



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LOS AVISOS DE MAREJADAS Y SU RELACIÓN CON LOS VALORES EXTREMOS DEL NIVEL TOTAL DE AGUA EN LA BAHÍA DE VALPARAÍSO

Memoria de Título presentada por

Nicole Andrea Ureta Vergara

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Patricio Andrés Catalán Mondaca

agosto de 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LOS AVISOS DE MAREJADAS Y SU RELACIÓN CON LOS VALORES EXTREMOS DEL NIVEL TOTAL DE AGUA EN LA BAHÍA DE VALPARAÍSO _____

Nombre del candidato(a): Nicole Andrea Ureta Vergara _____

Carrera / Grado: Ingeniería Civil _____

Campus: San Joaquín _____ Departamento: Obras Civiles _____

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, **Patricio Andrés Catalán Mondaca** _____, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 21/08/2026

Firma: _____

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 21/08/2026

Firma: _____



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

TÍTULO DE LA MEMORIA:

**ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LOS AVISOS DE MAREJADAS Y SU
RELACIÓN CON LOS VALORES EXTREMOS DEL NIVEL TOTAL DE
AGUA EN LA BAHÍA DE VALPARAÍSO**

AUTOR:

NICOLE ANDREA URETA VERGARA

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERÍA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Nombre

Firma

Prof. Guía Patricio Catalán Mondáca

Miembro 1 Comisión

Santiago, Chile, agosto de 2026

ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LOS AVISOS DE MAREJADAS Y SU RELACIÓN CON LOS VALORES EXTREMOS DEL NIVEL TOTAL DE AGUA EN LA BAHÍA DE VALPARAÍSO

Nicole Andrea Ureta Vergara¹, Patricio Andrés Catalán Mondaca¹

¹ Universidad Técnica Federico Santa María

1 Resumen

En esta memoria se analiza la relación entre los avisos de marejadas emitidos por el Servicio Meteorológico de la Armada de Chile y los eventos extremos del nivel total de agua (Total Water Level, TWL) en la bahía de Valparaíso. Para ello, se integran las componentes del nivel de aguas quietas (Still Water Level, SWL) y las variables asociadas al oleaje para construir series de tiempo del TWL en 21 nodos costeros. El estudio considera la identificación de eventos extremos mediante la metodología Peak Over Threshold (POT), cuyos parámetros se definen a partir de un análisis de sensibilidad, la evaluación de su correspondencia temporal con los avisos de marejadas y la propuesta de un ajuste metodológico adaptado a las condiciones locales de la bahía de Valparaíso.

Palabras clave: avisos de marejadas, nivel total de agua (TWL), Peak Over Threshold (POT).

2 Contexto

Durante las últimas décadas, el calentamiento global ha generado alteraciones en los patrones climáticos y atmosféricos. A nivel oceanográfico, estos cambios repercuten directamente en el nivel del mar, en el clima del oleaje, las mareas y las corrientes. Particularmente para las marejadas, los efectos asociados al cambio climático se han visto reflejados en el aumento de la frecuencia e intensidad con la que se presentan en las costas de Chile. Esto, sumado al aumento del nivel medio del mar y al incremento de la urbanización costera, genera que la población y la infraestructura se vean cada vez más expuestas a este tipo de amenazas (Winckler et al., 2022; Jara, 2025).

Un ejemplo de ello son los impactos generados por las marejadas del 25 de junio de 2017 en Viña del Mar. Durante estos eventos se registraron sobrepasos de la defensa costera, anegamiento de las calles e inundaciones sobre una superficie cercana a 10 [ha], con profundidades de hasta 90 [cm]. Los eventos dejaron daños en la infraestructura y erosión en las playas, con una pérdida aproximada de 81000 [m³] de arena (Igualt et al., 2019). Otro caso de gran impacto fue el que se presentó el 8 de agosto de 2015 en las regiones de Coquimbo y Valparaíso, donde el oleaje extremo, los fuertes vientos, las bajas presiones y una marea astronómica favorable generaron un aumento del nivel del mar y sobrepasos del borde costero. En este caso, más de 55000 personas resultaron afectadas y las pérdidas en infraestructura alcanzaron los US\$7.2 millones (Winckler et al., 2017).

Frente a este escenario, el Servicio Meteorológico de la Armada de Chile (SERVIMET) realiza pronósticos de propagación del oleaje con el objetivo de identificar la posible ocurrencia de marejadas en la costa y, cuando corresponde, emite avisos orientados a resguardar la seguridad de las personas (DIRECTEMAR, 2024; Molina, 2022). Estos avisos son una herramienta fundamental para la gestión del riesgo costero. Sin embargo, considerar únicamente las condiciones de oleaje puede ser insuficiente para evaluar este tipo de amenazas, ya que sus impactos dependen, entre otros factores, de la marea, el nivel del mar y la morfología de la costa (Molina, 2022; Winckler et al., 2017).

En este contexto, y como parte del proyecto FONDEF ID25I10160 “Olas del Futuro”, es que surge la necesidad de comprender y caracterizar el comportamiento de las marejadas en zonas costeras. Es por

esto que en esta memoria se analiza la relación entre los avisos de marejadas y la superposición de distintas componentes que influyen y determinan los valores extremos del nivel total de agua en la bahía de Valparaíso.

3 Objetivos

Para este estudio, el objetivo general es analizar la relación entre los eventos extremos del nivel total de agua y los avisos de marejadas en la bahía de Valparaíso.

A continuación, se indican los objetivos específicos:

OE1: Generar una base de datos única que recopile información de las variables oceanográficas y los registros históricos de avisos de marejadas en la región de Valparaíso.

OE2: Determinar la relevancia de las componentes del nivel total de agua durante los eventos asociados a avisos de marejadas.

OE3: Evaluar y proponer ajustes metodológicos para adaptar el análisis de los avisos de marejadas a las condiciones locales de la costa.

4 Marco teórico:

4.1 Generación del oleaje:

El viento es el movimiento de masas de aire inducido por gradientes térmicos y de presión, los cuales a su vez se ven afectados por la rotación de la tierra y la fricción entre el aire y la superficie (Campos, 2016). Vásquez (2025) indica que las marejadas son eventos extremos de oleaje, donde el principal factor generador es el viento. Por ende, si hay condiciones extremas de viento, se generan condiciones extremas de oleaje, es decir, se generan condiciones de marejadas.

En Chile, hay principalmente dos sistemas atmosféricos que provocan los gradientes de presiones y a su vez los vientos extremos: el anticiclón semipermanente del Pacífico Sureste y el cinturón de bajas presiones en latitudes medias. El anticiclón del Pacífico Sureste es una zona de alta presión en el norte de Chile, que producto del gradiente de presión, genera vientos locales en la costa. El cinturón de bajas presiones, tal como dice su nombre, son zonas de baja presión en latitudes medias (40°S-60°S) que, producto del gradiente, genera oleaje remoto. Son sistemas intensos durante todo el año y es el principal generador de oleaje extremo. (Vásquez, 2025).

4.2 Marejadas:

El concepto de marejadas se puede entender de manera diferente según el autor o institución que utilice el término. Además, su definición ha ido evolucionando a lo largo del tiempo. Puelma et al. (2016) hacen una revisión del concepto de marejadas y destacan el hecho de que hay por lo menos cinco definiciones distintas, que las describen según las características del oleaje (largo, altura y estado de mar) o según los efectos que generan en la costa (sobrepasos o rompientes).

Molina (2022) propone definir marejadas como “combinación del oleaje y del nivel del mar que tiene la capacidad de afectar el normal desarrollo de las actividades socioeconómicas en la zona costera y que pueden llegar a provocar daños en la infraestructura”. Esta definición engloba tanto las características del oleaje como las del nivel del mar, además del impacto que estas en conjunto pueden generar en la sociedad y en la infraestructura costera. De esta forma, amplía la idea y el cómo se entiende qué son las marejadas, sin limitarse a sus características físicas.

Por su parte, el Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SENAPRED) y la Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (DIRECTEMAR) (2024), definen las marejadas solo como oleaje de magnitud por sobre el promedio, producido por efecto del viento, que puede viajar miles de kilómetros hasta afectar el borde costero y las actividades marítimas que se desarrollan en el lugar. En este caso también se hace referencia a las características y a los efectos que tiene el oleaje en la costa.

Los eventos de marejadas también se pueden clasificar como anormales. Este concepto se comenzó a utilizar en 2013 y tal como dice Molina (2022) se incorporó “para poder diferenciar los eventos que tienen potencial de generar daños en la infraestructura”. Actualmente SENAPRED, en su página oficial, clasifica las marejadas como anormales “cuando el fenómeno tiene características diferentes a los valores promedio de oleaje (altura, dirección, período), por lo que pueden ingresar a las bahías y puertos, generando severos daños a la infraestructura costera, además de inundaciones por sobrepasos, reducción de playas, cortes de tránsito y suspensión de otras actividades.”

4.3 Avisos de marejadas:

La Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (DIRECTEMAR) es el organismo de alto nivel de la Armada de Chile cuya misión se orienta a dar cumplimiento a las leyes y convenios internacionales del ámbito marítimo, con el objetivo de proteger la vida humana en el mar, preservar el medio ambiente acuático y los recursos naturales marinos, además de fiscalizar las actividades que se desarrollan en su área de jurisdicción. Por su parte, el Servicio Meteorológico de la Armada (SERVIMET), dependiente de DIRECTEMAR, es el organismo técnico responsable del monitoreo, alerta y difusión de información de las amenazas de marejadas y otros eventos extremos del tiempo marítimo (DIRECTEMAR, 2024).

Los pronósticos marítimos elaborados por SERVIMET se basan en el Sistema de Pronósticos Meteorológicos Marítimos (METEOMAR), el cual integra salidas del modelo global de pronóstico atmosférico Global Forecast System (GFS), del modelo meteorológico de investigación Weather Research and Forecasting Model (WRF) y del modelo de monitoreo y predicción del oleaje WAVEWATCH III (WW3) (DIRECTEMAR, 2022).

Como parte del Encuentro Técnico-Académico sobre Percepción Remota, Gestión Costera y Monitoreo de Eventos Extremos en Chile, SERVIMET, junto con el Comité Oceanográfico Nacional (CONA) y otras instituciones, desarrollaron el 28 de mayo de 2026 un Taller de Marejadas. En esta instancia se presentaron los criterios utilizados para emitir estos avisos, los cuales se basan en el pronóstico de la propagación del oleaje.

En la Tabla 4-1 y la Tabla 4-2 se resumen los criterios utilizados por SERVIMET para clasificar el oleaje propagado como marejada y marejada anormal, respectivamente. Estos responden a condiciones del oleaje en aguas profundas, por lo que, a nivel costero, son estimaciones muy generales y cualitativas (Puelma et al., 2016). Por lo demás, en las tablas no se especifica si las variables consideradas corresponden a valores medios, máximos o espectrales, lo cual puede generar ambigüedad respecto al tipo de información utilizada.

Tabla 4-1: Condiciones del oleaje para definir avisos de marejadas.

Origen	Dirección	Altura [m]	Período [s]
Post frontal, campo lejano	Surweste/Weste	3 – 4	No considerado
Campo lejano	Norweste	2 – 2.5	No considerado
Fortalecimiento del Anticiclón	Sur/Surweste	> 3	No considerado

Tabla 4-2: Condiciones del oleaje para definir avisos de marejadas anormales.

Origen	Dirección	Altura [m]	Período [s]
Campo lejano	Surweste/Weste	> 4	No considerado
Campo lejano	Norweste	> 2.5	14 – 18
Campo lejano	Norweste	> 1.9	> 18
Sistema frontal	Norweste/Weste	> 3	No considerado

4.4 Total Water Level (TWL):

En zonas costeras, el nivel del mar se ve influenciado por factores mareales y condiciones meteorológicas locales. La marea astronómica es la fluctuación periódica del nivel del mar generada por la interacción entre la Tierra, el Sol y la Luna. Por su parte, la marea meteorológica hace referencia a las variaciones del nivel del mar asociadas a condiciones atmosféricas y meteorológicas (Campos, 2016). Sin embargo, en las playas, el nivel del mar también se ve afectado por cambios hidrodinámicos asociados al oleaje en la zona de rompiente mediante el wave runup, el cual corresponde a la combinación del wave setup, definido como el promedio temporal de la elevación del nivel del mar en la línea de costa, y el swash, correspondiente a las fluctuaciones verticales instantáneas del nivel del agua con respecto a esa elevación media (Serafin et al., 2017; Stockdon et al., 2006)

De acuerdo con Serafin et al. (2017), la superposición del nivel medio del mar, la marea astronómica y el residuo no mareal define el Still Water Level (SWL), o nivel de agua quieta, el cual representa el nivel del mar sin considerar la contribución del oleaje. A su vez, el residuo no mareal agrupa las variaciones del nivel del mar que no son explicadas por la marea astronómica, y se descompone en una señal estacional intraanual, anomalías mensuales del nivel medio del mar asociadas a variabilidad interanual y un residuo de alta frecuencia relacionado con el storm surge. Al incorporar al SWL la contribución del oleaje mediante el wave runup, se define el nivel total de agua o, en inglés, el Total Water Level (TWL). Serafin et al. (2017) utilizan las ecuaciones (1), (2) y (3) para obtener el TWL, SWL y residuo no mareal, respectivamente. Además, utilizan la ecuación (4), propuesta por Stockdon et al. (2006), para estimar el wave runup.

$$TWL = SWL + R \quad (1)$$

$$SWL = \eta_{MSL} + \eta_A + \eta_{NTR} \quad (2)$$

$$\eta_{NTR} = \eta_{SE} + \eta_{MMSLA} + \eta_{SS} \quad (3)$$

Donde:

- TWL : Total Water Level (nivel total de agua) [m].
- SWL : Still Water Level [m].
- R : wave runup [m].
- η_{MSL} : nivel medio del mar con respecto a un datum vertical [m].
- η_A : marea astronómica [m].
- η_{NTR} : residuo no mareal [m].

- η_{SE} : señal estacional intraanual [m].
- η_{MMSLA} : anomalías mensuales del nivel medio del mar asociadas a variabilidad interanual [m].
- η_{SS} : residuo de alta frecuencia asociado al storm surge [m].

La ecuación del wave runup, la cual Stockdon et al. (2006) define como el runup excedido por el 2% de las olas, es una parametrización empírica, desarrollada a partir de 10 experimentos realizados en 6 playas de Estados Unidos y Países Bajos, que depende de la pendiente de la playa, la altura significativa del oleaje en aguas profundas y longitud de onda del oleaje en aguas profundas, donde esta última se obtiene utilizando la ecuación (5).

$$R_2 = 1.1 \left(0.35\beta_f(H_0L_0)^{1/2} + \frac{[H_0L_0(0.563\beta_f^2 + 0.004)]^{1/2}}{2} \right) \quad (4)$$

$$L_0 = \frac{gT_0^2}{2\pi} \quad (5)$$

Donde:

- R_2 : runup excedido por el 2% de las olas [m].
- L_0 : longitud de onda del oleaje en aguas profundas [m].
- β_f : pendiente de la playa.
- H_0 : altura significativa del oleaje en aguas profundas [m].
- T_0 : periodo del oleaje en aguas profundas [s].
- g : aceleración de gravedad [m/s²].

Stockdon et al. (2023) mencionan que las predicciones del TWL son necesarias para orientar la evaluación del potencial de inundación, erosión y amenazas costeras asociadas. En esta línea, Serafin et al. (2017) analizan los extremos del TWL para cuantificar la contribución relativa de las variables que lo caracterizan y así interpretar mejor los procesos que impulsan las inundaciones y erosiones costeras. Además, mencionan que, en general, estas amenazas suelen estar determinadas por valores del TWL que superan cierto umbral. En este contexto, Arns et al. (2013) evalúan y comparan métodos para estimar la probabilidad de ocurrencia asociada a los niveles extremos de agua, con el objetivo de proporcionar orientación en el diseño y operación de infraestructura costera. En el estudio destacan y recomiendan utilizar la metodología de Peak Over Threshold (POT), ya que entrega resultados más confiables y estables que otros métodos analizados.

Por lo tanto, analizar los valores extremos del TWL permite identificar potenciales condiciones de amenaza en la costa, considerando que estos pueden estar dominados por distintas combinaciones entre el SWL y el wave runup. Llevándolo al caso de estudio, este enfoque permite comparar los avisos de marejadas, los cuales se asocian principalmente a eventos de oleaje extremo, con los peaks de la serie del TWL, evaluando si los avisos efectivamente coinciden con los periodos en que el nivel total de agua alcanza sus mayores niveles en la costa.

5 Base de datos:

Para el desarrollo de esta memoria se utilizan dos bases de datos. La primera corresponde a un reanálisis del SWL obtenido desde Copernicus Climate Data Store (CDS), del European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), y la segunda corresponde a un hindcast de oleaje generado por la Universidad de Valparaíso, a partir de la metodología propuesta por Correa et al. (2025).

Copernicus CDS/ECMWF utiliza el modelo hidrodinámico Global Tide and Surge Model (GTSM) versión 3.0, con forzantes climáticas del reanálisis global ERA5, para generar series temporales de variables relacionadas con el nivel del mar. A partir de la modelación se obtienen las variables Tidal elevation, Storm surge residual, Mean sea level y Total water level. Para mantener la nomenclatura y ser consistente con Serafin et al. (2017), el Total water level de esta base de datos se considera una aproximación del SWL definido en la ecuación (2), ya que no incorpora la contribución del wave runup. Por su parte, Tidal elevation se asocia a la marea astronómica η_A , mientras que Storm surge residual se asocia al residuo no mareal η_{NTR} , debido a que Copernicus CDS/ECMWF lo define como la diferencia entre Total water level y Tidal elevation. El nivel medio del mar se utiliza como datum vertical de la modelación, por lo cual no se incorpora de manera explícita en el análisis.

De esta base de datos se evalúan dos potenciales nodos para obtener el SWL: el nodo 39079, ubicado en la bahía de Valparaíso, y el nodo 33874, ubicado mar adentro frente a la zona sur de la bahía. En la Figura 5-1 y la Tabla 5-1 se muestran la ubicación y coordenadas de cada nodo, respectivamente.



Figura 5-1: Ubicación de potenciales nodos Copernicus CDS/ECMWF para definir el SWL (WGS84/ UTM 19S).

Tabla 5-1: Coordenadas de potenciales nodos Copernicus CDS/ECMWF para definir el SWL (WGS84/ UTM 19S).

Nodo	Este [m]	Norte [m]
33874	221439	6342765
39079	255678	6342124

Siguiendo la metodología de Correa et al. (2025), la Universidad de Valparaíso genera una base de datos de oleaje mediante un hindcast desarrollado con modelación espectral en WAVEWATCH III versión

6.07. Este modelo resuelve la evolución espacial y temporal de la energía del oleaje mediante la ecuación de balance de acción espectral, utilizando forzantes de viento provenientes del reanálisis ERA5 del ECMWF. A partir de esta modelación se generan series horarias de altura significativa espectral (H_{m0}) y periodo peak (T_p) del oleaje, entre otras variables, para 21 nodos costeros de la bahía de Valparaíso. La ubicación y coordenadas de cada nodo se presentan en la Figura 5-2 y en la Tabla 5-2, respectivamente.

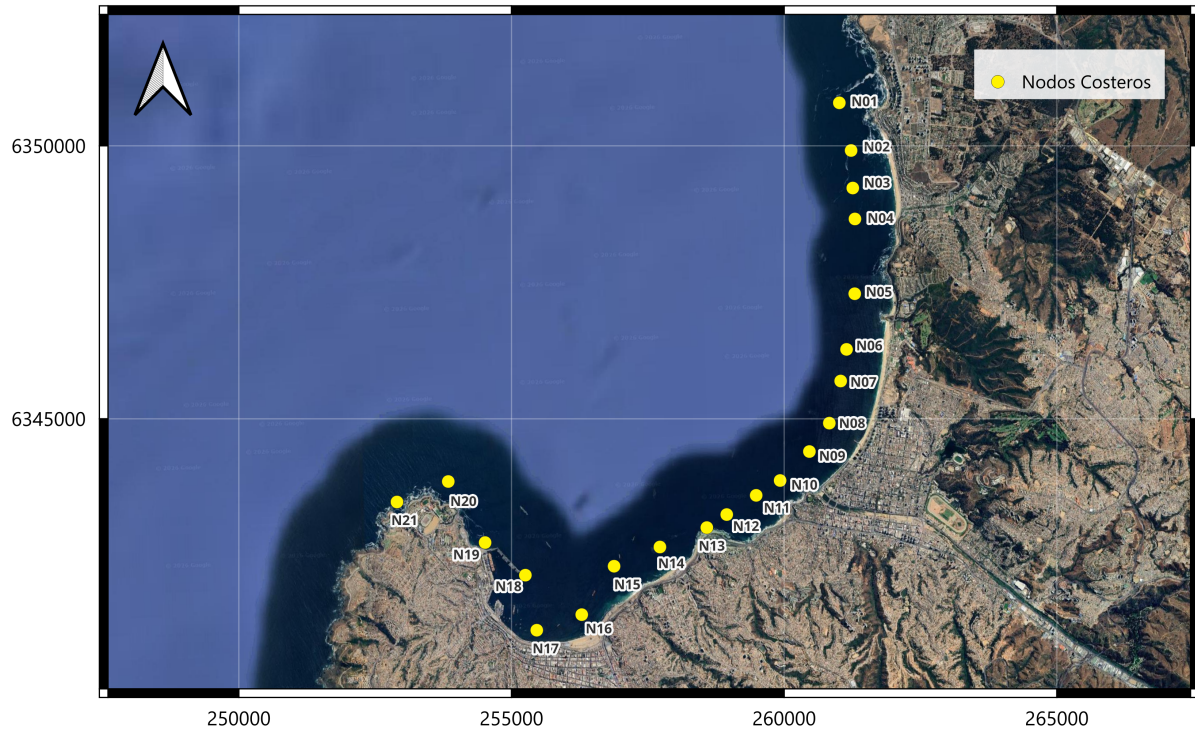


Figura 5-2: Ubicación nodos costeros entregados por la Universidad de Valparaíso (WGS84/UTM 19S).

Tabla 5-2: Coordenadas nodos costeros entregados por la Universidad de Valparaíso (WGS84/UTM 19S).

Nodo	Este [m]	Norte [m]	Nodo	Este [m]	Norte [m]
N01	261013	6350787	N12	258948	6343245
N02	261229	6349914	N13	258583	6343006
N03	261260	6349226	N14	257723	6342650
N04	261299	6348659	N15	256882	6342298
N05	261295	6347290	N16	256288	6341411
N06	261145	6346270	N17	255464	6341126

N07	261038	6345691	N18	255255	6342134
N08	260829	6344919	N19	254516	6342732
N09	260464	6344399	N20	253841	6343850
N10	259927	6343869	N21	252900	6343475
N11	259488	6343597	-	-	-

6 Metodología

En la metodología de esta memoria se utilizan bases de datos oceanográficas y registros históricos de avisos de marejadas para analizar su relación con los eventos extremos del nivel total de agua en la bahía de Valparaíso. En una primera etapa se procesan las bases de datos y se evalúan las alternativas para representar el SWL y la pendiente de playa requerida en la estimación del wave runup. Posteriormente, mediante un análisis de sensibilidad, se establecen los criterios de la metodología POT y se selecciona la pendiente de playa. Con estos parámetros se generan las series de tiempo del TWL, se identifican sus valores extremos y se analiza la relevancia de sus componentes durante los eventos asociados a avisos de marejadas. Finalmente, se propone un ajuste metodológico que incorpora criterios espaciales y temporales para adaptar el análisis de los avisos de marejadas a las condiciones locales de la zona de estudio.

A continuación, se describen en detalle las etapas metodológicas, y, en la Figura 6-1, se presenta un esquema general de la secuencia de las principales actividades realizadas.

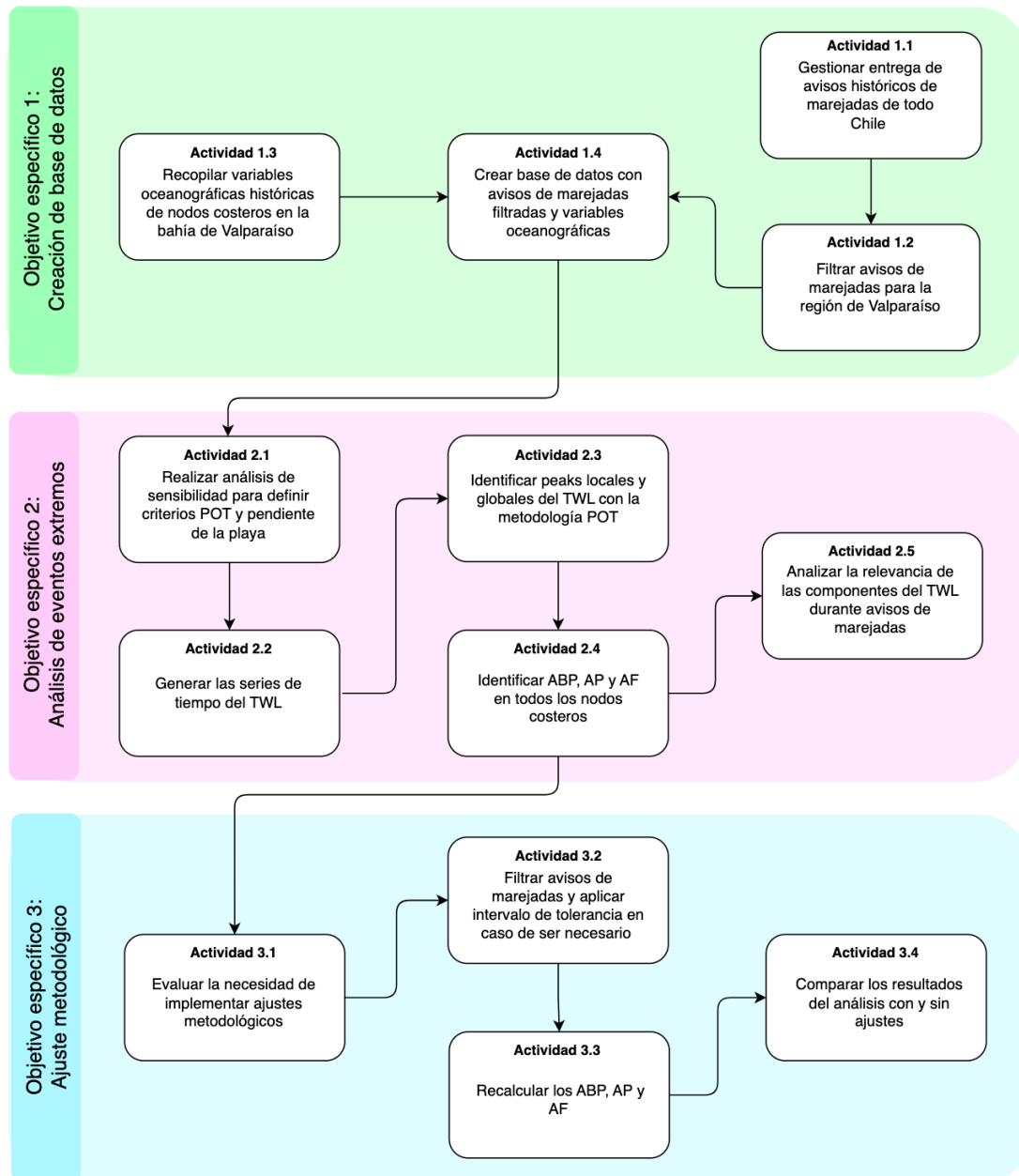


Figura 6-1. Esquema metodológico para alcanzar los objetivos específicos de la memoria.

6.1 Recopilación y procesamiento de las bases de datos:

Los registros históricos de avisos de marejadas se obtienen directamente desde SERVIMET y comprenden el periodo 2009–2025. El registro especifica el tramo costero afectado, la dirección del oleaje y las fechas de inicio y término, con una resolución diaria. De esta base de datos se seleccionan solo los avisos cuyo tramo incluya a la región de Valparaíso y, ya que la dirección del oleaje no se incorpora en el análisis de valores extremos del TWL, los avisos que presenten continuidad o superposición temporal se agrupan como un único evento de marejadas. De esta manera, se evita contabilizar una mayor cantidad de avisos que no aporta información adicional al análisis.

Para las variables asociadas al SWL, se dispone de información en el nodo 33874, ubicado mar adentro, y en el nodo 39079, ubicado al interior de la bahía, cercano al sector de Caleta Portales. Debido a su ubicación dentro de la bahía, inicialmente se podría suponer que el nodo 39079 es la alternativa más adecuada para representar las condiciones en la costa. Sin embargo, para verificar si la ubicación influye

en los resultados, se comparan ambas series del SWL y se evalúa si existen diferencias significativas entre ellas.

Las variables utilizadas para estimar el wave runup se obtienen directamente para cada uno de los 21 nodos costeros. Para esta estimación, Stockdon et al. (2006) utilizan la altura significativa del oleaje en aguas profundas H_0 y el período del oleaje en aguas profundas T_0 , señalando que, en playas naturales, el período se suele representar mediante el período peak T_p , aunque no especifican si este corresponde al período utilizado para la estimación del wave runup. Sin embargo, en documentación posterior de los datos experimentales, T_0 se identifica explícitamente como el período peak (Stockdon & Holman, 2011). Considerando los antecedentes mencionados, en esta memoria se utiliza la altura significativa espectral H_{m0} y el período peak T_p para estimar el wave runup. Desde este momento se utilizará R para referirse, tanto al wave runup de la ecuación (1), como al runup definido por Stockdon et al. (2006) en la ecuación (4).

A diferencia de las variables relacionadas con el oleaje, no se dispone de información específica de la pendiente de playa para cada nodo costero analizado. En el caso particular de la playa de Reñaca, Agredano et al. (2025) reportan una pendiente promedio de $\beta_f = 0.1$. De manera complementaria, a partir de los resultados presentados por Frías (2016) para la playa El Encanto, también ubicada en Reñaca, se obtiene una pendiente promedio de $\beta_f = 0.096$. En este último estudio, en tres de los cinco perfiles analizados se registran pendientes superiores a $\beta_f = 0.13$ e inferiores a $\beta_f = 0.05$, alcanzando valores máximos y mínimos aproximados de $\beta_f = 0.16$ y $\beta_f = 0.02$, respectivamente. Por su parte, Martínez y Salinas (2009) reportan para la playa de Tunquén pendientes entre 3.1° y 5.1° , equivalentes a $\beta_f = 0.054$ y $\beta_f = 0.089$, respectivamente. Si bien Tunquén se encuentra fuera de la bahía de Valparaíso, estos valores se incorporan como referencia debido a la falta de mediciones disponibles para los nodos de estudio. A partir de estos antecedentes, se adopta $\beta_f = 0.1$ como valor base y se consideran adicionalmente pendientes de $\beta_f = 0.05$ y $\beta_f = 0.15$ para abarcar la variabilidad observada y definir un rango aplicable al conjunto de nodos costeros. Por lo tanto, de manera preliminar, se generan tres bases de datos con las variables que definen el TWL, cada una asociada a un valor distinto de β_f .

6.2 Análisis de sensibilidad para definir criterios POT y base de datos:

Con las bases de datos definidas, se generan las series de tiempo del TWL utilizando la ecuación (1). Para identificar los valores extremos se emplea la metodología POT, la cual requiere definir un umbral de excedencia y un criterio de independencia de eventos. La elección de estos parámetros determina la cantidad de peaks identificados y, por consiguiente, los resultados del análisis (Liu et al., 2025).

Respecto al criterio de independencia, Liu et al. (2025) indican que utilizar intervalos inferiores a 24 [h] tiende a sobreestimar la cantidad de eventos extremos y recomiendan, de manera general, intervalos de 25 [h] a 72 [h]. Por su parte, Li et al. (2012), al comparar distintos métodos de análisis de oleaje extremo, utilizan como umbral el valor correspondiente al promedio más dos desviaciones estándar de la serie de tiempo ($\bar{x} + 2\sigma$). Además, indican que el intervalo entre peaks consecutivos no debe ser inferior a 30 [h], de lo contrario, ambos se consideran parte de un mismo evento. En ambientes dominados por tormentas o condiciones de alta energía de oleaje, Kümmerer et al. (2024) utilizan como umbral de excedencia el valor correspondiente al percentil 95 de la serie de tiempo y destacan la importancia de considerar criterios de independencia temporal para evitar que peaks consecutivos asociados a un mismo evento sean contabilizados como independientes.

A partir de los antecedentes mencionados, se realiza un análisis de sensibilidad para evaluar distintas configuraciones utilizadas en el análisis de eventos extremos del TWL. Se consideran tres pendientes de playa para la estimación del wave runup y diferentes combinaciones de intervalos de independencia y umbrales de excedencia de la metodología POT.

Para esto, se evalúan los siguientes casos:

- Intervalos de independencia de 24 [h], 48 [h] y 72 [h], considerando el rango mencionado por Liu et al. (2025) e incorporando un valor intermedio.
- Umbrales de excedencia de $(\bar{x} + \sigma)$, $(\bar{x} + 2\sigma)$ y $(\bar{x} + 3\sigma)$, adoptando como referencia el valor utilizado por Li et al. (2012) e incorporando un umbral inferior y superior, con una diferencia de σ respecto al valor de referencia.

De esta manera, al combinar las tres bases de datos preliminares del TWL, obtenidas a partir de distintas pendientes de playa, con los criterios definidos para la metodología POT, se evalúa un total de 27 configuraciones en el análisis de sensibilidad. Con el objetivo de comparar el desempeño de cada configuración, se define un ranking porcentual (R) que evalúa la concordancia temporal entre los avisos de marejadas y los valores extremos del TWL. El ranking compara la cantidad de avisos bien predichos (ABP) con los avisos perdidos (AP). Los ABP corresponden a avisos de marejadas durante los cuales se registra al menos un peak global o local de la serie de tiempo del TWL. Por el contrario, los AP corresponden a peaks globales del TWL que no coinciden con un aviso de marejadas.

El ranking asociado a cada configuración j se obtiene mediante la ecuación (6), en la cual se promedia, para los 21 nodos costeros, la diferencia entre la proporción de los ABP y la proporción de los AP.

$$R_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{ABP_{j,i}}{N^o A_{SERVIMET}} - \frac{AP_{j,i}}{N^o Peaks_{j,i}} \right) \cdot 100\% \quad (6)$$

Donde:

- R_j : ranking de la configuración j .
- i : índice asociado a cada nodo costero.
- j : índice asociado a cada configuración del análisis de sensibilidad.
- $ABP_{j,i}$: cantidad de avisos bien predichos de la configuración j en el nodo asociado al índice i .
- $AP_{j,i}$: cantidad de avisos perdidos de la configuración j en el nodo asociado al índice i .
- $N^o A_{SERVIMET}$: cantidad total de avisos de marejadas.
- $N^o Peaks_{j,i}$: cantidad total de peaks globales del TWL para la configuración j en el nodo i .
- n : cantidad total de nodos costeros.

Para los ABP se consideran todos los peaks del TWL que superan el umbral, ya que limitar el análisis a los peaks globales excluye avisos que no coinciden con el registro máximo del cluster. En cambio, los AP se contabilizan únicamente a partir de los peaks globales, debido a que cada uno representa un evento extremo independiente. De esta forma, se evita asociar más de un AP a un mismo cluster y sobreestimar la cantidad de eventos extremos sin aviso de marejadas.

6.3 Caracterización de los nodos costeros a partir de los avisos de marejadas y el TWL:

Con los parámetros seleccionados para la metodología POT y la estimación del wave runup, se analiza la correspondencia temporal entre los avisos de marejadas emitidos por SERVIMET y los peaks del TWL. Para ello, además de los ABP y los AP, se incorporan los avisos falsos (AF), definidos como aquellos durante los cuales no se identifica ningún peak que supere el umbral de excedencia. Para cada nodo costero se determina la cantidad de ABP, AP y AF, permitiendo analizar su distribución espacial en la bahía de Valparaíso.

Para los ABP, la relevancia de las componentes η_A , η_{NTR} y R se evalúa a partir del valor que registra cada una en el instante correspondiente al peak global de cada cluster. Dado que los umbrales de excedencia varían entre nodos, estas componentes se normalizan respecto al umbral correspondiente mediante la ecuación (7), con el objetivo de facilitar la comparación de los resultados entre nodos.

$$V_{x,i,norm} = \frac{V_{x,i}}{U_i} \quad (7)$$

Donde:

- $V_{x,i,norm}$: valor normalizado de la componente x en el nodo i .
- $V_{x,i}$: componente x en el nodo i .
- U_i : : umbral de excedencia en el nodo i .

6.4 Ajuste metodológico para evaluación de avisos de marejadas en zonas costeras:

Con el objetivo de adaptar el análisis de los avisos de marejadas a las condiciones locales de la bahía de Valparaíso, se propone un ajuste metodológico que incorpora criterios específicos para la zona de estudio. Para ello, se evalúa la congruencia entre los avisos de marejadas y los eventos extremos del TWL mediante el índice de congruencia promedio (G), definido en la ecuación (8). Este índice representa la proporción de eventos clasificados como ABP respecto del total de ABP, AF y AP registrados en todos los nodos costeros. Como criterio de evaluación, se establece un valor mínimo de congruencia del 50%, ya que valores inferiores indican que la correspondencia entre los avisos de marejadas y los eventos extremos del TWL no representa la mayoría de los casos analizados, justificando la incorporación de ajustes metodológicos.

$$G = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{ABP_i}{ABP_i + AF_i + AP_i} \cdot 100\% \quad (8)$$

El primer ajuste consiste en identificar y excluir del análisis aquellos avisos que no representan condiciones extremas dentro de la bahía. SERVIMET emite los avisos para extensos tramos de la costa, por lo que un mismo aviso puede responder a condiciones extremas fuera de la bahía y no necesariamente dentro de la zona de estudio. Por esta razón, cuando un aviso no coincide con ningún peak del TWL en ninguno de los 21 nodos analizados, se clasifica como un aviso fuera de la bahía (AFB) y se excluye del análisis.

El segundo ajuste consiste en incorporar un intervalo de tolerancia en la evaluación de la coincidencia temporal entre los avisos de marejadas y los peaks del TWL. Como se indicó en la sección 4.3, los avisos emitidos por SERVIMET se basan en el pronóstico de la propagación del oleaje desde aguas profundas. Sin embargo, el momento en que el TWL alcanza su valor máximo en la costa puede no coincidir con el intervalo temporal informado para el aviso, debido a la propagación del oleaje y a la respuesta hidrodinámica local (Serafin et al., 2017). Por este motivo, se considera una ventana temporal de ± 24 [h], correspondiente al menor intervalo compatible con la resolución diaria con que se emiten los avisos de marejadas. Esta tolerancia se aplica exclusivamente a los peaks clasificados inicialmente como AP, con el objetivo de evaluar si efectivamente corresponden a eventos independientes o si su falta de coincidencia con el aviso se debe únicamente a un desfase temporal. De esta manera, se mantiene la duración original de los avisos emitidos por SERVIMET y no se modifica la clasificación de los ABP ni de los AF. Así, los peaks registrados hasta 24 [h] antes del inicio o 24 [h] después del término de un aviso dejan de contabilizarse como AP independientes.

7 Análisis de resultados

7.1 Procesamiento inicial de la base de datos

La base de datos de los avisos de marejadas para la región de Valparaíso comprende registros entre 2009 y 2025. Debido a que los años 2009 y 2025 presentan información incompleta, el análisis considera únicamente el período 2010–2024, durante el cual se contabiliza un total de 409 avisos de marejadas.

Una vez definido el período de análisis, se selecciona la serie de tiempo del SWL que se utilizará en el cálculo del TWL. Para ello se comparan las series correspondientes a los nodos 33874 y 39079. Como se observa en la Figura 7-1, ambas series presentan un comportamiento prácticamente idéntico, con una diferencia absoluta máxima de 0.026 [m]. Dado que la elección del nodo no genera diferencias significativas en el cálculo del TWL, se selecciona el nodo 39079 por encontrarse al interior de la bahía y ser el más cercano a los nodos costeros analizados.

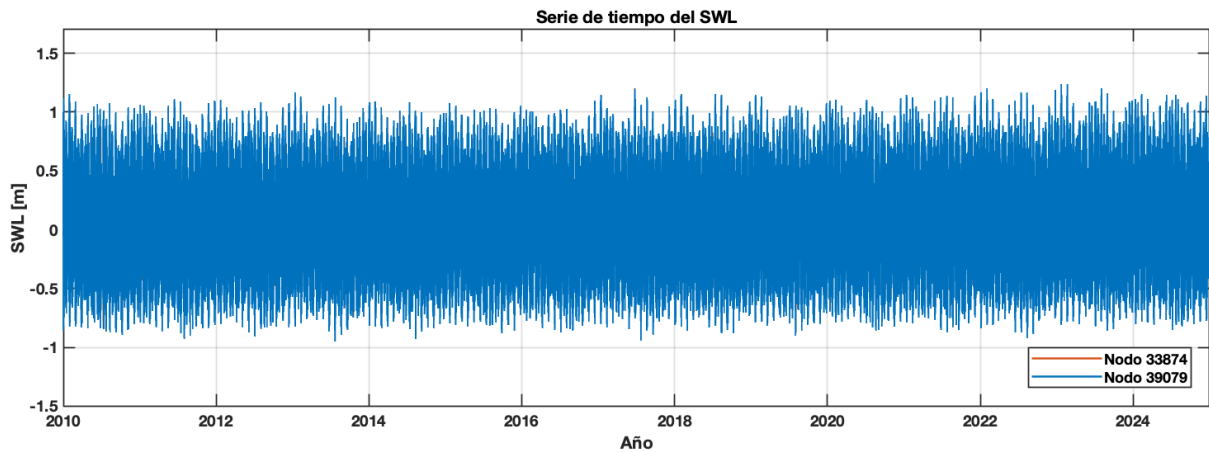


Figura 7-1: Serie de tiempo del SWL para el nodo 33874 y 39079.

7.2 Criterios para identificar eventos extremos del TWL:

En la Figura 7-2 se muestra el ranking obtenido para las 27 configuraciones evaluadas en el análisis de sensibilidad. Para simplificar la notación utilizada en la figura, las pendientes de playa $\beta_f = 0.05$, $\beta_f = 0.1$ y $\beta_f = 0.15$ se presentan como $\beta 0.05$, $\beta 0.1$ y $\beta 0.15$, respectivamente. De la misma manera, los umbrales de excedencia $(\bar{x} + \sigma)$, $(\bar{x} + 2\sigma)$ y $(\bar{x} + 3\sigma)$, se indican respectivamente como σ , 2σ y 3σ , mientras que los intervalos de independencia se representan como 24 [h], 48 [h] y 72 [h]. A partir de esta figura se observa que las configuraciones asociadas al umbral $(\bar{x} + \sigma)$ obtienen los mejores rankings, mientras que aquellas definidas con el umbral $(\bar{x} + 3\sigma)$ solo presentan rankings negativos.

Sin embargo, el ranking por sí solo no es suficiente para justificar la elección del umbral de excedencia. Es por esto que se realiza un análisis complementario para compararlos umbrales con el percentil 95 utilizado por Kümmerer et al. (2024). Para ello, en cada uno de los 21 nodos costeros se determina el percentil equivalente de los umbrales $(\bar{x} + \sigma)$, $(\bar{x} + 2\sigma)$ y $(\bar{x} + 3\sigma)$, considerando las tres pendientes de playa evaluadas. Después, para cada combinación pendiente–umbral, los percentiles obtenidos en los 21 nodos se promedian y así se obtiene un valor representativo. Los resultados se presentan en la Tabla 7-1, donde se observa que el umbral $(\bar{x} + \sigma)$ se asocia a los percentiles 83–84, mientras los umbrales $(\bar{x} + 2\sigma)$ y $(\bar{x} + 3\sigma)$ corresponden aproximadamente a los percentiles 97 y 100, respectivamente.

Si bien las configuraciones asociadas al umbral $(\bar{x} + \sigma)$ presentan los mejores rankings, este criterio corresponde aproximadamente al percentil 84 de la distribución del TWL, valor considerablemente inferior al percentil 95 utilizado por Kümmerer et al. (2024). En cambio, el umbral $(\bar{x} + 2\sigma)$, además

de ser el mismo criterio utilizado por Li et al. (2012), presenta rankings positivos y percentiles promedio más cercanos al propuesto por Kümmerer et al. (2024). Por lo tanto, considerando los resultados del análisis de sensibilidad y su concordancia con los antecedentes bibliográficos, se selecciona $(\bar{x} + 2\sigma)$ como umbral de excedencia para identificar los eventos extremos del TWL.

Respecto a la pendiente de playa, si bien β_f forma parte de las configuraciones evaluadas en el análisis de sensibilidad, no es un parámetro propio de la metodología POT, sino corresponde a una variable necesaria para estimar el TWL y, a su vez, identificar los ABP y AP. Los resultados de la Figura 7-2 muestran que, a diferencia de lo observado para los umbrales de excedencia, las configuraciones no presentan una tendencia clara asociada a una pendiente de playa específica. Esto indica que, dentro del rango de pendientes evaluadas, la elección de β_f no modifica de manera significativa los resultados del análisis de sensibilidad. Por esta razón, y considerando además que no se dispone de mediciones específicas para cada nodo de la bahía, se adopta como pendiente de playa $\beta_f = 0.1$, la cual corresponde al valor reportado por Agredano et al. (2025) y al registro más reciente disponible para el interior de la bahía.

Finalmente, respecto al criterio de independencia de eventos, se evaluaron intervalos de 24 [h], 48 [h] y 72 [h]. El intervalo de 24 [h] se incorporó al análisis por corresponder a la menor ventana temporal compatible con la resolución diaria de los avisos de marejadas. Sin embargo, Liu et al. (2025) recomiendan utilizar un intervalo mínimo de 25 [h], ya que valores inferiores pueden sobreestimar el número de eventos extremos al separar peaks pertenecientes a un mismo cluster. Por este motivo, el intervalo de 24 [h] se descarta para los análisis posteriores. Entre las configuraciones restantes con pendiente $\beta_f = 0.1$ y umbral $(\bar{x} + 2\sigma)$, la Figura 7-2 muestra que el intervalo de 72 [h] presenta un ranking levemente superior al obtenido con 48 [h]. Por lo tanto, se adopta un intervalo de independencia de 72 [h] para identificar los eventos extremos del TWL.

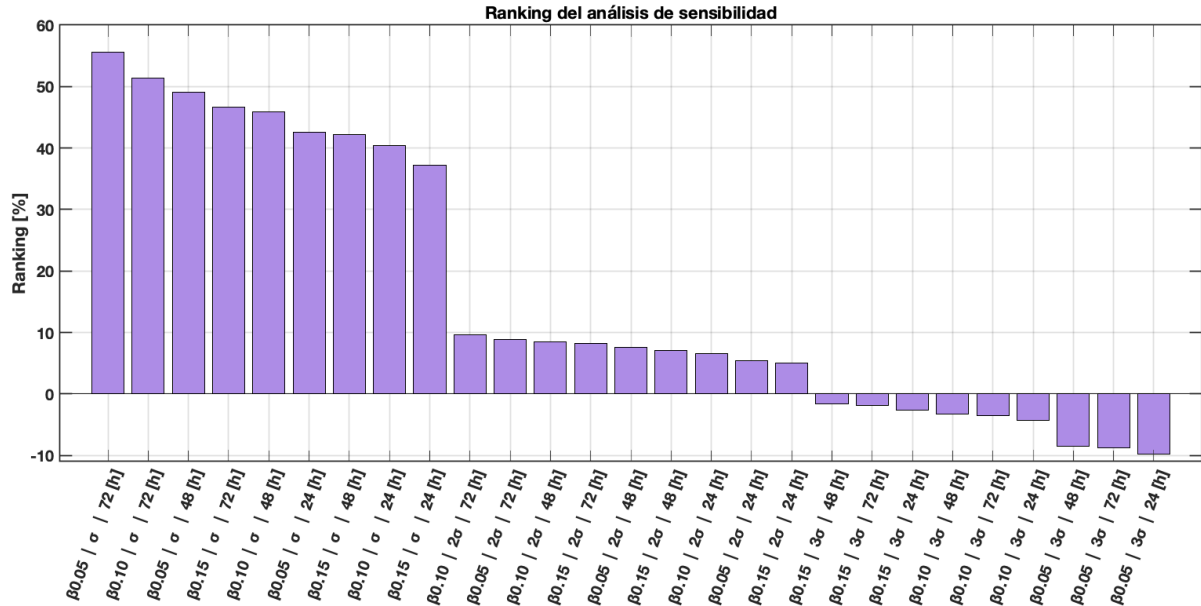


Figura 7-2: Ranking de configuraciones del análisis de sensibilidad.

Tabla 7-1: Percentil equivalente promedio asociado a cada umbral de excedencia y pendiente de playa.

β_f	$P(TWL \leq \bar{x} + \sigma)$	$P(TWL \leq \bar{x} + 2\sigma)$	$P(TWL \leq \bar{x} + 3\sigma)$
0.05	82.8	97.6	99.9
0.1	83.5	97.4	99.8
0.15	84.0	97.2	99.7

7.3 Caracterización de las variables del TWL y análisis cualitativo de los avisos de marejadas:

La clasificación de los avisos de marejadas y de los eventos extremos del TWL para los 21 nodos costeros se presenta mediante un gráfico de barras apiladas en la Figura 7-3. Debido a que los ABP y los AF son complementarios, la suma de ambas categorías es igual a 409 para todos los nodos. De esta figura se observa que la cantidad de ABP tiende a disminuir desde el norte hacia el sur de la bahía, alcanzando un mínimo en el nodo N17, y aumenta nuevamente hacia los nodos N20 y N21. De manera complementaria, los AF presentan una distribución espacial inversa. Por su parte, los AP no muestran una tendencia espacial definida entre los nodos, aunque sí se destaca el nodo N16 por registrar la mayor cantidad.

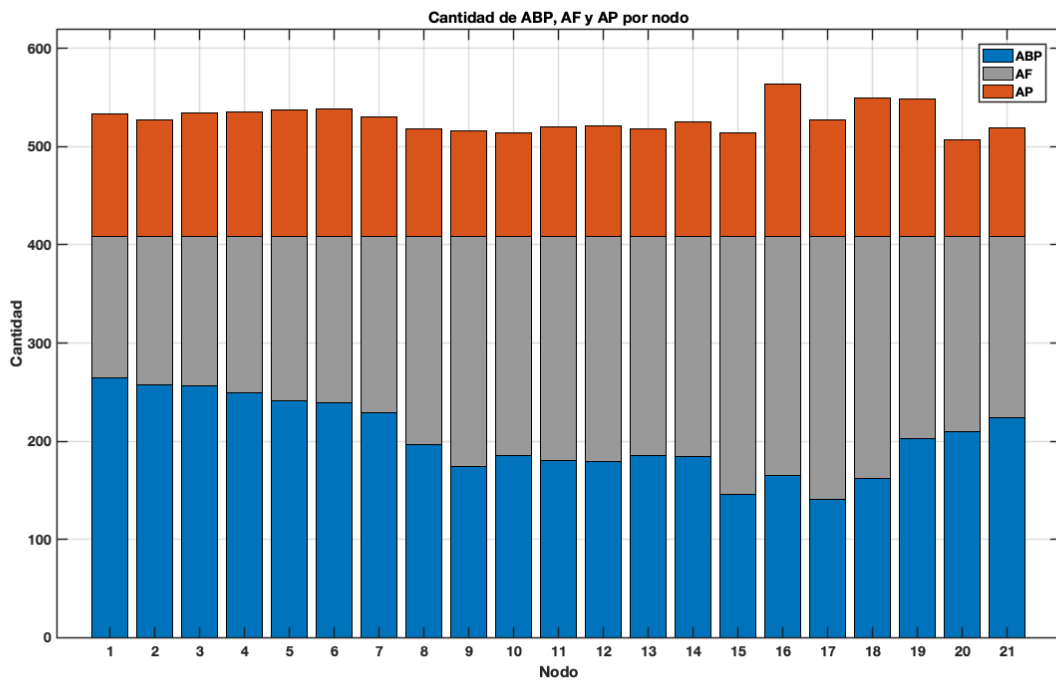


Figura 7-3: Cantidad de ABP, AP y AF en cada nodo costero de la bahía de Valparaíso.

Para representar la importancia relativa de las componentes del TWL durante los ABP, se analizan las contribuciones normalizadas de η_A , η_{NTR} y R respecto al umbral de excedencia definido para cada nodo. La Figura 7-4 presenta los resultados correspondientes al percentil 50 (P50), mientras que la Figura 7-5 muestra aquellos obtenidos al percentil 95 (P95). Para ambos percentiles, R corresponde a la principal

contribución en la mayoría de los nodos de la bahía. Sin embargo, entre los nodos N16 y N19, ubicados en la zona sur, aumenta la importancia relativa de η_A , alcanzando valores comparables e incluso superiores a los de R . Por su parte, η_{NTR} presenta una contribución considerablemente menor que las de R y η_A , manteniéndose prácticamente uniforme entre los nodos. En estas figuras además se observa que, para el P50, ninguna de las componentes supera de manera individual el umbral de excedencia. En cambio, para el P95 la contribución de R supera el umbral en la mayoría de los nodos.

Dado que los percentiles no permiten establecer con qué frecuencia ocurre esta condición, se contabiliza el porcentaje de ABP en los cuales el aporte de R supera por sí solo el umbral de excedencia. Los resultados muestran valores que varían entre 0% y 19% para los nodos analizados. Esto indica que, si bien durante los eventos de mayor magnitud el aporte de R puede superar el umbral, dicha condición ocurre únicamente para una cantidad reducida de los ABP. En consecuencia, en la mayoría de los casos la condición de excedencia del TWL se alcanza mediante la contribución conjunta de R , η_A y η_{NTR} .

En cuanto a la variación espacial de las contribuciones, esta es consistente con la distribución de ABP y AF presentada en la Figura 7-3. Entre los nodos N16 y N19, el aumento relativo de η_A coincide con el sector más protegido de la bahía frente al oleaje proveniente del sur, donde el aporte de R reduce su contribución respecto de los sectores más expuestos. Considerando que los avisos de marejadas se emiten según las condiciones del oleaje, resulta coherente que los nodos ubicados en la zona norte presenten una mayor cantidad de ABP, mientras que hacia la zona sur aumente la cantidad de AF.

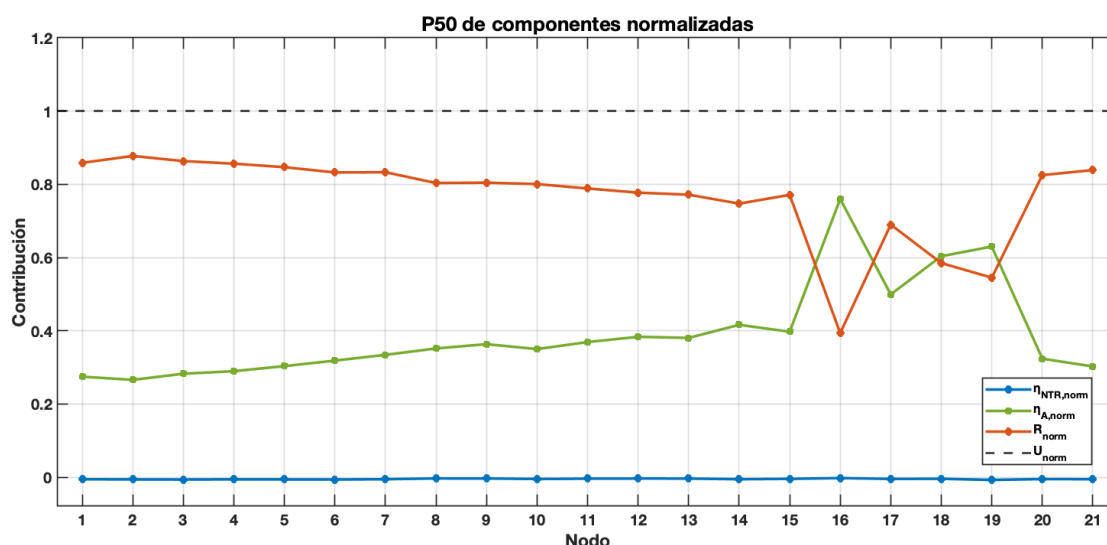


Figura 7-4: Percentil 50 de las componentes normalizadas en ABP.

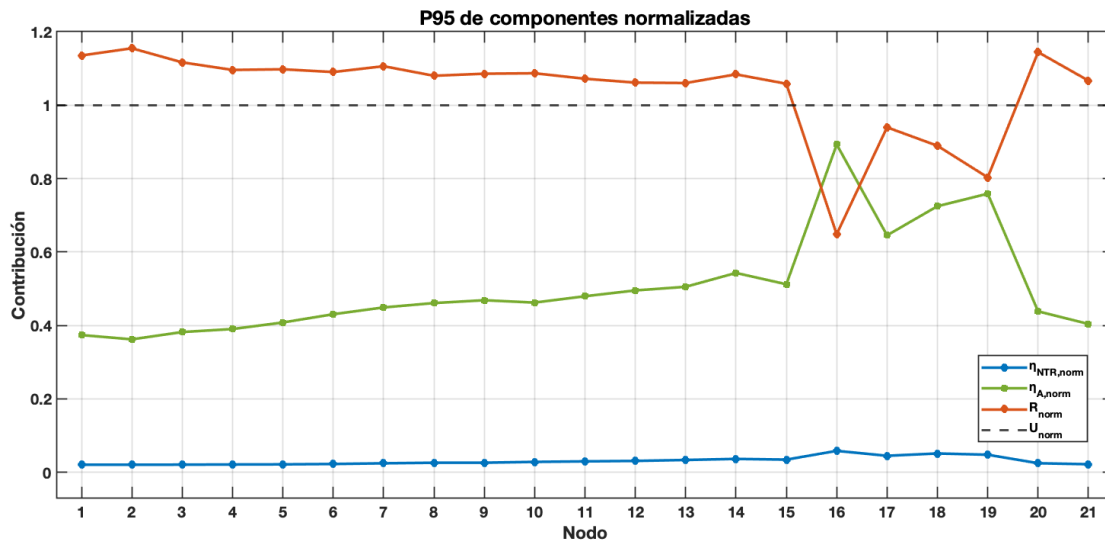


Figura 7-5: Percentil 95 de las componentes normalizadas en ABP.

7.4 Ajustes metodológicos para la clasificación de los avisos de marejadas y peaks del TWL

Con el objetivo de evaluar si es necesario realizar ajustes metodológicos en el análisis de los avisos de marejadas y los eventos extremos del TWL, se calcula el número de congruencia promedio para la bahía de Valparaíso. El valor de G que se obtiene corresponde a 39%, inferior al criterio definido, lo cual justifica la implementación de los ajustes propuestos.

El primer ajuste consiste en excluir del análisis aquellos avisos de marejadas en los cuales ninguno de los 21 nodos registra un evento extremo del TWL. Como resultado, la cantidad de avisos disminuye en un 22%, de 409 a 320, lo que indica que una proporción importante de los avisos no representaba los valores extremos del TWL dentro de la bahía de Valparaíso. Por otra parte, al incorporar el intervalo de tolerancia de ± 24 [h], disminuye la cantidad de AP, ya que dejan de contabilizarse como eventos independientes aquellos peaks que presentan un desfase temporal de un día o menos respecto a los avisos de marejadas. Dependiendo del nodo, la cantidad de AP disminuye entre 14 y 29 peaks. Estos resultados se presentan en la Figura 7-6, donde se compara la cantidad de ABP, AF y AP antes y después de implementar los ajustes.

En la Tabla 7-2 se presenta el número de congruencia nodal antes y después de los ajustes, junto con el incremento relativo de cada nodo (ΔG_i). Antes de su implementación, solo un nodo cumple el criterio del 50%. Después, 9 de los 21 nodos cumplen con dicho criterio y, de manera general, presentan un aumento relativo de congruencia nodal de aproximadamente el 25%. Como resultado, el número de congruencia promedio de la bahía aumenta desde 39% hasta 48%. Si bien este valor continúa siendo inferior al criterio definido, la congruencia entre los avisos de marejadas y los valores extremos del TWL aumenta al excluir avisos que no representan condiciones extremas dentro de la bahía y considerar posibles desfases temporales entre los avisos de marejadas y los peaks del TWL.

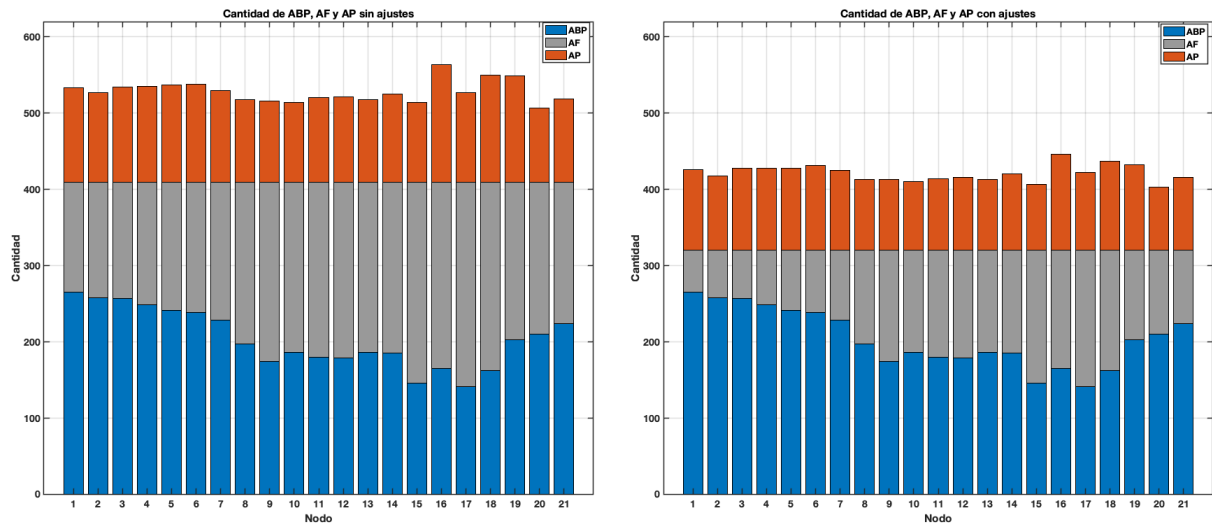


Figura 7-6: Cantidad de ABP, AF y AP antes y después de implementar ajustes.

Tabla 7-2: Número de congruencia nodal y su aumento relativo.

Nodo	G_i [%]		ΔG_i [%]
	Sin ajustes	Con ajustes	
N01	50	62	25
N02	49	62	26
N03	48	60	25
N04	47	58	25
N05	45	56	25
N06	44	55	25
N07	43	54	25
N08	38	48	25
N09	34	42	25
N10	36	45	25
N11	35	43	26
N12	34	43	25
N13	36	45	25
N14	35	44	25
N15	28	36	26
N16	29	37	27
N17	27	33	25
N18	29	37	26
N19	37	47	27
N20	41	52	26
N21	43	54	25

8 Conclusiones:

A partir de los resultados obtenidos en este estudio se confirma que el wave runup constituye la principal contribución al TWL durante los eventos extremos analizados. Esto concuerda con los criterios utilizados por SERVIMET para definir la emisión de un aviso de marejadas, ya que se basa únicamente en la propagación del oleaje. Sin embargo, en la mayoría de los casos esta componente por sí sola no es suficiente para generar la condición de excedencia del umbral, sino que es la contribución conjunta del wave runup, la marea astronómica y el residuo no mareal las que determinan los valores extremos del TWL. Por lo tanto, se concluye que el análisis del nivel total del agua permite una caracterización más completa de los procesos que dan origen a los eventos extremos en la costa.

El análisis espacial de los resultados de la clasificación de los avisos permitió establecer que la correspondencia entre ellos y los eventos extremos del TWL varía dentro de la bahía de Valparaíso. En los sectores más expuestos al oleaje, la correspondencia temporal entre ambos es mayor y disminuye hacia los sectores más protegidos. Este comportamiento se relaciona con la contribución relativa de las componentes del TWL: en las zonas más expuestas predomina el wave runup, mientras que hacia el sur de la bahía adquiere mayor importancia la marea astronómica. En consecuencia, la relación entre los avisos de marejadas y los eventos extremos del TWL depende de las características locales de cada sector y no puede interpretarse de manera uniforme para toda la bahía.

La evaluación de la relación entre los avisos de marejadas y los eventos extremos del TWL depende, en parte, de los criterios utilizados para establecer su correspondencia. En este sentido, excluir del análisis los avisos que no presentan eventos extremos en ninguno de los nodos permite centrar la evaluación en las condiciones que efectivamente se presentan en la bahía de Valparaíso, mientras que incorporar un intervalo de tolerancia permite considerar que una diferencia temporal entre la emisión de un aviso y la ocurrencia de un evento extremo del TWL no necesariamente implica que se trate de fenómenos distintos, sino que puede ser consecuencia de la forma en que ambos fueron determinados. Por ende, se concluye que la principal contribución de esta investigación consiste en la propuesta de una metodología para evaluar de manera representativa la relación entre los avisos de marejadas y los eventos extremos del TWL.

Finalmente, para la continuidad de este estudio, se recomienda replicar la metodología propuesta en otras zonas costeras del país, comenzando por bahías con características similares a las de la bahía de Valparaíso. De esta manera, sería posible verificar si la metodología permite evaluar de forma adecuada la relación entre los avisos de marejadas y los eventos extremos del TWL en otros sectores de la costa.

Referencias:

- Agredano, R., Cienfuegos, R., Catalán, P., Mignot, E., Bonneton, P., Bonneton, N., Martínez, C. (2019). Morphological changes in a cusped sandy beach under persistent high-energy swells: Reñaca Beach (Chile). *Marine Geology*, 417, 105988. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2019.105988>
- Arns, A., Wahl, T., Haigh, I. D., Jensen, J., & Pattiaratchi, C. (2013). Estimating extreme water level probabilities: A comparison of the direct methods and recommendations for best practise. *Coastal Engineering*, 81, 51–66. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.07.003>
- Campos, R. (2016). Análisis de marejadas históricas y recientes en las costas de Chile. Memoria del proyecto para optar al Título de Ingeniero Civil Oceánico. Universidad de Valparaíso, Facultad de Ingeniería.
- Correa, S., Aguirre, C., Becerra, D., Molina, M., Vilchez, P., & Bahamóndez, S. (2025). Upgrade of the Chilean Wave Atlas database. *Ocean Modelling*, 193, 102456. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2024.102456>
- Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante. (2022). PAQ CHL001: Cuestionario previo a la auditoría. Armada de Chile.
- Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante. (2024). D.G.T.M. y M.M. Ord. Exenta N° 12600/03/360 Vrs.: Aprueba convenio de colaboración entre el Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SENAPRED) y la Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante. Armada de Chile.
- Frías, G. (2016). Implementación de una metodología de reconstrucción de perfiles de playa a partir de mediciones indirectas: una aplicación a playa El Encanto, Reñaca, Región de Valparaíso. Memoria del proyecto para optar al Título de Ingeniero Civil Oceánico. Universidad de Valparaíso, Facultad de Ingeniería.
- Igualt, F., Breuer, W., Contreras, M., & Martínez, C. (2019). Efectos del cambio climático en la zona urbana turística y costera de Viña del Mar: levantamiento de daños para una inundación por marejadas y percepción de seguridad. *Revista* 180, (44), 120-133. [https://dx.doi.org/10.32995/rev180.num-44.\(2019\).art-626](https://dx.doi.org/10.32995/rev180.num-44.(2019).art-626)
- Jara, B (2025). Precipitaciones extremas El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) 2023 y verificación de caudal de diseño de obras hidráulicas urbanas en el Maule, Chile. Memoria de título, Universidad Técnica Federico Santa María.
- Kümmerer, V., Ferreira, Ó., Fanti, V., & Loureiro, C. (2024). Storm identification for high-energy wave climates as a tool to improve long-term analysis. *Climate Dynamics*, 62, 2207–2226. <https://doi.org/10.1007/s00382-023-07017-w>
- Li, F., Bicknell, C., Lowry, R., & Li, Y. (2012). A comparison of extreme wave analysis methods with 1994–2010 offshore Perth dataset. *Coastal Engineering*, 69, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.05.006>
- Liu, P., Din, A. H. M., & Hamden, M. H. (2025). Reconstructing hourly coastal total sea levels and assessing current and future extreme sea levels threats to the coast of China. *Scientific Reports*, 15, Article 38547. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-22493-2>
- Molina, M. (2022). Marejadas en Chile: características, avances y desafíos pendientes. En Martínez, C., Cienfuegos, R., Barragán, J., Navarrete, S., Hidalgo, R., Arenas, F. & Fuentes, L. (Eds.), *Hacia una*

- ley de costas en Chile: bases para una gestión integrada de áreas costeras (pp. 207–224). Serie GEOLIBRO, Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago.
- Puelma, A., Vásquez, J., & Guerrero, F. (2016). Marejadas costa afuera, pronósticos de oleaje local y cierres de puerto. VII Seminario Internacional de Ingeniería y Operación Portuaria (SIOP 2016). Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica.
- Serafin, K. A., P. Ruggiero, and H. F. Stockdon. (2017). The relative contribution of waves, tides, and nontidal residuals to extreme total water levels on U.S. West Coast sandy beaches. *Geophys. Res. Lett.*, 44, 1839-1847. doi:10.1002/2016GL071020
- Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres & Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (2024). Protocolo entre el Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres y la Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante para el monitoreo, alerta y difusión de las amenazas de marejadas y otros eventos extremos del tiempo marítimo. Gobierno de Chile. https://www.directemar.cl/directemar/site/docs/20240522/20240522114643/convenio_senapred_dg_tm_censurado.pdf
- Stockdon, H. F., & Holman, R. A. (2011). Observations of wave runup, setup, and swash on natural beaches (Data Series 602). U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/ds602>
- Stockdon, H. F., Holman, R. A., Howd, P. A., & Sallenger Jr, A. H. (2006). Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering* 53(7), 573-588. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.12.005>
- Stockdon, H. F., Long, J. W., Palmsten, M. L., Van der Westhuysen, A., Doran, K. S., & Snell, R. J. (2023). Operational forecasts of wave-driven water levels and coastal hazards for US Gulf and Atlantic coasts. *Communications Earth & Environment*, 4, Article 169. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00817-2>
- Vásquez, M. (2025). Caracterización sinóptica de eventos de oleaje extremos en Chile. Tesis para optar al grado de Magíster en Meteorología y Climatología. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geofísica.
- Winckler, P., Acuña, C., Mora, J., Agredano, R., Contreras, M., Larraguibel, C., Melo, O. (2022). Impactos del cambio climático en la costa de Chile. En Martínez, C., Cienfuegos, R., Barragán, J., Navarrete, S., Hidalgo, R., Arenas, F. & Fuentes, L. (Eds.), *Hacia una ley de costas en Chile: bases para una gestión integrada de áreas costeras* (pp. 225–249). Serie GEOLIBRO, Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago.
- Winckler, P., Catalán, P., Nicolis, O. (2025). Olas del Futuro: sistema de soporte de decisiones de riesgo costero. Proyecto FONDEF IDeA I+D.
- Winckler, P., Contreras-López, M., Campos-Caba, R., Beyá, J. F., & Molina, M. (2017). El temporal del 8 de agosto de 2015 en las regiones de Valparaíso y Coquimbo, Chile Central. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 45(4), 622–648. <https://doi.org/10.3856/vol45-issue4-fulltext-1>