

MODELACIÓN Y ANÁLISIS DE EVOLUCIÓN MORFOLÓGICA DE PLAYA BELLAVISTA-TOMÉ BAJO LA ACCIÓN DE OLEAJE DE TORMENTA

*Ignacio Becerra Castillo*¹, *Rafael Aránguiz Muñoz*², *Mauricio Villagrán Valenzuela*³

RESUMEN:

Debido a los nuevos escenarios de cambio climático a los cuales nos estamos enfrentando, resulta necesario disponer de herramientas efectivas de predicción de peligro de las zonas litorales del país y así estudiar su comportamiento bajo el análisis de amenaza en la que se encuentran. El propósito de este artículo consiste en analizar la respuesta dinámica producto de casos hipotéticos de eventos extremos de tormenta en la Playa Bellavista ubicada en la Comuna de Tomé, Región del Biobío. Para ello se utilizó el modelo numérico SWAN(DELFT3D) para propagación de oleaje y XBeach para analizar los cambios en la morfología de la playa en términos de la influencia del oleaje generado por las tormentas en el área de estudio. Para la calibración del modelo XBeach, se simuló los estados de mar con mayor energía en aguas profundas para los meses de Julio, Agosto y Septiembre del 2018, comparando los datos morfológicos de tres perfiles posteriores a la ocurrencia de las tres tormentas; el modelo se configuró con diferentes parámetros, analizando su desempeño en base al descriptor estadístico BSS. Los valores más altos de BSS variaron de 0.60 a 0.64 dependiendo del perfil. El mejor rendimiento para cada perfil se obtuvo definiendo el parámetro de rompiente como *Roelvink1* y *facua* de 0.4. Los resultados muestran que XBeach modela razonablemente la erosión en las playas, por lo que puede aplicarse con éxito como herramienta eficaz de predicción de peligros. El análisis de eventos extremos de tormenta indica la importancia de la Isla Quiriquina como barrera natural de oleaje, disminuyendo considerablemente la energía del oleaje que ingresa a la bahía de Concepción, generando así que el volumen erosionado del litoral sea notablemente menor.

PALABRAS CLAVES: Morfología costera; Simulación numérica; Oleaje de tormenta.

ABSTRACT:

Due to the new climate change scenarios that we are facing, it is necessary to have effective Hazard prediction tools for the coastal areas of the country and study their behavior under the hazard analysis in which they are found. The purpose of this article is to analyze the dynamic response product of hypothetical cases of extreme storm events in Bellavista Beach located in the Tome Commune, Biobio Region. The numerical model SWAN(DELFT3D) for wave propagation and XBeach were used to analyze the changes in beach morphology in terms of the influence of the waves generated by the storms in the study area. For the calibration of the XBeach model, the sea states with the highest energy in deep water were simulated for the months of July, August and September of 2018, comparing the morphological data of three profiles after the occurrence of the three storms; the model was configured with different parameters, analyzing its performance based on the statistical descriptor BSS. The highest BSS values ranged from 0.60 to 0.64 depending on the profile. The best performance for each profile was obtained by defining the breaking parameter as *Roelvink1* and *facua* of 0.4. The results show that XBeach reasonably models erosion on beaches, so it can be successfully applied as an effective tool for predicting hazards. The analysis of extreme storm events indicates the importance of Quiriquina Island as a natural wave barrier, considerably reducing the energy of the waves entering the Bay of Concepción, thus generating the eroded volume of the coast is significantly lower.

KEYWORDS: Coastal morphology; Numerical modelling; Storm surge.

¹ Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, ibecerra@ing.ucsc.cl

² Profesor Adjunto, Depto de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, raranguiz@ucsc.cl

³ Profesor Adjunto, Depto de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, mvillagran@ucsc.cl

1. INTRODUCCIÓN

La Ingeniería de Costas, surge como respuesta a las necesidades del ser humano de formar parte de las zonas costeras debido a su potencial desarrollo económico y social, siendo uno de los ambientes más dinámicos de nuestro planeta. Por lo anterior resulta un desafío tanto intelectual como práctico comprender y predecir su comportamiento, pues existe una alta interacción entre el aire, agua y sedimentos; los que generan procesos dinámicos en diferentes escalas de tiempo y espacio.

Debido a lo anterior, la zona litoral está caracterizada por ser un sector donde se concentran dos importantes factores altamente variables. Por un lado, está el constante desarrollo de actividades antrópicas y por el otro, existe un ecosistema que está sometido a un equilibrio dinámico muy sensible a sufrir cambios producto de la acción de las dinámicas marítimas y climáticas.

Uno de los fenómenos que dinamiza las zonas costeras es el oleaje, ya que las variaciones en su intensidad, periodo y dirección, originan cambios en la morfología del sector, desarrollando zonas de acreción y/o erosión que pueden llegar a disminuir significativamente la funcionalidad de la playa. Entonces resulta claramente necesario caracterizar su comportamiento con el fin de comprender y predecir la respuesta del sector a las forzantes externas. No obstante, el oleaje por sí solo no es completamente determinante en la evolución morfológica del litoral, ya que la configuración de la bahía y su exposición son variables que influyen en la transferencia energética (Campos-Caba *et al.*, 2015). Por tanto, un evento extremo en aguas profundas no necesariamente lo es en el sitio de estudio (Molina, 2016). Dando a entender que no hay que considerar el oleaje como una variable independiente, sino que es necesario estudiarla como una variable que interactúa constantemente con el medio, por lo tanto, su análisis debe ser en conjunto a otras variables, tales como presión atmosférica, mareas, vientos, configuración geográfica, entre otros.

Los mayores cambios morfológicos de la zona litoral ocurren durante eventos energéticos de tormentas o marejadas, más aún en las costas arenosas (Cea, 2016), debido al alto grado dinámico que poseen; evolucionando continuamente en respuesta a las variables que se desarrollan en su entorno. Estos eventos de tormenta pueden llegar a ocasionar cambios significativos en las costas, afectando con ello vidas e infraestructura costera y habitacional existente. Por lo que es importante analizar el comportamiento litoral bajo el análisis de amenaza en la que se encuentran.

En los últimos años, la erosión costera en las playas del territorio nacional producto de eventos extremos ha aumentado considerablemente en magnitud y ocurrencia (e.g., Winckler *et al.*, 2015; Ibaceta, 2017; Araneda 2018), producto de la variabilidad climática a la que nos estamos enfrentando, asociada a los nuevos escenarios de cambio climático, por lo que resulta necesario disponer de herramientas efectivas de predicción de peligro de las zonas litorales del país.

El objetivo central de este documento, no existiendo estudios previos, consiste en analizar la respuesta dinámica del sector litoral producto de casos hipotéticos de eventos extremos de tormenta en la Playa Bellavista ubicada en la Comuna de Tomé, Región del Biobío.

Para realizar este estudio se utilizaron los modelos numéricos SWAN (DELFT3D) y XBeach, con el propósito de modelar los cambios en la morfología de la zona de estudio antes señalada. Los cuales fueron calibrados y validados con mediciones realizadas *in situ*.

2. MÉTODOS

El presente documento está organizado de la siguiente forma. Primero se presenta el área de estudio, luego se detallan los datos disponibles para realizar esta investigación, con los cuales se calibran y validan los modelos numéricos empleados. Siendo SWAN utilizado para propagar el estado de mar desde aguas profundas hacia la zona de estudio y XBeach utilizado para simular la evolución morfológica transversal a la línea de costa y con ello conocer la respuesta dinámica del litoral de la Playa Bellavista con respecto a los eventos de marejadas. Finalmente, con los modelos numéricos calibrados se analiza la respuesta dinámica del borde costero de la zona de estudio en función de eventos extremos de tormentas generados por distintas combinaciones climáticas

obtenidos a partir de un análisis histórico de valores extremos, estudiando con ello el nivel de amenaza y peligrosidad que se puede generar en la Playa Bellavista.

2.1 Área de estudio

La zona de estudio corresponde a una planicie costera inserta en la bahía de Concepción (36.6°S y 73.0°W); cuenta con una línea de costa de aproximadamente 700 m de extensión, en la cual se concentran principalmente actividades relacionadas al turismo y pesca artesanal. Bellavista es una playa intermedia-reflectiva, con régimen semidiurno de marea y de arenas finas con diámetro medio en promedio de 0.4 mm. Se observa en la figura 1 que la zona de estudio se encuentra fuertemente protegida por el sector Peninsular de Tumbes y la Isla Quiriquina, la que posee una superficie de 4.86 km^2 .

El clima de oleaje que interactúa con las costas de Chile, está condicionado por vientos que van desde el Oeste al Este entre 40°S y 60°S (Fuenzalida, 1983). Los cuales se propagan a lo largo del Océano Pacífico, llegando a las costas de Chile como oleaje tipo *swell*, que corresponden a oleajes propagados lejos de su zona de generación y que sufren diferentes fenómenos físicos a medida que se acercan a la costa “ordenándolos” en trenes de ondas con periodos y direcciones similares, perdiendo con ello el aspecto caótico y convirtiéndose así en oleajes más regulares y menos energéticos (Molina *et al.*, 2011). La configuración semi cerrada que forman estas barreras naturales, es decir, la Península de Tumbes e Isla Quiriquina, adquiere un rol importante en la formación de oleaje local; generado por vientos desarrollados al interior de la bahía, los que presentan características de altura, periodo y dirección que varían en función de las condiciones meteorológicas de la zona litoral, por tanto, corresponde a oleaje más caótico e irregular, variando continuamente la dirección de propagación en función a la variación de la dirección del viento que los genera.

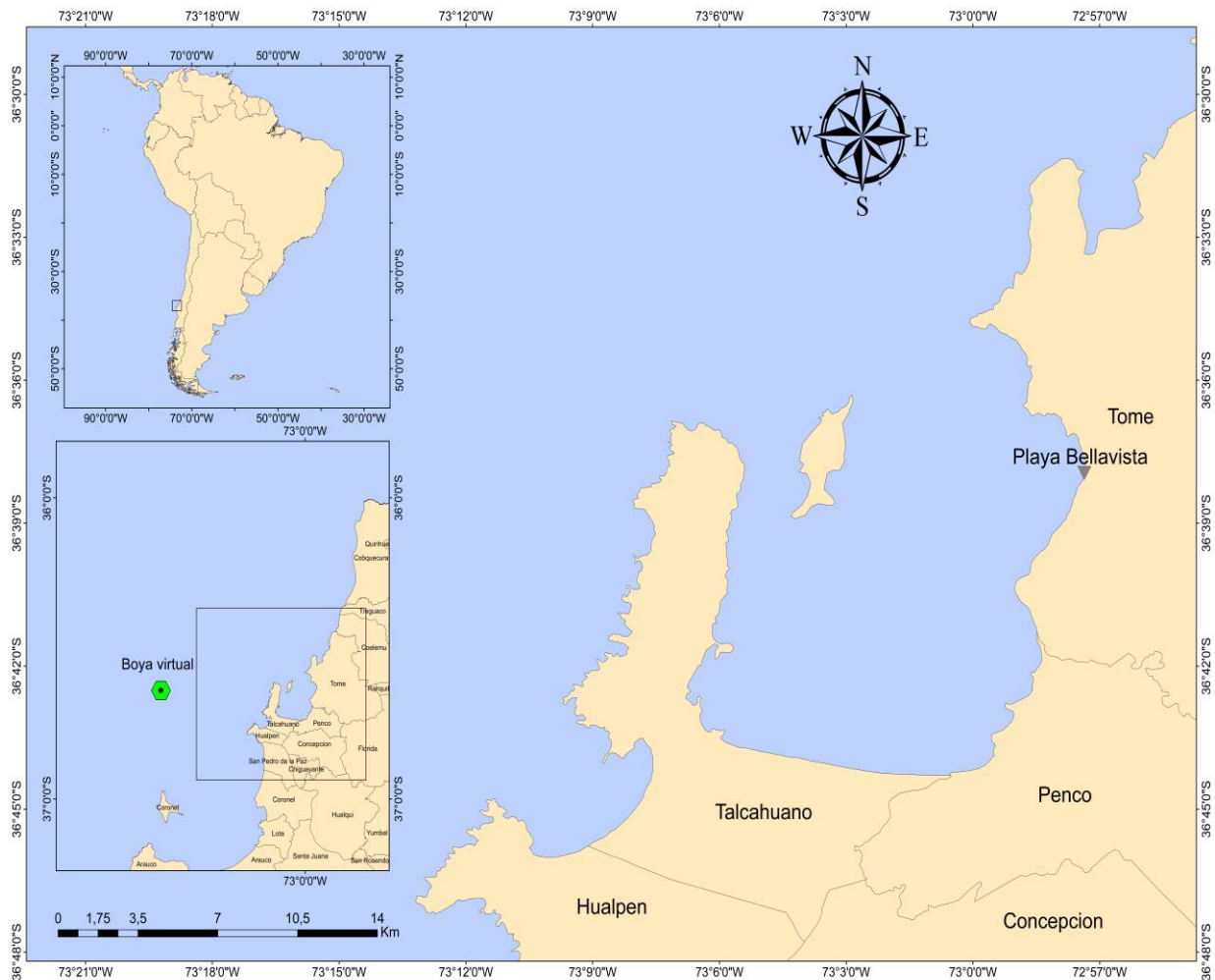


Figura 1: Contexto geográfico de la zona de estudio: Playa Bellavista está ubicada en la Comuna de Tomé, Región del Biobío.

2.2 Datos disponibles y caracterización del oleaje

Para caracterizar el clima de oleaje de aguas profundas se utilizaron datos de oleaje de largo plazo, generados a partir de un modelo *hindcast* de tercera generación desarrollado por NOAA/NCEP llamado WAVEWATCH III (Tolman 1997), que corresponde a un modelo numérico que resuelve las ecuaciones de equilibrio de densidad de la acción espectral. Se analizaron datos específicos de un nodo virtual (Boya virtual, figura 1) ubicado frente a la bahía de Concepción, con una resolución temporal de 3 horas para los meses de Julio, Agosto y Septiembre del año 2018.

Además, se dispone de una base de datos de viento proporcionada por el Centro Meteorológico Marítimo de Talcahuano para los mismos tres meses, los cuales se ajustaron con respecto al viento a 10 msnm usando la ley potencial de energía eólica (1) propuesta por Terrero *et al.* (2014)

$$v_{10} = v_z * \left(\frac{\ln(10) - \ln(z_0)}{\ln(v_z) - \ln(z_0)} \right) \quad (1)$$

Donde z_0 depende del tipo de superficie en la que se realizó la medición. Siendo 10^0 si se trata de un poblado, 10^{-1} para áreas verdes, 10^{-2} en un aeródromo, $3 * 10^{-3}$ en arena y 10^{-3} en un cuerpo de agua. v_z corresponde a la velocidad a una altura. Para esta investigación el factor de corrección z_0 utilizado corresponde a $3 * 10^{-3}$.

Los perfiles iniciales (antes de la ocurrencia de las tormentas) que se modelaron en el modelo numérico XBeach, se extrajeron desde la batimetría disponible de las cartas náuticas del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA).

Con respecto al nivel de mar, se utilizó un código de acceso libre programado en Matlab que determina la marea astronómica, el cual se sometió a un control de calidad comparando los resultados simulados con la información disponible en el sitio de UNESCO-IOC para la estación de la isla Quiriquina, la que se encuentra más próxima a la zona de estudio. Se observa en la figura 2 los dos tipos de marea que se pueden desarrollar, siendo Sicigia una de ellas, la que se produce debido a la alineación de la Luna, el Sol y la Tierra; generando con ello que los efectos de atracción se amplifiquen, ocasionando que las pleamares de Sicigias sean más altas que las pleamares promedio y las bajamares sean más bajas que las bajamares promedio (Foreman, 1977). El segundo tipo de marea que se puede desarrollar corresponde a Cuadratura, que está relacionada a amplitudes de marea mucho menores, producto de que el Sol y la Luna forman un ángulo recto entre sí ocasionando menor fuerza de atracción, por tanto, resulta conveniente realizar mediciones topográficas en sicigia, debido a que se logra registrar la parte baja de la playa y con ello mejorar la calibración de los modelos numéricos.

El 10 de septiembre se registró la mínima marea mensual de sicigia (figura 2), por lo que se realizó una campaña en terreno donde se efectuaron mediciones de perfiles perpendiculares a la línea de costa con un GPS, con el fin de poder calibrar las simulaciones numéricas a realizar con el modelo XBeach en función de la evolución morfológica del perfil de playa producto de eventos de tormenta para los meses de Julio, Agosto y Septiembre del año 2018. Además, se instaló un sensor de presión en el mar con el propósito de obtener la variación de superficie libre cada 1 segundo y otro sensor para medir la presión atmosférica; restando a los datos obtenidos por el sensor de presión atmosférica los datos recopilados por el sensor de presión ubicado en el mar, al cual posteriormente se le aplicó un filtro frecuencial que elimina las componentes asociadas a la marea astronómica, dejando así únicamente la variación del nivel del mar debido al oleaje incidente, finalmente mediante descomposición de series de Fourier se construyó el espectro asociado al estado de mar de ese día en la zona de estudio, con el fin de validar las simulaciones generadas con el modelo SWAN.

En cuanto a los perfiles medidos en terreno (figura 4b), estos se ajustaron mediante la elevación de la línea de costa registrada el día de la campaña en terreno y con el nivel de marea correspondiente al momento en el que se realizó la topo-batimetría disponible.

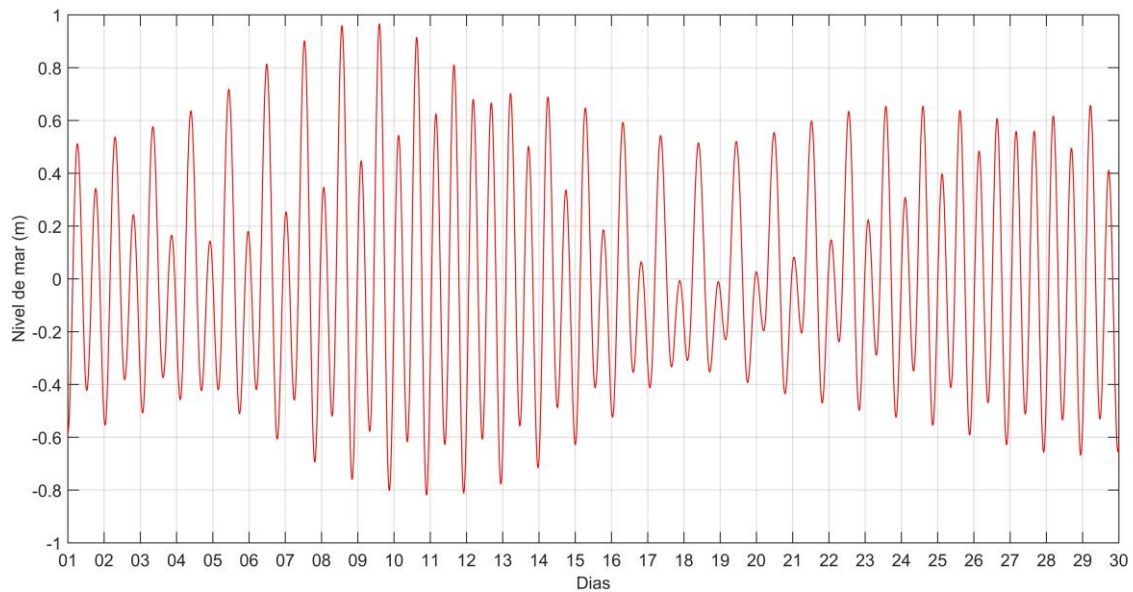


Figura 2: Nivel del mar registrado el mes de septiembre de 2018. Día con mínima marea se registró el 10 de septiembre a las 18:30 hora local.

2.3 Modelo numérico SWAN

Para simular el oleaje en la bahía, se utilizó el modelo numérico de tercera generación SWAN (*Simulating Waves Nearshore*) integrado en el Software DELFT3D. Cuyo proceso desarrolla una discretización espectral en todas las direcciones y frecuencias, basándose en las ecuaciones de balance. Este modelo resuelve en forma conjunta el oleaje generado en aguas profundas y el oleaje local generado por viento, caracterizando con ello los procesos físicos de asomeramiento, refracción, interacción no lineal onda-onda, disipación producto de la acción del fondo, rotura y efectos de difracción generados por accidentes geográficos y obras marítimas.

Con respecto al proceso de propagación se utilizaron tres mallas numéricas (figura 4a) con una resolución espacial de 300x300 m, 100x100 m y 30x30 m en dirección hacia la costa. El modelo se calibró y validó en función del espectro resultante de la elevación de superficie libre descrita en el punto 2.2, incluyendo la propagación del estado de mar en aguas profundas (H_s , T_p y D_p) para el día de medición, más la inclusión del viento local (D_p viento y v_{10}).

Para la calibración, se sometió previamente el modelo numérico a un análisis de sensibilidad del parámetro asociado al fenómeno de difracción; el cual posee un rango de 0 hasta 0.5 y se fue variando en 0.2, con el propósito de determinar su influencia en relación a los resultados propagados hacia la bahía. Debido a que los accidentes geográficos de la zona (Península de Tumbes e Isla Quiriquina) interactúan fuertemente con el oleaje. La difracción generada por accidentes geográficos y/u obras marítimas juega un rol muy importante en el patrón de propagación de oleaje hacia la bahía, especialmente en zonas litorales con configuración cerrada (Holthuijsen, 2003), como lo es la bahía de Concepción.

Con el modelo numérico validado, se propagaron los máximos eventos energéticos en aguas profundas para los tres meses de análisis (figura 3). De los que se extraen en los puntos de control ubicados a una profundidad de 20 m, espectros de salida cada 3 horas, que corresponden a las forzantes hidrodinámicas del modelo numérico XBeach.

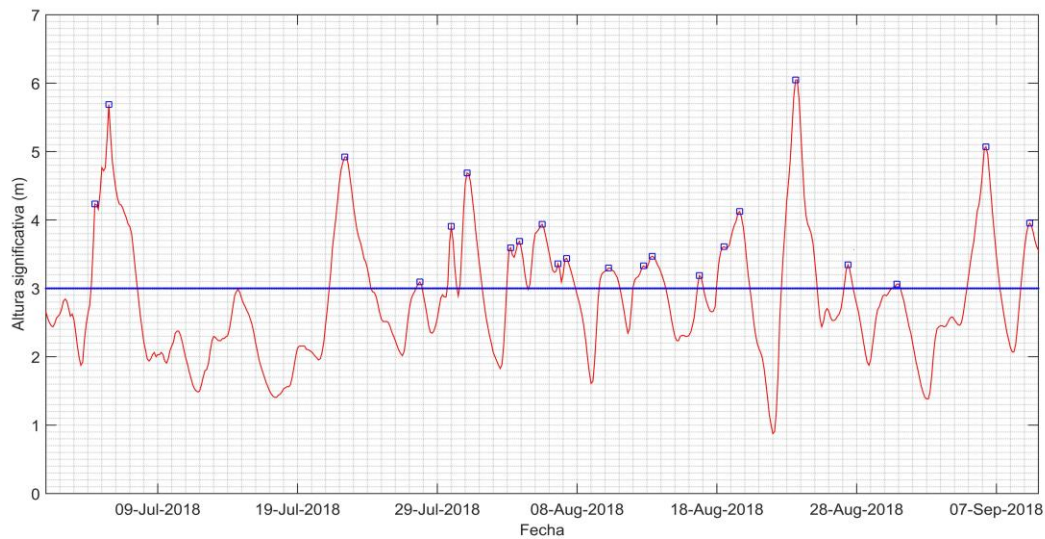


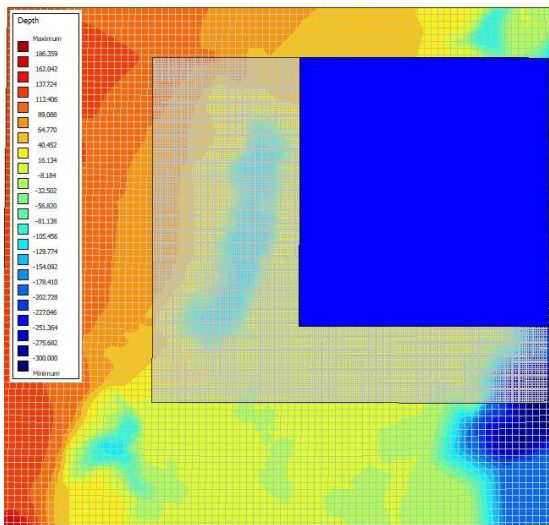
Figura 3: Estadística de altura significativa para los tres meses de análisis considerando todas las direcciones sobre umbral de 3 m. Se incluyen los máximos eventos registrados (cuadrados azules) con independencia de 4 días.

2.4 Modelo numérico XBeach

Para simular la evolución morfológica transversal a la línea de costa, se utilizó el modelo numérico XBeach (Roelvink, 2009). El cual es de libre acceso y fue desarrollado por la Universidad de Miami, la Universidad técnica de Delft y UNESCO-IHE, con el propósito de simular los procesos morfodinámicos e hidrodinámicos en playas de arenas producto de eventos energéticos de tormenta. El modelo incluye los procesos hidrodinámicos de transformación de onda corta (refracción, asomeramiento y rompiente), además de los procesos de transformación de ondas largas (generación, propagación y disipación).

Se analizaron tres perfiles transversales a la línea de costa (figura 4b), producto de que la mayor evolución morfológica de la playa durante eventos de tormenta es en esta dirección, es decir transversal (Winckler *et al.*, 2015). Se observa además en la figura 4b, que se analizó un perfil ubicado al lado norte de la desembocadura del estero Bellavista, con el objetivo de analizar si existe influencia de la desembocadura del estero en relación a la dinámica litoral durante oleaje en calma.

a)



b)

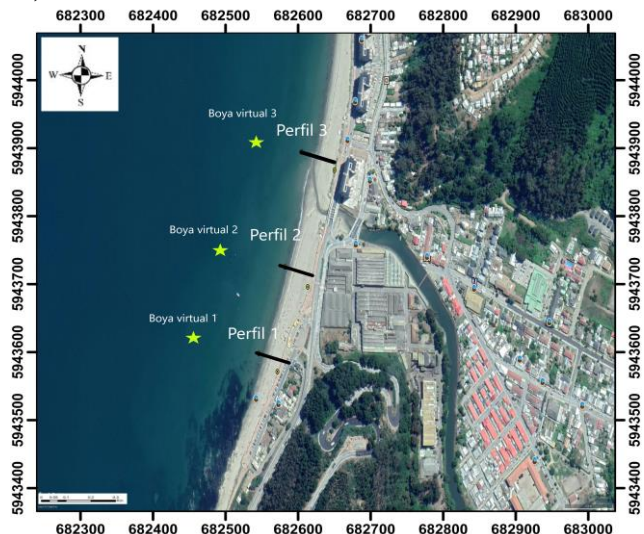


Figura 4: a) Dominio de cálculo simulación numérica SWAN, b) Ubicación de perfiles transversales analizados en Playa Bellavista y boyas virtuales de los que se obtienen espectros de salida cada 3 horas para cada perfil.

Con respecto a la calibración del modelo XBeach, se realizó una simulación previa con los parámetros que el modelo trae por defecto, con el objetivo de testear sus capacidades iniciales. Posteriormente se efectuó un análisis de sensibilidad de los parámetros relacionados con la evolución morfodinámica, siendo *wetslp* responsable de los procesos de relacionados con la velocidad de caída del grano, *facua* corresponde a un coeficiente asociado al transporte de sedimentos, que puede variar de 0 hasta 1; estando el valor cero asociado a erosión de la línea de costa y el valor uno representa acreción de la línea de costa, *lws* que está relacionado con el tipo de ola y finalmente el tipo de rompiente del oleaje que se puede definir como *Roelvink1* o *Roelvink2*.

Los resultados de cada simulación fueron evaluados con los registros de mediciones realizados después de la ocurrencia de la tormenta del mes de septiembre del 2018. Para ello se utilizó el criterio *Brier Skill Score* (BSS) (Van Rijn *et al.*, 2003). BSS corresponde a un indicador usado para evaluar el desempeño de modelos numéricos, especialmente para cambios morfológicos, la correlación entre los perfiles pre-tormenta (X_b), post-tormenta (X_p) y modelado (X_m) pueden expresarse a través de la ecuación (2).

$$BSS = 1 - \left[\frac{(X_m - X_p)^2}{(X_p - X_b)^2} \right] \quad (2)$$

La clasificación del desempeño del modelo para BSS corresponde al siguiente: BSS < 0 malo, 0 - 0.3 bajo, 0.3 - 0.6 razonable, 0.6 - 0.8 bueno y 0.8 - 1 excelente.

2.5 Análisis de la respuesta dinámica del borde costero en relación a oleaje extremo de tormenta.

Con los modelos numéricos SWAN y XBeach calibrados, se analizó la ocurrencia de eventos extremos en aguas profundas para la zona en estudio y así estudiar la respuesta dinámica del sector litoral con respecto a eventos extremos de tormentas generados por distintas combinaciones climáticas, con el objetivo de conocer el nivel de daño que se puede llegar a generar en la Playa Bellavista. Para ello se trabajó con la base de datos de oleaje de largo plazo WAVEWATCH III (detallada en el punto 2.2), pero esta vez con datos históricos desde 1980 hasta 2018. Efectuando un análisis de valores extremos mediante el método de máximos sobre el umbral (Goda, 1988), el cual se definió con el objetivo de ampliar el registro de eventos máximos, los que poseen una diferencia de cuatro días, con el propósito de no considerar datos asociados a una misma tormenta. Posteriormente se testearon diferentes distribuciones de probabilidad (Log Normal, Weibull y Gumbel) y se escogió la con mejor coeficiente de ajuste R^2 . Finalmente se establecieron los periodos de retorno de eventos extremos.

Se analizaron distintas condiciones climáticas, generando distintas combinaciones de vientos y mareas junto con la altura de ola, asociada a un periodo de retorno de 100 años en aguas profundas, con el objetivo de analizar la respuesta dinámica del sector a distintas combinaciones de forzantes hidrodinámicas y cuantificar la cantidad de sedimento erosionado producto de la ocurrencia de estos eventos extremos de tormenta, analizando con ello la susceptibilidad del litoral.

3. RESULTADOS

3.1 Caracterización de clima de oleaje

En la figura 5 se observa la clasificación de oleaje en aguas profundas obtenida de la base de datos de WAVEWATCH III desde 1980 hasta 2018. Se visualiza una predominancia de oleajes provenientes desde la dirección SW (225°), los que son generados producto de ciclones extratropicales y que poseen periodos relativamente largos y de baja altura (Beyá *et al.*, 2016a).

La figura 5 muestra que la distribución de oleajes se concentra mayoritariamente en la dirección SW con un 80% de ocurrencia, siendo el estado de mar reinante en aguas profundas asociado a alturas significativas entre 2 a 3 metros y periodos de 12 a 14 segundos, estando estos periodos asociados a oleajes tipo *swell*.

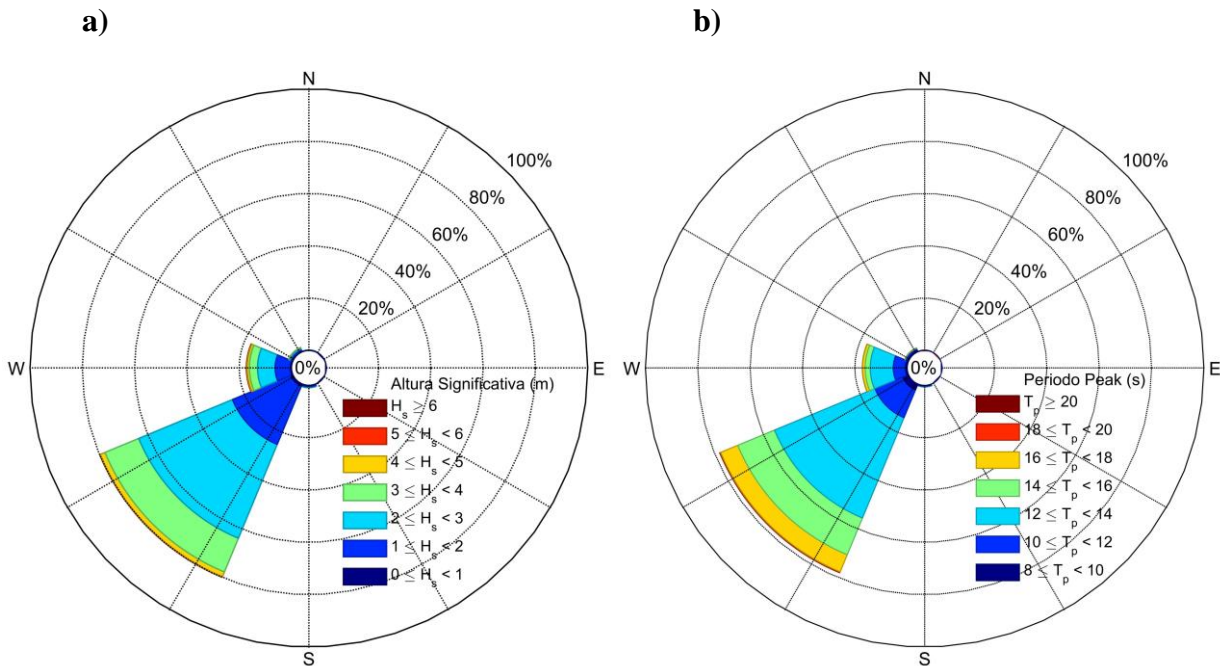


Figura 5: Estadística de oleaje en aguas profundas frente a la bahía de Concepción. **a)** corresponde a rosa de altura significativa (m) y **b)** rosa de periodos *peak* (s).

3.2 Propagación de oleaje

Los resultados de simulaciones previas (figura 6) de propagación de oleaje hacia la bahía indicaron que las variaciones de los parámetros asociados al fenómeno de difracción no generaron cambios notorios en el espectro resultante, debido a que el cálculo de H_{m0} fue el mismo valor para las tres simulaciones, por lo que se descartaron del análisis de calibración del modelo.

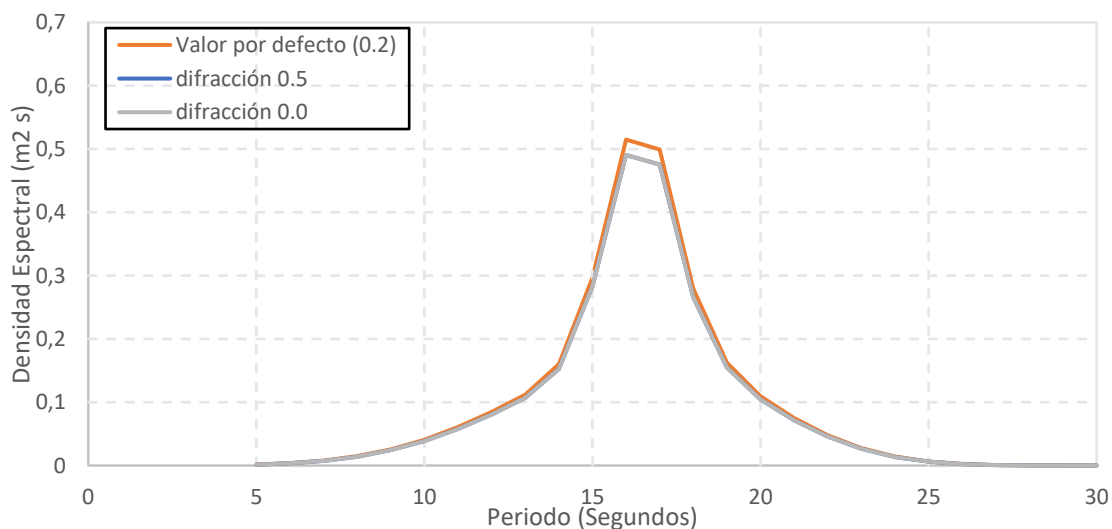


Figura 6: Resultados de análisis de sensibilidad de parámetro asociado a difracción en SWAN.

Para calibrar el modelo se propagó el estado de mar en aguas profundas del día en que se efectuó la campaña en terreno junto con el oleaje local generado por el viento, el que se ajustó mediante la ecuación (1) a 10 msnm, resultando un valor de v_{10} igual a 2.55 m/s. Lo anterior se detalla en la tabla 1.

Tabla 1: Estado de mar en aguas profundas además de datos de viento local registrados el día de campaña en terreno.

Dirección	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Dp viento (°)	v_{10} (m/s)
SW	3.40	16.50	225	230	2.55

Se observa en la figura 7, que el modelo capta la interacción que se genera entre los accidentes geográficos presentes en la zona y la propagación del frente de ondas desde la dirección SW, ocasionando con ello una disminución considerable de la altura de ola. Por lo que se infiere que bajo esta dirección no existirá un oleaje energético en la bahía, contrario a lo que pasaría si existiese un oleaje proveniente de la dirección NW, debido a la alta exposición que se encuentra para esta dirección la Playa Bellavista, ocasionando con ello que el oleaje incida con mayor energía en la playa debido a la baja difracción y refracción que puede sufrir en su trayectoria. Lo que ocasionaría mayores cambios morfológicos del litoral.

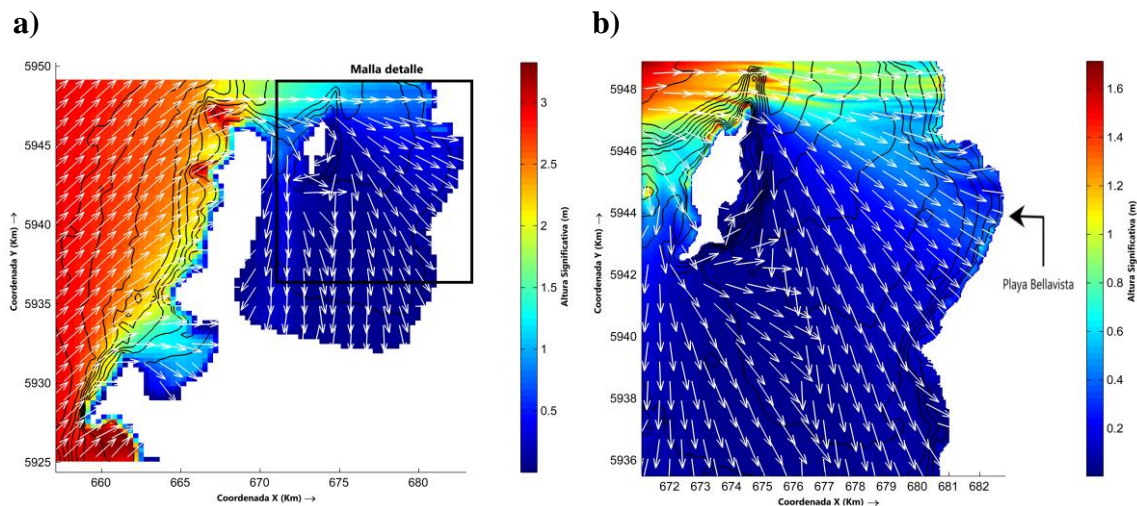


Figura 7: Propagación de oleaje desde aguas profundas a someras más la inclusión del oleaje generado por el viento del día en que se realizó la campaña en terreno. Se muestra la altura significativa de ola (m) y los procesos de transformación de oleaje. **a)** corresponde a los resultados de propagación en todo el dominio, **b)** corresponde al sector de la bahía de Concepción.

El espectro resultante (figura 8) de la propagación del estado de mar de aguas profundas a aguas someras más la inclusión del oleaje generado por el Fetch en la bahía, simulado numéricamente a través de SWAN, se obtuvo mediante la activación de los procesos relacionados con *whitecapping*, interacción onda-onda y disipación producto de la acción del fondo; similar a lo establecido por Lucero *et al.* (2017).

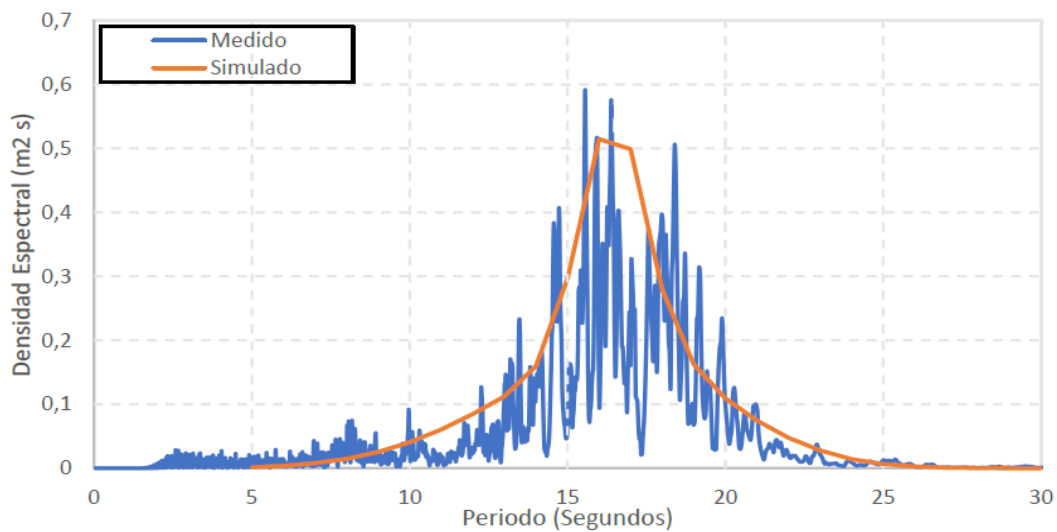


Figura 8: Comparación entre espectro resultante de simulación numérica en SWAN (azul) y el registrado en terreno (rojo).

En la figura 8, visualmente es complejo determinar el desempeño del modelo, por lo que se calculó la altura significativa del espectro medido en terreno, a partir del cálculo del área bajo la curva espectral; dando un valor de H_{m0} igual a 0.51 m y T_p de 15.6 s. Los valores espectrales simulados corresponden a $H_{m0} = 0.42$ m y $T_p = 16.5$ s, lo cual indica que el modelo subestima la altura de la ola en un 17%.

Lo anterior se debe a que la cuantificación del espectro depende de la profundidad en la que se midió en terreno, ya que no se registró el punto donde se posicionó el sensor en el mar. Por lo que puede ser que los procesos de asomeramiento reales no hayan sido considerados por el modelo, producto de que la boya sintética de la que se obtuvo el espectro simulado está en una zona donde los procesos de asomeramiento simulados no se han desarrollado completamente por el modelo.

Además, parte de la subestimación del espectro resultante del modelo numérico se debe a que el modelo SWAN no reproduce totalmente la difracción generada por obras marítimas y/o accidentes geográficos abruptos (Allard, 2004). Por ello, cualquier propagación de oleaje que se genere en dirección SW tendrá asociado un error, producto de que la difracción domina el patrón de propagación de oleaje hacia la bahía bajo esta dirección. En cambio, dado que la dirección NW se encuentra considerablemente abierta y el oleaje interactúa en menor magnitud con la península de Tumbes, el error disminuirá notablemente. Por lo tanto, debido a la menor disminución de energía espectral que se generará ocasionada por la menor interacción con el oleaje bajo la dirección NW, se generará una mayor tasa de transporte de sedimentos en dirección transversal a la línea del litoral costero de la Playa Bellavista. Producto de lo anterior, se propagaron los máximos eventos mensuales en aguas profundas con dirección NW, los que se detallan en la tabla 2.

Se observa en la figura 9 que la Playa Bellavista corresponde a la zona más propensa a sufrir daños producto de eventos de tormenta bajo la dirección NW, debido a que se concentran las mayores energías de la zona. Esto se debe a que el oleaje interactúa en menor medida con la Isla Quiriquina y la península de Tumbes, ocasionando con ello que el patrón de propagación no se vea alterado significativamente por difracción, pero si se genera refracción producto de la variación en la batimetría cercano a la zona litoral. Todo lo anterior genera magnitudes de altura significativa del rango de 3 – 4 metros, entregando indicios de que la Playa Bellavista es susceptible a sufrir cambios morfológicos producto de eventos de tormenta con dirección de oleaje NW.

Tabla 2: Forzantes hidrodinámicas modelo numérico DELFT3D.

Mes	Hs (m)	T_p (s)	D_p (°)	D_p viento (°)	v_{10} (m/s)
Julio	5.69	10.89	330	350	7.00
Agosto	6.05	13.26	332	200	2.30
Septiembre	4.70	11.53	330	350	4.63

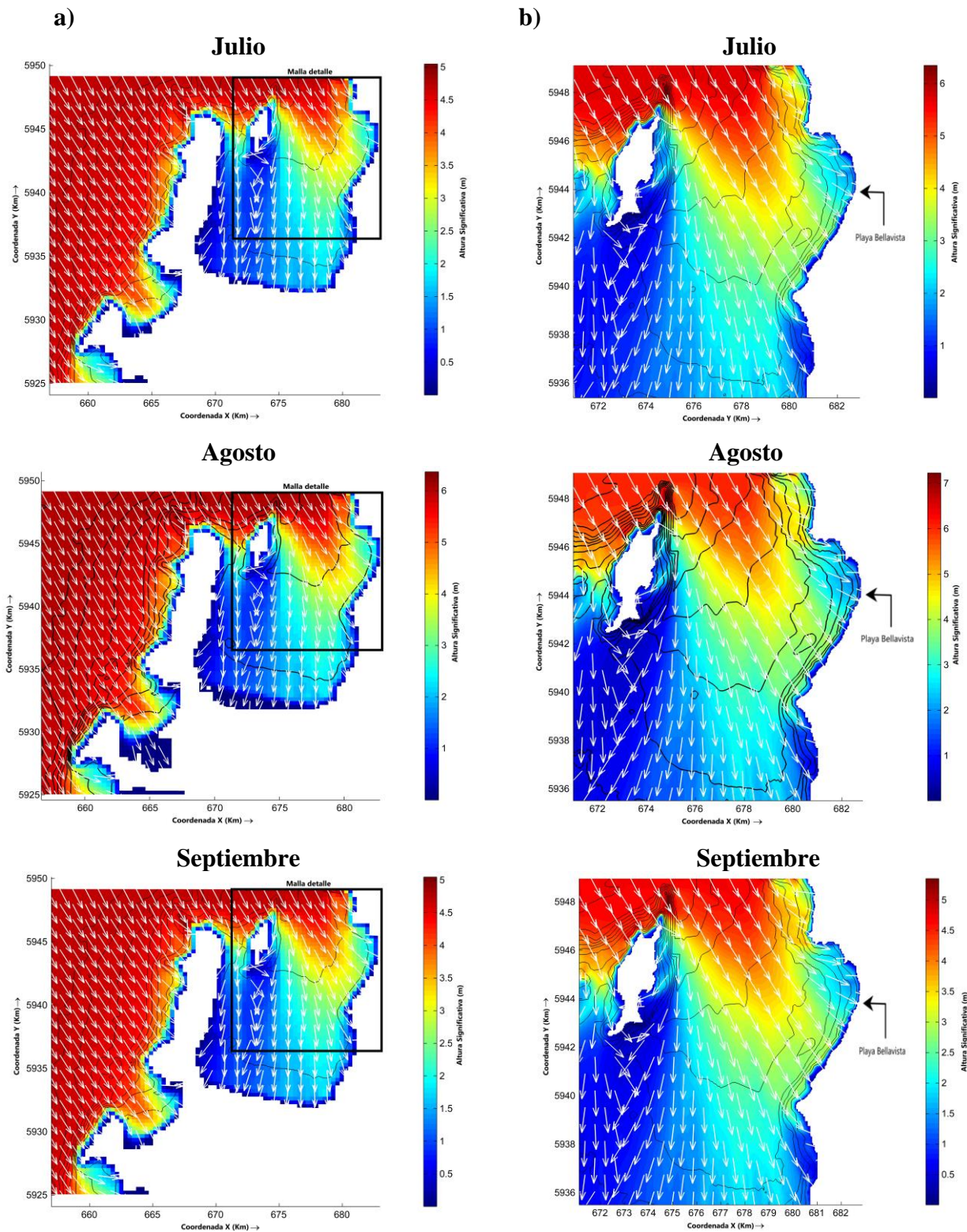


Figura 9: Propagación de oleaje (tabla 2) desde aguas profundas a someras. Se muestra la altura significativa de ola (m), para el estado de mar en aguas profundas más la inclusión del oleaje local generado por el viento, en forma descendente para los meses de julio, agosto y septiembre. **a)** corresponde a los resultados de propagación en todo el dominio, **b)** corresponde al sector de la bahía de Concepción.

3.3 Evolución morfodinámica

En la figura 10 se muestra el estado de mar en el veril 20 m ubicado frente a cada perfil analizado (figura 4), obtenidos de la propagación hacia la bahía de los máximos eventos para los meses de julio, agosto y septiembre; se consideró que cada tormenta dura 9 horas, por lo que se extrajeron tres espectros resultantes. Estos espectros corresponden a las forzantes hidrodinámicas del modelo numérico XBeach, además del registro del nivel de mar asociado a cada evento de tormenta mensual, el viento local y el diámetro medio del sedimento que corresponde a 0.4 mm, lo que se detalla en la tabla 3.

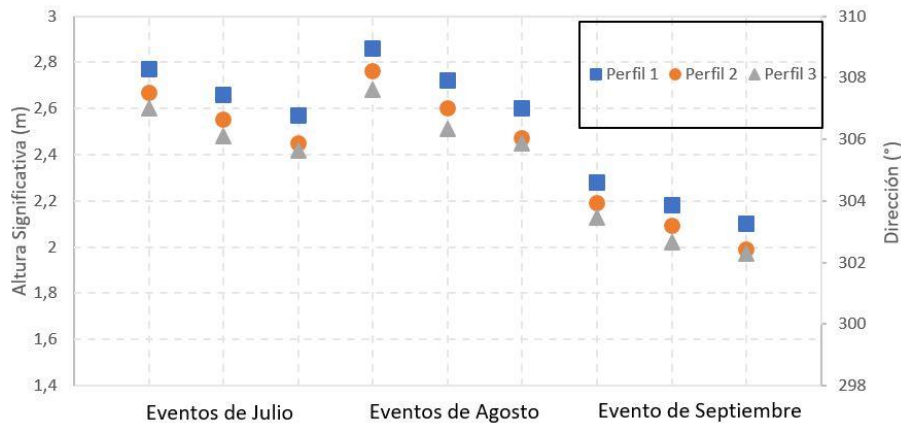


Figura 10: Forzantes hidrodinámicas modelo numérico XBeach obtenidas de SWAN, se muestra la altura significativa en el veril 20 m ubicada frente a los perfiles analizados. Los parámetros de entrada se actualizan cada 3 horas.

Tabla 3: Datos de viento y nivel de marea para eventos de tormenta mensuales.

Mes	nivel del mar (m)	Dp viento (°)	v_{10} (m/s)
Julio	0.87	350	7.00
Agosto	1.06	200	2.30
Septiembre	0.52	350	4.63

Las pruebas realizadas en el modelo numérico XBeach se efectuaron con el propósito de determinar el conjunto de parámetros que mejor refleja los cambios en la morfología de la playa, causados por los eventos de tormenta ocurridos. Los resultados de las simulaciones con los parámetros por defecto entregaron valores de BSS con rango de -6.4 hasta -0.3 (mal ajuste) para todos los perfiles, por lo tanto, los parámetros se modificaron.

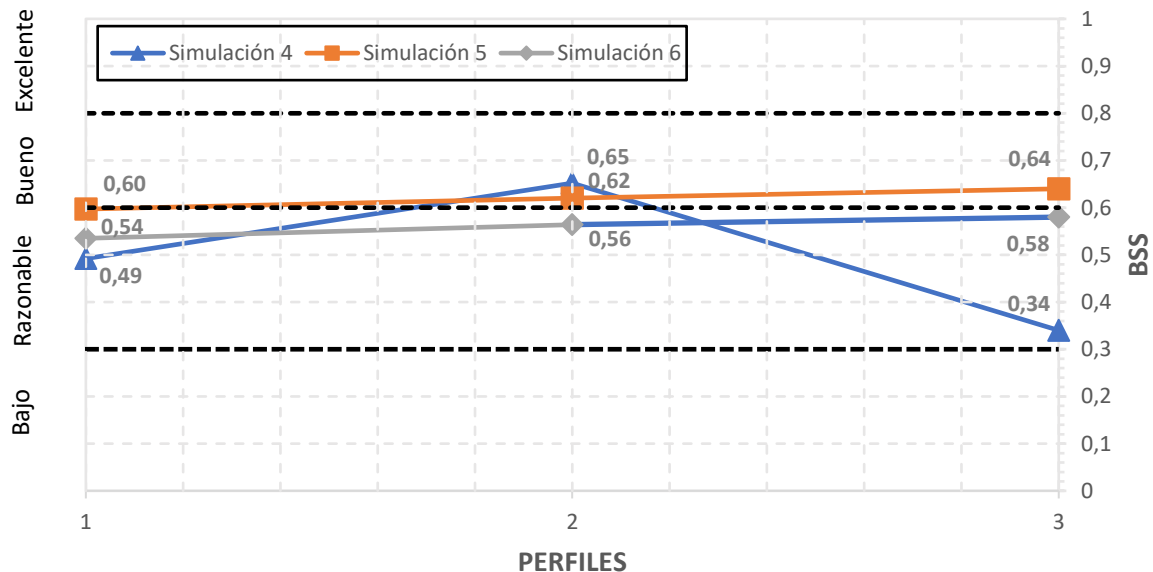
El parámetro lws deshabilitado indujo gran acreción en los perfiles analizados, contrario a lo determinado del análisis en terreno, por lo que se concluye que este parámetro debe ser habilitado. Por otra parte, el parámetro $wetslp$ no causó diferencias visibles en el proceso de erosión. El parámetro $facua$ resultó ser el más importante, ya que el valor asignado genera grandes variaciones en el perfil resultante. Finalmente se menciona que los valores más altos de BSS se obtuvieron al considerar el tipo de rompiente como *Roelvink1*, siendo este parámetro por defecto *Roelvink2*. Se hipotetiza que lo anterior se debe a que *Roelvink1* representa de mejor manera la ruptura del oleaje para los eventos modelados.

Con respecto al valor de BSS, se calculó el valor promedio del perfil y se consideró su análisis en relación a todos los perfiles, descartando así los valores de BSS que solo sean favorables para perfiles analizados individualmente. En la tabla 4 se detallan los parámetros utilizados asociados a los mejores valores de BSS analizados en conjunto.

Tabla 4: Configuración de parámetros de XBeach con mejor desempeño para la zona de estudio.

Parámetro	Valor por defecto	Simulación					
		1	2	3	4	5	6
rompiente	Roelvink 2	Roelvink 2	Roelvink 2	Roelvink 2	Roelvink 1	Roelvink 1	Roelvink 1
facua	0.0	0.0	0.1	0.3	0.0	0.4	0.5

En la figura 11, se observan los mejores resultados simulados para todos los perfiles, siendo la simulación 5 la que entregó mejores valores de BSS para todos los perfiles.


Figura 11: Mejores ajustes de *Brier Skill Scores* (BSS) por perfil.

Se presenta en la Figura 12, la comparación con los perfiles previos y posteriores a la ocurrencia de tormentas, se observa que el modelo XBeach predice razonablemente la respuesta morfodinámica de la playa ante las forzantes externas (oleaje, vientos y marea astronómica). Además, los resultados indican que el modelo no reproduce la erosión en la parte baja de los perfiles, sino que asume que esta zona no sufre variaciones en su morfología, lo que ocasiona una subestimación en los perfiles 1 y 2. Investigaciones similares realizadas en costas chilenas (eg., Ibaceta, 2017; Araneda, 2018) también destacan esta subestimación que realiza XBeach en la parte baja de la playa, lo que necesariamente debe ser estudiado y mejorado si se busca reproducir la evolución morfológica en todo el perfil.

En cambio, los valores más cercanos a los medidos en terreno se dan en la parte media de los perfiles, correspondiente a la distancia transversal 20 y 40 metros (50 m para el perfil 3). También se percibe que la erosión ocasionada en los perfiles no generó grandes modificaciones y conservaron relativamente su pendiente original, lo cual indica que los cambios morfológicos generados por las forzantes hidrodinámicas de los meses de julio, agosto y septiembre no generaron daños considerables en la línea de costa.

El perfil inicial se extrajo de la topo-batimetría obtenida de las cartas náuticas del SHOA, por lo que pudiese darse la condición de que el perfil antes de la ocurrencia de las tormentas disminuyera su cota, producto de efectos erosivos desarrollados por otras tormentas que ocurrieron meses anteriores a la elaboración de esta investigación, además se debe tener en cuenta que el registro de topografía (perfiles) se llevó a cabo semanas después de la ocurrencia de la tormenta del mes de Septiembre, lo que aporta a la discrepancia entre los datos medidos en terreno y los resultados de XBeach, obteniendo así valores de BSS más bajos a los que se hubieran obtenido si la medición se hubiera realizado inmediatamente después de la tormenta. Además, el perfil final medido corresponde al obtenido después de la ocurrencia de las 3 tormentas, es decir Julio, Agosto y Septiembre, por lo que no se conoce la evolución temporal dinámica del litoral para cada una de las tormentas ocurridas. Pero a pesar de lo mencionado anteriormente, los resultados son satisfactorios.

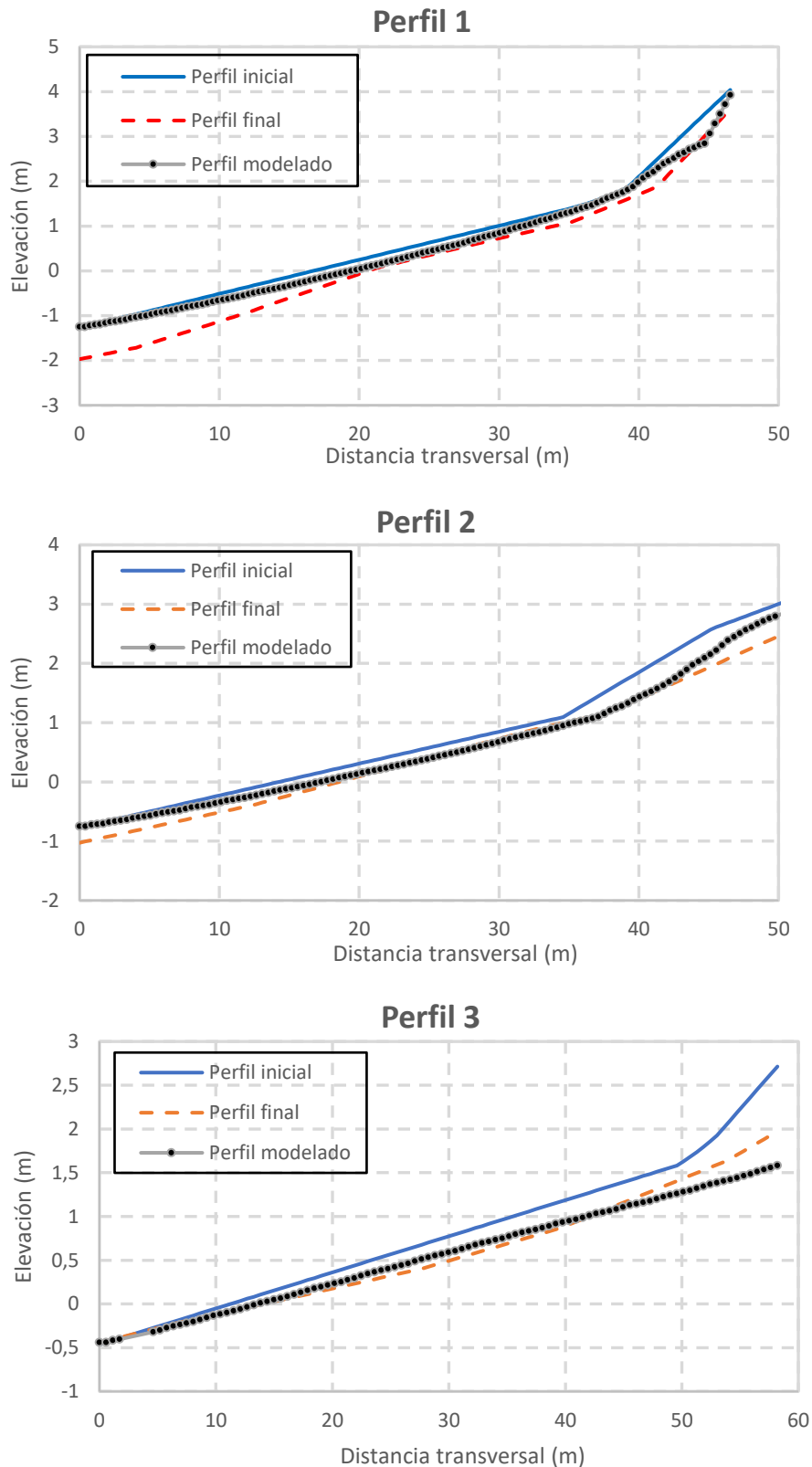


Figura 12: Resultados de mejores simulaciones en software XBeach, parámetro *facua* corresponde a 0.4 y tipo de rompiente *Roelvink1* para todos los perfiles. La mejor simulación (línea continua con círculos negros) se compara con el perfil inicial (azul) y el perfil final (naranja) de las tormentas.

3.4 Análisis de la respuesta dinámica del borde costero en relación a oleaje extremo de tormenta.

Los resultados del análisis de valores extremos para direcciones entre 292.5° y 337.5° se presentan en la tabla 5, se utilizó el método de valores máximos sobre umbral con el objetivo de ampliar la base de datos de valores extremos y mejorar con ello la evaluación de los periodos de retorno para la zona de estudio. Debido a que, durante la evaluación de una muestra de datos extremos, a veces, un dato individual exhibe un valor más alto que el de los otros. En el proceso de ajustar la muestra de datos a una distribución candidata, esos datos particulares se representan en una posición muy por encima de la línea de la curva de la distribución ajustada del período de retorno, lo que puede generar incongruencias en la estimación de este periodo (Khairi, 2016).

La figura 13 muestra los resultados del análisis de alturas de ola asociados a periodos de retorno para la zona de estudio, obtenida a través de la distribución Gumbel. Es importante destacar las limitaciones que posee este análisis, ya que considera como única variable la altura significativa de ola para definir los periodos de retorno, no obstante los mayores cambios morfológicos y posibles daños a la zona costera se producen debido a la ocurrencia conjunta de condiciones climáticas; producto de la combinación de oleaje, vientos, marea astronómica y presión atmosférica, siendo estas últimas responsables de posibles contribuciones de peralte del nivel del mar.

Tabla 5: Resultados de análisis de valores extremos sobre umbral.

Base de datos	Inicio	Término	Umbral (m)	R^2	N° de datos sobre umbral	Distribución
NOAA WW3	1980	2018	4	0.93	52	Gumbel

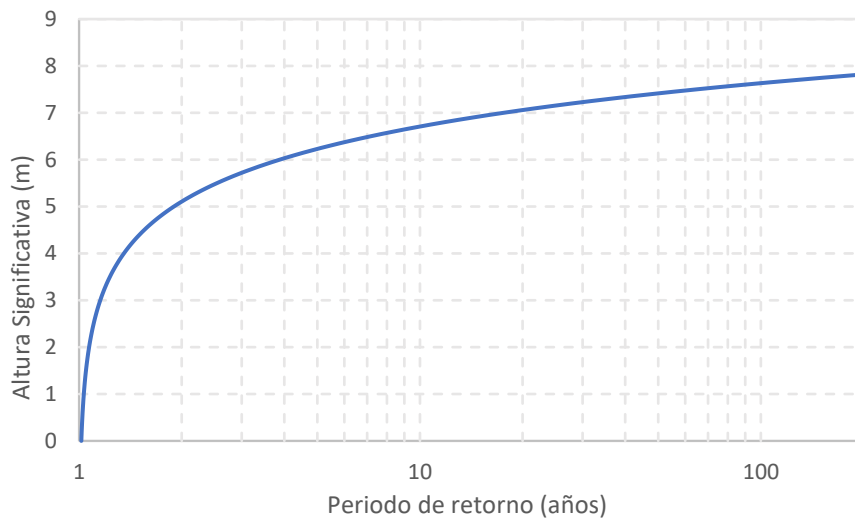


Figura 13: Curva de altura significativa y periodos de retorno para oleajes con dirección entre 292.5° y 337.5° .

Debido a que las variaciones en el perfil de playa ocurren producto de distintos escenarios de combinaciones entre oleaje, condiciones meteorológicas y marea astronómica, se analizó la respuesta morfológica que el sector litoral de la Paya Bellavista desarrolla con respecto a la ocurrencia del estado de mar asociado a un periodo de retorno de 100 años, combinado con distintas magnitudes de vientos y nivel de marea. Se escogió este periodo de retorno ya que corresponde a un valor típico de diseño de obras marítimas a nivel nacional (DOP, 2013), los valores de entrada que serán propagados hacia la bahía a través de SWAN se detallan en la tabla 6.

El viento y nivel de marea del escenario 1 (tabla 6) corresponden al promedio registrado en las tres tormentas ocurridas en los meses de Julio, Agosto y Septiembre. En cambio, los valores del escenario 2 corresponden a los máximos valores registrados en los mismos tres meses de análisis. Por lo que se espera que este escenario genere mayor daño en el litoral.

Tabla 6: Escenarios con distintas combinaciones climáticas asociados a la altura significativa H_s correspondiente a un periodo de retorno de 100 años.

Escenarios	H_s (m)	T_p (s)	D_p (°)	D_p viento (°)	v_{10} (m/s)	nivel marea (m)
1	7.6	13.2	330	350	4.6	0.87
2	7.6	13.2	330	350	16.5	1.74

A continuación, se muestran los resultados propagados a través de SWAN hacia la zona de estudio, los que se usaron como parámetros de entrada para modelar la respuesta morfológica simulada en el modelo XBeach. En la figura 15 se detallan las alturas de ola por perfil asociada a cada espectro resultante de 3 horas de duración.

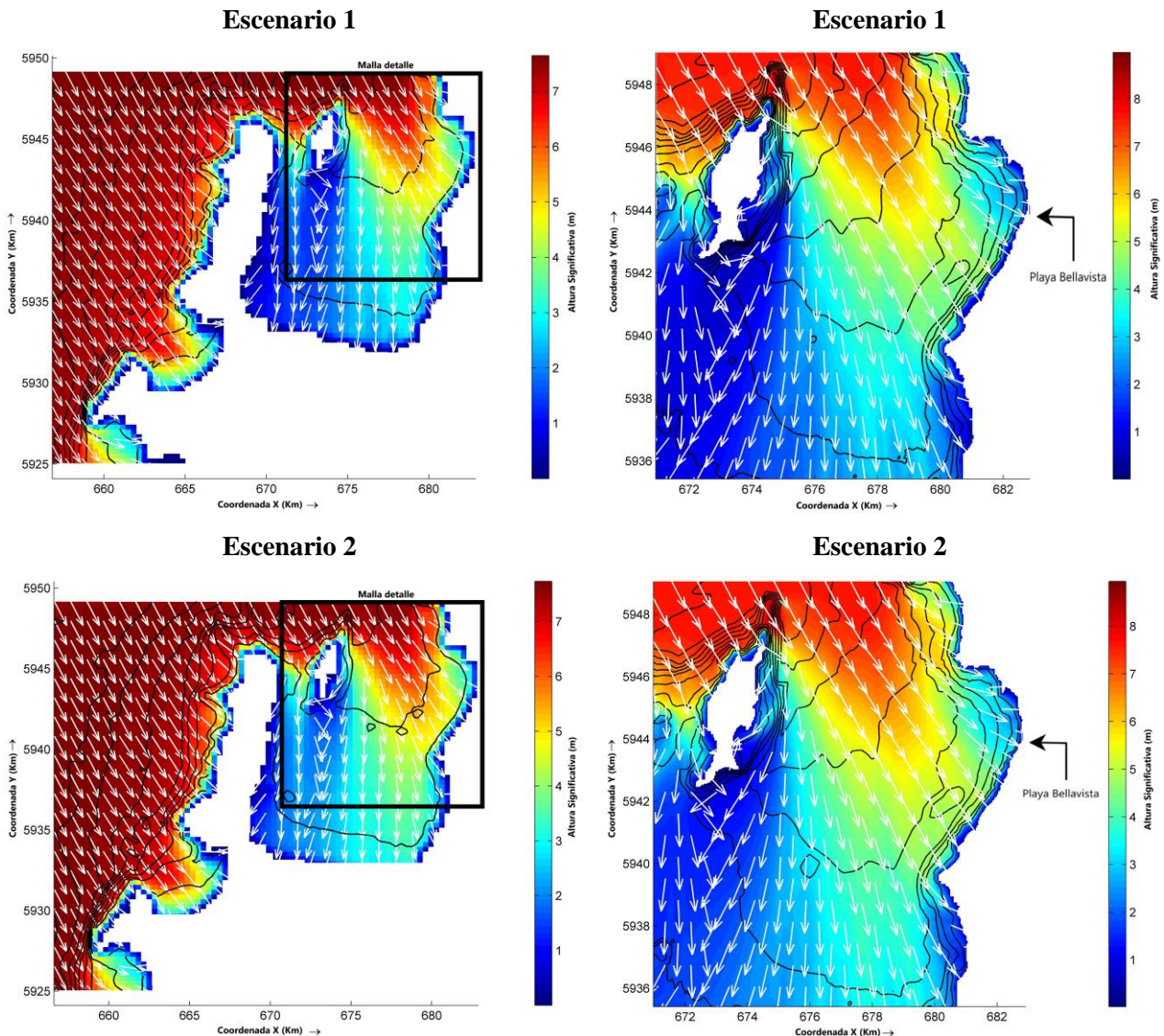


Figura 14: Propagación de oleaje extremo (tabla 6) desde aguas profundas a someras. Se muestra la altura significativa de ola (m), para el estado de mar en aguas profundas más la inclusión del oleaje local generado por el viento, en forma descendente para los escenarios 1 y 2. **a)** corresponde a los resultados de propagación en todo el dominio, **b)** corresponde al sector de la bahía de Concepción.

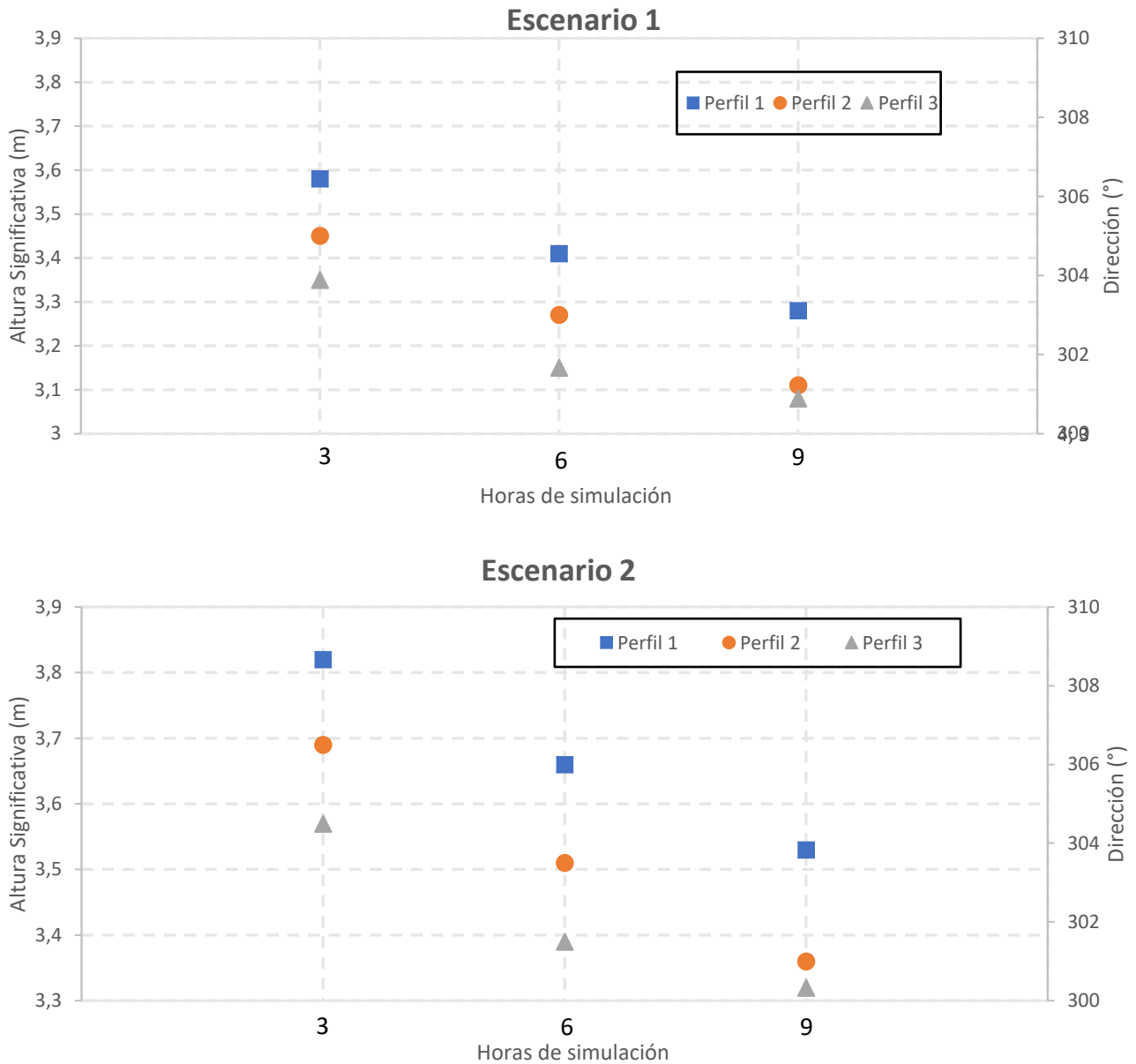


Figura 15: Forzantes hidrodinámicas de distintos escenarios de combinaciones de valores extremos para el modelo numérico XBeach obtenidas de SWAN, se muestra la altura significativa en el veril 20 m ubicada frente a los perfiles analizados. Los parámetros de entrada se actualizan cada 3 horas.

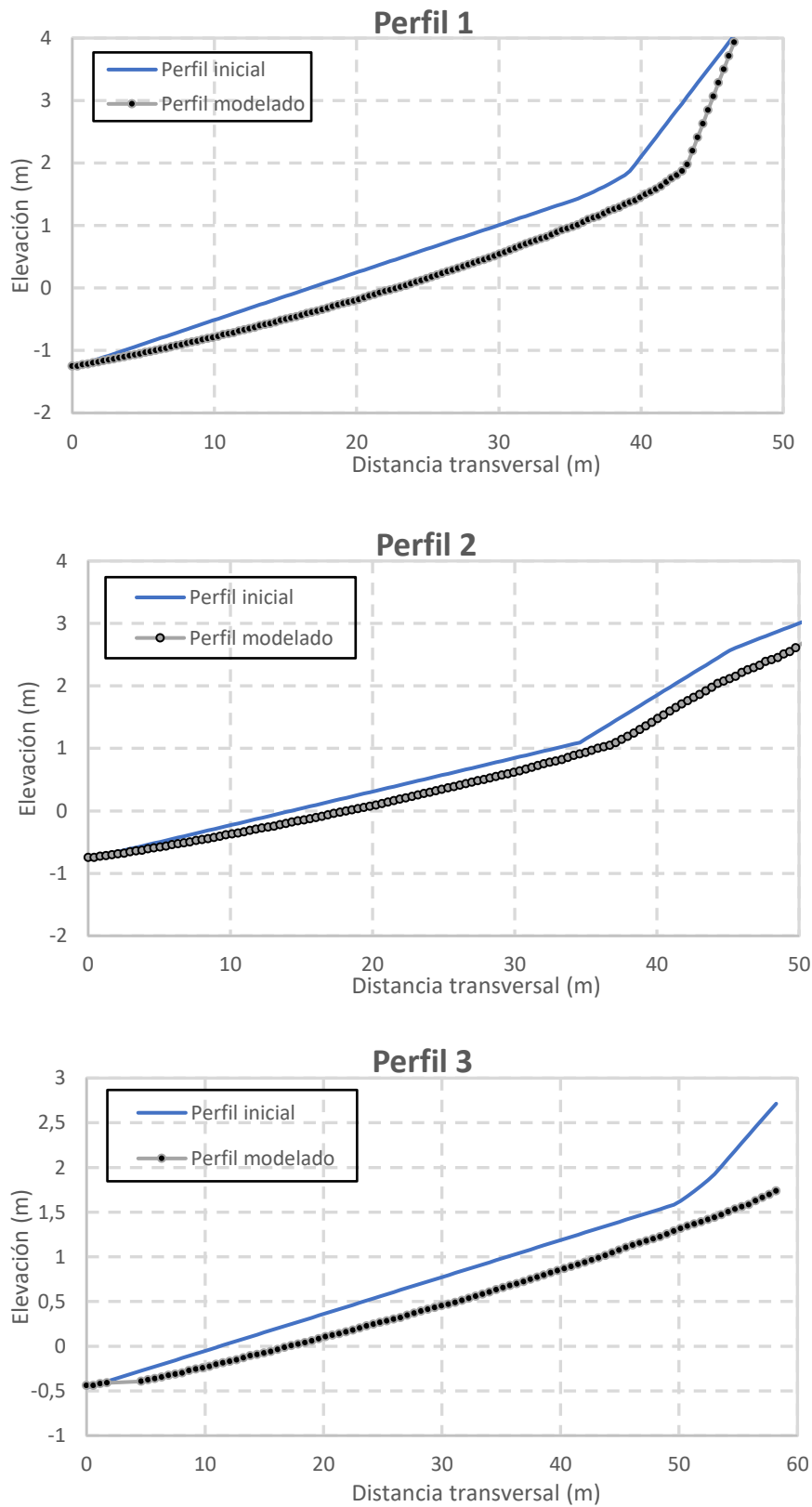


Figura 16: Resultados de simulación en XBeach para cada perfil analizado con respecto al escenario 1.

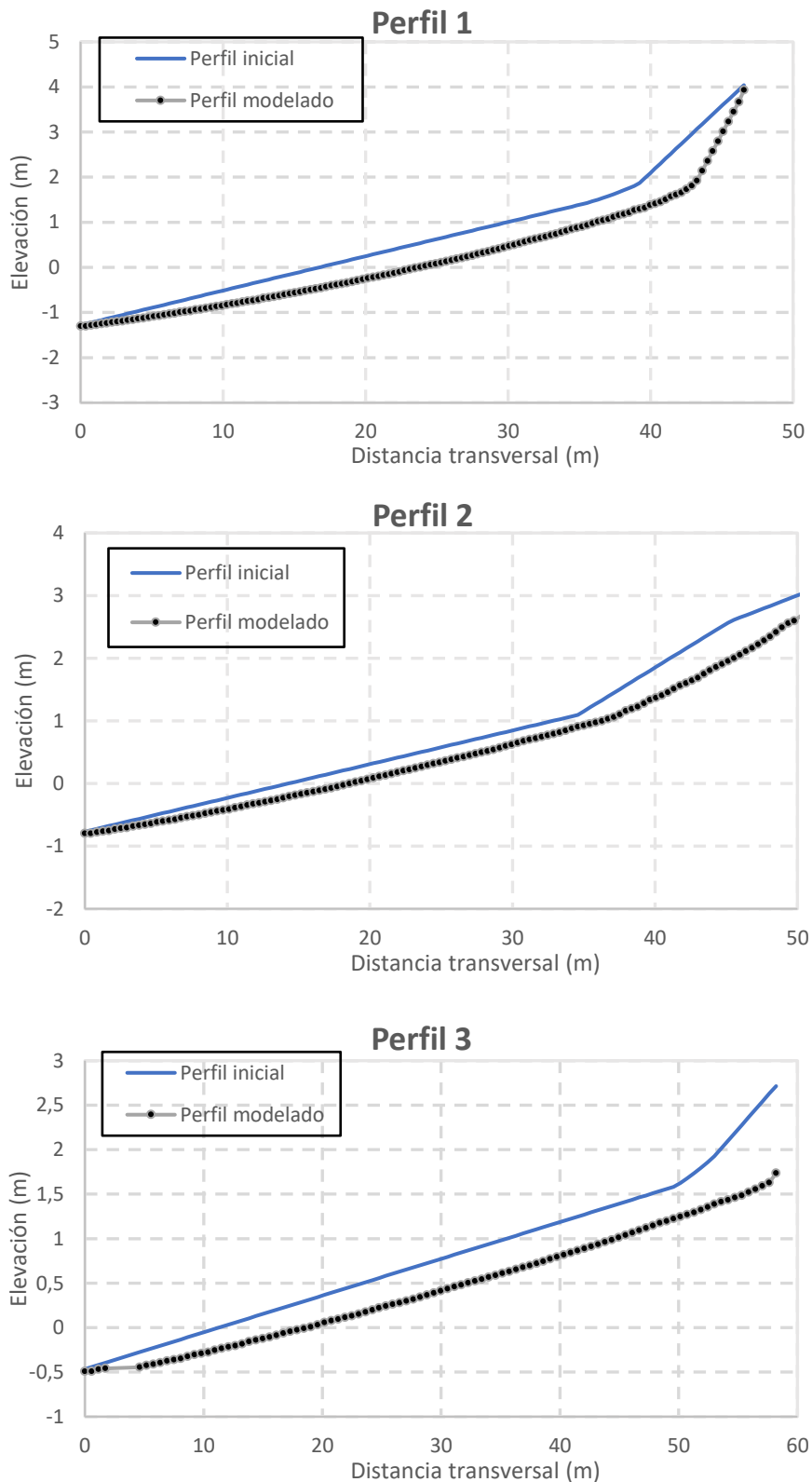


Figura 17: Resultados de simulación en XBeach para cada perfil analizado con respecto al escenario 2.

En la tabla 7 se muestran los valores de erosión por perfil simulados para cada escenario. Se observa que el escenario 2 genera mayor erosión en la zona litoral debido a que corresponde a una combinación climática más energética.

Tabla 7: Valores de volumen erosionado por longitud para los tres perfiles analizados con diferentes escenarios climáticos.

Perfil	Volumen erosionado (m ³ /m)	
	Escenario 1	Escenario 2
1	19.10	22.05
2	12.45	14.71
3	17.37	20.31

Al comparar los resultados de cada escenario (figuras 16 y 17) más los volúmenes de erosión que generan las distintas combinaciones de variables climáticas (tabla 7), se analiza el nivel de daño que en la Playa Bellavista puede llegar a ocurrir.

Se observa que la zona donde se realizó la medición del perfil 1 presenta la mayor erosión en toda la playa, desarrollando niveles máximos de socavación de 22.05 m³/m, generando con ello niveles de descensos verticales desde 0.3 m, siendo el máximo de 0.91 m, los cuales fueron obtenidos de la comparación de los perfiles iniciales extraídos de la topo-batimetría y el hipotético comportamiento de la respuesta a las forzantes hidrodinámicas de la playa Bellavista, lo que indica que la zona donde se midió el perfil 1 corresponde a la zona con mayor riesgo erosivo producto de la gran cantidad de sedimento erosionado. El perfil 2 en cambio, resultó con menores valores de erosión, llegando a valores máximos de socavación de 14.71 m³/m y 0.59 m de descenso vertical máximo. El perfil 3 se realizó en el lado norte de la desembocadura del estero Bellavista, y presenta volúmenes de socavación máximos de 20.31 m³/m y 0.90 m de descenso vertical.

El volumen máximo erosionado simulado a través de XBeach para todo el sector de la Playa Bellavista se estimó en 15,918 m³, comparando este valor con el máximo valor de sedimento erosionado, estimado en 31,000 m³ ocurrido en Valparaíso producto del temporal del 8 de agosto del 2015 (Winckler *et al.*, 2015). Se conjetura que la Isla Quiriquina desarrolla un rol importante como barrera natural de oleaje proveniente de todas las direcciones, debido a que ocasiona una disminución considerable de la altura y energía de oleaje que ingresa a la bahía de Concepción.

4. CONCLUSIONES

Como no se contó con mediciones previas a la ocurrencia de las tormentas de los meses de Julio, Agosto y Septiembre de 2018 y la medición en terreno de los perfiles se realizó semanas después de la ocurrencia de la tormenta del mes de Septiembre, esto aportó a que los valores obtenidos de BSS no fueran tan buenos, pero aun así, estos resultados obtenidos fueron satisfactorios, probando con ello que el modelo numérico XBeach puede ser aplicado exitosamente como herramienta efectiva de predicción de peligro del litoral en la Playa Bellavista.

Analizando los resultados de la tabla 7, se concluye que los mayores cambios morfológicos y posibles daños a la zona costera de la Playa Bellavista, se producen debido a la ocurrencia conjunta de condiciones meteorológicas (viento y presión atmosférica), nivel de marea y condiciones oceanográficas. Desarrollando mayores niveles energéticos de oleaje en la bahía de Concepción.

Se recalca la importancia de la Isla Quiriquina, que desarrolla un rol preponderante como barrera natural de oleaje proveniente de todas las direcciones, debido a que ocasiona una disminución considerable de la altura y energía del oleaje que ingresa a la bahía de Concepción.

Finalmente se menciona que debido a la configuración cerrada que presenta la bahía de Concepción producto de la península de Tumbes y la Isla Quiriquina, hace de esto, una zona litoral con menores probabilidades de desastres producto de eventos energéticos de oleaje, siendo con ello una zona costera de menor rango de peligrosidad.

5. REFERENCIAS

Allard, R. (2004). "Validation Test Report for the Simulating Waves Nearshore Model (SWAN)". Naval research Laboratory, 50 pp.

- Araneda, L.** (2017). “Diagnóstico y modelación de falla en Playa Escuadrón bajo la acción de oleaje de tormenta”. *Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Depto. De Ingeniería Civil*. Concepción, Chile, 19 pp.
- Beyá, I.** (2006) “Estimación del clima de oleaje en la V región: consideraciones de diseño”. *VII Seminario Internacional de Ingeniería y Operación Portuaria. Sociedad chilena de Ingeniería Hidráulica*. San Antonio, Chile, 2016.
- Campos-Caba, R.** (2016). “Análisis de marejadas históricas y recientes en las costas de Chile”. *Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil Oceánico, Universidad de Valparaíso, Facultad de Ingeniería*. Valparaíso, Chile, 136 pp.
- Cea, I.** (2016). “Implementación de un modelo de seguimiento de la línea de costa en la desembocadura del río Mataquito”. *Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Depto. De Ingeniería Civil*. Concepción, Chile, 93 pp.
- Dirección de Obras Portuarias, DOP.** (2013) *guía para el diseño, construcción, operación y conservación de obras marítimas y costeras*. Primera edición.
- Foreman, M.** (1977). *Manual for Tidal Heights Analysis and Prediction. Pacific Marine Science, Report 77-10*, Institute of Ocean Sciences, 101 pp.
- Fuenzalida, H.** (1983). “*La atmosfera inconstante: circulación general de la atmosfera. Fascículos para la comprensión de la ciencia, las humanidades y la tecnología*”. Editorial Universitaria, Santiago. 107 pp
- Goda, Y.** (1988). *On the methodology of selecting design wave height*. Coastal Engineering, 899-913 pp.
- Holthuijsen, Leo & Herman, Agnieszka & Booij, N & Cieřlikiewicz, Witold.** (2003). “Diffraction in SWAN”, 405-412 pp
- Ibaceta, R.** (2017). “Evolución morfológica de playas en la escala de tormentas aplicación del modelo XBeach en la Playa Reñaca”. *Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica (SOCHID), XXIII Congreso de Ingeniería Hidráulica 2017*. Valparaíso, Chile, 2017, 17 pp.
- Khairi, A.** (2016) “*Evaluation of peak over threshold method*”, Ocean Science, 25 pp.
- Lucero, F.; Catalán, P.; Osandón, A.; Beyá, J.; Puelma, A. and Zamorano, L.** (2017). *Wave energy assessment in the central-south coast of Chile*. Renewable Energy.
- Molina, M.; Contreras, M.; Winckler, P.; Salinas, S.; Reyes, M.** (2011). “Consideraciones sobre las variaciones de mediano y largo plazo del oleaje en el diseño de obras marítimas en Chile central”. *An. Inst. Ing. Chile*, 77-88 pp
- Molina, M.** (2016). “Eventos extremos de oleaje para el diseño de obras ¿evaluar en aguas profundas o en el sitio?” *VII Seminario Internacional de Ingeniería y Operación Portuaria. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica*. San Antonio, Chile, 2016, 14 pp.
- Roelvink, D.; Reniers, A.; van Dongeren, A.; van Thiel de Vries, J.; McCall, R.; Lescinski, J.** (2009). *Modelling storm impacts on beaches dunes and barrier islands*. Coastal Engineering, 1132-1152 pp.
- Terrero, E. & Legrá, A. & Lamorú, A.** (2014). *Método de inverso de la potencia de la distancia para estimar la velocidad de, viento*. Ingeniería Energética, 263-273 pp.
- Tolman, H.** (1997). *User manual and system documentation of WAVEWATCH III versión 1.15*. NOAA/NWS/NCEP/OMB. Technical Note 151, 97 pp.
- Van Rijn, L.; Walstra, D.; Grasmeijer, B.; Sutherland, J.; Pan, S.; and Sierra, J.** (2003) “*The predictability of cross-shore bed evolution of Sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based Profile models*”. Coastal Engineering, 295-327.
- Winckler, P. & Contreras, M. & Beya, J. & Molina, M.** (2015). “El temporal del 8 de agosto de 2015 en las regiones de Valparaíso y Coquimbo, Chile Central”. *Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica (SOCHID), XXII Congreso de Ingeniería Hidráulica 2015*. Santiago, Chile 2015, 27 pp.