

## **SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

### **VII SEMINARIO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA Y OPERACIÓN PORTUARIA**

#### **EVENTOS EXTREMOS DE OLEAJE PARA EL DISEÑO DE OBRAS, ¿EVALUAR EN AGUAS PROFUNDAS O EN EL SITIO?**

**MAURICIO MOLINA PEREIRA<sup>1</sup>**

#### **1. RESUMEN**

Se observa en la práctica ingenieril chilena la determinación de la altura de ola asociada a un periodo de retorno de diseño a partir de una selección de eventos extremos en aguas profundas y posterior propagación hasta el sitio de interés, lo que es reforzado por las instrucciones contenidas en la publicación 3201 del SHOA. El análisis de información espectral de oleaje en aguas profundas revela la condición multimodal del fenómeno, por lo que la información en un sitio de estudio será altamente sensible al nivel de exposición o abrigo que posea. Se confecciona un caso de estudio idealizado con 4 sitios con diferente nivel de exposición al oleaje y se obtiene la serie espectral en el sitio mediante un proceso de transferencia desde aguas profundas. La selección de eventos extremos en los sitios difiere significativamente de la selección en aguas profundas, encontrándose numerosos casos de eventos extremos en aguas profundas que no lo son en el sitio y viceversa. Se encuentra además que la determinación de la altura de diseño mediante la selección de parámetros en aguas profundas y posterior propagación induce errores no solo a la sobre estimación (visión conservadora) sino que también hacia la subestimación, aumentando con ello el riesgo de las obras. Se recomienda no emplear esta práctica metodológica y considerar solo la evaluación de eventos extremos en el sitio luego de una transferencia espectral completa.

---

<sup>1</sup>Profesor Auxiliar, Escuela de ingeniería civil oceánica. Universidad de Valparaíso, mauricio.molina@uv.cl

## 2. INTRODUCCIÓN: LA PRÁCTICA EN LA INGENIERÍA CHILENA

En la ingeniería marítima se requiere que las estructuras sean capaces de continuar operando luego de la ocurrencia de un evento extremo de oleaje, por lo que el diseño estructural de la obra está condicionado por este factor. En este diseño, la vida útil del proyecto y el riesgo asociado son los parámetros que definen el periodo de retorno de diseño (ROM 0.2-90). Las metodologías para la estimación de un valor asociado a una probabilidad de ocurrencia se encuentran abordadas en la literatura internacional (Liu y Frigaard 2001) considerando desde los criterios de selección de datos hasta la estimación del parámetro asociado a un cierto periodo de retorno mediante el ajuste de alguna función de distribución.

En la práctica ingenieril chilena se observa que el análisis de valores extremos se realiza siguiendo la metodología establecida por la publicación 3201 del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA), denominada Instrucciones oceanográficas N°1: especificaciones técnicas para mediciones y análisis oceanográficos, documento que especifica los contenidos que debe tener un estudio de oleaje para recibir la aprobación de dicho organismo. El capítulo 3.15, denominado Clima de Oleaje Extremo o de Diseño, señala:

*“El desarrollo del clima de oleaje de diseño, estará basado en el análisis de las olas extremas que han sido definidas en el clima de oleaje de aguas profundas. El análisis de olas extremas deberá ser efectuado identificando y aislando, como mínimo, las mayores tormentas ocurridas en cada uno de los 20 años de Hindcasting (20 eventos), para cada una de las componentes del oleaje (tipos Sea y Swell que llegan generalmente desde el tercer y cuarto cuadrante a las costas de Chile) requeridos en 3.1.2, con el fin de observar el oleaje de diseño para diferentes direcciones y caracterizar el oleaje en casos extremos. Con esta información, se deberá llevar a cabo un análisis estadístico de los valores extremos, que arroje una estimación de la altura significativa de la ola con períodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años. Además, deberán incluirse en el análisis, los parámetros claves (altura significativa (Hs), período de “peak” espectral (Tp), dirección de incidencia (Dir), fecha y duración) asociados con cada tormenta...”*

Esta metodología señala que los eventos extremos se seleccionan y analizan en aguas profundas, donde se estiman las alturas asociadas al periodo de retorno de diseño, la que posteriormente se propaga al sitio de interés mediante la asignación de un periodo peak y dirección media. Dicha asignación queda sujeta al criterio del diseñador, pero en general se encuentran criterios como determinar la media de los parámetros de los eventos seleccionados, asociar los valores de los eventos mayores o bien el de los más frecuentes. Este procedimiento requiere la reconstrucción del espectro de aguas profundas asociadas al evento extremo seleccionado, el cual usualmente corresponde a algún espectro sintético de frecuencia con distribución direccional simétrica.

Como alternativa a las posibles influencias que tenga la exposición del sitio a las condiciones de oleaje, también es frecuente encontrar análisis que aíslan los eventos extremos por dirección (cuadrantes en la mayoría de los casos), realizando la misma metodología obtenida anteriormente, pero cuyo diseño final se realiza a partir de la mayor altura entre las dos alternativas, dado que se asume que ese corresponde al caso conservador.

Independiente de la metodología que se emplee, en cada caso se asume que el comportamiento del evento extremo es unimodal y que toda la energía se asocia a la frecuencia y dirección principal.

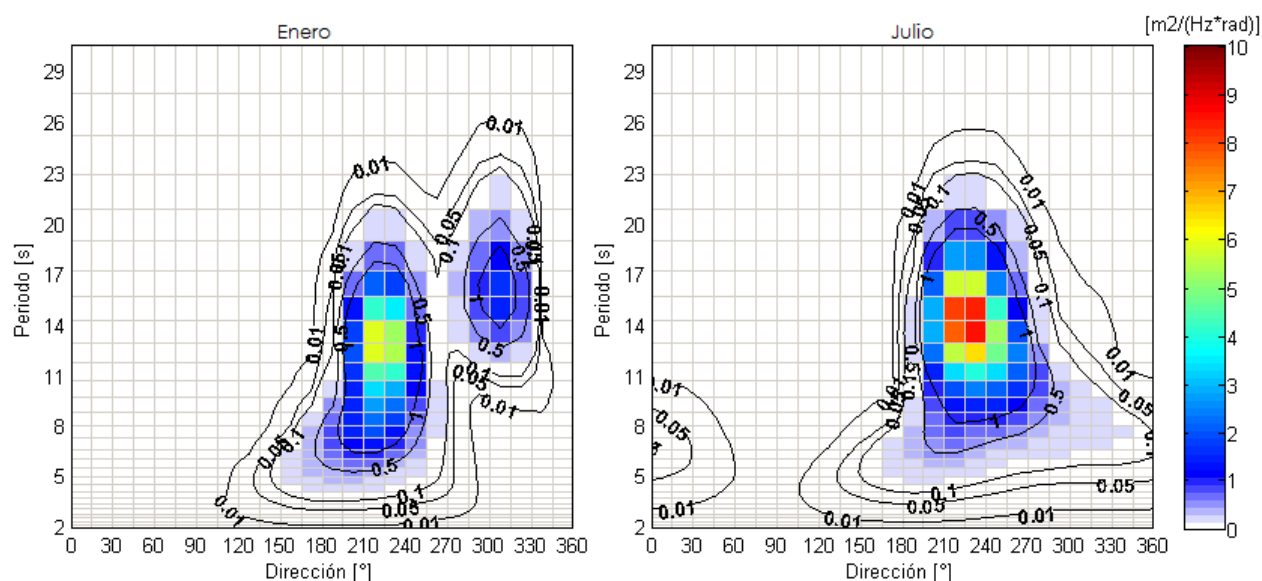
### 3. CARACTERÍSTICAS DEL OLEAJE EN CHILE

El oleaje que se presenta en Chile proviene de diferentes fuentes de generación, produciéndose principalmente swell SW desde el Pacífico sur, swell NW desde el Pacífico norte y generación local en las cercanías del continente (Molina 2011). La incidencia de dicho oleaje permite observar en ocasiones la ocurrencia simultánea de oleaje, lo que se traduce en condiciones de oleaje multimodales.

En el caso de los eventos extremos de oleaje, estos pueden ser generados en cualquiera de las tres zonas, aunque son más frecuentes las de generación local y las generadas en el pacífico sur. Con todo, es frecuente el desarrollo de un evento extremo asociada a una fuente de generación en simultáneo con otra condición de oleaje no extrema.

En el caso del desarrollo de cualquier estudio de oleaje para ingeniería se utiliza información comercial proveniente de modelos globales de re-análisis, denominados hindcasting, los que a partir de información de campos globales de viento derivan las condiciones de oleaje en aguas profundas. Este tipo de soluciones permite contar con información espacial y temporal acorde a los requerimientos del SHOA, las que posteriormente es posible llevar hasta el punto de interés a través de software especializado.

Para el desarrollo del presente estudio se considera el uso de una serie espectral de 37 años (1979-2015) en aguas profundas en las cercanías de Valparaíso, obtenidos mediante el modelo Wavewatch III en el contexto del proyecto FONDEF Un atlas de oleaje para Chile, desarrollado por la Escuela de Ingeniería Civil Oceánica de la Universidad de Valparaíso (Hidalgo et.al 2015).



**Figura 1 Espectro promedio en aguas profundas de serie espectral representativa de Valparaíso entre 1979 y 2015 para los meses de enero y julio**

La Figura 1 presenta el espectro promedio de la serie de 37 años para los meses de enero y julio, correspondiente a los meses que presentan mayor notoriedad de estacionalidad, donde es

posible observar que en todo el año predomina la componente swell SW con dirección en torno a los  $225^\circ$  y periodos entre 12 y 16 [s], la cual se acentúa en época invernal. En la época estival se presenta el swell del NW con dirección en torno a los  $315^\circ$  y periodos entre 13 y 20 [s], la cual desaparece en época invernal. Por el contrario la componente local, con periodos menores a 11 [s] se presenta con direcciones principalmente en el tercer y cuarto cuadrante ( $180^\circ$  a  $359^\circ$ ) de forma más intensa en invierno, moderando su impacto en verano, donde se presenta con dirección predominantemente en el tercer cuadrante ( $180^\circ$  a  $269^\circ$ )

#### **4. CASO ESTUDIO: INFLUENCIA DE LA UBICACIÓN DE LA OBRA EN LA SELECCIÓN DE EVENTOS EXTREMOS**

Considerando las diversas fuentes de generación de oleaje, y a partir de ello, la multimodalidad que se observa en algunos espectros, es posible considerar que las características con las que finalmente llegará el oleaje al sitio dependerán en gran medida de las direcciones desde las que se presentará la energía en aguas profundas y la exposición del sitio de estudio a dichas direcciones. Por lo mismo es esperable que dependiendo de la distribución de la energía en el espectro, se presenten casos en los que estados de mar muy energéticos, catalogables como extremos, posean energía principalmente en direcciones de las cuales el sitio se encuentre altamente protegido, y por ello, dicho estado de mar no sea extremo en el sitio. Así mismo, es posible que estados de mar con energía moderada la presenten distribuida en las direcciones de mayor exposición del sitio, y por ende se presente allí como evento extremo.

Dado lo anterior, y considerando que una selección inadecuada de eventos extremos de oleaje altera la estimación de los valores de altura significativa asociada a un periodo de retorno, que corresponde al parámetro de diseño, resulta necesaria la definición de un caso de estudio que permita contrastar las opciones metodológicas para la determinación de los valores de diseño de una obra, sobre todo considerando que una sobreestimación del valor de diseño implicará un aumento innecesario de los costos, mientras que una subestimación implicará un aumento de riesgo de daños al no poseer las condiciones de diseño adecuadas.

En la Figura 2 se presenta una geografía ficticia con cuatro sitios de estudio, los cuales se disponen en una profundidad de 20 [m]: El sitio A busca representar aquellas porciones de costa completamente expuestas a las condiciones de oleaje, mientras que los sitios B y D son puntos que se encuentran completamente protegidos del oleaje provenientes del noroeste y suroeste respectivamente. El punto C en tanto busca tener protección parcial de las condiciones de oleaje suroeste y noroeste, pero completamente expuesto a las condiciones del oeste.

El dominio espacial de la batimetría considerada inicia desde profundidades superiores a 1000 [m] con el objetivo de que las simulaciones de propagación de oleaje comiencen desde aguas profundas, mientras que la extensión en el eje norte sur es el suficiente para que las condiciones de borde no provoquen difracción numérica en la zona de interés. El ángulo de la costa y de los veriles de profundidad se encuentran alineados con la orientación que típicamente presenta la costa chilena ( $12^\circ$ ).

La transferencia de la información espectral a los sitios seleccionados se realizó mediante el uso de matrices de transformación y de cambio de dirección empleando la metodología planteada por Monsalve (2010), utilizando el software SWAN, consiguiendo series de 37 años de espectros (108111 estados de mar) en cada uno de los sitios considerados.

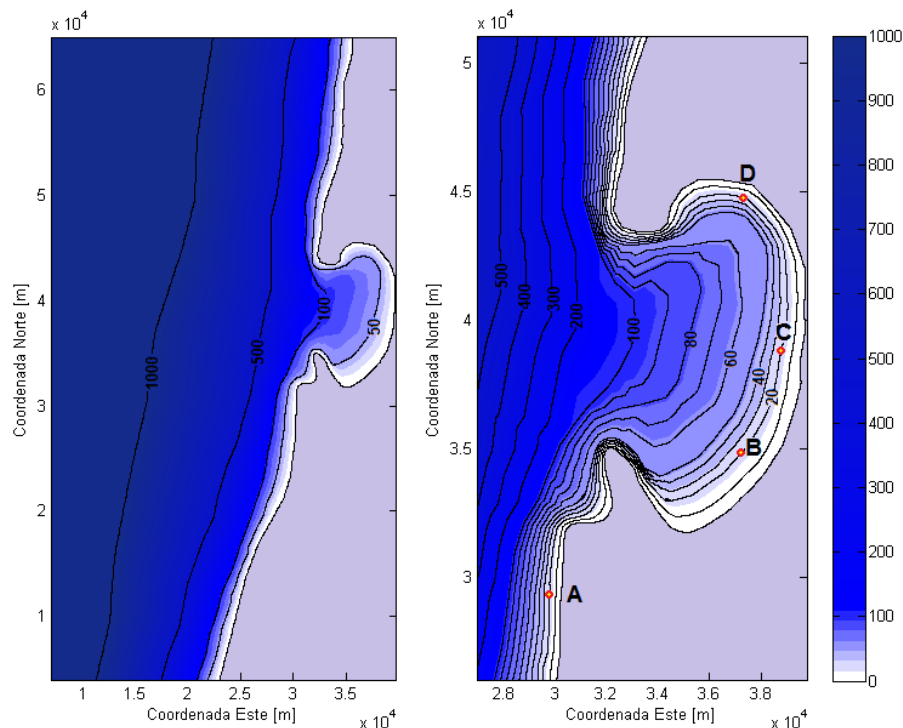


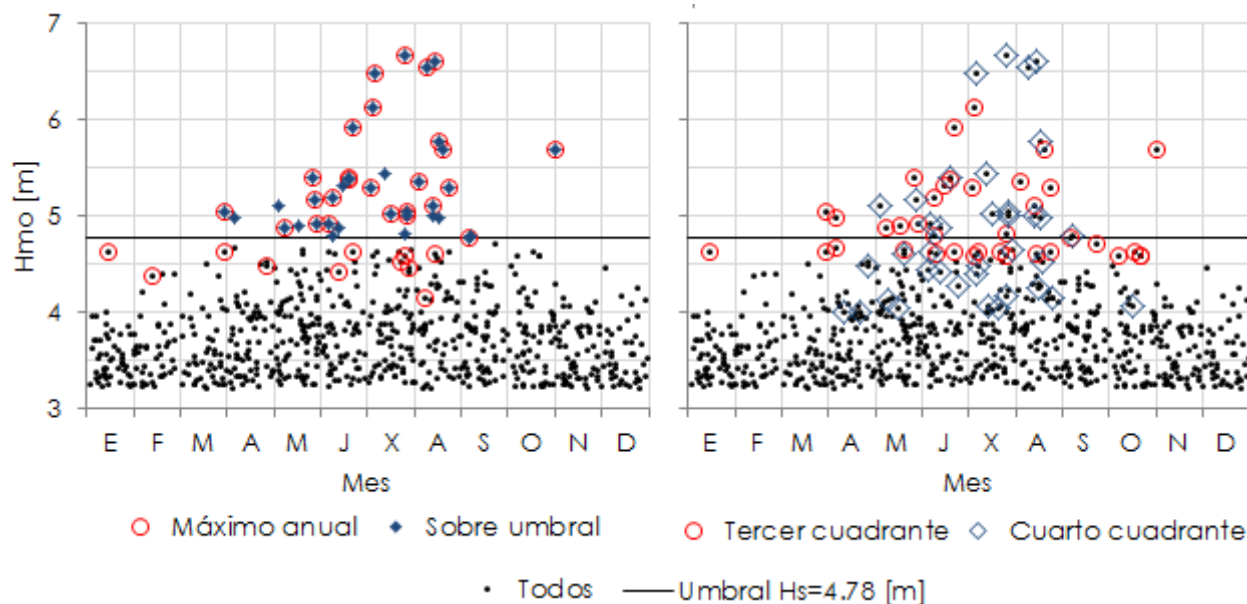
Figura 2 batimetría idealizada considerada para la simulación

## 5. SELECCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE EVENTOS EXTREMOS

La identificación de los eventos extremos en cada serie se realiza a partir del estado de mar de mayor altura, y cuya magnitud se encuentre dentro del 5% de los mayores estados de mar. Se consideran eventos independientes cuando el estado de mar representativo se encuentra distanciado más de dos días del siguiente, sino, se considera solo el mayor de ellos. Para efecto de ajuste de curvas de distribución, la selección de los eventos se realizó tanto con los máximos anuales (37) como con los valores sobre umbral, cuyo valor corresponde a aquel permite la selección de los 37 mayores eventos de la serie.

La Figura 3 (izq) presenta la distribución anual de los eventos extremos en aguas profundas, donde se indican los eventos seleccionados con los métodos máximo anual y valores sobre umbral. De la selección se observa que, si bien el máximo anual permite analizar estadística con frecuencia relativamente constante, esto no garantiza la selección de los mayores eventos de la serie, dado que hay años con más de un evento significativo. Prueba de ello es la consideración del evento del 6 de agosto de 2008, caracterizado con una altura de 4.15 [m] en desmedro de otros 90 eventos que tuvieron alturas mayores, como el de 14 de junio de 2010 con altura de 5.32 [m] dado que el máximo de ese año fue 5.69 [m] (18 de agosto de 2010).

Por el contrario, la selección de valores sobre umbral permite asegurar la selección de los eventos más importantes (umbral =4.78 [m]), pero deja 11 años de estadística sin ser considerada (1980, 1983, 1991, 1995, 1996, 2000, 2001, 2002, 2004, 2008 y 2009) versus los 4 eventos que considera del año 1982 (16 de mayo, 8 de junio, 15 de julio y 12 de agosto).



**Figura 3 Eventos extremos en aguas profundas, seleccionados a partir de máximo anual y valores sobre umbral (izq) y por cuadrante (der)**

En cuanto al análisis por cuadrante, se presenta en la Figura 3 (der) la selección por medio de valores sobre umbral, siendo este de 4.58 [m] en el caso del oleaje proveniente del tercer cuadrante (direcciones entre 180° a 269°) y de 3.99 [m] en el caso del cuarto cuadrante (direcciones entre 270° y 359°).

Considerando que se disponen las series espectrales en cada sitio, se realiza la identificación de los eventos extremos y se comparan con la selección realizada en aguas profundas. En la mayoría de los casos, el estado de mar representativo de cada evento no es coincidente entre el sitio de estudio y aguas profundas, sin embargo se consideran como evento equivalente si la diferencia de la fecha del máximo entre el sitio y aguas profundas es menor a 2 días.

Se observan 24 eventos que son considerados como extremo en alguno de los sitios y que no son identificados como tales en aguas profundas, mientras que hay 42 eventos extremos de aguas profundas que no son considerados como tales en alguno de los sitios.

La Figura 4 presenta la comparación entre la selección de eventos extremos para la estimación de periodo de retorno considerando como base los eventos extremos identificados en aguas profundas, donde es posible observar que se presentan diferencias importantes en los eventos que son considerados como extremos. Esto implica que un evento extremo de aguas profundas no necesariamente lo es en el sitio de estudio y viceversa.

Alta notoriedad alcanza los resultados de la selección de máximos anuales por sitio ya que de los 37 eventos seleccionados, entre 6 y 10 no se encuentran dentro del 5% de alturas mayores en aguas profundas, el cual corresponde al criterio empleado para aislar los eventos extremos.



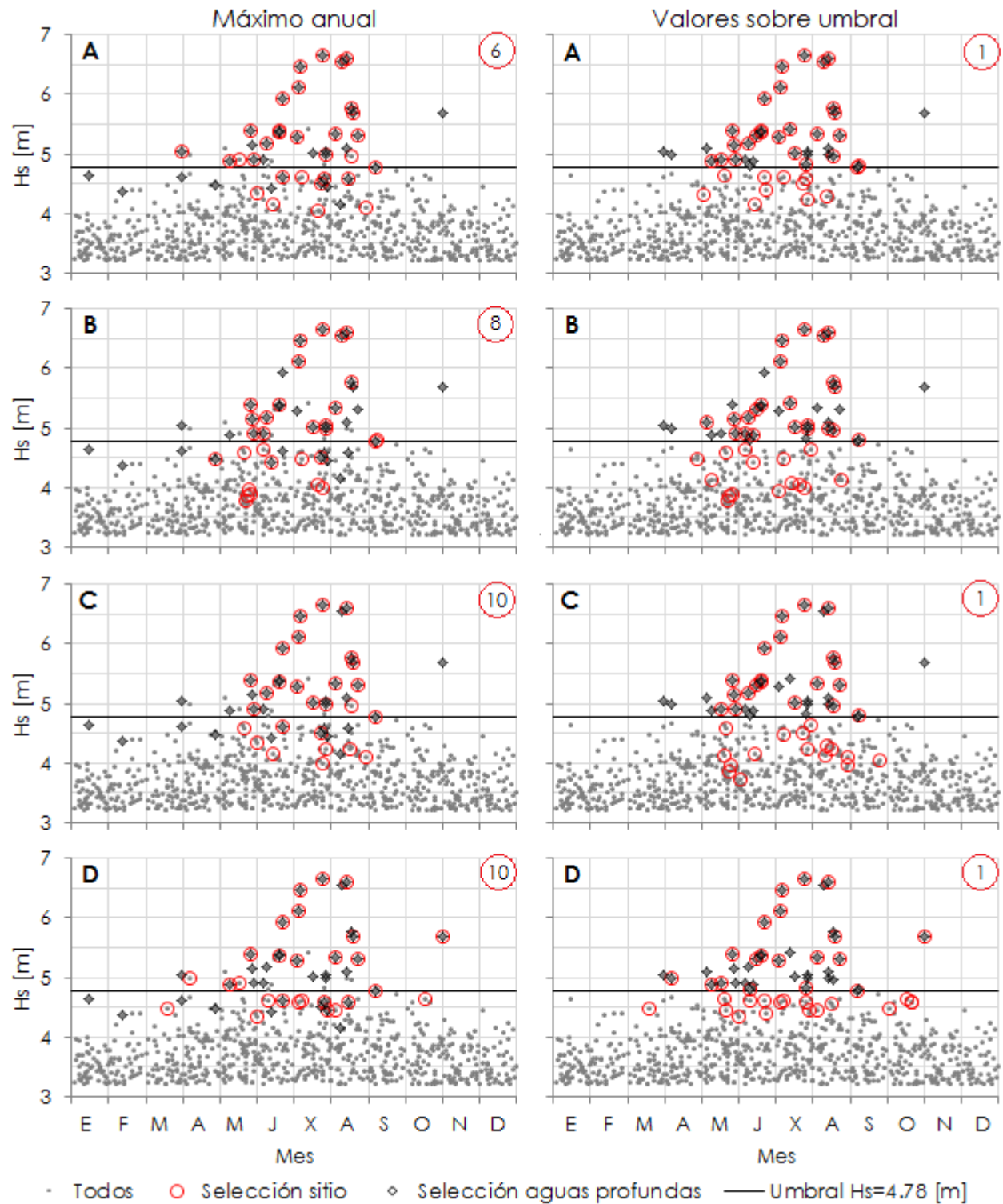


Figura 4 Comparación de los eventos extremos identificados en aguas profundas con los seleccionados en cada sitio. Valor en círculo indica eventos extremos que no lo son en aguas profundas

## 6. ESTIMACIÓN DE LA ALTURA ASOCIADA A PERIODO DE RETORNO PARA EL DISEÑO

Considerando las diferencias observadas en la selección de los eventos extremos para estimación de la altura asociada a un periodo de retorno, se realiza la estimación de estos valores para efectos de comparación en cada uno de los sitios en estudio.

Se consideró el uso de la distribución de Weibull para este efecto, con probabilidad de ploteo de Goda y  $k=2.0$  (Liu y Frigaard 2001). Esta configuración fue la que presentó el mejor ajuste en todos los casos seleccionados en desmedro de los restantes valores del coeficiente  $k$ , la probabilidad de ploteo de Petrauskas, y las distribuciones de Gumbel y Log-Normal.

Los periodos de retorno calculados y las alturas significativas asociadas en aguas profundas se presentan en la Tabla 1, donde es posible observar que la influencia del criterio de selección se traduce en una estimación de altura mayor en el caso del método de máximo anual para periodos de retorno desde 10 años. En cuanto a la influencia en la selección por cuadrantes, se observan valores menores que por máximo anual en todos los casos, mientras que las estimación a partir de los datos del cuarto cuadrante presenta valores mayores a los estimados por sobre el umbral en toda la estadística en periodos de retorno de 75 y 100 años.

**Tabla 1 Altura significativa [m] asociada a distintos periodos de retorno calculada en aguas profundas para diferentes criterios de selección**

Tr [años]	Máximo anual	Sobre umbral	Tercer cuadrante	Cuarto cuadrante
2	5.11	5.28	4.91	4.74
5	5.75	5.78	5.30	5.45
10	6.11	6.07	5.52	5.85
20	6.42	6.31	5.71	6.20
50	6.78	6.59	5.93	6.60
75	6.93	6.71	6.02	6.76
100	7.03	6.79	6.08	6.87

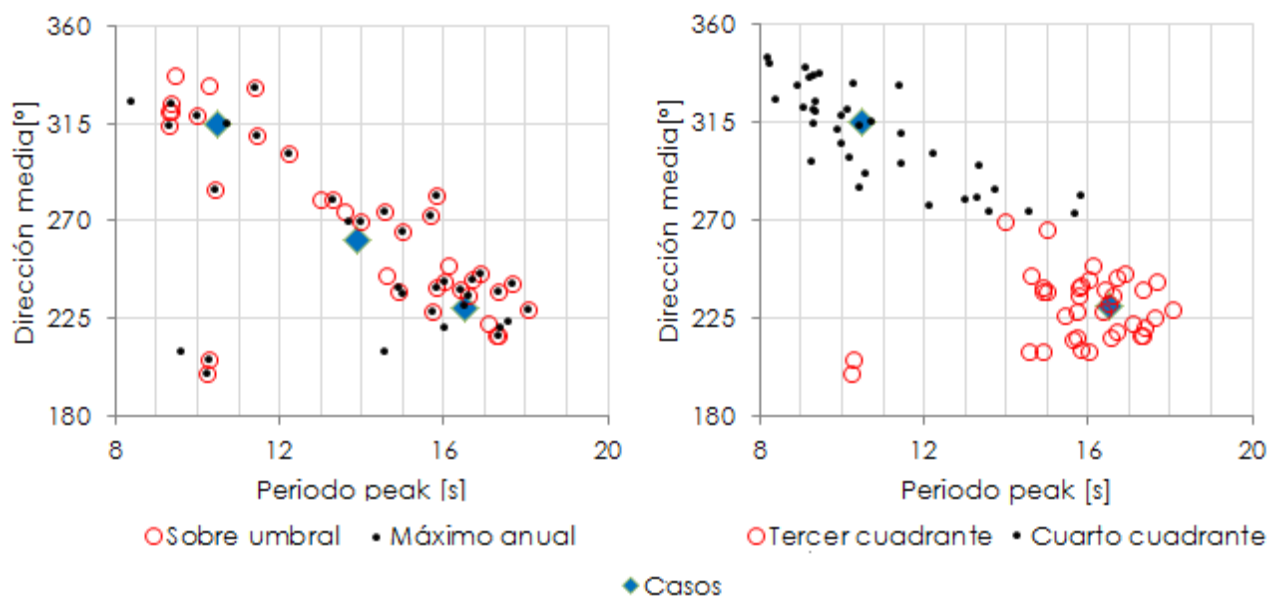
En el caso de la estimación de la altura en el sitio asociada al periodo de retorno calculado en aguas profundas, se construye un espectro con la altura calculada la cual se propaga a cada sitio. Se ha utilizado en las frecuencias el espectro sintético JONSWAP con un factor de apuntalamiento  $\gamma=3.3$ , y la una distribución gaussiana en el caso de la dirección con una dispersión direccional de  $20^\circ$ .

Dado que para esto se requiere la asignación de un periodo peak y dirección media, se detalla en la Tabla 2 los escenarios considerados los cuales fueron obtenidos a partir de los valores asociados a los eventos extremos seleccionados, tanto para toda la estadística (ver Figura 5 iza) como para la selección por cuadrante (ver Figura 5 der).



**Tabla 2 Casos considerados para asignación de periodo y dirección a los valores de periodo de retorno estimados en aguas profundas**

Caso	Periodo peak [s]	Dirección media [°]	Escenario
1	13.9	261.5	Media de la selección
2	16.5	230.0	Típico tercer cuadrante
3	10.5	315.0	Típico cuarto cuadrante



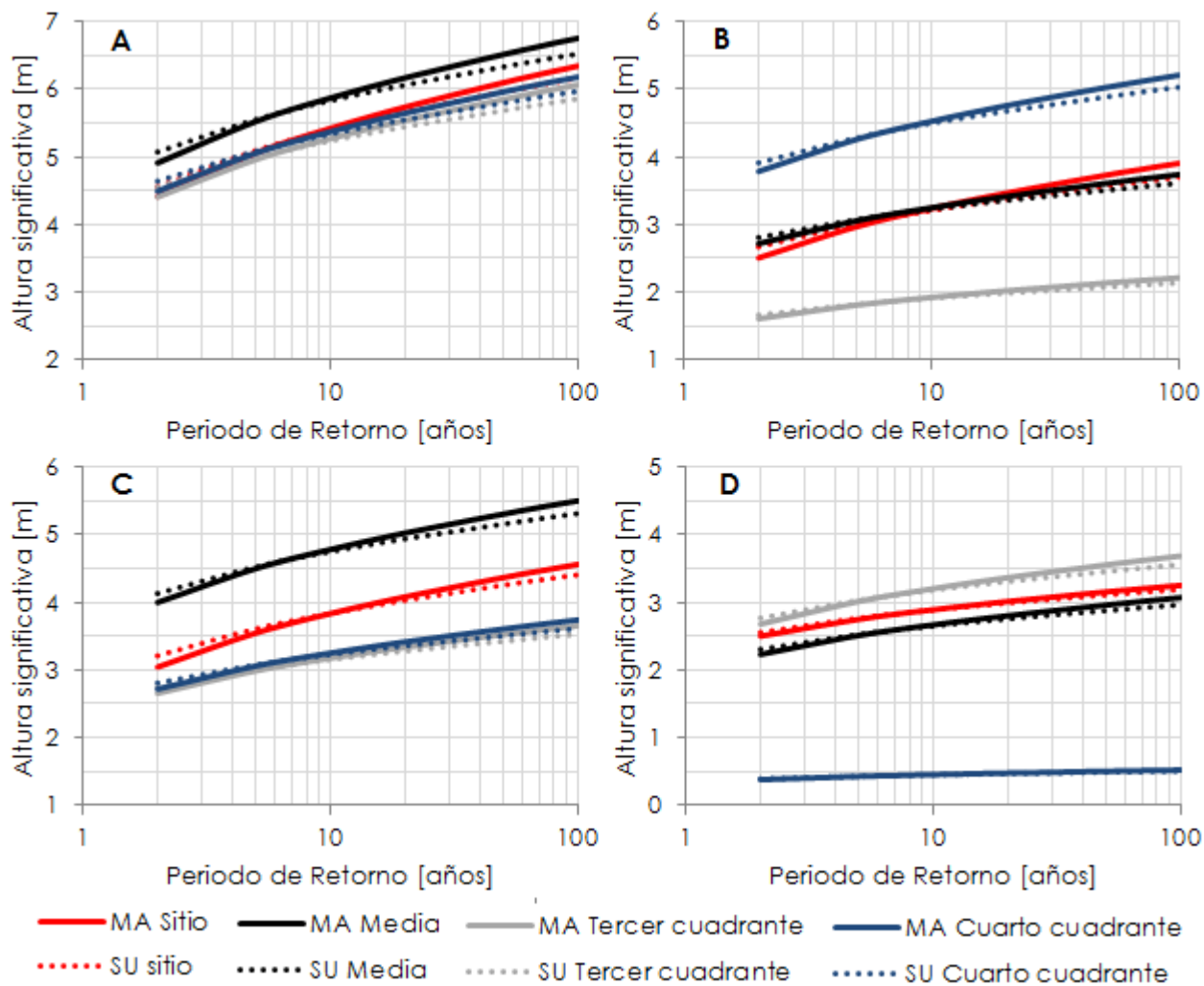
**Figura 5 Periodo peak y dirección media de los eventos seleccionados en aguas profundas sobre el total de la estadística (izq) y por cuadrante (der). Se indican los casos considerados para análisis.**

La estimación de los periodos de retorno en aguas profundas y luego propagadas a los sitios permite la comparación de la fiabilidad de esta metodología con la evaluación de los eventos extremos en el sitio luego de haber transferido la estadística espectral completa.

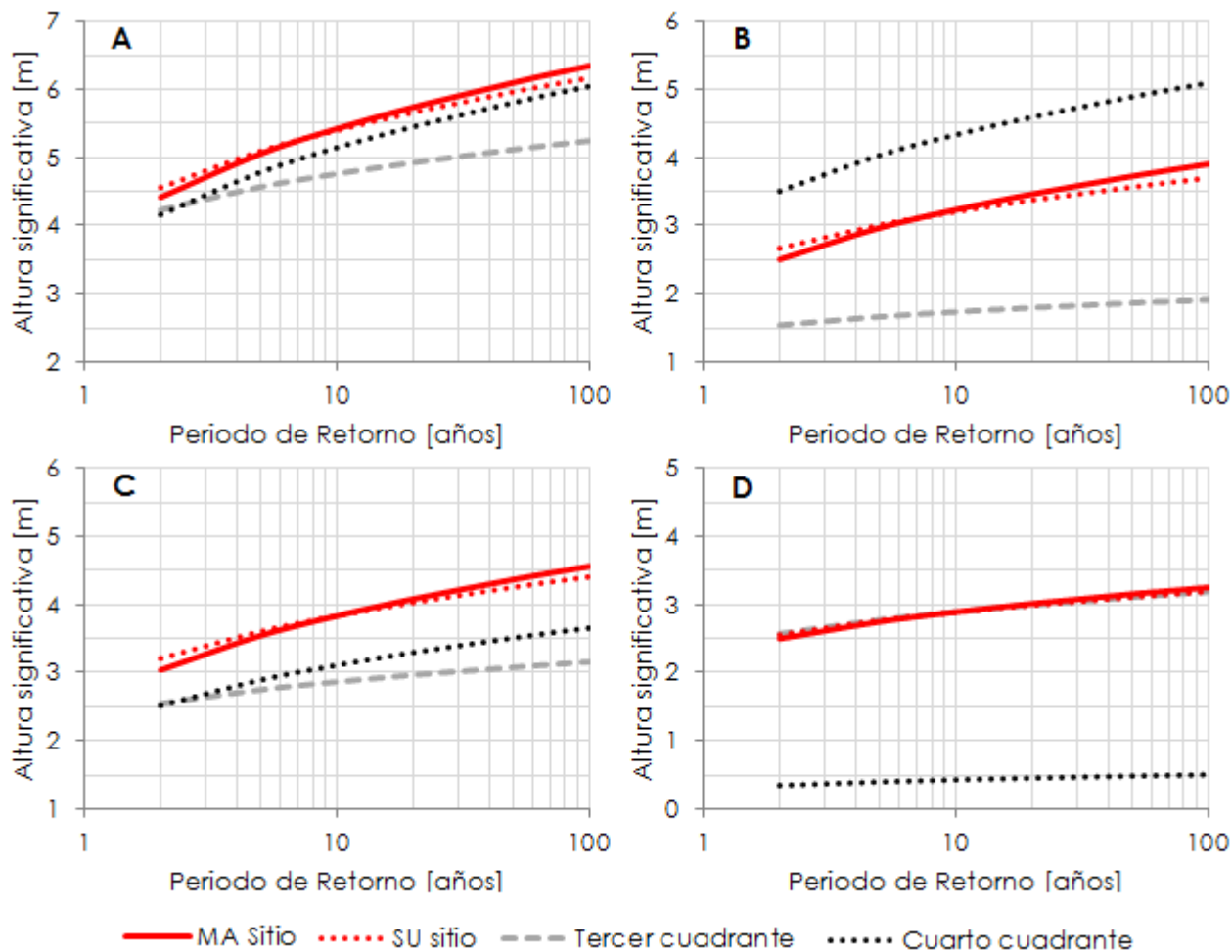
Los resultados que se presentan en la Figura 6 permiten observar que el efecto de la selección de eventos extremos por los métodos de máximo anual y valores sobre umbral provoca en todos los casos que los valores obtenidos con el primero son superiores en periodos de retorno mayores, siendo el método de máximos anuales, desde ese punto de vista, conservador respecto a valores sobre umbral.

En el caso de la influencia del periodo peak y dirección media considerada para asociar a la altura significativa obtenida en aguas profundas en la propagación del oleaje al sitio, se observa una alta sensibilidad a estos parámetros, donde las diferencias se acentúan si el sitio posee algún tipo de abrigo. Adicionalmente se observa que un caso tiene comportamiento disímil dependiendo del sitio, ya que en uno se presenta con una sobreestimación y en otros con subestimación, lo cual fue observado para cada uno de los casos considerados en la Tabla 2.

En el caso de la estimación del periodo de retorno a partir de la selección por cuadrante, se observa en la Figura 7 la evaluación en los sitios luego de la propagación, donde los valores obtenidos son variables dependiendo del sitio analizado. En general los valores obtenidos son menores a los que resultan de la evaluación en el sitio, salvo en los casos en los que el sitio se encuentra completamente expuesto al cuadrante desde el cual proviene la aproximación.



**Figura 6** Altura significativa asociada a periodo de retorno en los sitios de estudio mediante transferencia espectral de la serie completa al sitio (rojo) y propagación al sitio de las alturas estimadas en aguas profundas por parámetros medios (negro), tercer (gris) y cuarto cuadrante (azul) tanto por selección de máximo anual (línea continua) como de valores sobre umbral (línea punteada).



**Figura 7** Altura significativa asociada a periodo de retorno en los sitios de estudio mediante transferencia espectral de la serie completa al sitio con selección de máximo anual (rojo continua) y valores sobre umbral (rojo punteada) y propagación al sitio de las alturas estimadas en aguas profundas divididas por dirección de incidencia tercer cuadrante (gris segmentada) y cuarto cuadrante (negra punteada).

## 7. DISCUSIÓN

Teniendo en cuenta estos resultados, es posible evidenciar que la metodología de análisis de eventos extremos en aguas profundas y posterior propagación no es recomendable cuando el sitio en cuestión posee algún tipo de abrigo o la característica espectral del oleaje sea multimodal.

La razón fundamental de su ineficacia radica en que la evaluación de eventos extremos a partir de la altura significativa no permite distinguir la distribución de la energía en las distintas frecuencias y direcciones, sino que considera solo la cantidad total. Si se considera que el espectro de aguas profundas presenta multimodalidades, entonces es esperable que al propagar dicha información hasta el sitio se presentarán transformaciones debido a la

propagación, que dependerán de la dirección y frecuencia de cada componente, y por ende, la información que se observa en el sitio de interés es información filtrada. Lo anterior se refuerza si se considera que también es posible encontrar en el espectro componentes energéticas que no llegaran al sitio debido a su dirección.

Si la metodología se analiza desde la componente netamente espectral y se asume que el proceso de cálculo de la altura asociada al periodo de retorno es correcto, entonces el primer error que se introduce dentro del proceso es el tipo de espectro que se le atribuirá al valor extremal obtenido. Esto se explica en que, dado que el evento considerado no ha ocurrido, se desconoce su forma espectral, y por ende se le atribuye un espectro sintético, en general unimodal, que distribuye toda la energía entorno a un periodo y dirección principal por lo que el resultado en el sitio dependerá del nivel de exposición que este tenga a dicha dirección. En este ámbito el estudio evidencia que los resultados son altamente sensibles al criterio que se adopte para la elección de la combinación de periodo y dirección del evento extremo a propagar y ya que, una combinación en un caso se presenta sobreestimando y en otro subestimando, con lo que no es posible asegurar que exista una combinación que permita tener confiabilidad respecto al resultado obtenido en el punto.

Por otro lado, si se realiza un análisis de las formas espectrales de los eventos extremos seleccionados y a partir de ello generar una propuesta de forma espectral, ciertamente la aproximación tenderá a mejorar, pero no se puede tener certeza de que un evento extremo presente formas espectrales similares a las que se han presentado con anterioridad.

Obviando la discusión respecto a la forma espectral, la metodología de selección de eventos extremos induce a trabajar solo con los eventos mayores dentro de la información conocida (por máximo anual o sobre umbral), sin embargo, los resultados presentados en el capítulo 5 dan cuenta que un evento extremo en aguas profundas no necesariamente lo es en el sitio, y viceversa, por lo que una selección inadecuada de eventos va a implicar errores en la estimación de la altura asociada al periodo de retorno, además de considerar formas espectrales que no necesariamente son las que permiten llevar proporcionalmente más energía al sitio de estudio.

Ahora, si se desea mejorar la estimación realizando aproximaciones por cuadrantes (o cualquier otro criterio para dividir direcciones) tratando de aislar los eventos de oleaje extremo por fuente de generación, se presenta la dificultad de la elección del parámetro para clasificar los datos. Si bien, el oleaje de generación distante (swell SW y NW) es posible separarlos por cuadrante dadas las ubicaciones relativas de las zonas de generación respectivas, no es posible hacer lo mismo con los eventos de generación local, los cuales se presentan tanto en el tercero como en el cuarto. De igual manera la definición de una frecuencia única que divida entre generación local y distante, ya que en el caso de los eventos que provienen especialmente del tercer cuadrante a nivel espectral ambas componentes tienden a mezclarse. Dado esto, una adecuada selección de eventos por fuente de generación pasará por la implementación de técnicas de separación de componentes energéticas por cada espectro, que permitirán obtener ajustes óptimos de valores asociados a periodos de retorno, sin embargo esto no asegura que un evento extremo en aguas profundas lo siga siendo en el sitio, además requerir técnicas de probabilidad conjunta considerando que para un periodo de retorno se obtendrá una altura de ola por cada fuente de generación, cuando el objetivo es identificar el oleaje que debe soportar la estructura en un determinado periodo de retorno.

Dado lo anterior, clasificar los eventos extremos a partir de los parámetros de resumen del estado de mar, separando por cuadrante, no logra el objetivo ya que solo permite clasificar aquellos eventos donde la mayor parte de la energía está asociada a una cierta dirección, combinando fuentes de generación. Tampoco es considerar que el mayor de los valores obtenidos en el sitio luego de la propagación por cuadrante va por el lado de la seguridad, ya que, como se encontró en el análisis, la mayoría de los casos presentó valores menores a los estimados en el sitio.

Resultados similares a estos se encuentran en el trabajo de Cárdenas, Gómez y Serrano (2014) donde analizan un modelo validado con mediciones in situ en Laguna Verde, Valparaíso, y cuyas características geográficas son similares a las del sitio B de este estudio. Allí se concluye que la alternativa propuesta por SHOA es conservadora mientras que la separación por cuadrante presenta resultados similares a los obtenidos en el sitio. Sin embargo, los restantes casos analizados en la batimetría ficticia propuesta dan cuenta que la evaluación en el sitio a partir de información en aguas profundas por cuadrante presenta variabilidades similares a la que considera la metodología SHOA.

Estos resultados permiten observar que la metodología de análisis de eventos extremos en aguas profundas y posterior propagación al sitio de interés no necesariamente apunta hacia el resguardo, ya que se observaron también casos en los que la altura de diseño fue subestimada. Esta condición, junto con una mayor disponibilidad de información estadística y la ocurrencia de eventos extremos como los del 3 de julio de 2013 y 8 de agosto de 2015 en la costa chilena, sugieren la necesidad de una actualización en la estimación del periodo de retorno que tiene la altura de diseño de las obras marítimas existentes, ya que un caso en el que se haya subestimado los valores de diseño implica una vulnerabilidad mayor de la obra, y por ende la posibilidad cierta de afrontar daños en un horizonte temporal menor al previsto.

Las dificultades asociadas a la implementación de una metodología de transferencia espectral que permita obtener las series de tiempos de espectro en el sitio de interés radican en la necesidad de información espectral de aguas profundas, software de propagación de oleaje, capacidad de cómputo y una metodología adecuada. Si bien estos elementos fueron privativos en hasta hace algunas décadas, el avance tecnológico y el desarrollo de ingeniería nacional permiten superar estas dificultades. En cuanto a la metodología, estas han sido desarrolladas por Monsalve (2010), Nicolau del Roure (2004) y Domínguez (2011), mientras que la información espectral se encuentra más asequible al igual que los softwares y la capacidad de cómputo.

Finalmente, considerando que los proyectos usualmente se desarrollan en zonas con algún nivel de abrigo, y que el oleaje en Chile es principalmente multimodal, se recomienda no utilizar la metodología de análisis de valores extremos en aguas profundas y posterior propagación, sino que transferir espectralmente toda la información disponible al sitio y allí realizar la evaluación de eventos extremos. Así mismo, resulta necesario propiciar un cambio en la práctica ingenieril y en los instrumentos empleados por parte de los organismos técnicos correspondientes, con el objeto de realizar diseños precisos y con ello disminuir la vulnerabilidad de la infraestructura marítima costera.

## 8. CONCLUSIONES

La aplicación del caso de estudio para comparar la selección de eventos extremos de oleaje en aguas profundas y en cada sitio de interés luego de una transferencia espectral de toda la estadística, permite observar diferencias sustanciales, donde se presentan casos en los que un evento que es extremo en aguas profundas no lo es en un sitio de estudio y viceversa. Esto es atribuible a la condición multimodal del oleaje en Chile.

Las metodologías propuesta por SHOA en la publicación 3201 para la determinación de valores de diseño asociados a periodos de retorno a partir de selección de eventos extremos en aguas profundas presenta diferencias importantes en los resultados con la metodología de selección en el sitio luego de una transferencia espectral completa de la serie de tiempo, tanto en la selección total como en la por cuadrante, presentando tanto sobre estimaciones como subestimaciones, dependiendo de la configuración de la costa.

Se recomienda no emplear la metodología propuesta por SHOA en la publicación 3201 para la determinación de los valores de diseño de obras marítimas, así como revisar dicho instrumento y otros que sean empleados por los organismos técnicos para la revisión de estudios de oleaje, promoviendo el uso de análisis de valores extremos en el sitio luego de transferir espectralmente toda la información de aguas profundas.

## 9. AGRADECIMIENTOS

Se agradece al equipo del proyecto FONDEF Un atlas de oleaje para Chile de la Escuela de Ingeniería Civil Oceánica de la Universidad de Valparaíso por facilitar los datos necesarios para el presente trabajo, en especial a Marco Álvarez y José Beyá.

## 10. REFERENCIAS

Cárdenas C., J. Gómez, J. Serrano, 2014, Determinación de valores extremos de oleaje: a partir del análisis en aguas profundas y del análisis en aguas someras. VI Seminario Internacional de Ingeniería y Operación Portuaria.

Domínguez, J. 2011. Analysis of spectral wave energy, transfer methodologies from Deep to shallow wáter. Thesis for the degree of Master of Science in Engineering. Pontificia Universidad Católica de Chile

Hidalgo H., A. Gallardo y J. Beyá. (2015). Calibración del modelo Wavewatch III para las costas de Chile. XXII congreso chileno de ingeniería hidráulica.

Liu, Z. y P. Frigaard. 2001. Generation and analysis of random waves. Instituttet for Vand, Jord og Miljøteknik. Aalborg Universitet

Molina, M. 2011. Estudio no estacionario de clima medio de oleaje en la costa central de Chile. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Oceánico. Universidad de Valparaíso.

Monsalve, E. 2010. Desarrollo e implementación de modelo de transferencia espectral de oleaje en bahía de Valparaíso. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Oceánico. Universidad de Valparaíso.

Nicolau del Roure, F. 2004 Evaluación de metodologías de transferencia de oleaje desde aguas profundas a aguas someras. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile

Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada SHOA 2005, Publicación 3201: Instrucciones oceanográficas N°1: especificaciones técnicas para mediciones y análisis oceanográficos. (rev 30 de agosto de 2016 en [http://www.shoa.cl/datos/descargas/pdf/pub3201\\_3ed-v4\\_2015.pdf](http://www.shoa.cl/datos/descargas/pdf/pub3201_3ed-v4_2015.pdf))

Recomendaciones de Obras Marítimas Españolas ROM 0.2-90. 1990. Acciones en el proyecto de obras marítimas y portuarias.