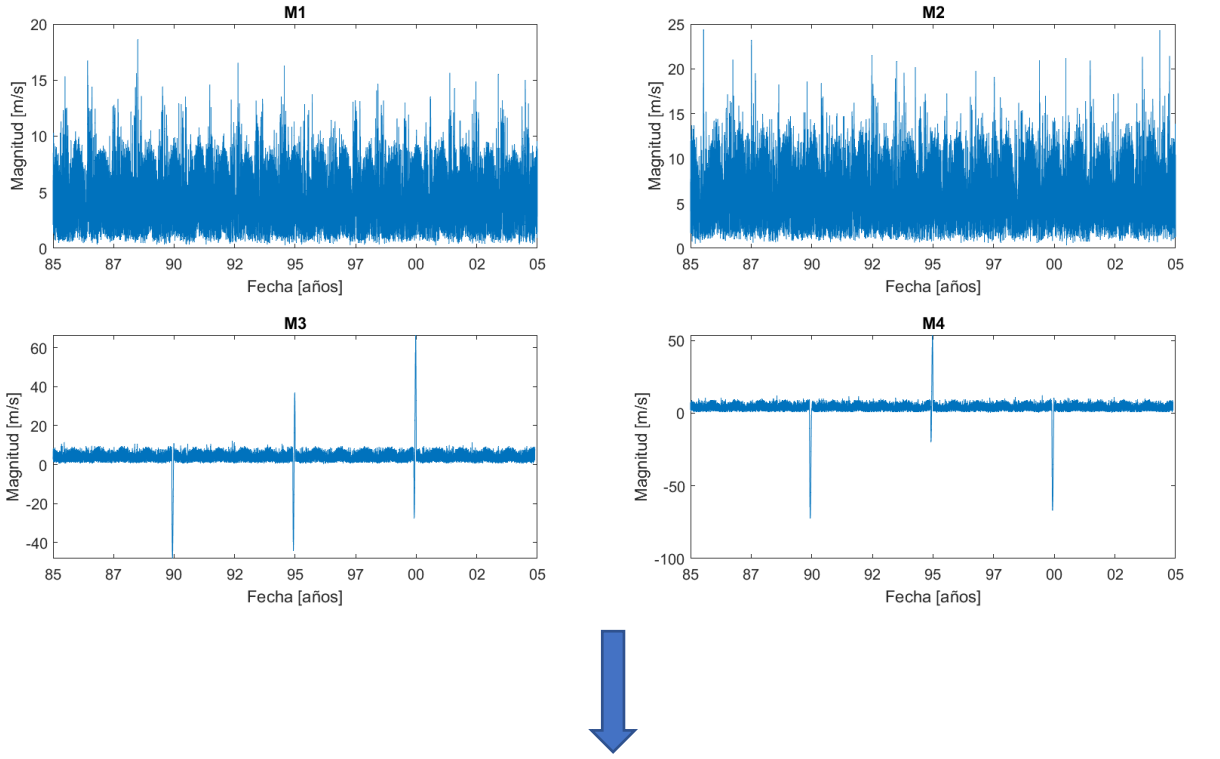
TABLA 3: FACTORES DE CORRECCIÓN DE LA MAGNITUD DEL VIENTO

	Elevación Fz	Temperatura Ft	Duración Fd	Ubicación Fu
GCM	1.00	1.00	1.24	1.00

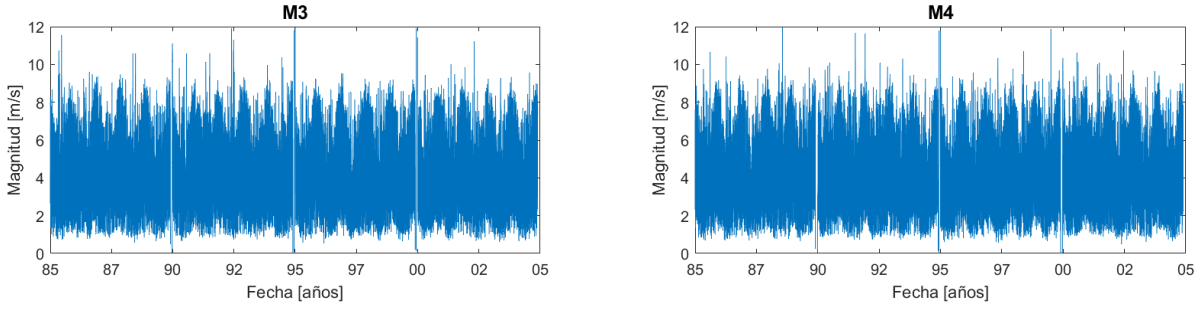
Es importante tener en cuenta los gaps o falta de datos en una serie de tiempo al momento de realizar un análisis. Esto puede afectar la precisión de los resultados y, en algunos casos, puede ser necesario rellenar los datos faltantes. Hay varias técnicas que se puede utilizar para rellenar gaps, tales como la interpolación, la extrapolación o la imputación de datos. La elección de alguna de ellas depende del contexto, cantidad y distribución de los datos faltantes. Es importante tener cuidado al utilizar cualquiera de estas técnicas, ya que pueden introducir sesgos o errores en los resultados.

En este caso, la interpolación temporal genera valores de magnitud no acordes a la realidad o que son atípicos en los datos, por lo que no es adecuada. Un ejemplo de ello se observa en la serie temporal del modelo M3 y M4 (Figura 17). Otra opción es reemplazar los datos faltantes con valores NAN *(Not a Number*). Sin embargo, hay que tener en cuenta que esta opción no es una corrección, sino que simplemente marca la ausencia de datos y no reemplaza los datos faltantes por valores válidos.

FIGURA 17: SERIE DE TIEMPO MODELOS GCM Y REEMPLAZO DE GAPS EN LOS MODELO M3 Y M4



Arreglo M3 y M4



Fuente: Elaboración propia.

5.1.4 ANÁLISIS DE DOWNTIME POR VIENTO

Los umbrales de operación son límites que se establecen para determinar en qué condiciones es seguro operar, garantizando la seguridad de la nave y la tripulación. En la Tabla 4 se muestran los umbrales de operación para el viento en función del tipo de nave, definidos a partir de la Tabla 1. Si se superan estos umbrales, no se puede operar.

TABLA 4: UMBRALES DE OPERACIONALES PARA EL VIENTO DEFINIDOS POR LA CAPITANÍA DE PUERTO

Eslora (E)	Manga (M)	Naves Tipo	Viento [nudos]	Viento [m/s]
E < 253 m	M ≤ 32,2 m	Todas, excepto RO-RO[11] y Pasajes	15	7.72
253 m< E < 367 m	M > 32,2 m	Todas, excepto Naves de Pasajes	10	5.14
E ≤ a 237 m	M ≤ a 38 m	RO-RO	10	5.14

Fuente: Adaptado de DIRECTEMAR (2022).

TABLA 5: UMBRALES DE OPERACIONALES PARA EL VIENTO DEFINIDOS POR LA ROM 3.1-99

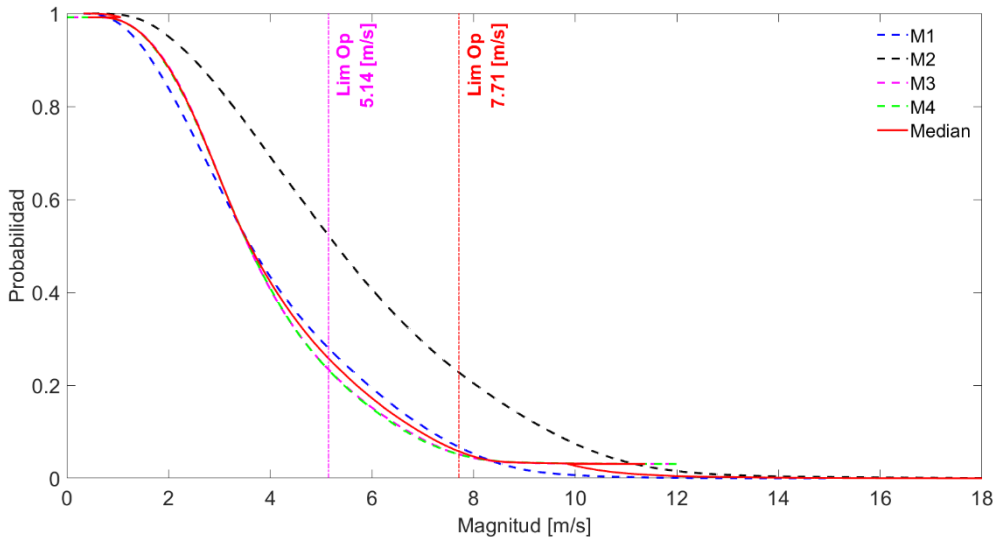
Criterio	Acciones sentido al muelle	Viento [nudos]	Viento [m/s]
Atraque de buque	Longitudinal	33	17
	Transversal	19	10
Paralización operaciones carga y descarga	Longitudinal y Transversal	43	22
Permanencia de buques en muelle	-	43	22

Fuente: Adaptado de la ROM 3.1-99 (2000).

[11] RO-RO acrónimo del término en ingles Roll On Roll Off, sirve para para referenciar a cualquier tipo de buque, barco que transporte cargamento rodado, ya sea automóviles, camiones o vehículos industriales, entre otros (Stock Logistic,2016).

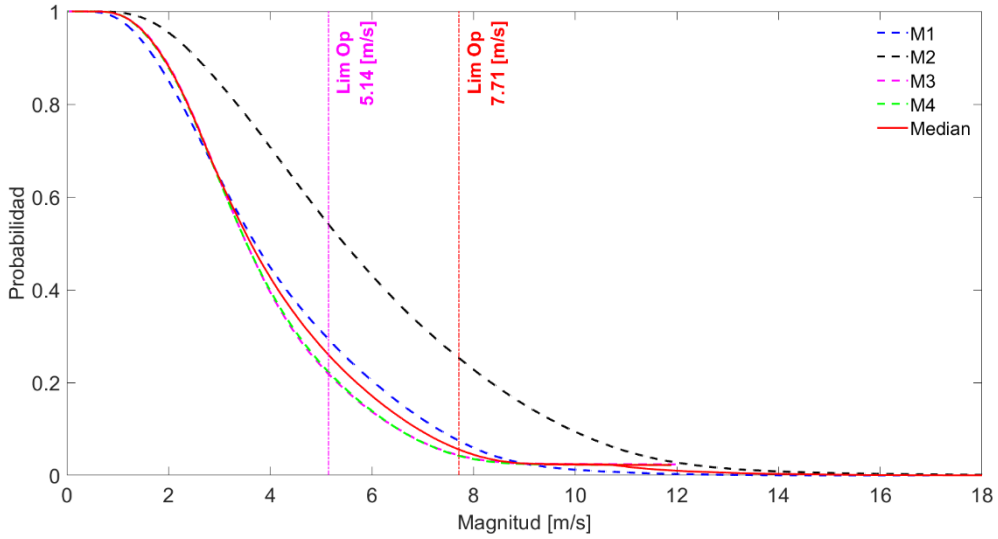
Una vez determinado los umbrales de operación y la data de magnitud de viento de los modelos GCMs en el puerto, se procede a calcular el *downtime* operacional por viento en la bocana del puerto. Esto se realiza cruzando las probabilidades de excedencia con los umbrales de operación anteriormente definidos.

FIGURA 18: CRUCE DE CURVAS DE EXCEDENCIA DE LA MAGNITUD DEL VIENTO EN EL PERIODO HISTÓRICO (1985-2004). UMBRALES DEFINIDOS POR LA CAPITANÍA DE PUERTO



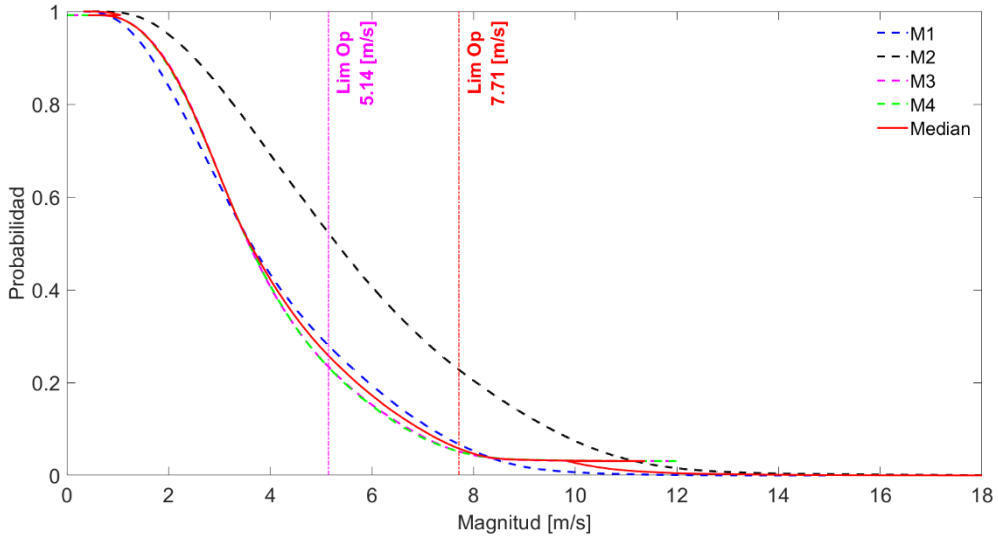
Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 19: CRUCE DE CURVAS DE EXCEDENCIA DE LA MAGNITUD DEL VIENTO EN LA PROYECCIÓN A MEDIADOS DE SIGLO (2026-2045). UMBRALES DEFINIDOS POR LA CAPITANÍA DE PUERTO



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 20: CRUCE DE CURVAS DE EXCEDENCIA DE LA MAGNITUD DEL VIENTO EN LA PROYECCIÓN A FIN DE SIGLO (2081-2100). UMBRALES DEFINIDOS POR LA CAPITANÍA DE PUERTO

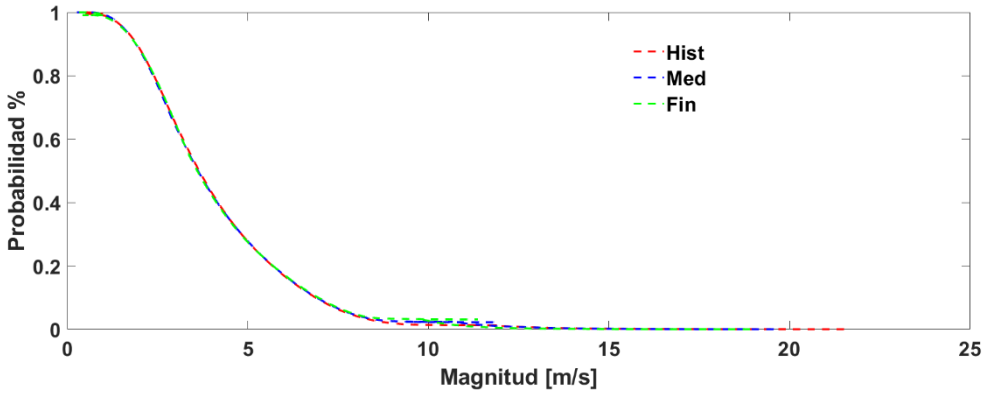


Fuente: Elaboración propia.

Las Figura 18Figura 19 y Figura 20 muestran las curvas de excedencia para el periodo histórico y en las proyecciones a medio y fin de siglo respectivamente. Todas indican que el GCM M2 (MPI-ESM1-2-LR) tiende a intensificar la magnitud de los vientos en comparación con los demás modelos. El GCM M3 y M4 (CMCC-CM2-SR5 y CMCC-ESM2) tienen las menores intensidades.

Según los umbrales establecidos por la Capitanía de Puerto, para la mediana de los 4 modelos GCMs se estima que cerca del 26% de las horas del año el viento supera los 5,14 [m/s] y un 5-5,5% y 5,76% excede los 7,71 [m/s]. Es importante tener en cuenta que la mediana es una medida de tendencia central más robusta a valores extremos que el promedio. En este caso, es posible que el modelo M2 tenga valores más intensos en algunas ventanas de estudio, lo que podría afectar el promedio y dar una representación distorsionada de la magnitud del viento. Al calcular la mediana, se minimiza el efecto de estos valores y se obtiene una medida más precisa del comportamiento del modelo durante diferentes periodos de tiempo.

FIGURA 21: MEDIANA DE LOS MODELOS GCM DE VIENTO POR PERIODOS DE TIEMPO



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 21 se visualiza solo la mediana de los modelos por cada periodo de estudio, sin embargo, no se logra visualizar a simple vista la diferencia entre las curvas. Es por lo que en la Tabla 6y Tabla 7Tabla 4 se detalla los resultados de la probabilidad de excedencia que tiene el viento respecto a diferentes umbrales en el puerto de San Antonio establecidos

por la Capitanía de Puerto. La probabilidad de excedencia es la probabilidad de que la magnitud del viento supere ciertos límites en una distribución de probabilidad dada.

TABLA 6: RESULTADOS DOWNTIME OPERACIONAL. UMBRAL DE 5,14 [M/S] DEFINIDO POR CAPITANÍA DE PUERTO

	Velocidad de Viento umbral: 10 [nudos] ~ 5,14 [m/s]							
	Probabilidad de excedencia %			Downtime [hora/año]			Diferencia [hora/año]	
Modelo	1985-2004	2026-2045	2081-2100	1985-2004	2026-2045	2081-2100	Med-Hist	Fin-Hist
M1	29,06	29,37	28,03	2545,72	2572,87	2455,49	**27,16**	**-90,23**
M2	54,95	54,12	52,29	4813,68	4740,97	4580,66	**-72,71**	**-233,02**
M3	21,39	21,87	23,43	1873,82	1915,87	2052,53	**42,05**	**178,70**
M4	22,54	22,27	23,31	1974,56	1950,91	2042,02	**-23,65**	**67,45**
Mediana	**25,92**	**26,01**	**25,82**	**2270,65**	**2278,54**	**2261,89**	**7,88**	**-8,76**

Fuente: Elaboración propia.

TABLA 7: RESULTADOS DOWNTIME OPERACIONAL. UMBRAL DE 7,71 [M/S] DEFINIDO POR CAPITANÍA DE PUERTO

	Velocidad de Viento umbral: 15 [nudos] ~ 7,71 [m/s]							
	Probabilidad de excedencia %			Downtime [hora/año]			Diferencia [hora/año]	
Modelo	1985-2004	2026-2045	2081-2100	1985-2004	2026-2045	2081-2100	Med-Hist	Fin-Hist
M1	6,97	7,46	6,70	610,19	653,12	587,24	**42,92**	**-22,95**
M2	24,90	25,30	22,75	2181,30	2216,34	1992,96	**35,04**	**-188,34**
M3	3,58	4,29	5,12	313,32	375,51	448,75	**62,20**	**135,43**
M4	3,89	4,22	5,09	340,56	369,29	445,51	**28,73**	**104,94**
Mediana	**5,28**	**5,55**	**5,76**	**462,59**	**486,42**	**504,64**	**23,83**	**42,05**

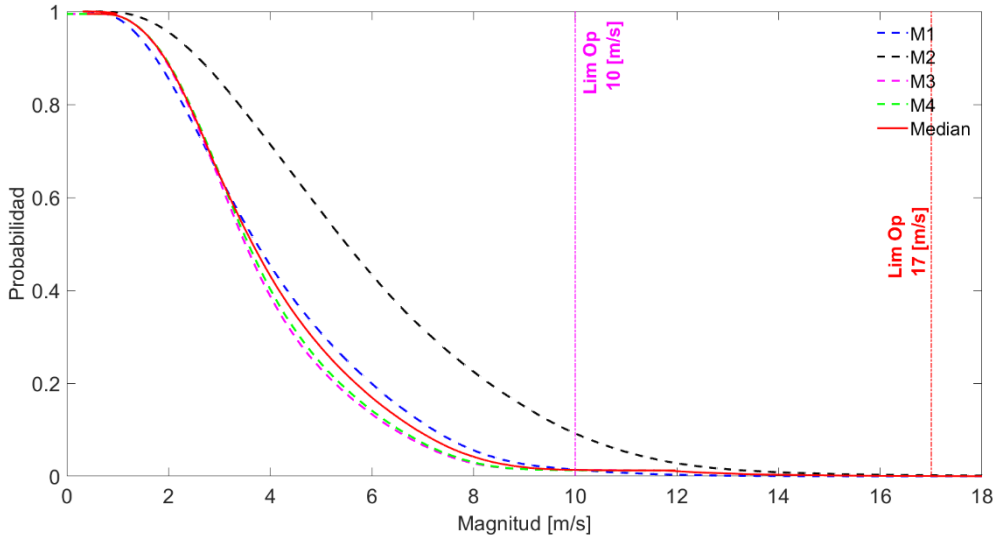
Fuente: Elaboración propia.

Las tablas presentadas muestran la probabilidad de excedencia de cada modelo y la mediana respectiva de los cuatro, además del *downtime* operacional y la diferencia de las proyecciones respecto al periodo histórico.

En la Tabla 6 para un umbral de viento de 5,14 [m/s] dentro de la dársena, los modelos GCM proyectan un aumento moderado del downtime operacional para el medio siglo (8 horas al año) y una disminución para el fin de siglo (9 horas al año) en comparación con el

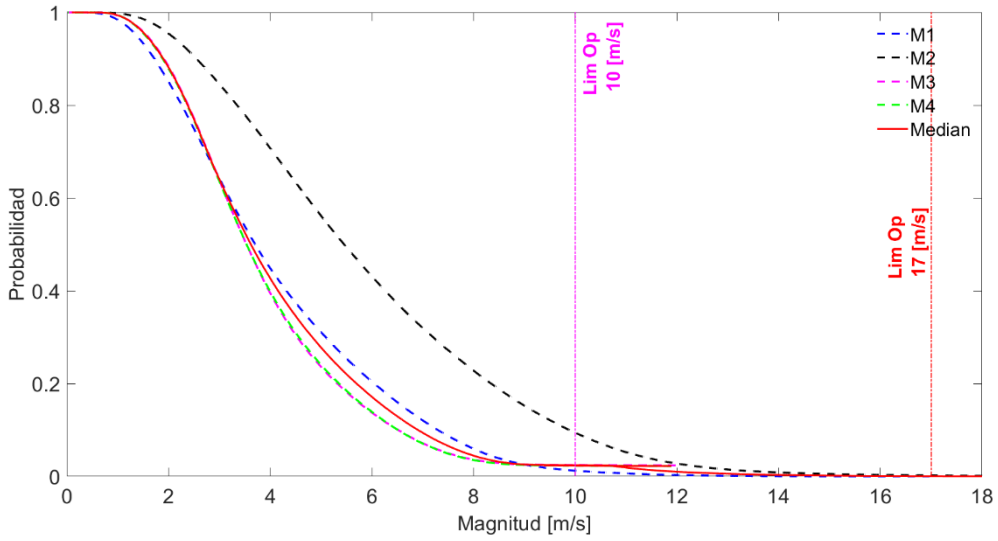
periodo histórico. Sin embargo, en la Tabla 7 para un umbral de viento de 7,71 [m/s], todos los modelos GCM proyectan un aumento significativo en el downtime operacional para el medio siglo (24 horas al año) y el fin de siglo (42 horas al año) en comparación con el periodo histórico. Cabe mencionar que estos resultados de *downtime* operacional solo tiene en consideración la variable viento.

FIGURA 22: CRUCE DE CURVAS DE EXCEDENCIA DE LA MAGNITUD DEL VIENTO EN EL PERIODO HISTÓRICO (1985-2004). UMBRALES DEFINIDOS POR LA ROM 3.1-99



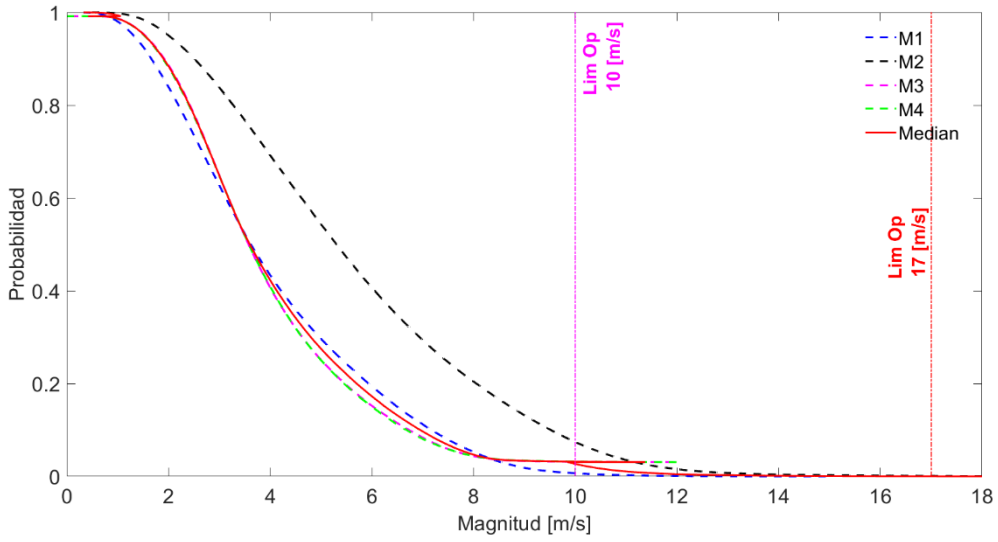
Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 23: CRUCE DE CURVAS DE EXCEDENCIA DE LA MAGNITUD DEL VIENTO EN LA PROYECCIÓN A MEDIADOS DE SIGLO (2026-2045). UMBRALES DEFINIDOS POR LA ROM 3.1-99



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 24: CRUCE DE CURVAS DE EXCEDENCIA DE LA MAGNITUD DEL VIENTO EN LA PROYECCIÓN A FIN DE SIGLO (2081-2100). UMBRALES DEFINIDOS POR LA ROM 3.1-99



Fuente: Elaboración propia.

Las Figura 22,Figura 23 y Figura 24 presentan el cruce de curvas de excedencia de cada modelo con respecto a los umbrales de viento definido por la ROM 3.1-99 (PPEE, 2000). Estos umbrales tienen relación con los movimientos tanto longitudinal y transversal de la nave en diferentes maniobras dentro de la dársena. Con un umbral de 10 [m/s] que restringe al sentido transversal que se mueve la nave, existe un porcentaje de excedencia de la mediana de un 1,36% para el periodo histórico y para las proyecciones a medio y fin de siglo de un 2,38 y 3,16% de excedencia respectivamente. En cuanto al umbral de 17 [m/s] los porcentajes de excedencia son despreciables para las magnitudes que se presentan en el puerto de San Antonio, por lo que no se considera para los resultados del *downtime* operacional.

TABLA 8: RESULTADOS DOWNTIME OPERACIONAL POR VIENTO. UMBRALES DEFINIDOS POR LA ROM 3.1-99

	Velocidad de Viento umbral: 19 [nudos] ~ 10 [m/s]							
	Probabilidad de excedencia %			**Downtime [hora/año]**			**Diferencia [hora/año]**	
Modelo	**1985-2004**	**2026-2045**	**2081-2100**	**1985-2004**	**2026-2045**	**2081-2100**	**Med-Hist**	**Fin-Hist**
M1	1,39	1,22	0,65	121,82	106,49	57,00	**-15,33**	**-64,82**
M2	9,21	9,34	7,34	806,86	818,24	643,04	**11,39**	**-163,81**
M3	1,36	2,41	3,16	119,20	211,18	276,88	**91,98**	**157,68**
M4	1,30	2,29	3,16	113,94	200,66	276,88	**86,72**	**162,94**
Mediana	**1,36**	**2,38**	**3,16**	**119,20**	**208,55**	**276,88**	**89,35**	**157,68**

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 8, los modelos GCMs proyectan un aumento significativo en el *downtime* operacional para mediados de siglo (89 horas al año) y a fin de siglo (157 horas al año) en comparación con el periodo histórico, cabe mencionar que estos resultados son respecto a la diferencia de los porcentajes de excedencia entre los periodos, porque considerando esto último es importante mencionar que el rango de excedencia con los umbrales de la ROM son mucho menores respecto a los umbrales definidos por la Capitanía de Puerto.

.

5.2 ESTUDIO DE OLEAJE

Estos resultados se basan en los obtenidos en el estudio del proyecto “Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile” (MMAa, 2019). En la Tabla 9, se detalla los modelos GCM utilizados y sus respectivas características. De dichos modelos se descargó[12] data con una resolución de 3 horas (MMAa, 2019).

TABLA 9: MODELOS GCM DEL CMIP5 SELECCIONADOS Y *HINDCAST* HISTÓRICO

Símbolo	Modelo	Centro de modelado	Resolución Atmosférica (Lon x Lat)	Periodo histórico	Proyección RCP8.5
M1	MRI-CGM	MRI, Japón	1.12148°x1.125°	1850-2014	2015-2100
M2	MIROC5	JAMSTEC, Japón.	1.4°x1.4°	1850-2014	2015-2100
M3	HADGEM2-ES	MOHC, Reino Unido.	1.25°x1.875°	1850-2014	2015-2100
M4	EC-EARTH	EC-EARTH, Europa.	1.1215°x1.25°	1850-2014	2015-2100
M5	CCMC	CMCC, Italia.	0.75°x0.75°	1850-2014	2015-2100
M6	ACCESS 1.0	CSIRO-BOM, Australia.	1.25°x1.875°	1850-2014	2015-2100
Hindcast	CFSR	CFSR-NOAA	0.33°x0.33|	1990-2019	-

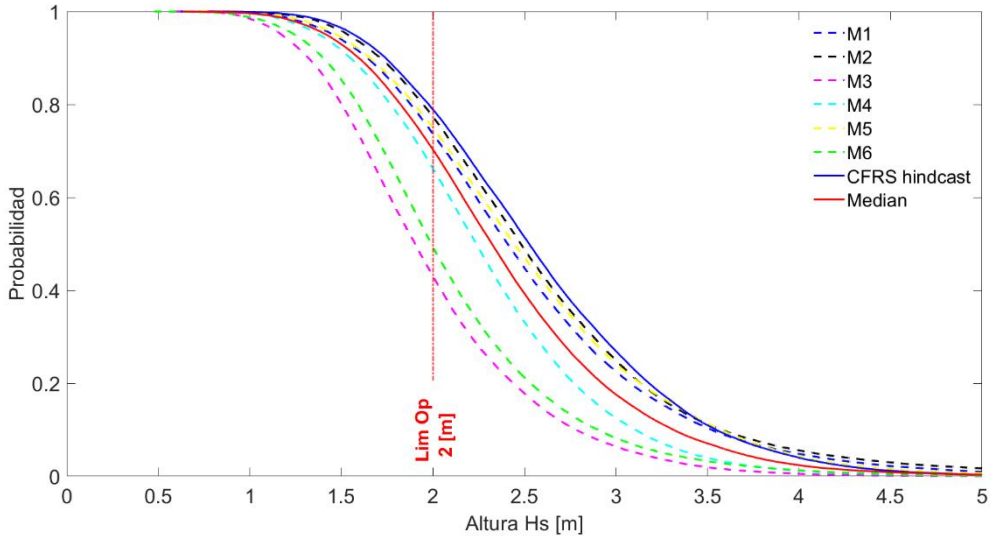
Fuente: Elaboración propia.

La curva de excedencia muestra la relación entre la altura de ola y la probabilidad de que se exceda esa altura durante la maniobra de embarque o desembarque de prácticos. El umbral de referencia que menciona la Tabla 4, es un límite establecido para determinar si es seguro o no realizar la maniobra con tales condiciones de oleaje. En este caso, si la

[12] La data se descargó del servidor de dicho proyecto: https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip5/

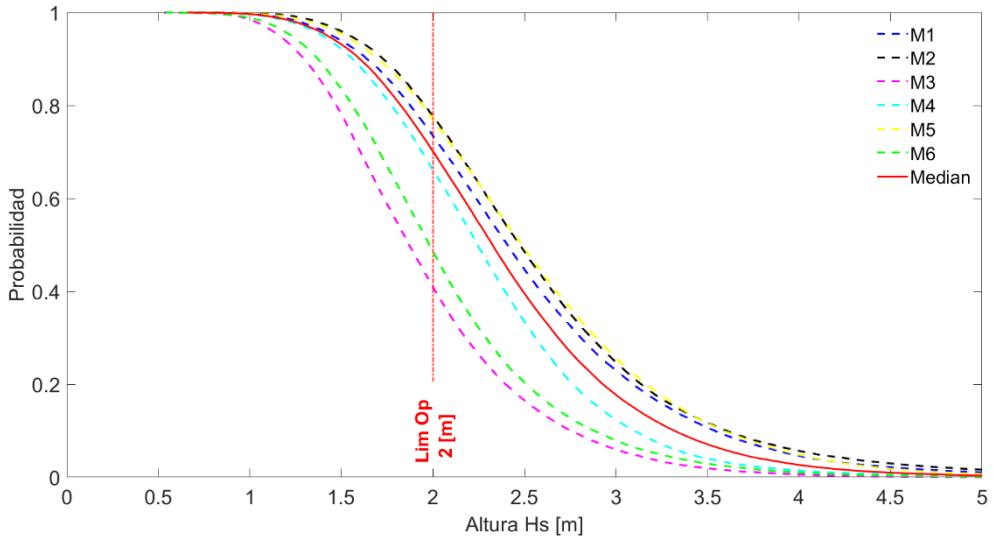
altura de ola es mayor de 2 [m], implica que la maniobra no se considera segura y no se debe realizar.

FIGURA 25: CRUCE DE CURVAS DE EXCEDENCIA DE LA ALTURA DE OLA PARA CADA MODELO EN EL PERIODO HISTÓRICO CON LAS CONDICIONES LÍMITES DE OPERACIÓN



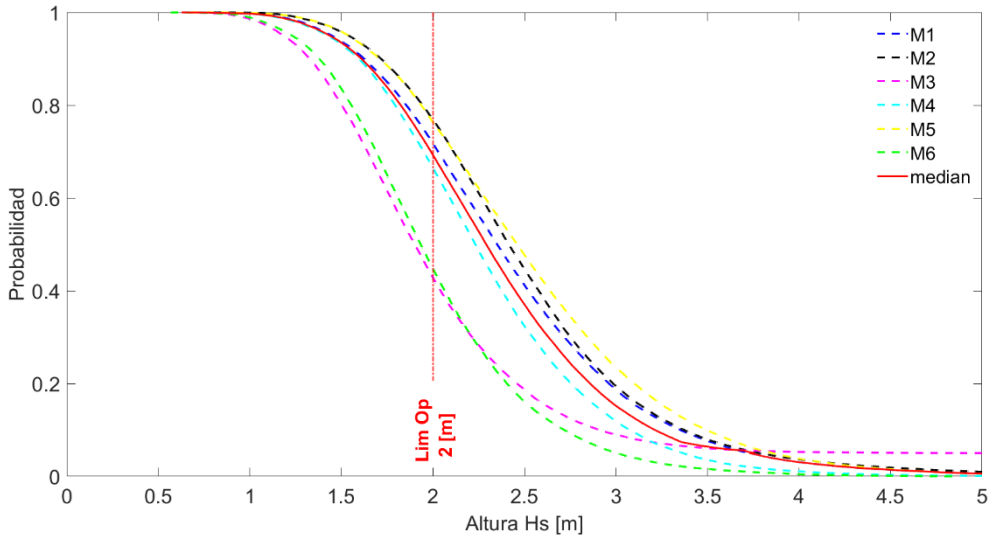
Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 26: CRUCE DE CURVAS DE EXCEDENCIA DE LA ALTURA DE OLA PARA CADA MODELO EN EL PERIODO MEDIO SIGLO (2026-2045) CON LAS CONDICIONES LÍMITES DE OPERACIÓN



Fuente: Elaboración propia.

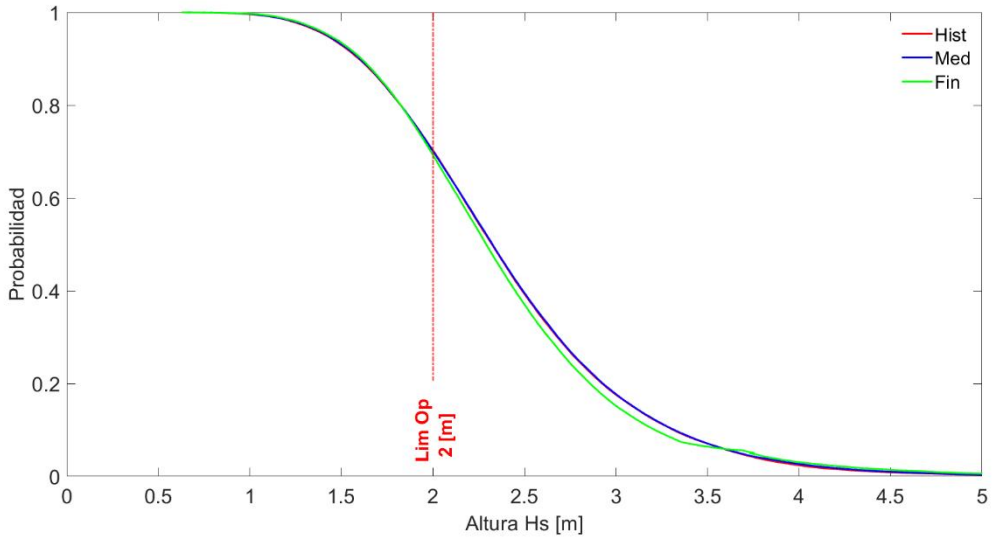
FIGURA 27: CRUCE DE CURVAS DE EXCEDENCIA DE LA ALTURA DE OLA PARA CADA MODELO EN EL PERIODO FIN SIGLO (2026-2045) CON LAS CONDICIONES LÍMITES DE OPERACIÓN



Fuente: Elaboración propia.

LasFigura 25,Figura 26 Figura 27 se muestra que en la zona de espera de prácticos en aguas profundas donde embarcan y desembarcan de las naves, existe un gran porcentaje de excedencia para cada modelo GCM para todos los periodos de tiempo evaluados. El porcentaje varía entre un 40% y un 77%. El modelo CFRS hindcast que se presenta en el periodo histórico es un modelo que se asimila a los datos de campo y tiene un porcentaje de excedencia de un 78%. Estos resultados indican que, en esa zona, las olas exceden el umbral operacional de altura de 2 [m] la mayor parte del tiempo.

FIGURA 28: MEDIANA DE LOS MODELOS GCM DE ALTURA DE OLA POR PERIODOS DE TIEMPO



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 28 indica que los modelos tienen una mediana similar para los distintos periodos de evaluación, la diferencia es despreciable. En el periodo histórico, la mediana se encuentra en un 70,29% de excedencia, mientras que en las proyecciones a mediano y fin de siglo, la mediana se encuentra entre 70,12 y 69,31% respectivamente.

La Tabla 9 siguiente se calcula el downtime operacional para conocer la diferencia entre estas medianas, y así poder tener una idea de cómo se comporta cada modelo en relación con las proyecciones y el periodo histórico.

TABLA 10: RESULTADOS DE DOWNTIME OPERACIONAL POR ALTURA DE OLA. UMBRALES ESTABLECIDOS POR LA CAPITANÍA DE PUERTO

	Altura significativa umbral: 2 [m]							
	Probabilidad de excedencia %			Downtime [hora/año]			Diferencia [hora/año]	
Modelo	1985-2004	2026-2045	2081-2100	1985-2004	2026-2045	2081-2100	Med-Hist	Fin-Hist
M1	73,65	73,49	71,77	6451,80	6437,78	6287,11	**-14,02**	**-164,69**
M2	77,39	77,70	76,88	6779,42	6806,58	6734,75	**27,16**	**-44,68**
M3	43,05	40,93	42,84	3771,24	3585,53	3752,84	**-185,71**	**-18,40**
M4	66,21	66,11	66,45	5800,06	5791,30	5821,08	**-8,76**	**21,02**
M5	75,07	77,05	76,39	6576,19	6749,64	6691,82	**173,45**	**115,63**
M6	49,35	48,61	44,82	4323,12	4258,30	3926,29	**-64,82**	**-396,83**
CFRS Hindcast	78,93	-	-	6914,33	-	-	-	-
Mediana	**70,29**	**70,12**	**69,31**	**6157,46**	**6142,57**	**6071,62**	**-14,89**	**-85,85**

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 10, los modelos GCMs predicen una reducción relativamente pequeña en el downtime operacional a mediados de siglo (14 horas al año) y a fin de siglo (85 horas al año) en comparación al periodo histórico. Cabe mencionar que estos resultados de downtime operacional solo consideran la variable altura de ola en aguas profundas, y son proyecciones obtenidas para el clima de oleaje del proyecto CCCostas (MMAa, 2019).

6 CONCLUSIONES

Al estar expuesto al Océano Pacífico, el puerto de San Antonio sufre las consecuencias de las condiciones climatológicas, pues es uno de los puertos de Chile con más horas de cierre al año (Winckler et al., 2022). En este estudio se buscó conocer las condiciones de oleaje y viento operacional del puerto con proyecciones que se basan en escenarios de cambio climático, para así tomar medidas a largo plazo que permitan reducir las horas de cierre y mejorar la eficiencia del sistema portuario.

Dado el desarrollo del estudio se puede inferir que:

Para el estudio de vientos

- Las proyecciones utilizadas son creadas a partir de la sexta fase del CMIP, específicamente del experimento SSP5-8.5 que corresponde a la trayectoria más extrema entre las distintas SSPs. Al ser proyecciones nuevas solo se cuenta con 4 modelos GCMs disponibles dada la elección por los criterios de selección (frecuencia, ensemble, grilla).
- El GCM M2 (MPI-ESM1-2-LR) presentó las magnitudes de viento más intensas al largo de los 3 horizontes de evaluación. Los GCMs M3 (CMCC-CM2-SR5) y M4 (CMCC-ESM2) tenían un comportamiento similar, siendo siempre menores a la mediana de los modelos. El GCM M1 (MIROC6) era el modelo más cercano a la mediana.
- Se trabajó con la mediana de los cuatro modelos para el *downtime* operacional, ya que es una medida que no es afectada por los valores extremos, no así el promedio.
- Los resultados del *downtime* operacional expresan valores relativos, pues no se realizó un ajuste de los GCMs con el registro *in situ* en el puerto, la técnica empleada no se correlaciona con los modelos (ajuste lineal) por lo que es necesario utilizar otras técnicas de corrección por sesgos. Esto no afecta a la diferencia del *downtime* de las proyecciones respecto al periodo histórico.
- Se utilizaron dos umbrales definidos por, la Capitanía de Puerto y la ROM3.1-99. Para la primera de ella existe mayor probabilidad de excedencia dado que los límites son menores, pues están establecidos según las condiciones climáticas en la que puede maniobrar el puerto de San Antonio. Los umbrales de la ROM son poco

excedidos, ya que es solo una recomendación para la operatividad de naves en los muelles, sin embargo, considera, el sentido en la que se mueve la nave sea de manera transversal al puerto o longitudinal, dos criterios que el otro no considera.

- Los resultados expresan que, si se presenta un escenario similar al SSP5-8.5 a mediados de siglo el *downtime* operacional aumentaría en 8 horas al año. Y para fin de siglo disminuiría en 9 horas al año, esto si solo se considera el un umbral de 10 [kn]. Y para el umbral de 15 [kn] a mediados de siglo aumentaría el *downtime* 24 horas y para fin de siglo 42 horas respecto al periodo histórico
- Actualmente el puerto de San Antonio en el año 2022 contempló un 10,2% de excedencia del viento a 10 [kn] (Berrios F. , 2022), lo que equivale a 894 horas al año, esto no significa que no se operó en esas horas. Es por lo que no solo se debe considerar la excedencia de los umbrales como resultados del *downtime*, también las maniobras de la operación.

Para el estudio de oleaje

- Las proyecciones utilizadas corresponden a los escenarios de quinto informe de CMIP específicamente del RCP8.5, es cual representa el escenario más desfavorable en termino de emisiones. Los resultados fueron obtenidos en aguas profundas, en la zona de espera de prácticos.
- Los GCMs M2 (MIROC5) y M5 (CCMC) son los que proyectaron mayor altura de ola a lo largo de los tres horizontes de evaluación. Los GCMs M1 (MRI-CGM) y M4 (EC-EARTH) presentaron un comportamiento medio donde se asimilan a la mediana de los seis modelos. Y los GCMs M3 (HADGEM2-ES) y M6 (ACCESS 1.0) son los de menor altura proyectada.
- El puerto de San Antonio logró aumentar el umbral de altura de olas en marzo del 2022, pasó de 1,8 [m] a 2 [m], sin embargo, este límite sigue siendo excedido gran parte del tiempo, según los resultados de la evaluación anual por EPSA (Berrios F. , 2022) cerca del 14% se presentó una excedencia de altura de ola de 2 [m].
- Según los resultados obtenidos a mediados de siglo y a fin de siglo se espera que disminuya el *downtime* operacional respecto al periodo histórico, aun así, los porcentajes de excedencia siguen siendo significantes.
-

General

El puerto de San Antonio el año 2022 presentó 1183 horas de cierre, de las cuales el 62% fue provocado por el oleaje y el 8% por el viento. Las dos variables estudiadas y de gran influencia en la operatividad segura del puerto. Los umbrales de operación están ligados a las condiciones que la Capitanía de Puerto encuentra segura para la ejecución de maniobras, sin embargo, para el viento solo considera umbrales para el tipo de nave y no por los grados de libertad que puede tener un buque en el muelle, existen diferentes recomendaciones que evalúan los movimientos de la nave, esto permite condiciones más específicas para cada zona.

Para el aumento del umbral de la altura de ola significativa, se debe realizar mediante estudios de maniobras, aun así, son rígidas bajo la Circular Marítima O-80/022 y esta no permite la transferencia de prácticos a las naves con altura de ola superiores a 2,5 [m].

En efecto de la limitante tiempo, en este proyecto no se pudo evaluar el *downtime* operacional considerando las condiciones de operación de maniobras, por lo que tampoco se pudo considerar propuestas como el tipo de amarre de naves, o cambian la zona o el medio en la que se embarcan los prácticos para disminuir el *downtime* operacional por viento y oleaje.

7 REFERENCIAS

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.,. Obtenido de 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.

38, G. N. (2022). *Hacia una Ley de Costas en Chile: bases para una Gestión integrada de Áreas Costeras.* (R. C. Carolina Martínez, Ed.) Santiago, Chile.

Ancapichún, S. (2012). *Variabilidad del Anticiclón del Pacífico Sur y su relación con la oscilación del Pacífico: Implicancias oceanográficas a lo largo de la costa centro-norte de Chile.* Valdivia, Chile.: Tesis de Grado para optar al grado de licenciado en Biología Marina y Título de Biólogo Marino.

Bambach, N. (2022). Introducción a los modelos climáticos.

Berrios, F. (2022). *Desarrollo de tareas de mantención preventiva sistema VCMOV.* EPSA.

Berrios, F. (2022). Estaciones meteorológicas del Puerto San Antonio.

Beyá J., Á. M. (2016). *Atlas de Oleaje de Chile.* Valparaíso: Escuela de Ingeniería Civil Oceánica. Universidad de Valparaíso.

CAMPORT. (2021). *Las marejadas llegaron para quedarse.*

CEPAL. (2022). *Informe portuario 2021.* CEPAL.

CMNUCC. (1992). *CONVENCI”N MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE.* Obtenido de https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf

DIRECTEMAR. (2012). *Establece características de operación del terminal marítimo Punta Chungo perteneciente a la compañia Minera Los Pelambres, en el Puerto de Los Vilos.* Los Vilos.

DIRECTEMAR. (2020). *Las marejadas llegaron para quedarse*. Obtenido de https://www.directemar.cl

DIRECTEMAR. (2022). *Habilita la Operación del Puerto de San Antonio, C.P. S.A. ORD. N° 12.000/__91_/ VRS.* San Antonio, Chile.

ENES. (s.f.). *Enes Model Data*. Obtenido de https://portal.enes.org/data/enes-model-data/cmip5/datastructure

EPSA. (2013). *Plan Maestro.* San Antonio, Chile.

EPSA. (2021). *Memoria Anual 2021*. Obtenido de Puerto San Anonio: https://www.puertosanantonio.com/psa/site/docs/20200804/20200804122024/memoria_empresa_portuaria_san_antonio_2021.pdf

G5, N. (2021). *La "quirúrgica" tarea de embarcar mar adentro a un práctico del puerto de San Antonio*. Obtenido de G5noticias: https://g5noticias.cl/2021/01/20/la-quirurgica-tarea-de-embarcar-mar-adentro-a-un-practico-del-puerto-de-san-antonio/

Hagen, R. H. (1996). *Morphology of San Antonio submarine canyon on the central Chile forearc.* Marine Geology. doi: 129 (3-4): 197-205.

IPCC. (2018). *Anexo I: Glosario.* Calentamiento global de 1,5 °C, Informe especialdel IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 ºC con respecto a los niveles preindustriales y las.

IPCC. (2021). *What is IPCC.* Obtenido de AR6 IPCC.

IPCC. (2021). *What is the IPCC?* Obtenido de IPCC: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/07/AR6_FS_What_is_IPCC.pdf

IPCC. (2022). *Synthesis Report of the Sixth Assessment Report*. Obtenido de IPCC: https://www.ipcc.ch/ar6-syr/

Juan Carlos Catilla, Francisco Javier Meza, Sebastián Vicuña, Pablo Marquet, Juan Pablo Montero. (2019). *Cambio Climático en Chile: Ciencia, Mitigación y Adaptación.* Ediciones UC.

Mauritsen, T. B. (2019). *Developments in the MPI-M Earth System Model version 1.2 (MPI-ESM1.2) and its response to increasing CO2.* Journal of Advances in Modeling Earth Systems. doi:11, 998– 1038

Meza, F. (2019). Atmósfera, Balance de Energía y Efecto Invernadero. . En F. M. Juan Castilla, *Cambio Clim´tico en Chile: Ciencia, Mitigación y Adaptación.* Santiago, Chile: Ediciones UC.

Ministerio de Energía. (s.f.). *Explorador de Energía Eólica*. Obtenido de https://eolico.minenergia.cl/inicio

MMAa. (2019). *Volumen 1: Amenazas en "Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile".* Santiago, 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.

O'Neill, B. (2014). *A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways.* Climatic Change.

O'Neill, B. C. (2016). *The scenario model intercomparison project for CMIP6.* GeoscientificModel Development.

Portuario, P. (2021). Quintero, Ventanas y San Antonio son los puertos que acumulan más cierres por mal tiempo. Obtenido de https://portalportuario.cl/quintero-ventanas-y-san-antonio-son-los-puertos-que-acumulan-mas-cierres-por-mal-tiempo/

PPEE. (2000). *ROM 3.1-99. Proyecto de la configuración marítima de los puestos; canales de acceso y área de flotación.* España: Programa ROM (Recomendaciones de Obras Marítimas).

Riahi, K. V. (2017). *The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview.* Global Environmental change.

Richard Moss, M. B. (2008). *Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change. Impacts and Response Strategies.* Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change.

SAM. (2021). *Informe final Mesa de Servicios de Apoyo a las Maniobras.*

Sarochar, H. (2013). Introducción a la Meteorología General. Universidad Nacional de la Plata.

Tatebe, H. O. (2019). *Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6.* Model Dev. doi:12, 2727–2765

Tobar, R. (2019). *San Antonio: 107 años de puerto contemporáneo*. Obtenido de El quinto poder: https://www.elquintopoder.cl/sociedad/san-antonio-107-anos-de-puerto-contemporaneo/

USACE. (2006). *Coastal Engineering Manual - Part II.* US Army Corps of Engineers Publications.

Vivanco, E. (2019). *Cambio climático.* Obtenido de Biblioteca del Congreso Nacional de Chile:https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/27848/1/CC_Conceptos_e_impactos_Website_CC_2019.pdf

Vuuren, D. v. (2014). *A new scenario framework for climate change research: scenario matrix architure.*

Winckler et al., P. (2020). *Evidence of climate-driven changes on atmospheric, hydrological, and oceanographic variablesalong the Chilean coastal zone.* Climate Change.

Winckler, P. (2022). *Gnereación de información sobre proyecciones futuras variables mares y oceanos del Ecuador bajo escenarios de cambio climático.* Consultoría PNUDECU-SdP-ADQ-21-139768.

Xu, J., Zhang, X., Feng, C., Yang, S., Guan, S., Jia, K., . . . Zhao, X. (2021). *Evaluation of Surface Upward Longwave Radiation in the CMIP6 Models with Ground and Satellite Observations.* Remote Sensing 13, no. 21: 4464. Obtenido de https://doi.org/10.3390/rs13214464

8 ANEXO

8.1 CORRECCIONES DE MAGNITUDES DE VIENTO

Las correcciones que se deben efectuar en los registros de viento son las siguientes según USACE (2006):

- Corrección por altura
- Corrección por duración
- Corrección por ubicación
- Corrección por temperatura

A. Corrección por altura

A menudo, los vientos registrados a diferentes alturas no coinciden con el nivel de referencia estándar de 10 [m], ya que la velocidad del viento puede variar con la altura debido a factores como topografía del área y la presencia de obstáculos cercanos. Por lo tanto, es necesario convertir los registros de viento a un nivel de referencia común para poder compararlos de manera adecuada. El no hacerlo puede producir errores grandes en los resultados. Esto se puede hacer aplicando una corrección a la velocidad del viento medida a diferentes alturas para tener en cuenta estos factores y convertirla al nivel de referencia estándar de 10 [m].

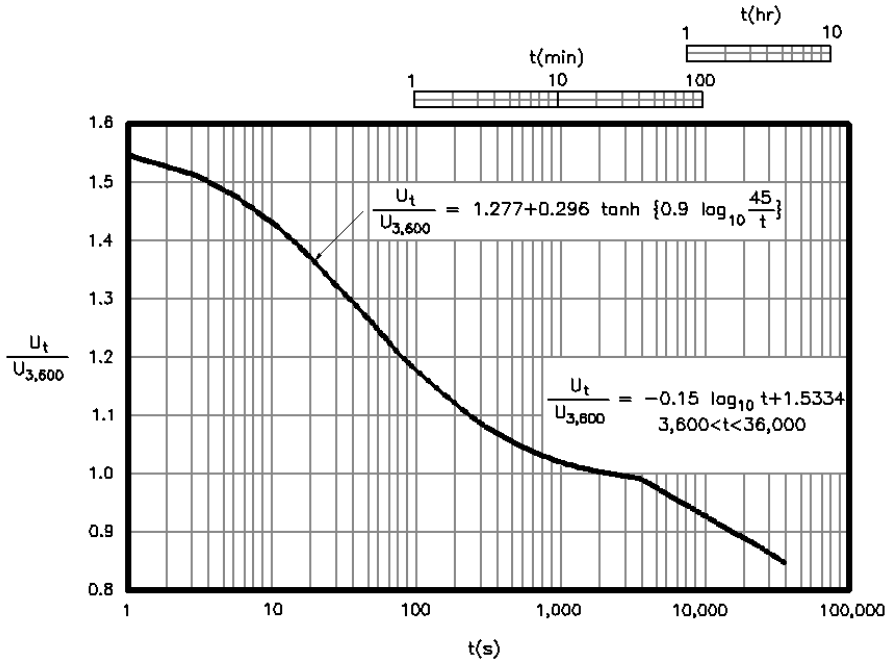
$$U_{10} = U_Z \left(\frac{10}{z}\right)^{1/7} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde: U_{10} es la magnitud del viento a 10 [msnm], U_Z es la magnitud del viento a una altitud z respecto de la superficie del agua o terreno.

B. Corrección por duración

Los vientos en cualquier punto de la tierra representan una superposición de diferentes escalas atmosféricas de movimiento, todas interactuando para generar fenómenos meteorológicos locales. Cada una de las escalas atmosféricas desempeña un papel específico en la transferencia de momentum en la atmosfera. Debido a esta combinación de diferentes escalas de movimiento, los vientos casi nunca son constantes para cualquier intervalo prolongado de tiempo. Debido a esto es necesario conocer el promedio del intervalo de cualquier dato utilizado. Por ejemplo, algunas magnitudes de viento representan promedios en pequeños intervalos de tiempo (típicamente de 1 a 30 minutos), y otros como las derivadas de campos de presión sinópticos pueden representar vientos medios en intervalos de varias horas.A efectos de este estudio se considera los límites umbrales de la Tabla 8.1 condiciones límites de operación de buques en mulles y pantalanes de la ROM 3.1-99 (PPEE, 2000)

FIGURA 29: RELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD DEL VIENTO DE CUALQUIER DURACIÓN (U_t) Y LA VELOCIDAD DEL VIENTO DE 1 HORA(U_{3600})

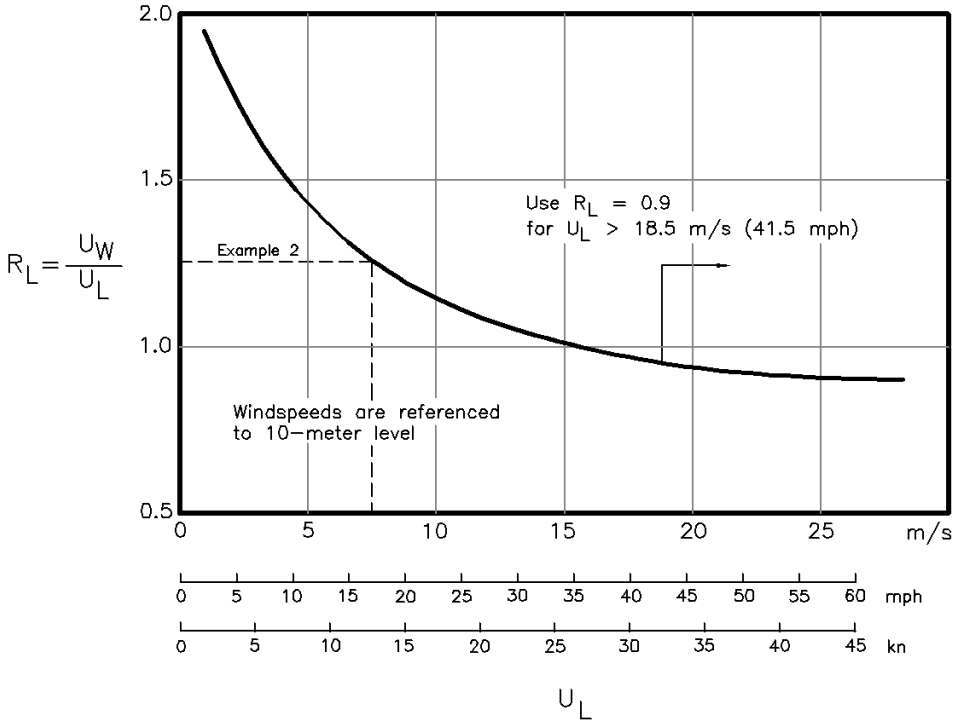


Fuente: (USACE, 2006)

C. Corrección por ubicación

Cuando los vientos pasan sobre discontinuidad en la rugosidad (por ejemplo, una interfaz tierra-mar), se genera una capa límite interna. Esta complicación puede dificultar el uso de vientos de ciertos lugares en la que los vientos de algunas direcciones caen dentro de la capa límite marina y los vientos de otras direcciones caen dentro de una capa límite terrestre. En casos como estos se puede utilizar la figura para realizar una transformación de tierra a mar para todos los ángulos provenientes de la tierra.

FIGURA 30:RELACIÓN (R_L) ENTRE LA VELOCIDAD DEL VIENTO SOBRE EL AGUA (U_W) Y LA VELOCIDAD DEL VIENTO SOBRE LA TIERRA (U_L)



Fuente: (USACE, 2006)

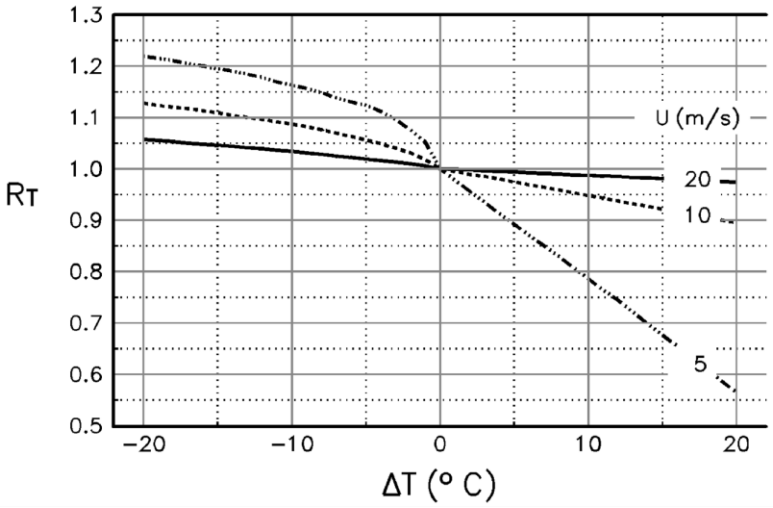
D. Corrección por temperatura

En la Figura 31 se presenta el factor de corrección R_T por la diferencia de temperatura aire-mar. Aunque esta diferencia puede afectar significativamente a vientos ligeros y moderados, solo tiene un pequeño impacto en altas velocidad de viento. Cuando solo se dispone de un conocimiento general del estado de la capa límite atmosférica, esta debe clasificarse como:

- Estable: cuando el aire es más caliente que el agua, el agua enfría el aire justo encima de ella y disminuye la mezcla en la columna de aire ($R_T = 0.9$).
- Neutra: cuando el aire y el agua tienen la misma temperatura, la temperatura del agua no afecta la mezcla en la columna de aire ($R_T = 1.0$).
- Inestable: cuando el aire es más frio que el agua, el agua calienta el aire, causando que el aire cercano a la superficie del agua se eleva, aumentando su mezcla ($R_T = 1.1$).

Cuando la condición de la capa límite es desconocida, con en el caso de estudio, se asume una condición inestable ($R_T = 1.1$).

FIGURA 31: RELACIÓN DE AMPLIFICACIÓN (R_T) DE W_c (VELOCIDAD DEL VIENTO QUE TIENE EN CUENTA LA DIFERENCIA DE TEMPERATURA ENTRE EL AIRE Y MAR) A W_w (VELOCIDAD DEL VIENTO SOBRE EL AGUA SIN EFECTOS DE TEMPERATURA)



Fuente: (USACE, 2006)

8.2 UMBRALES DE OPERACIÓN

A. Definidos por la Capitanía de Puerto

Eslora y Manga	Naves Tipo	Dirección y Velocidad Máx. del Viento (nudos)	Corriente (nudos)	Altura de la Ola (Hs) (metros) y Período	Visibilidad Mínima	Otras Limitaciones
Hasta 253 metros, cuya manga ≤ 32,2 metros	Todas, excepto RO-RO y Pasajes	Norte ≤15 Otras direcciones hasta 20	≤ 0,5	Hs ≤ 2,0. Periodo ≤ 12 seg.	• Para el Ingreso: 2 Millas. • Zarpe: 500 metros.	• Para corrida de nave Sitio N° 8: Altura de Ola ≤ 1 metro frente al sitio de atraque; Viento ≤ 15 nudos de cualquier dirección. • Permanencia en su sitio: Altura de Ola ≤ 1 metro en los Sitios N° 1 al N° 7 y Muelle Costanera (C1 y C2), y 2 metros en los Sitios N° 8 y N° 9. • Ejecución de faenas de carga y/o descarga: 1 metro en los Sitios N° 1 al N° 7 y Muelle Costanera (C1 y C2), y 2 metros en los Sitios N° 8 y N° 9.
≥ a 253 y hasta 367 metros, cuya manga > 32,2 metros	Todas, excepto Naves de Pasajes	Cualquier dirección ≤ 15 Cualquier dirección ≤ 10	≤ 0,5	(Hs) ≤ 1,8. Periodo ≤ 12 seg. 1,8 < Hs ≤ 2,0. periodo ≤ 12 seg.		Para aquellas naves que operen hacia o desde el Sitio N° 2, STI deberá levantar los brazos de las Grúas Gantry del Sitio N° 1, antes del inicio de la maniobra y no los podrá bajar hasta que el Práctico lo autorice.
≤ a 237 metros, cuya manga ≤ a 38 metros.	RO-RO	Cualquier dirección ≤ 10	≤ 0,5	(Hs) ≤ 2,0 mts. Periodo ≤ 12 seg.		• Sólo podrán operar en los Sitios N° 1 al N° 4-5 y Muelle Costanera C1 y C2. • Se deben utilizar 2 remolcadores ASD, de a lo menos 40 toneladas de Bollard Pull cada uno en todas sus maniobras. • Utilizar 2 lanchas de amarre, pudiendo dispensarse una de ellas solo para las maniobras de zarpe de los Sitios N° 4-5, cuando la nave se encuentre atracada por su banda de estribor y su eslora sea inferior a 200 metros.
≤ a 300 metros	Pasajes	Cualquier dirección ≤ 15	≤ 1,0	(Hs) ≤ 1,5 mts. Periodo ≤ 12 seg.		• Sólo podrán operar en los Sitios N° 4-5 y Muelle Costanera C1 y C2. • Deberá utilizar 2 remolcadores tomados y dos lanchas de amarre, independiente de la eslora de la nave (hasta 300 metros).

Fuente: (DIRECTEMAR, Habilita la Operación del Puerto de San Antonio, C.P. S.A. ORD. N° 12.000/__91_/ VRS., 2022)

B. Definidos por la ROM 3.1-99

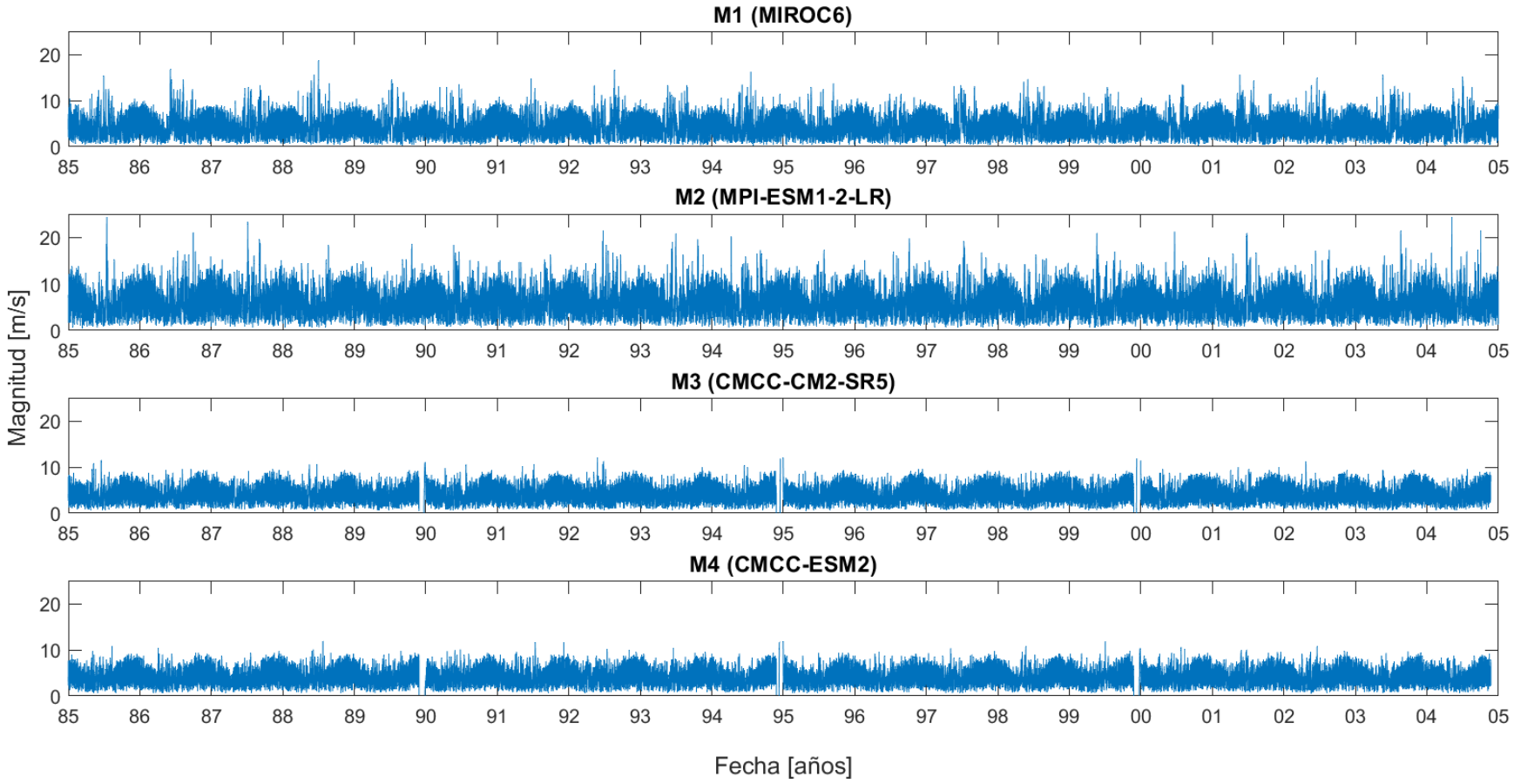
	Velocidad absoluta del viento $V_{10.1\ min}$	Velocidad absoluta de la corriente $V_{c.1\ min}$	Altura de ola H_s
1. *Atraque de buques*			
• Acciones en sentido longitudinal al muelle	17.0 m/s	1.0 m/s	2.0 m
• Acciones en sentido transversal al muelle	10.0 m/s	0.1 m/s	1.5 m
2. *Paralización operaciones carga y descarga (para equipos convencionales)*			
• Acciones en sentido longitudinal al muelle			
— Petroleros			
< 30.000 TPM	22 m/s	1.5 m/s	1.5 m
30.000-200.000 TPM	22 m/s	1.5 m/s	2.0 m
> 200.000 TPM	22 m/s	1.5 m/s	2.5 m
— Graneleros			
Cargando	22 m/s	1.5 m/s	1.5 m
Descargando	22 m/s	1.5 m/s	1.0 m

	Velocidad absoluta del viento $V_{10.1\ min}$	Velocidad absoluta de la corriente $V_{c.1\ min}$	Altura de ola H_s
— Transportadores de Gases Licuados			
< 60.000 m^3	22 m/s	1.5 m/s	1.2 m/s
> 60.000 m^3	22 m/s	1.5 m/s	1.5 m/s
— Mercantes de carga general, Pesqueros de altura y congeladores	22 m/s	1.5 m/s	1.0 m
— Portacontenedores, Ro-Ros y Ferries	22 m/s	1.5 m/s	0.5 m
— Transatlánticos y Cruceros (1)	22 m/s	1.5 m/s	0.5 m
— Pesqueros de pesca fresca	22 m/s	1.5 m/s	0.6 m
• Acciones en sentido transversal al muelle			
— Petroleros			
< 30.000 TPM	20 m/s	0.7 m/s	1.0 m
30.000-200.000 TPM	20 m/s	0.7 m/s	1.2 m
> 200.000 TPM	20 m/s	0.7 m/s	1.5 m
— Graneleros			
Cargando	22 m/s	0.7 m/s	1.0 m
Descargando	22 m/s	0.7 m/s	0.8 m
— Transportadores de Gases Licuados			
< 60.000 m^3	16 m/s	0.5 m/s	0.8 m
> 60.000 m^3	16 m/s	0.5 m/s	1.0 m
— Mercantes de carga general, Pesqueros de altura y congeladores	22 m/s	0.7 m/s	0.8 m
— Portacontenedores, Ro-Ros y Ferries	22 m/s	0.5 m/s	0.3 m
— Transatlánticos y Cruceros (1)	22 m/s	0.5 m/s	0.3 m
— Pesqueros de pesca fresca	22 m/s	0.7 m/s	0.4 m
3. *Permanencia de buques en muelle*			
— Petroleros y Transportadores de Gases Licuados			
• Acciones en sentido longitudinal al muelle	30 m/s	2.0 m/s	3.0 m
• Acciones en sentido transversal al muelle	25 m/s	1.0 m/s	2.0 m
— Transatlánticos y Cruceros (2)			
• Acciones en sentido longitudinal al muelle	22 m/s	1.5 m/s	1.0 m
• Acciones en sentido transversal al muelle	22 m/s	0.7 m/s	0.7 m
— Embarcaciones deportivas (2)	22 m/s	1.5 m/s	0.4 m
• Acciones en sentido longitudinal al muelle	22 m/s	1.5 m/s	0.4 m
• Acciones en sentido transversal al muelle	22 m/s	0.7 m/s	0.2 m
— Otro tipo de buques	Limitaciones impuestas por las cargas de diseño de los muelles		

Fuente: (PPEE, 2000)

8.3 RESULTADOS: SERIE DE TIEMPO VIENTO

FIGURA 32: SERIE DE TIEMPO PERIODO HISTÓRICO (1985-2004)



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 33: SERIE DE TIEMPO PARA PROYECCIÓN SSP5-8.5 (2026-2045)

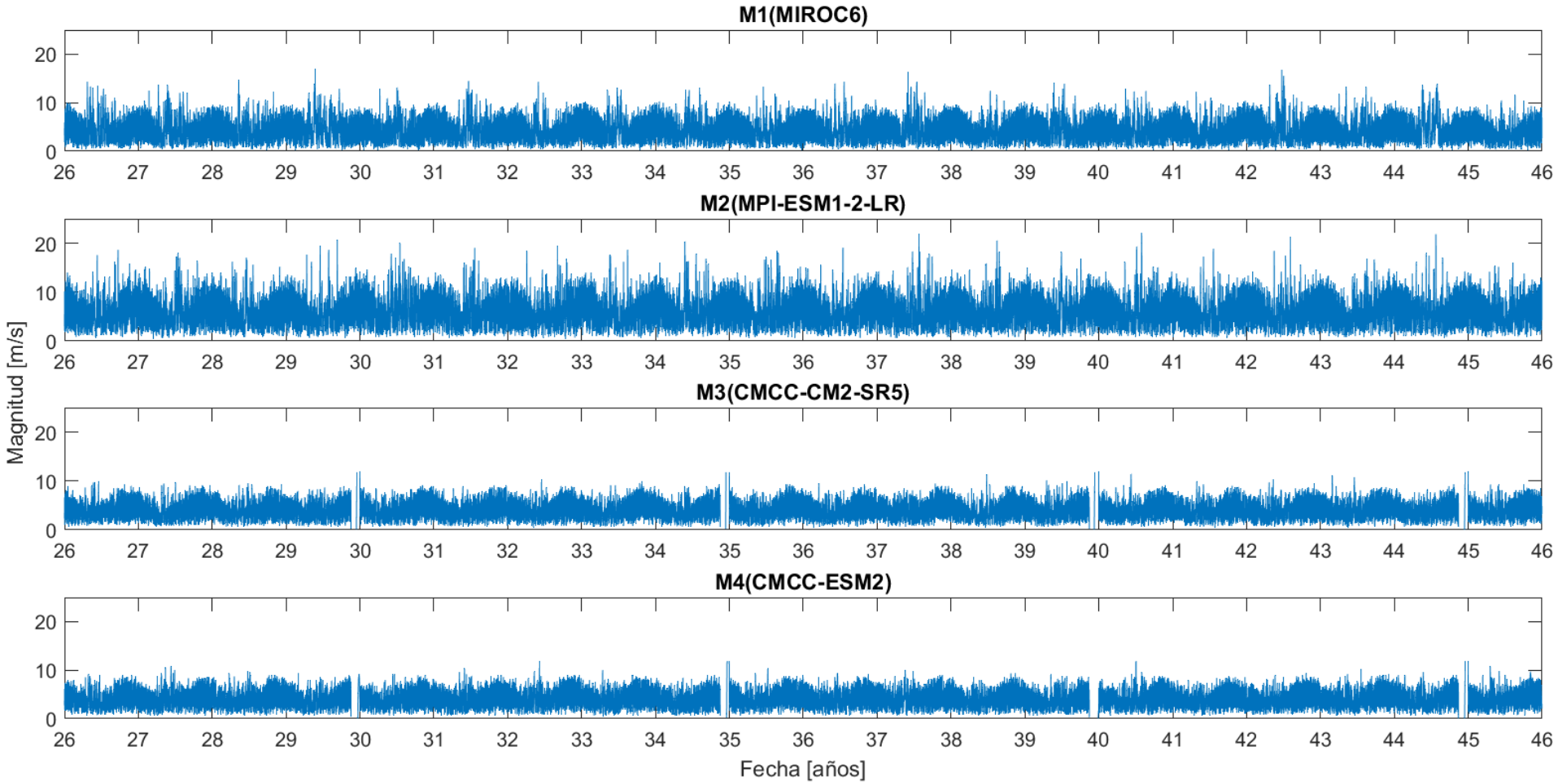
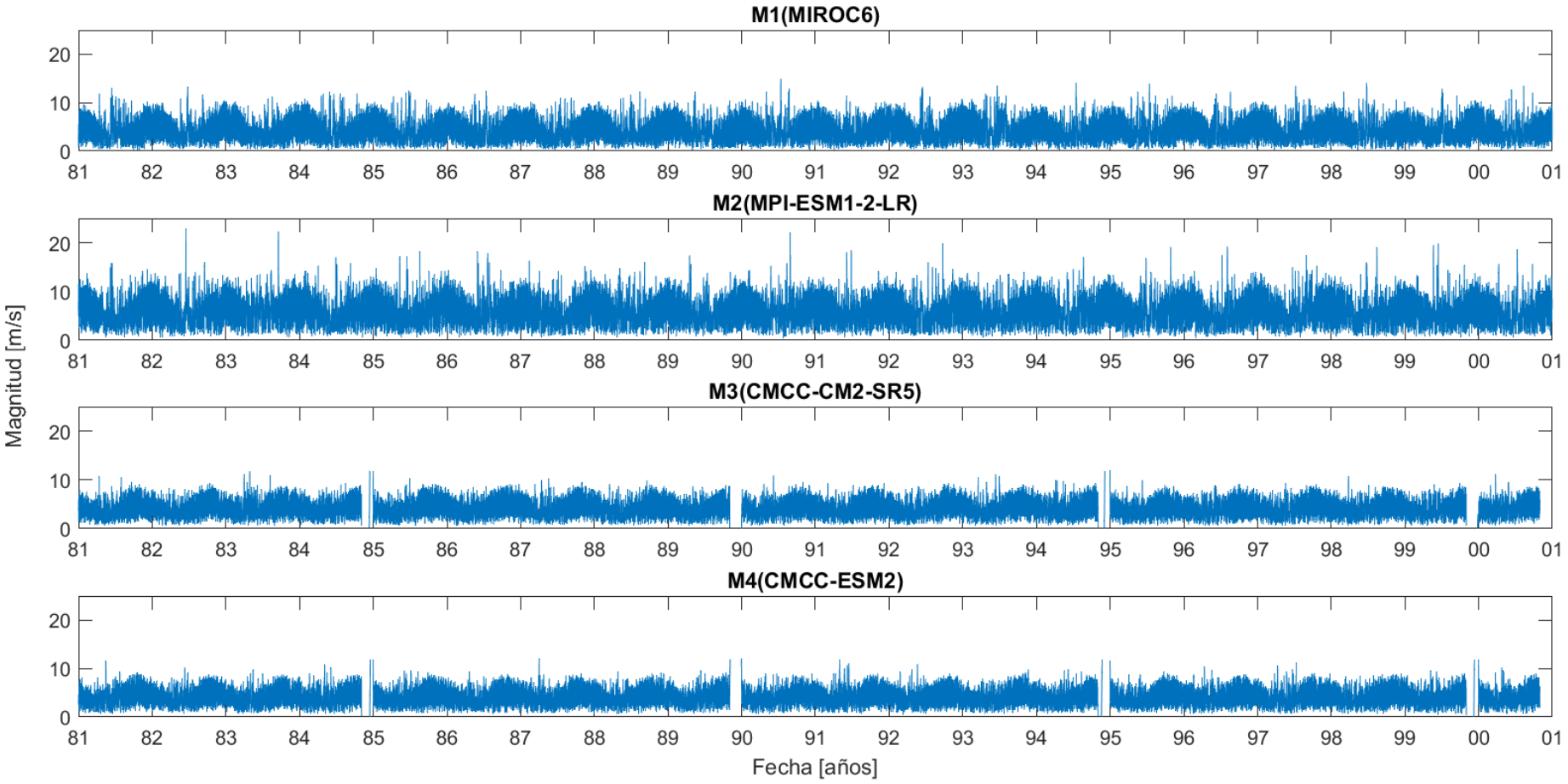
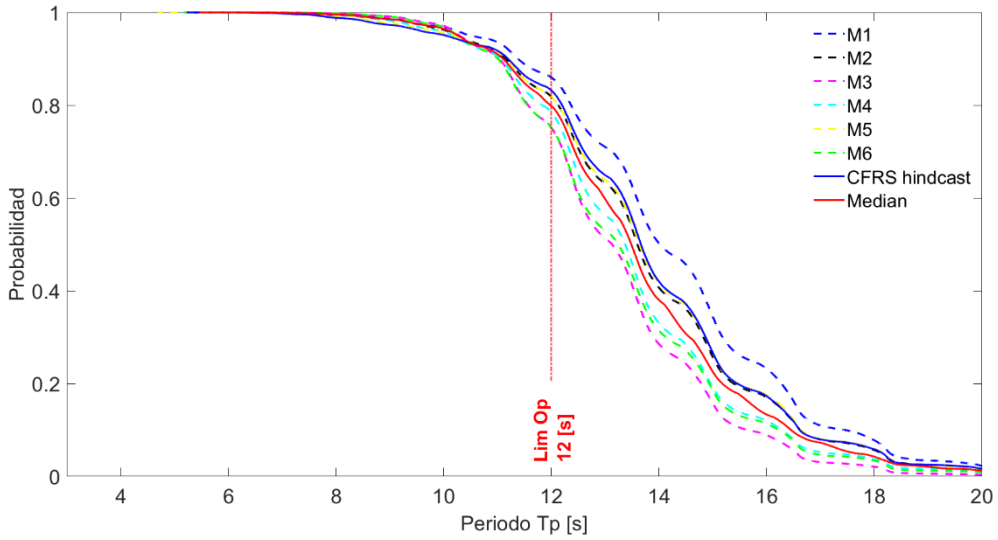


FIGURA 34: SERIE DE TIEMPO PARA PROYECCIÓN SSP5-8.5 FIN DE SIGLO (2081-2100)



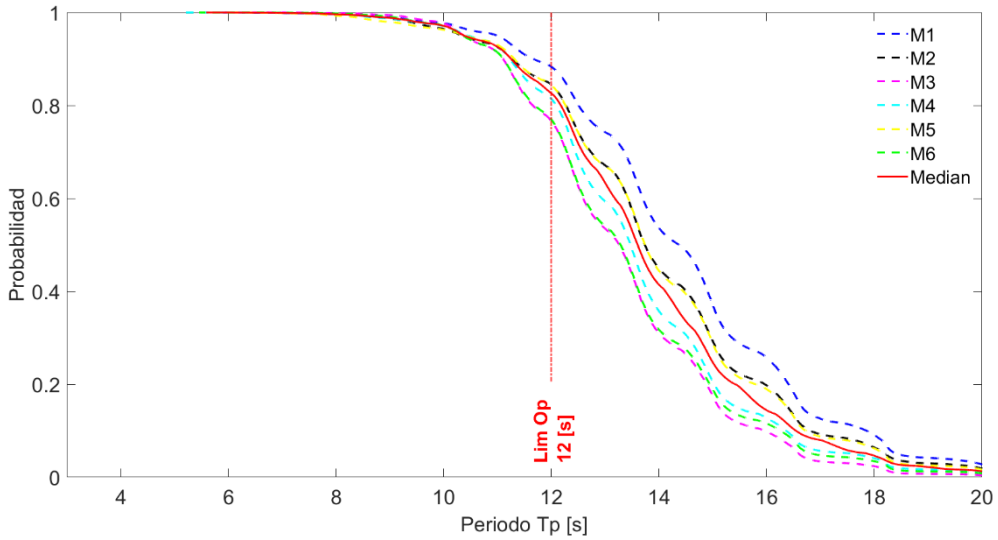
8.4 RESULTADOS PROYECCIONES PARA EL PERIODO PEAK

FIGURA 35: CRUCE DE CURVAS DE EXCEDENCIA DEL PERIODO PEAK DEL OLEAJE EN EL PERIODO HISTÓRICO (1085-2004)



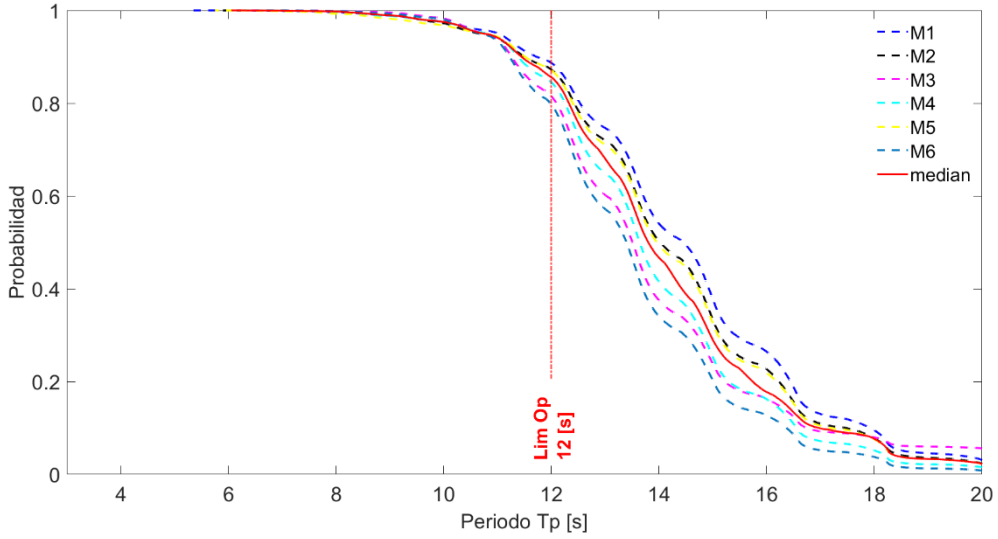
Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 36: CRUCE DE CURVAS DE EXCEDENCIA DEL PERIODO PEAK DEL OLEAJE EN LA PROYECCIÓN A MEDIADOS DE SIGLO (2026-2045).



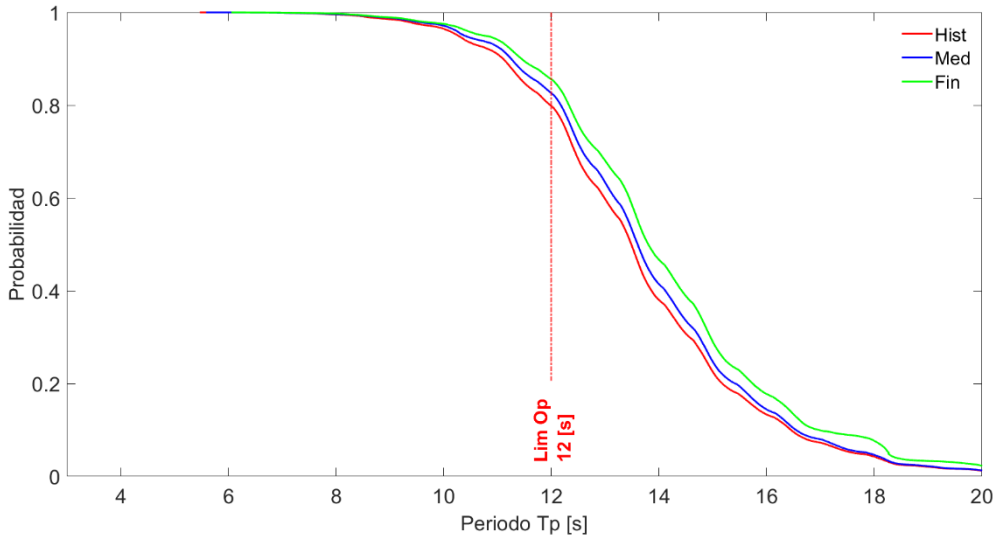
Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 37: CRUCE DE CURVAS DE EXCEDENCIA DEL PERIODO PEAK DEL OLEAJE EN LA PROYECCIÓN A FIN DE SIGLO (2081-2100).



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 38: CRUCE DE CURVAS DE EXCEDENCIA DEL PERIODO PEAK. MEDIANA DE TODOS LOS HORIZAONTES DE EVALUACIÓN



Fuente: Elaboración propia.

TABLA 11: RESULTADOS DOWNTIME OPERACIONAL RESPECTO AL UMBRAL DE 12 [S] PERIODO PEAK

	Periodo Peak umbral: 12 [s]							
	Probabilidad de excedencia %			Downtime [hora/año]			Diferencia [hora/año]	
Modelo	1985-2004	2026-2045	2081-2100	1985-2004	2026-2045	2081-2100	Med-Hist	Fin-Hist
M1	85,99	88,37	88,66	7532,78	7741,27	7766,68	**208,49**	**233,89**
M2	81,75	84,40	87,27	7161,36	7393,50	7644,91	**232,14**	**483,55**
M3	75,15	76,60	81,47	6583,20	6710,22	7136,83	**127,02**	**553,63**
M4	78,45	81,40	84,50	6872,28	7130,70	7402,26	**258,42**	**529,98**
M5	81,93	84,37	87,16	7177,13	7390,87	7635,28	**213,74**	**458,15**
M6	75,08	76,97	79,69	6577,07	6742,63	6980,90	**165,56**	**403,84**
CFRS Hindcast	83,18	-	-	7286,63	-	-	-	-
Mediana	**79,77**	**82,61**	**85,59**	**6987,91**	**7236,70**	**7497,74**	**248,78**	**509,83**

Fuente: Elaboración propia.