

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**  
**XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**CARACTERIZACIÓN SINÓPTICA DE EVENTOS DE OLAJE EXTREMOS EN CHILE.**

**MAGDALENA VÁSQUEZ R.<sup>1</sup>**  
**RENE GARREUD S.<sup>2</sup>**  
**CATALINA AGUIRRE G.<sup>3</sup>**

**RESUMEN**

Las marejadas son fenómenos causados por condiciones de viento de mayor magnitud a lo habitual que aumenta las alturas de las olas. Es por esto, que el estudio se enfoca en caracterizar las condiciones meteorológicas que desencadenaron marejadas extremas según la Escala de Impactos de Marejadas desarrollada por el Sistema de Alerta de Marejadas (SAM) de la Universidad de Valparaíso en Chile. Se seleccionaron tres puntos representativos en Chile: norte ( $-23^{\circ}\text{S}, 72^{\circ}\text{W}$ ), centro ( $-32^{\circ}\text{S}, 75^{\circ}\text{W}$ ) y sur ( $-44^{\circ}\text{S}, 78^{\circ}\text{S}$ ). Donde se extrajeron datos cada 3 [hrs] de altura significativa, periodo medio y dirección media modelados con WaveWatch III forzado con viento superficial y fracción de área de hielo marino del reanálisis ERA5. Con estos datos se obtuvieron los umbrales para categorizar los eventos en M3, M4 y M5 que sucedieron entre mayo y octubre desde 1979 al 2022, obteniendo 28 casos en el norte, 28 en el centro y 21 en el sur. En la zona norte y centro, los eventos remotos son los que ocurren con mayor frecuencia y son generados por bajas presiones, mientras que en la zona sur estos eventos son escasos. Las alturas máximas de estos eventos coinciden con magnitudes de vientos máximas. Los eventos locales en la zona norte son desarrollados por viento sur ocurrido mayormente en primavera. Asimismo, esta configuración se repite en la zona centro, en conjunto a eventos generados por bajas presiones cercanas a la costa, al igual que en la zona sur, donde este tipo de eventos son predominantes y originados por bajas presiones.

---

<sup>1</sup> Investigadora, Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso. – magdalena.vasquez@uv.cl

<sup>2</sup> Profesor titular, Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. - rgarreau@uchile.cl

<sup>3</sup> Profesora titular, Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso. – catalina.aguirre@uv.cl

## 1. INTRODUCCIÓN

Las marejadas son eventos extremos de oleaje, que afectan el normal desarrollo de las actividades socioeconómicas que se realizan en ciudades costeras [ONEMI, 2017]. A su vez, el oleaje es generado por la acción del viento, que al perturbar la superficie del océano forma ondas superficiales que aumentan en altura y potencia a medida que este sopla con una magnitud y dirección constante [Beyá et al., 2016]. Al propagarse el oleaje, este se caracteriza por tener alturas, direcciones de propagación y periodos constantes.

En los últimos años se ha puesto más atención a estos eventos extremos, ya que se ha registrado un aumento en su frecuencia en nuestro país [Winckler et al., 2020] y por las consecuencias que tienen en el turismo, las actividades portuarias, las playas, la pesca artesanal, entre otras actividades que se realizan cerca de la costa [Molina, 2022]. Una de las áreas más afectadas es la portuaria, ya que al cerrar el puerto todos los movimientos logísticos planeados para esos días con marejadas se ven detenidos. Un día sin operación en los puertos por los efectos del mal tiempo causa pérdidas millonarias de aprox. USD 8.7 millones [Fernández, 2018]. Por otro lado, la erosión de las playas causada por las marejadas ha ido en aumento y se estima que para mediados de siglo (2026 - 2045) el ancho de las playas se reduzca entre un 4% a 41% generando pérdidas anuales de USD 5.6 millones en promedio [Winckler et al., 2023].

Es por esto que diferentes estudios cuantifican las marejadas dependiendo de su intensidad usando variables oceanográficas e impactos en las costas como son el sobrepaso, los cierres de puertos, la erosión en playas, etc. Se han creado diferentes productos como la Escala de Magnitud de Intensidad de Daños por Marejadas [Campos-Caba, 2016] o también la Categorización de Marejadas del Sistema de Alerta de Marejadas de la Universidad de Valparaíso [Molina et al., 2019]. Estas categorías se separan en 5 intensidades, siendo la M1 la menos intensa que logra afectar las actividades que se realizan en la costa, hasta la M5, que es la más intensa con marejadas extremas que causan severos daños en la infraestructura costera, erosiona las playas y se debe evacuar los sectores aledaños a la costa.

Si bien estas categorías se calculan con parámetros del oleaje, la generación / intensificación de las marejadas van de la mano con lo que sucede en la atmósfera, ya que mientras más intensos sean los vientos, las olas que se formen serán de mayor altura. Es por esto, que conocer las condiciones meteorológicas que desarrollan eventos extremos de oleaje son de suma importancia para contribuir al conocimiento y pronóstico de estos fenómenos poco estudiados. El presente estudio se enfoca en caracterizar las configuraciones meteorológicas a escala sinóptica más típicas que desencadenan marejadas extremas categorizadas como M3, M4 y M5 en distintas zonas del país, con el fin de realizar una comparación entre los distintos climas extremos de oleaje y además establecer patrones característicos en la formación de estos fenómenos utilizando variables meteorológicas.

## **2. METODOLOGÍA**

### **2.1 Área de estudios & Datos**

Para realizar este estudio, se separó la costa de Chile en tres zonas, en donde se seleccionó un punto representativo en cada una de ellas representando el norte ( $23^{\circ}\text{S}, 72^{\circ}\text{W}$ ), centro ( $32^{\circ}\text{S}, 75^{\circ}\text{W}$ ) y sur ( $44^{\circ}\text{S}, 78^{\circ}\text{W}$ ), con el fin de caracterizar los climas extremos de oleaje de acuerdo a la variabilidad meridional de Chile.

Los datos se obtuvieron a partir de una simulación realizada en el modelo WaveWatch III, el cual se forzó con viento superficial a 10 [m] y fracción de área de hielo marino cada 6 [hrs] entre los años 1979 al 2022 del reanálisis ERA5 con una resolución espacial de  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  cubriendo el Océano Pacífico completo ( $80^{\circ}\text{N} - 80^{\circ}\text{S}$ ,  $100^{\circ}\text{E}$  a  $61^{\circ}\text{W}$ ), con el fin de representar de manera óptima los vientos que generan oleaje que afecta a la costa del Pacífico Sureste. Se extrajeron las variables de altura significativa ( $H_s$ ), periodo medio ( $T_m$ ) y dirección media ( $D_m$ ) cada 3 [hrs] con una resolución espacial de  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ . La validación de los resultados fue realizada en el trabajo de Vásquez (2024).

### **2.2 Selección de eventos**

Las categorías se definen a partir de series de tiempo de  $H_s$  y la potencia del oleaje ( $P$ ) obtenida en los puntos de estudio. Se seleccionaron fechas en las que se registraron marejadas catalogadas como M3, M4 y M5, relacionadas con los eventos más extremos, con 2, 5 y 10 años de período de retorno, respectivamente. Además, se estableció que, para considerar un día como M3, este umbral debía superarse en tres o más estados de mar ( $\geq 9$ [hrs]). En cambio, para M4 y M5, al tener periodos de retorno más largos, los días de eventos fueron seleccionados cuando un estado de mar (3[hrs]) lograba sobrepasar el umbral de una de estas dos categorías en  $H_s$  o  $P$ .

### **2.3 Clasificación de eventos**

Una vez obtenidos los eventos para cada categoría, se separaron de acuerdo a su origen, utilizando el periodo medio  $T_m$  y la dirección media  $D_m$  del oleaje, mediante los siguientes criterios:

- Marejadas Remotas:  $T_m$  mayores a 10 [s] y  $D_m$  provenientes desde el SW entre los  $202.5^{\circ}$  y  $247.5^{\circ}$ .
- Marejadas Locales:  $T_m$  menores a 10 [s] y  $D_m$  de propagación distinta al SW.

El criterio seleccionado para el periodo sigue lo establecido en [SHOA, 2005], por lo que se estableció que bajo los 10 [s] el oleaje fue generado por viento local y por sobre los 10[s] el oleaje fue generado lejano a la costa. Por otro lado, el criterio de  $D_m$  se seleccionó debido a que las marejadas locales típicamente registran olas provenientes de diferentes direcciones, como el sur (S), el oeste (W) o incluso el noroeste (NW), ya que, al registrarse vientos fuertes cercanos a la costa, el oleaje se desordena y las olas provienen de distintas direcciones. En cambio, las marejadas remotas, al tener períodos más largos, indican que se formaron lejanas

a la costa, y debido a la dispersión de ondas, ésta se propaga de manera ordenada en dirección suroeste (SW).

#### **2.4 Trayectorias & Zona de generación de marejadas de origen remoto**

Para identificar el momento y la ubicación del origen de la marejada y determinar cuánto tiempo tarda en propagarse desde la zona de generación a los puntos de estudio, se trazaron retro-trayectorias siguiendo el máximo de altura significativa. El objetivo de las trayectorias es registrar el desplazamiento del máximo de altura significativa, para así conocer el tiempo y la zona donde se generó el oleaje intenso que llegó a los puntos de estudio. El movimiento se traza desde el punto de estudio correspondiente a cada zona y se va siguiendo el valor máximo de la altura entre tres posibles direcciones oeste (W), suroeste (SW) y sur (S), yéndose atrás en el tiempo. El algoritmo finaliza cuando el valor del máximo es superior al de su antecesor y sucesor, determinando así su tiempo y posición de generación, lo que se nombró como el "día 0".

Las ubicaciones y valores de las alturas significativas máximas registradas en las trayectorias, se utilizaron para crear mapas de calor que permitieran identificar las zonas más comunes de generación de marejadas. Se considera como punto de generación aquel punto alrededor del máximo que tuviera un valor entre el máximo registrado el día de generación y el 90% de este. Una vez identificados todos los puntos que cumplían el criterio, se realiza una sumatoria de todos los eventos según su categoría y punto de estudio.

#### **2.5 Caracterización sinóptica de marejadas de origen remoto**

Con el fin de hacer un análisis de los eventos remotos, primero se observaron las semejanzas entre ellos mediante gráficos polares utilizando las componentes del viento, la altura máxima registrada y la dirección desde donde proviene el oleaje en los puntos de generación en los días 0 de cada evento de marejada. Una vez obtenidos los eventos a promediar, se utilizaron las ubicaciones de los máximos de altura significativa para así crear áreas más pequeñas de  $10^{\circ} \times 10^{\circ}$  centradas en el punto máximo. Esto mismo se replicó con la magnitud del viento y presión a nivel del mar.

#### **2.6 Análisis de frecuencia de los eventos**

Como una forma de establecer el carácter extremo de los eventos, se crearon histogramas utilizando la magnitud del viento y la presión media a nivel del mar (MSLP). En ellos, se muestran los valores máximos o mínimos de MSLP para cada evento de acuerdo a la configuración meteorológica que lo generó, en cambio, para la magnitud de viento se muestra el máximo valor de éste. Además, se añadieron diferentes valores de percentiles (pctl) para corroborar lo excepcional de los valores registrados en comparación con lo que se registra usualmente en cada zona de estudio.

### **3. RESULTADOS**

La Figura 1 muestra que en la zona norte 23 de las 28 marejadas (~80 %) fueron generadas en una zona remota, independiente de la categorización. El resto de los eventos fueron de

generación local con al menos un evento representativo en cada categoría. Esto se debe a la lejanía de este punto de estudio a la zona de generación de oleaje del hemisferio sur, haciendo que las olas tomen más tiempo (periodos más largos) en propagarse hasta la zona norte de Chile. En la zona centro se observa que, si bien la mayoría de las marejadas fueron clasificadas como remotas (20), el número de eventos locales (8) aumentó en comparación de la zona norte, y se muestra que para cada categoría existe un evento representativo de ellas. Por otro lado, en la zona sur 17 de las 21 marejadas fueron clasificadas como locales debido a sus cortos periodos y direcciones de propagación distintas al SW. En este caso, no hay ejemplos de marejadas remotas de categorías M4 y M5. Sin embargo, en la categoría M3 existen 4 eventos representativos de esta clasificación, con direcciones medias provenientes desde el SW y periodos levemente mayores a los 10 [s].

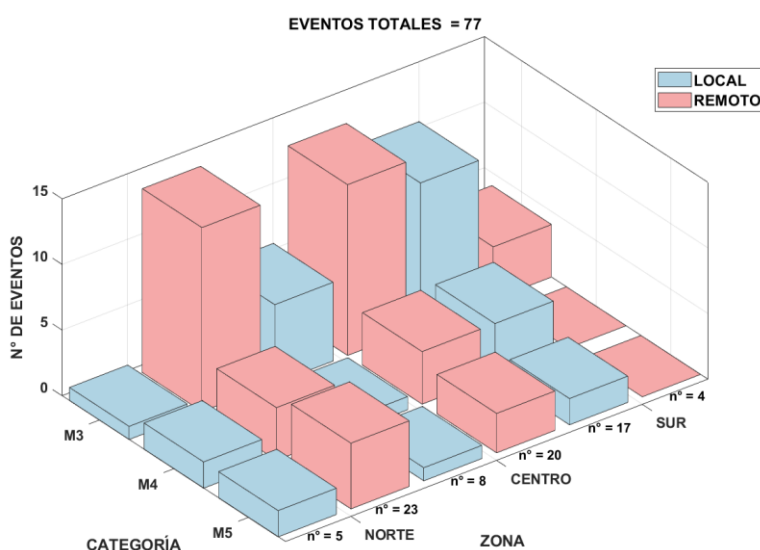


Figura 1. Distribución de los eventos seleccionados para las zonas de estudio.

A continuación, se muestran los resultados principales para el punto ubicado en la zona central de Chile.

Las trayectorias (Figura 2) muestran que en la zona centro (32°S, 285°W) la mayoría de las trayectorias provienen desde el SW en las tres categorías, sin embargo, en el recorrido de algunas de estas se pueden ver trayectos provenientes desde el W. Además, se observan trayectorias más cortas, haciendo alusión a que la generación de estos eventos es más próxima al punto de estudio. Asimismo, las zonas donde es más frecuente que se formen marejadas (Figura 3) categorizadas como M3 presentan una distribución con una componente SW, donde la zona más común de formación de marejadas de este tipo se encuentra entre los 40°S y 45°S, así como una concentración adicional entre los 50°S y 60°S. Para las marejadas M4, la zona más frecuente de formación se encuentra entre los 40°S y 50°S. De manera similar, los eventos de categoría M5 muestran marejadas que se forman más cerca del punto ubicado en los 35°S, aproximadamente, como en áreas más alejadas de la costa, entre los 40°S y 50°S.

La caracterización sinóptica de los eventos remotos en la zona central (Figura 4) muestra que las alturas significativas varían entre los 6 [m] y 9 [m] en el punto donde se generaron los distintos eventos y sus direcciones de propagación son entre el SW – WSW, dando indicios que las marejadas fueron generadas por una configuración meteorológica de una baja presión en la cual los vientos máximos se registran en el flanco NW de ésta. Además, las alturas máximas son mayores a medida que se aumenta en categoría, con vientos más zonales en los casos categorizados como M5 y una baja presión más profunda en comparación con las otras dos categorías.

Los histogramas de los eventos remotos (Figura 5) en la zona central muestran que las presiones medias a nivel del mar (MSLP) bajas que varían entre 956 [hPa] y 971 [hPa], donde la mayoría de los eventos se ubican entre los percentiles 1.5 y 10. Algunos eventos más extremos se encuentran por debajo del percentil 0.5, con valores inferiores a 950 [hPa]. Por otro lado, las magnitudes del viento registradas durante la mayoría de los días de marejada oscilan entre 16.9 [m/s] (percentil 99.5) y 19.6 [m/s] (percentil 99.9). Asimismo, las componentes del viento (Figura 6) presentan magnitudes positivas que superan los 11.4 [m/s] en la componente zonal y 7.5 [m/s] en la componente meridional (percentil 90), lo que indica que los vientos son predominantemente desde el SW.

Por otro lado, los histogramas de los eventos locales de la zona central (Figura 7) se registran distintos valores de MSLP debido a estos eventos fueron causados por distintos fenómenos meteorológicos, por lo tanto, los eventos generados por vientos sur registran presiones más altas, que superan los 1018 [hPa] llegando a registrar 1022 [hPa] en comparación con los eventos generados por una baja presión que poseen valores de 1009 [hPa], siendo el evento más bajo con un MSLP de 994.8 [hPa]. Por otro lado, las magnitudes del viento para esos días superan los 10.8 [m/s] (percentil 90). En particular, el evento M5 muestra valores que no exceden este valor, sin embargo, en el mapa de las condiciones meteorológicas se muestra que los vientos para ese día sí fueron superiores, pero este resultado radica en la posición del punto de estudio que se encuentra justo al centro de la baja presión, siendo no representativo, en este caso, de las condiciones de viento que hubo ese día en la costa. Siguiendo con las componentes del viento (Figura 8), podemos observar que en los casos M3 (que cuentan con la misma configuración) y M4, se presenta viento sur con magnitudes de la componente meridional que superan los 10.6 [m/s] (percentil 90). Por otro lado, los eventos generados por una baja presión presentan vientos provenientes tanto del NW como del W.

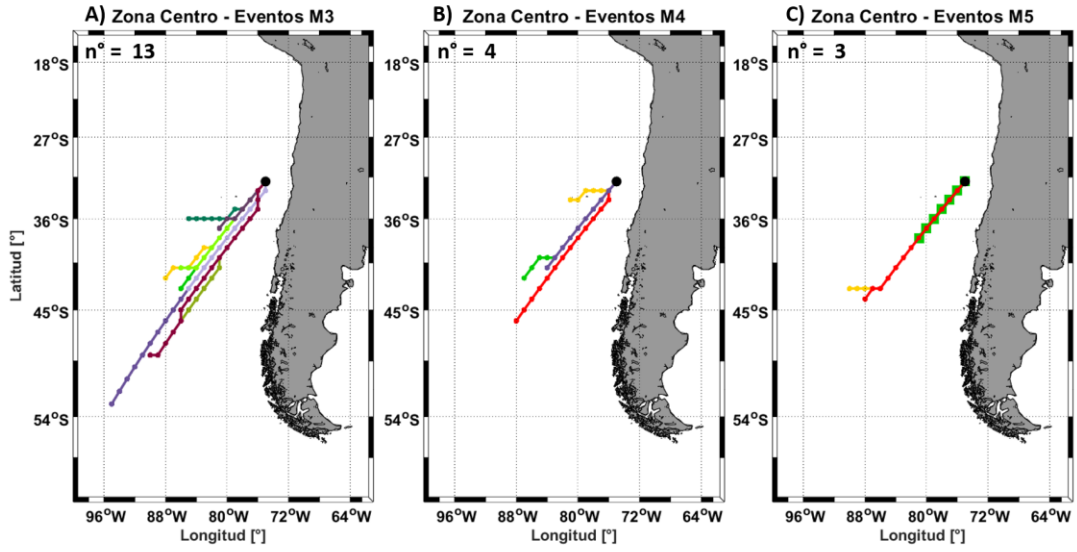


Figura 2. Trayectorias del máximo de Hs en la zona centro.

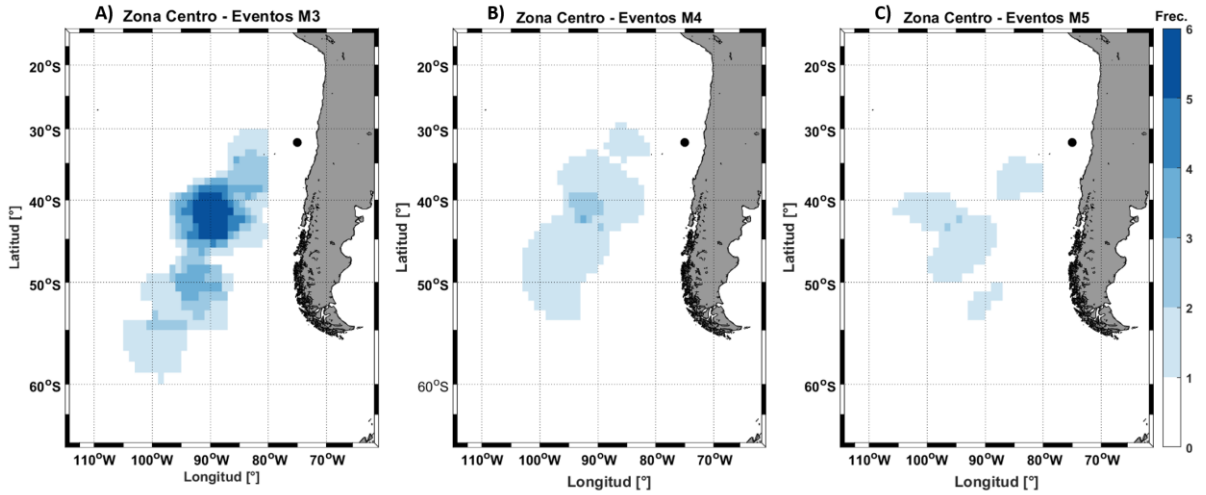
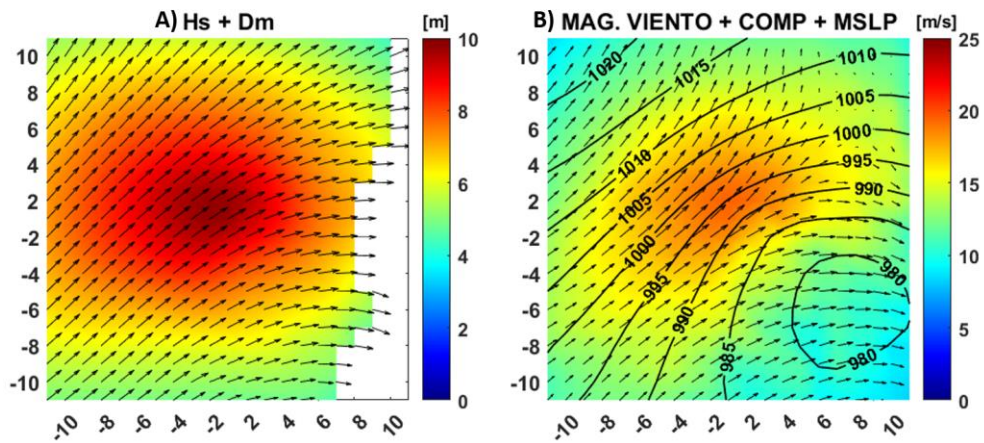


Figura 3. Mapa de calor de los sectores más frecuentes en que se forman marejadas en la zona centro.



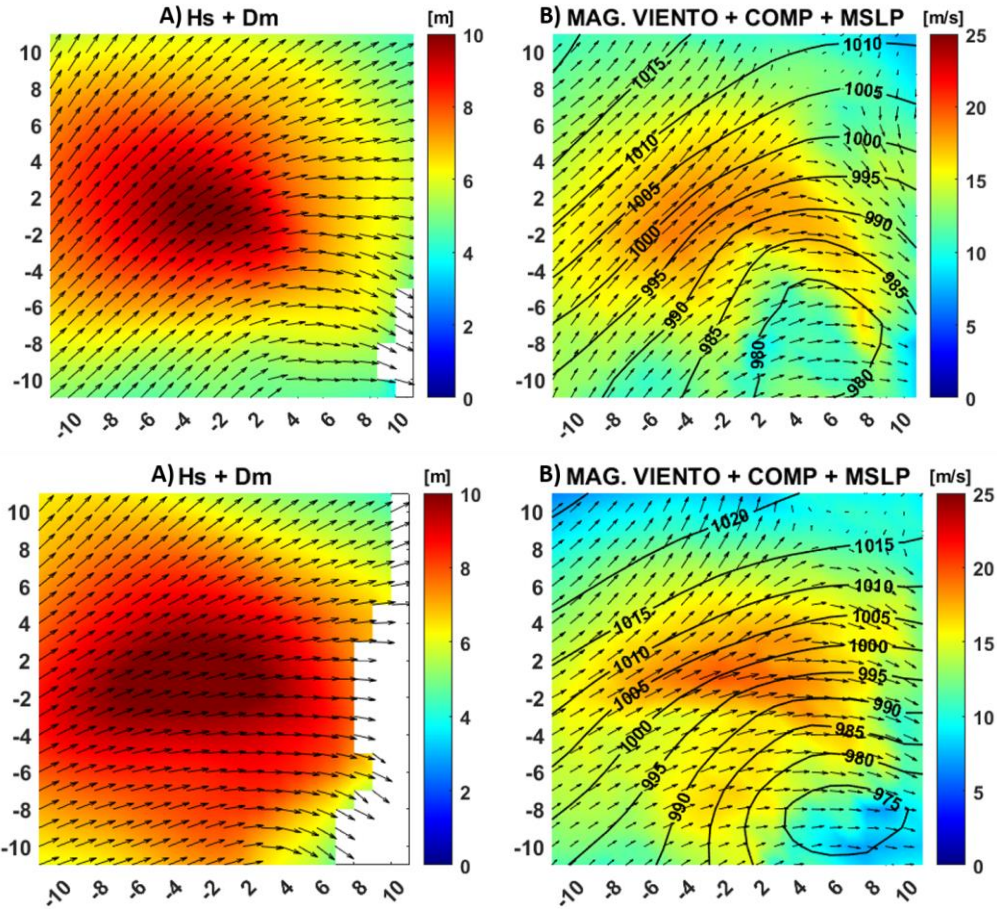


Figura 4. Mapa promedio de eventos remotos registrados en la zona centro. A) El color en el mapa corresponde a la altura significativa del oleaje y los vectores a la dirección de propagación. B) El color del mapa corresponde a la magnitud del viento, los vectores a las componentes de éste y los contornos a la presión media a nivel del mar.

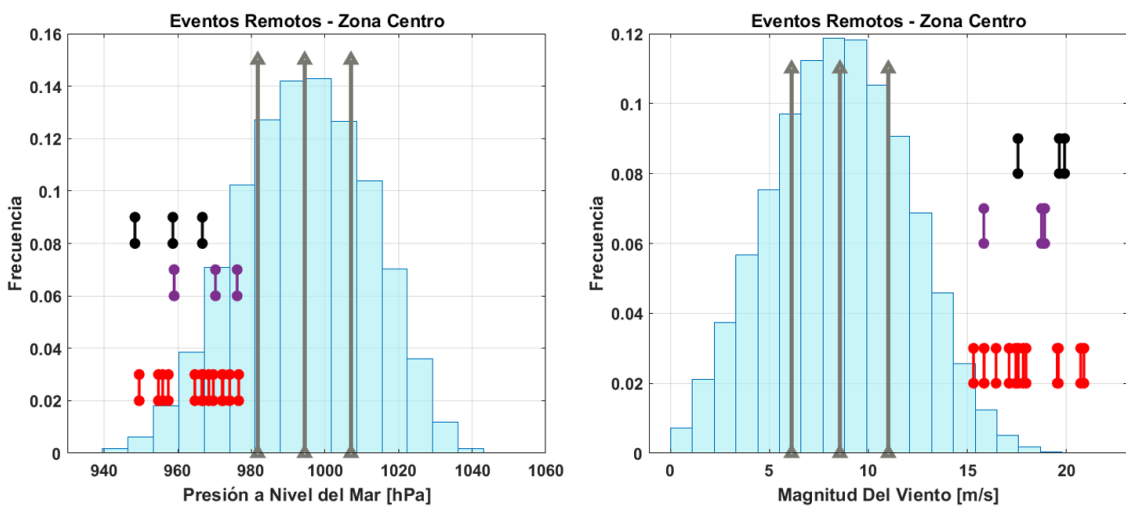


Figura 5. A) Histograma de presión a nivel del mar. B) Histograma de la magnitud del viento. Las barras rojas representan los eventos considerados como M3, las barras moradas los eventos categorizados como M4, las barras negras los eventos M5 y las líneas grises corresponden a los percentiles.

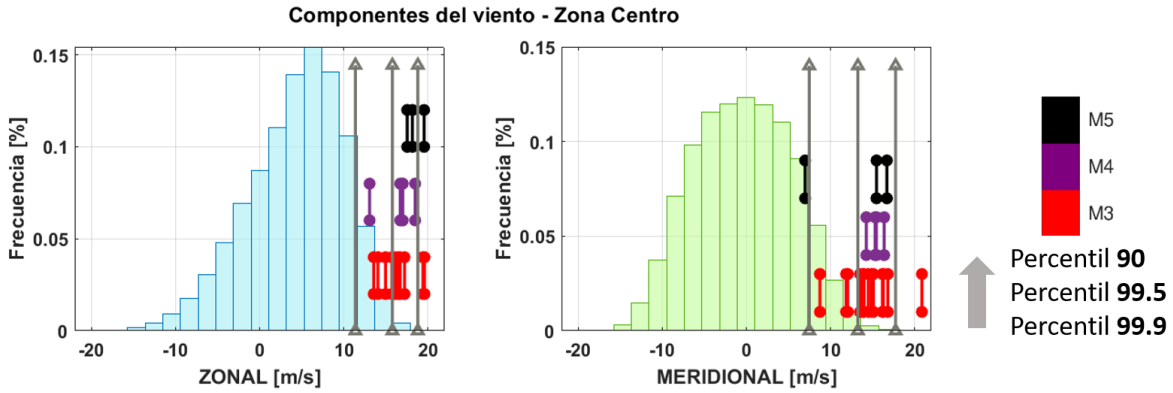


Figura 6. Histograma de las componente zonal y meridional del viento para la zona centro. Las barras rojas representan los eventos considerados como M3, las barras moradas los eventos categorizados como M4, las barras negras los eventos M5 y las líneas grises corresponden a los percentiles.

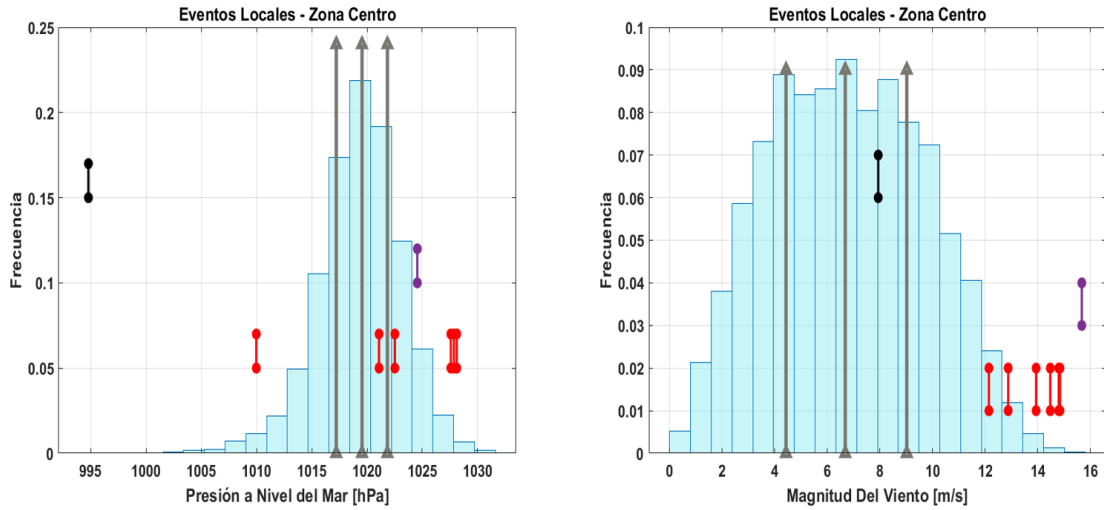


Figura 7. A) Histograma de presión a nivel del mar. B) Histograma de la magnitud del viento. Las barras rojas representan los eventos considerados como M3, las barras moradas los eventos categorizados como M4, las barras negras los eventos M5 y las líneas grises corresponden a los percentiles.

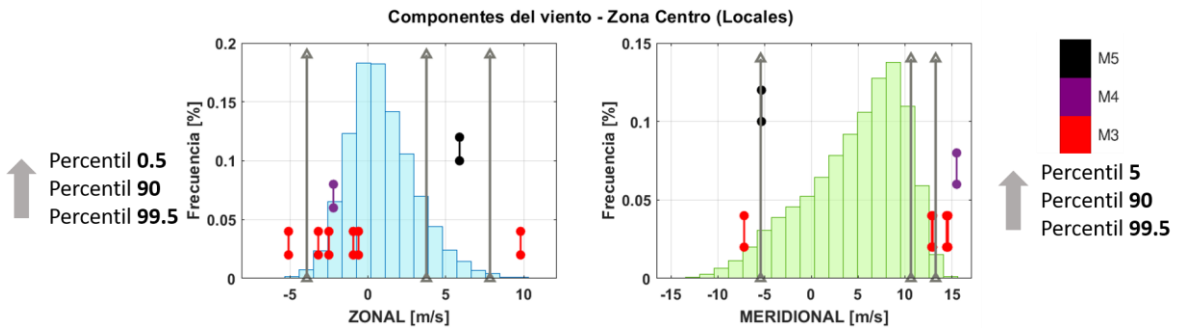


Figura 8. Histograma de las componente zonal y meridional del viento para eventos locales de la zona centro. Las barras rojas representan los eventos considerados como M3, las barras moradas los eventos categorizados como M4, las barras negras los eventos M5 y las líneas grises corresponden a los percentiles.

#### 4. CONCLUSIONES

En el caso de la separación entre los eventos remotos y locales en base al periodo, aquel límite de 10 [s] se considera un valor óptimo según lo establecido en [SHOA, 2005], [Holthuijsen, 2007] y [Stewart, 2008], ya que en general, el oleaje generado por vientos locales se caracteriza por periodos cortos, donde el tiempo transcurrido entre una ola y otra es menor a lo que se registra en el oleaje generado lejano a la costa, donde sus periodos suelen ser más largos superando los 8 [s] aproximadamente. Además, esta separación se realiza considerando la dirección de propagación del oleaje, donde la dirección SW es considerada reinante en Chile, por lo que las marejadas remotas formadas en latitudes altas se caracterizan por registrar valores desde esta dirección, en cambio, las marejadas de tipo local, se caracterizan por tener direcciones distintas del SW ya que los vientos generan olas que se propagan de manera desordenada hacia la costa [Silva, 2005].

En la zona central se muestra que tanto eventos remotos como locales (siendo los remotos los más recurrentes) son formados por bajas presiones que se pueden desarrollar tanto en latitudes medias, provenientes del cinturón de bajas presiones del Hemisferio Sur, como en latitudes cercanas al punto de estudio y a la costa. Estos últimos son los más perjudiciales en cuanto al normal desarrollo de las labores que se realizan en las ciudades costeras, además del daño que provocan a las infraestructuras. Esto se debe a que tanto el viento como el oleaje incide en ellas con una dirección predominantemente desde el NW. Así, la fuerza con la que llegan las olas no se ve disminuida por las protecciones costeras, ya que estas se diseñan para oleaje intenso provenientes desde el SW [Esparza and Winckler, 2017]. Por otro lado, los eventos locales registrados en esta zona son originados igualmente por el viento sur asociado al chorro atmosférico de baja altura, donde su máximo se encuentra cercano al punto de estudio, por lo que se genera oleaje intenso con periodos cortos [Semedo et al., 2018] que provocan marejadas provenientes desde el sur y dependiendo de la intensificación del jet [Aguirre et al., 2021] es como logran superar los umbrales de cada categoría.

#### REFERENCIAS

[Aguirre et al., 2021] Aguirre, C., Aqueveque, V., Vilches, P., Vásquez, A., Rutllant, J., and Garreaud, R. (2021). Recent changes in the low-level jet along the subtropical west coast of south america. *Atmosphere*, 12:465.

[Beyá et al., 2016] Beyá, J., Álvarez, M., Gallardo, A., Hidalgo, H., Aguirre, C., Valdivia, J., Parra, C., Mendez, L., Contreras, F., Winckler, P., and Molina, M. (2016). Atlas de Oleaje de Chile. Escuela de Ingeniería Civil Oceánica - Universidad de Valparaíso, Valparaíso, Chile.

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

[Esparza and Winckler, 2017] Esparza, C. and Winckler, P. (2017). Un análisis exhaustivo de las marejadas en la bahía de Valparaíso. In XXIII Congreso Chileno de Hidráulica, Valparaíso, Chile. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica.

[Fernández, 2018] Fernández, D. C. (2018). Desafíos para el comercio marítimo chileno. <https://www.icare.cl/contenido-digital/desafios-para-el-comercio-maritimo-chileno/>.

[Garreaud and Muñoz, 2005] Garreaud, R. and Muñoz, R. (2005). The low-level jet off the west coast of subtropical south america: Structure and variability. *Monthly Weather Review*, 133:2246–2260.

[Holthuijsen, 2007] Holthuijsen, L. H. (2007). *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, Delft University of Technology and UNESCO-IHE.

[Molina, 2022] Molina, M. (2022). Marejadas en Chile: características, avances y desafíos pendientes, pages 207–224. Serie GEOLIBRO. Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago.

[Molina et al., 2019] Molina, M., S., C., Parra, C., Tapia, C., Vargas, D., Villalobos, D., ..., and Vásquez, M. (2019). Implementación de un sistema de alerta de marejadas con propuesta de caracterización para aviso público. In XXIV Congreso Chileno De Ingeniería Hidráulica, Talcahuano, Chile.

[ONEMI, 2017] ONEMI (2017). Previene, infórmate y prepárate: Marejadas. Obtenido de [http://web.directemar.cl/met/jturno/documentos/diptico\\_Marejadas.pdf](http://web.directemar.cl/met/jturno/documentos/diptico_Marejadas.pdf).

[Semedo et al., 2018] Semedo, A., Soares, P. M., and Lemos, G. (2018). Waves along Eastern boundary currents – The regional winds effect. *Ocean Modelling*, 129:39–57.

[SHOA, 2005] SHOA (2005). Instrucciones oceanográficas n.º 1: Especificaciones técnicas para mediciones y análisis oceanográficos. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, 3 edition.

[Silva, 2005] Silva, R. (2005). Análisis y descripción estadística del oleaje. Serie de docencia SD/49. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

[Vásquez, 2024] Vásquez, M. (2024). Proyecciones del oleaje para fines de siglo en las costas del pacífico sureste.

[Winckler et al., 2020] Winckler, P., Aguirre, C., Farias, L., Contreras, M., and Italo, M. (2020). Evidence of climate-driven changes on atmospheric, hydrological, and oceanographic variables along the chilean coastal zone. *Climatic Change*, 163:1–20.

[Winckler et al., 2023] Winckler, P., Martín, R. A., Esparza, C., Melo, O., Sactic, M. I., and artínez, C. (2023). Projections of beach erosion and associated costs in chile. *Sustainability*, 15(7).