



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

Memoria del proyecto para optar al Título de  
Ingeniero Civil Oceánico

**“CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO  
WAVEWATCH III V. 4.18, PARA  
SU APLICACIÓN EN LA GENERACIÓN DE UN  
REANÁLISIS DE OLEAJE EN LAS COSTAS DE CHILE”**

**Héctor Renato Hidalgo Luarte**

**Julio 2017**

# **APROBACIÓN**

**Calibración y Validación del Modelo WAVEWATCH III v.4.18, para su Aplicación en la  
Generación de un Reanálisis de Olaje en las Costas de Chile.**

Héctor Renato Hidalgo Luarte

## **COMISIÓN REVISORA**

## **NOTA**

## **FIRMA**

José Beyá Marshall  
Profesor guía

---

---

Catalina Aguirre Galaz  
Docente

---

---

Ariel Gallardo Yáñez  
Ingeniero de proyectos

---

---

## **DECLARACIÓN**

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

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

---

Héctor Hidalgo Luarte  
Alumno

---

José Beyá Marshall  
Profesor guía

## **AGRADECIMIENTOS**

*Finalmente y después de tantos años, quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a todas las personas que me apoyaron a lo largo de esta etapa. En particular:*

*A mi familia, en especial a mis padres. Héctor, quien con su amor, ejemplo y paciencia, supo inculcar en mí el rigor y la perseverancia para alcanzar mis metas y perseguir mis sueños. A mi madre, compañera y consejera, Claudia, quien siempre estuvo ahí, velando por mis sueños, escuchando mis dudas y aconsejándome de la mejor forma, por haberme dado la vida y enseñarme a vivirla, jamás encontraré palabras que me ayuden a agradecer todo lo que me has entregado. A mi hermana, Mariana, quien ha hecho de mi vida un infierno, pero sin duda el infierno más divertido. A todos, les agradezco por el apoyo incondicional y el cariño que me han entregado a lo largo estos años. Este logro se los dedico a ustedes.*

*A mis compañeros de carrera, en especial a: Jaime Roberto Herrera, por el apoyo, las gratas conversaciones y no tan gratas discusiones, por las innumerables noches de estudio y café a la vena. Ariel Gallardo, por los consejos brindados, por las chelas compartidas, por la confianza entregada y por las eternas conversaciones con el pucho en mano. Cesar Esparza, por los consejos entregados y por darme el puntapié inicial para embarcarme en esta travesía. Y a todos los que no están nombrados aquí y que contribuyeron con su tiempo, dedicación y palabras de aliento.*

*A mi profesor guía José Beyá, por la confianza y paciencia entregada y por el apoyo en el desarrollo de este estudio.*

*A mis colegas del equipo “Un Atlas de Oleaje para Chile”, Marco Álvarez y Javier Valdivia, por todos los momentos vivimos en aquel reducido espacio que llamamos laboratorio.*

*A todos los profesores que fueron parte fundamental en mi formación, Marta Ulloa, Adriano Jimenez, Cristian Valderas, Mauricio Molina, Catalina Aguirre, Mario Beale y Álvaro Valdivia.*

*Se agradece el financiamiento entregado por el programa Fondef-IDeA de CONICYT y al equipo del proyecto compuesto por la Dirección de Obras Portuarias, APuerto Ingeniería y la Universidad de Valparaíso a través de la Escuela de Ingeniería Civil Oceánica y el Centro de Investigación y Modelamiento de Fenómenos Aleatorios – Valparaíso, al Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada y al Proyecto Corfo-INNOVA 09CN14-5718 “Catastro del recurso energético asociado a oleaje para el apoyo a la evaluación de proyectos de generación de energía undimotriz”.*

*Héctor Hidalgo Luarte*

*La frase, “la persona se hizo sola” no existe, carece de veracidad. Todos estamos hechos por otras miles de personas. Cada ser que hizo algo bueno por nosotros, o nos dijo algunas palabras de aliento o aprobación, influyó en nuestra personalidad y nuestros hechos. Es por eso que se vuelven parte de cualquier éxito nuestro.*

*George Matthew Adams, Escritor.*

# **CONTENIDO**

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>15</b>
2.1	General.....	15
2.2	Específicos.....	15
<b>3</b>	<b>MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>16</b>
3.1	Definición de Oleaje .....	16
3.2	Descripción Estadística de Oleaje.....	17
3.2.1	Espectro y Parámetros Descriptores .....	19
3.3	Modelos de Generación y Propagación de Oleaje.....	20
3.3.1	Modelos Empíricos.....	20
3.3.2	Modelos de Base Física.....	22
3.3.3	Modelos Heurísticos.....	25
3.4	Ecuación de Balance de Acción de Densidad Espectral de Oleaje .....	26
3.4.1	Términos Fuente de la EBAO .....	28
3.5	Modelo WAVEWATCH III v. 4.18.....	33
3.5.1	Esquemas Numéricos y Parametrizaciones de Procesos Físicos .....	34
3.5.2	Resolución Numérica .....	34
3.5.3	Parametrizaciones Físicas .....	37
<b>4</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>48</b>
4.1	Cluster de Servidores y Compilación del Modelo WAVEWATCH III v. 4.18 .....	48
4.2	Fuentes de Datos .....	50
4.2.1	Conjunto de Datos Batimétricos y Línea de Costa.....	50
4.2.2	Datos de Reanálisis Atmosférico .....	52
4.2.3	Mediciones de Boyas y Altimetros Satelitales .....	54
4.3	Metodología de Calibración y Validación .....	57
4.3.1	Selección de la Resolución y Extensión del Dominio Computacional y Batimétrico.....	59
4.3.2	Selección de Esquemas Físicos .....	61
4.3.3	Selección de Forzantes y Calibración de Esquemas Físicos .....	63

4.3.4	Cuantificación del Desempeño de los Escenarios de Calibración .....	66
4.3.5	Validación del Modelo .....	72
<b>5</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>74</b>
5.1	Selección de la Resolución y Extensión del Dominio Computacional y Batimétrico .....	74
5.2	Selección de Esquemas Físicos .....	77
5.2.1	Desempeño de Escenarios de Simulación .....	77
5.2.2	Resumen de Resultados.....	84
5.3	Selección de Forzantes y Calibración de Esquemas Físicos.....	85
5.3.1	Desempeño de Escenarios de Simulación .....	85
5.3.2	Resumen de Resultados.....	92
5.4	Validación.....	95
5.4.1	Comparación de Resultados con Registros de Oleaje Obtenidos Mediante Boyas .....	95
5.4.2	Comparación de Resultados con Registros Satelitales .....	98
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>100</b>
<b>7</b>	<b>RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....</b>	<b>102</b>
<b>8</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>103</b>
<b>ANEXO A:</b>	<b>Clúster de datos utilizados durante la calibración del modelo WWIII ..</b> .....	<b>107</b>
<b>ANEXO B:</b>	<b>Indicadores Estadísticos Selección de Esquemas y Parametrizaciones Físicas.....</b>	<b>110</b>
<b>ANEXO C:</b>	<b>Indicadores Estadísticos Calibración y Selección de Forzantes ....</b>	<b>116</b>

## **INDICE DE FIGURAS**

<b>Figura 3-1.</b> Clasificación de las desnivelaciones en la superficie libre del océano en función del periodo característico y fuerzas generadoras (Holthuijsen, 2007).....	16
<b>Figura 3-2.</b> Esquema representativo de un estado de mar. A). Descomposición del oleaje en ondas regulares (Pierson et al., 1955) B). Registro de desnivelaciones de 10 minutos, representativos de un estado de mar (Elaboración propia) C). Espectro direccional o bidimensional (Elaboración propia). .....	18
<b>Figura 3-3.</b> Cambio de energía a través de una celda de malla cartesiana definida en el espacio geográfico. Enfoque Euleriano para la derivación de la ecuación de balance de energía espectral de oleaje (Holthuijsen, 2007). .....	23
<b>Figura 3-4.</b> Esquema del funcionamiento de un modelo neuronal basado en GRNN, aplicado al pronóstico de oleaje (Montoya & Osorio, 2007) .....	25
<b>Figura 3-5.</b> Esquemmatización de la interacción ola-corriente (Holthuijsen, 2007).....	27
<b>Figura 3-6.</b> Esquemmatización de la mecánica de la generación de oleaje según Phillips (1957) (Holthuijsen, 2007). .....	29
Figura 3-7. Esquemmatización de la mecánica de la generación de oleaje según Miles (1957) (Holthuijsen, 2007).....	29
<b>Figura 3-8.</b> Esquemmatización de del proceso de rotura de las olas en aguas profundas (whitecapping) (Holthuijsen, 2007). .....	30
<b>Figura 3-9.</b> Esquema ilustrativo de la interacción entre cuádrupletas en aguas profundas. (Holthuijsen, 2007).....	32
<b>Figura 3-10.</b> Esquema cualitativo de la transformación de energía dentro de un espectro JOSWAP, debido a los distintos procesos que afectan el desarrollo del oleaje en aguas profundas (Holthuijsen, 2007).....	32
<b>Figura 4-1.</b> Fuentes de información del conjunto de datos batimétricos ETOPO2v2 (NGDC, 2006).....	51
<b>Figura 4-2.</b> Esquema del funcionamiento de un altímetro de radar (AVISO, 2015) .....	55
<b>Figura 4-3.</b> Esquema de extracción de datos satelitales en un radio cercano a 50 km respecto a una boya de referencia (Elaboración propia).....	56
<b>Figura 4-4.</b> Esquema simplificado de la metodología de calibración empleada .....	58
<b>Figura 4-5.</b> Batimetrías utilizadas para la simulación de los escenarios planteados en la Tabla 4-10, generadas a partir de la base de datos ETOPO2v2 mediante al algoritmo <i>GridGen</i> . A). Test_01. B). Test_02. C). Test_03. D). Test_04 (Elaboración propia).....	60
<b>Figura 4-6.</b> Desfase temporal de la altura máxima simulada y registrada por la boya. Los círculos rojos indican las alturas máximas. El círculo amarillo muestra la altura simulada coincidente en el tiempo con la máxima altura registrada por la boya. ....	68
<b>Figura 4-7.</b> Esquema simplificado de la metodología utilizada para la cuantificación del desempeño de los escenarios de calibración planteados. ....	71
<b>Figura 4-8.</b> Ubicación de las coordenadas de extracción de datos satelitales utilizadas en la validación del modelo WWIII.....	73
<b>Figura 5-1.</b> Gráficos de dispersión, izquierda $Hm0$ , derecha $Tm$ , A) Boya B1 v/s Test-03, B) Boya B5 v/s Test-03, C) Boya B8 v/s Test-03. ....	76
<b>Figura 5-2.</b> Índices de desempeño para distintos tipos de análisis entre los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-13 y la información de B1 y S1. Arriba, desempeño de $Hm0$ . Abajo, desempeño de $Tm$ . .....	77

<b>Figura 5-3.</b> Índices de desempeño para distintos tipos de análisis entre los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-13 y la información de B2 y S2. Arriba, desempeño de $Hm0$ . Abajo, desempeño de $Dm$ .....	78
<b>Figura 5-4.</b> Índices de desempeño para distintos tipos de análisis entre los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-13 y la información de B3 y S3. Arriba, desempeño de $Hm0$ . Centro, desempeño de $Tm$ . Abajo, desempeño de $Dm$ .....	79
<b>Figura 5-5.</b> Índices de desempeño para distintos tipos de análisis entre los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-13 y la información de B5 y S5. Arriba, desempeño de $Hm0$ . Centro, desempeño de $Tm$ . Abajo, desempeño de $Dm$ .....	80
<b>Figura 5-6.</b> Índices de desempeño para distintos tipos de análisis entre los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-13 y la información de B7 y S7. Arriba, desempeño de $Hm0$ . Centro, desempeño de $Tm$ . Abajo, desempeño de $Dm$ .....	81
<b>Figura 5-7.</b> Índices de desempeño para distintos tipos de análisis entre los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-13 y la información de B8 y S8. Arriba, desempeño de $Hm0$ . Centro, desempeño de $Tm$ . Abajo, desempeño de $Dm$ .....	82
<b>Figura 5-8.</b> Índices de desempeño para distintos tipos de análisis entre los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-16 y la información de B1 y S1. Arriba, desempeño de $Hm0$ . Abajo, desempeño de $Tm$ .....	85
<b>Figura 5-9.</b> Índices de desempeño para distintos tipos de análisis entre los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-16 y la información de B2 y S2. Arriba, desempeño de $Hm0$ . Abajo, desempeño de $Dm$ .....	86
<b>Figura 5-10.</b> Índices de desempeño para distintos tipos de análisis entre los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-16 y la información de B3 y S3. Arriba, desempeño de $Hm0$ . Centro, desempeño $Tm$ . Abajo, desempeño de $Dm$ .....	87
<b>Figura 5-11.</b> Índices de desempeño para distintos tipos de análisis entre los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-16 y la información de B5 y S5. Arriba, desempeño de $Hm0$ . Centro, desempeño $Tm$ . Abajo, desempeño de $Dm$ .....	88
<b>Figura 5-12.</b> Índices de desempeño para distintos tipos de análisis entre los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-16 y la información de B7 y S7. Arriba, desempeño de $Hm0$ . Centro, desempeño $Tm$ . Abajo, desempeño de $Dm$ .....	89
<b>Figura 5-13.</b> Índices de desempeño para distintos tipos de análisis entre los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-16 y la información de B8 y S8. Arriba, desempeño de $Hm0$ . Centro, desempeño $Tm$ . Abajo, desempeño de $Dm$ .....	90
<b>Figura 5-14.</b> Comparación de forma de espectros registrados por la boya B5 (Izquierda) con espectros obtenidos a partir del Test-11 (Derecha). Arriba, espectros integrados en el dominio de la frecuencia. Abajo, espectros integrados en el dominio de la dirección.....	96
<b>Figura 5-15.</b> Gráficos de desempeño del Test-11, en la representación del espectro de oleaje, comparación con espectros registrados por la boya B5. Arriba, gráficos en el dominio de la frecuencia y la dirección de $RMSE$ promediado en el tiempo gráfico 2DH (Izquierda) y gráfico 3D (Derecha). Abajo, gráficos de sesgo de los espectros en el tiempo, espectros integrados en el dominio de la frecuencia (Izquierda) y espectros integrados en el dominio de la dirección (Derecha).....	97
<b>Figura 5-16.</b> Resumen de indicadores estadísticos obtenidos a partir de la comparación de alturas $Hm0$ de altímetros satélites en las coordenadas expuestas en la Tabla 4-21 con alturas obtenidas del escenario Test-11. A). Indicador estadístico $R2$ , B). Indicador estadístico $BIAS$ , C). Indicador estadístico $MAE$ y D). Indicador estadístico $RMSE$ .....	99

## **INDICE DE TABLAS**

<b>Tabla 3-1.</b> Parámetros espectrales utilizados para caracterizar un estado de mar (adaptado de UNICAN, 2000).....	19
<b>Tabla 3-2.</b> Parámetros adimensionales de las expresiones propuestas por Breugem y Holthuijsen (2007) para oleaje en desarrollo a profundidades arbitrarias. ....	21
<b>Tabla 3-3.</b> Características y ejemplos entre distintas clasificaciones de modelos de generación y propagación de oleaje de base física, basados en la ecuación de balance de energía espectral de oleaje (adaptado de Lizano et. al, 2001).....	24
<b>Tabla 3-4.</b> Importancia relativa de los procesos que afectan la evolución del oleaje, adaptado de Battjes (1994) (Holthuijsen, 2007). ....	27
<b>Tabla 3-5.</b> Esquemas numéricos disponibles en el modelo WWIII (Tolman H., 2014) .....	35
<b>Tabla 3-6.</b> Técnicas de alivio del Efecto Garden Sprinkler (GSE). Incorporadas en el modelo WWIII (Tolman H., 2014). ....	36
<b>Tabla 3-7.</b> Parametrizaciones de procesos físicos disponibles en WWIII. ....	37
<b>Tabla 3-8.</b> Valores de los parámetros empíricos adimensionales del término <i>Sin</i> del paquete ST3 (Tolman H., 2014). ....	40
<b>Tabla 3-9.</b> Valores de los parámetros empíricos adimensionales del término <i>Sds</i> del paquete ST3 (Tolman H., 2014). ....	40
<b>Tabla 3-10.</b> Valores de los parámetros empíricos adimensionales del término <i>Sin</i> del paquete ST4 (Tolman H., 2014). ....	42
<b>Tabla 3-11.</b> Valores de los parámetros empíricos adimensionales del término <i>Sds</i> del paquete ST4 (Tolman H., 2014). ....	43
<b>Tabla 3-12.</b> Valores de los parámetros empíricos adimensionales del término <i>Sds</i> del paquete ST6, T representa la activación del umbral de normalización del espectro (Tolman H., 2014). ....	44
<b>Tabla 3-13.</b> Valores de los parámetros empíricos adimensionales del término <i>Snl</i> del Switch DIA (Tolman H., 2014). ....	45
<b>Tabla 4-1.</b> Características del clúster de servidores del CIMFAV y la Escuela de Ingeniería Civil Oceánica – UV. ....	48
<b>Tabla 4-2.</b> Resumen de parametrizaciones contenidos en el Switch_lfremer1. ....	49
<b>Tabla 4-3.</b> Detalle de fuentes de información del conjunto de datos batimétricos ETOPO2v2 (NGDC, 2006).....	51
<b>Tabla 4-4.</b> Niveles de resolución de la base de datos GSHHG .....	51
<b>Tabla 4-5.</b> Resumen comparativo de bases de datos de reanálisis disponibles.....	53
<b>Tabla 4-6.</b> Boyas disponibles utilizadas en la calibración y validación de la base de datos generada con modelo WWIII .....	54
<b>Tabla 4-7.</b> Detalle de información registrada por las boyas utilizadas en la calibración y validación de la base de datos generada con modelo WWIII .....	54
<b>Tabla 4-8.</b> Detalle de los datos históricos de alturas de ola obtenidas a partir de altimetría satelital, distribuidos por el proyecto ESA-Globwave. ....	56
<b>Tabla 4-9.</b> Periodos de simulación utilizados para calibrar el modelo WWIII v.4.18 .....	57
<b>Tabla 4-10.</b> Escenarios planteados para la selección de la resolución y extensión del dominio computacional que será utilizado durante el trabajo.....	59
<b>Tabla 4-11.</b> Pasos de tiempo del modelo WWIII v.4.18, empleados en los escenarios planteados en la Tabla 4-10 .....	61
<b>Tabla 4-12.</b> Configuración y forzantes base utilizadas en el modelo WWIII v.4.18 para los escenarios planteados en la Tabla 4-10.....	61

<b>Tabla 4-13.</b> Escenarios de simulación planteados para la selección de paquetes y parametrizaciones físicas en la calibración del modelo WWIII v.4.18 .....	62
<b>Tabla 4-14.</b> Factores de importancia relativa utilizados en la metodología de cuantificación de desempeño de los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-13 .....	62
<b>Tabla 4-15.</b> Información utilizada para contrastar los resultados de los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-13. ....	63
<b>Tabla 4-16.</b> Escenarios de simulación planteados para la selección de forzantes y calibración parametrizaciones físicas y coeficientes adimensionales del modelo WWIII v.4.18 .....	64
<b>Tabla 4-17.</b> Factores de importancia relativa utilizados en la metodología de cuantificación de desempeño de los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-16. ....	65
<b>Tabla 4-18.</b> Información utilizada para contrastar los resultados de los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-16 .....	66
<b>Tabla 4-19.</b> Indicadores estadísticos utilizados. $P_i$ y $O_i$ corresponden a los datos modelados y observados en el instante $i$ respectivamente, mientras que $N$ es la cantidad de datos coincidentes y comparables en ambas series .....	67
<b>Tabla 4-20.</b> Indicadores de estadística circular para la evaluación del desempeño en la selección de esquemas físicos y calibración del modelo (Zar, 1998). $P_i$ y $O_i$ corresponden a los datos modelados y observados en el instante $i$ respectivamente, mientras que $N$ es la cantidad de datos de ambas series. ....	67
<b>Tabla 4-21.</b> Coordenadas de extracción de datos satelitales utilizadas para la validación del modelo WWIII. ....	72
<b>Tabla 5-1.</b> Indicadores estadísticos boyas B1, B5 y B8 v/s escenarios planteados en la Tabla 4-10.....	74
<b>Tabla 5-2.</b> Promedio de indicadores estadísticos de los escenarios planteados en la Tabla 4-10.....	74
<b>Tabla 5-3.</b> Tiempos de cálculo por año de simulación, escenarios planteados en la Tabla 4-10.....	75
<b>Tabla 5-4.</b> Resumen de índices de desempeño de los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-13.....	84
<b>Tabla 5-5.</b> Resumen de índices de desempeño de los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-16.....	93
<b>Tabla 5-6.</b> Ranking de desempeño de escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-16.....	94
<b>Tabla 5-7.</b> Resumen de indicadores estadísticos resultantes de la comparación de los datos registrados por la boyas expuestas en la Tabla 4-6, con los datos generados a partir del Test-11.....	96
<b>Tabla A-1.</b> Clúster de datos obtenidos de la boya B1 .....	107
<b>Tabla A-2.</b> Datos representativos de los clúster de datos obtenidos de la boya B2 .....	107
<b>Tabla A-3.</b> Datos representativos de los clúster de datos obtenidos de la boya B3 .....	108
<b>Tabla A-4.</b> Datos representativos de los clúster de datos obtenidos de la boya B5 .....	108
<b>Tabla A-5.</b> Datos representativos de los clúster de datos obtenidos de la boya B7 .....	109
<b>Tabla A-6.</b> Datos representativos de los clúster de datos obtenidos de la boya B8 .....	109
<b>Tabla B-1.</b> Indicadores estadísticos obtenidos al comparar los resultados de las simulaciones planteadas en la Tabla 4-13 con los registros de B1 y S1.....	110
<b>Tabla B-2.</b> Indicadores estadísticos obtenidos al comparar los resultados de las simulaciones planteadas en la Tabla 4-13 con los registros de B2 y S2.....	111
<b>Tabla B-3.</b> Indicadores estadísticos obtenidos al comparar los resultados de las simulaciones planteadas en la Tabla 4-13 con los registros de B3 y S3.....	112

<b>Tabla B-4.</b> Indicadores estadísticos obtenidos al comparar los resultados de las simulaciones planteadas en la Tabla 4-13 con los registros de B5 y S5.....	113
<b>Tabla B-5.</b> Indicadores estadísticos obtenidos al comparar los resultados de las simulaciones planteadas en la Tabla 4-13 con los registros de B7 y S7.....	114
<b>Tabla B-6.</b> Indicadores estadísticos obtenidos al comparar los resultados de las simulaciones planteadas en la Tabla 4-13 con los registros de B8 y S8.....	115
<b>Tabla C-1.</b> Indicadores estadísticos obtenidos al comparar los resultados de las simulaciones planteadas en la Tabla 4-16 con los registros de B1 y S1.....	116
<b>Tabla C-2.</b> Indicadores estadísticos obtenidos al comparar los resultados de las simulaciones planteadas en la Tabla 4-16 con los registros de B2 y S2.....	117
<b>Tabla C-3.</b> Indicadores estadísticos obtenidos al comparar los resultados de las simulaciones planteadas en la Tabla 4-16 con los registros de B3 y S3.....	118
<b>Tabla C-4.</b> Indicadores estadísticos obtenidos al comparar los resultados de las simulaciones planteadas en la Tabla 4-16 con los registros de B5 y S5.....	119
<b>Tabla C-5.</b> Indicadores estadísticos obtenidos al comparar los resultados de las simulaciones planteadas en la Tabla 4-16 con los registros de B7 y S7.....	120
<b>Tabla C-6.</b> Indicadores estadísticos obtenidos al comparar los resultados de las simulaciones planteadas en la Tabla 4-16 con los registros de B8 y S8.....	121

## **RESUMEN**

El presente documento, expone el proceso de calibración y validación del modelo WAVEWATCH III V. 4.18, para su aplicación en la generación de un reanálisis de oleaje de a lo menos 20 años para las costas de Chile. Este trabajo fue realizado en el marco del proyecto Fondef-IDeA IT3I20006 “Un Atlas de Oleaje para Chile”, llevado a cabo por la escuela de Ingeniería Civil Oceánica de la Universidad de Valparaíso en colaboración con la Dirección de Obras Portuarias del Ministerio de Obras Públicas, Apuerto ingeniería y el Centro de Investigación y Modelamiento de Fenómenos Aleatorios - Valparaíso.

La calibración del modelo fue abordada en tres etapas. La primera consistió en la determinación de la configuración de la malla computacional y batimétrica, cuyos resultados fueran consistentes con las observaciones de instrumentos de medición in-situ y los tiempos de cálculo asociados ella fuesen relativamente bajos. La segunda, en la selección de las parametrizaciones de los procesos físicos contenidos en la ecuación de balance de acción de densidad espectral de oleaje, que permitan representar de mejor manera las condiciones de generación y propagación de oleaje hacia las costas de Chile. Finalmente la tercera etapa abordó la modificación de algunos de los parámetros adimensionales de los procesos físicos más relevantes en aguas profundas y que controlan el crecimiento y disipación de la energía debido a la interacción con el viento.

Para comparar los resultados de los escenarios de simulación planteados, se utilizaron 8 boyas distribuidas a lo largo de la costa chilena e información satelital proveniente de 6 misiones. Se planteó una metodología de evaluación del desempeño de los escenarios de simulación cuyo objetivo es la determinación de un único valor, el cual permite estimar la calidad de los datos simulados. Este valor fue denominado “Índice de Desempeño Unitario”, y consiste en una combinación lineal de indicadores estadísticos normalizados sobre la base de un análisis multicriterio, que tiene como objetivo establecer factores de importancia relativa a cada estadígrafo, tipo de análisis y parámetros de oleaje.

Los resultados de la primera etapa de calibración, indican que la configuración óptima de la malla batimétrica se encuentra acotada entre las latitudes 65° sur y 65° norte y por las latitudes 110° Este y 60° Oeste y con una resolución de 1° en ambos sentidos. De esta forma, es posible contar con resultados consistentes con las observaciones en tiempos de cálculo cercanos a las 2.2 horas por año de simulación.

Los resultados de la segunda dejan en evidencia que la combinación de parametrizaciones físicas que permiten obtener resultados con mejores ajustes a los datos instrumentales, corresponde a los contenidos en el Switch de compilación “Switch\_lfremmer1” (Test-11). Éste se encuentra contenido en el paquete de instalación del modelo WAVEWATCH III v.4.18 y considera el método DIA para la cálculo de las interacciones no lineales en aguas profundas, junto con el esquema de crecimiento y disipación de energía del oleaje ST4. Este último fue empleado por el lfremmer en la generación de la base de datos de reanálisis de oleaje global del proyecto IOWAGA.

De la última etapa de calibración se concluyó que el modelo forzando con información de la base de datos de reanálisis atmosférico ERA-Interim, genera resultados que representan de mejor desempeño en la descripción del clima medio de oleaje en Chile. De esta misma

etapa, y tras el ajuste de coeficientes en algunas de las parametrizaciones físicas contenidas en el `Switch_lfremer1`, se concluyó que la configuración de coeficientes por defecto de cada parametrización física, genera resultados que presentan un mejor ajuste y errores más bajos respecto a la información instrumental.

Finalmente, la base de datos generada con la configuración del modelo, obtenida luego del proceso de calibración presentó coeficientes de determinación  $R^2$  de 0.86 con errores medios cuadráticos de 0.27 metros en relación a la altura  $H_{m0}$  para una boya ubicada al norte de Chile. El desempeño más bajo observado, se presenta en una boya ubicada frente a Valparaíso, donde se observaron errores  $RMSE$  de 0.43 metros y  $R^2$  de 0.73. Respecto a los periodos  $T_m$ , se obtuvieron errores  $RMSE$  inferiores a los 3 segundos. Mientras que para las direcciones medias, se observaron coeficientes  $R^2$  superiores a 0.5, alcanzando un máximo de 0.79.

# 1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la información de oleaje en Chile es escasa y de calidad desconocida. No existe un documento oficial y público que describa cuantitativamente y en detalle el clima de oleaje frente a las costas del país. Existen estudios puntuales que mencionan algunos aspectos generales (Monárdez et al., 2008 ; Scott et al., 2002) y otros que lo describen de manera global (Cruz et al., 2009 ; Molina, 2011 ; CEPAL, 2012).

La normativa vigente en Chile (SHOA, 2005) establece que todo estudio de oleaje requiere de una base de datos de largo plazo de información espectral que permita conocer de forma completa y detallada el clima de olas en una región. Esta información puede ser obtenida a partir de dispositivos de medición directa (boyas, ADCP<sup>1</sup>, entre otros), medición indirecta (altimetría satelital) y bases de datos de oleaje reanalizado (de libre acceso y privadas).

En Chile, las mediciones de oleaje directas en aguas profundas son en su mayoría elaboradas y administradas por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA), quienes tienen disponibles para uso público registros de mediciones de oleaje con boyas de corta duración y localizadas mayoritariamente frente a las costas de Valparaíso. Existen otras mediciones localizadas y de corta duración llevadas a cabo por puertos, universidades y otras instituciones que corresponden a monitoreos puntuales realizados para proyectos específicos (Ossandón, 2014 ; Gallardo, 2015 ; Lucero, 2015).

Dada la inexistencia de una base de datos de oleaje completa de mediciones, es que en la práctica se aplican modelos matemáticos de tercera generación para poder caracterizar el clima de oleaje. Estos modelos resuelven la física del proceso de generación de oleaje por viento mediante una ecuación en derivadas parciales de advección conocida como “ecuación de balance de acción de densidad espectral de oleaje” (Gelci et al., 1957).

Centros de investigación internacionales (NOAA<sup>2</sup>, ECMFW<sup>3</sup>, Ifremer<sup>4</sup>, IH-Cantabria, entre otros) y empresas privadas (Baird and Associates, Fugro-Oceanor) han puesto sus esfuerzos en generar bases de datos de oleaje de amplia extensión temporal y espacial. Los organismos privados a diferencia de los centros de investigación proveen de bases de datos espectrales de uso restringido y a un alto costo. Los centros de investigación, por otra parte, ponen a libre disposición las bases de datos, aunque solamente la información de algunos parámetros estadísticos de oleaje y no los espectros completos.

El presente trabajo se enmarca en el proyecto Fondef-IDeA IT13I20006 “Un Atlas de Oleaje para Chile”, que pondrá a libre disposición información cuantitativa sobre el clima de oleaje en Chile. Para esto, se generará una base de datos de oleaje espectral con el modelo WAVEWATCH III v.4.18 (WWIII). El presente trabajo expone la calibración y validación del modelo WWIII para las costas de Chile. Los resultados de las simulaciones son comparados con datos provenientes de dispositivos de medición in-situ y dispositivos de teledetección.

---

<sup>1</sup>Acoustic Doppler Current Profiler

<sup>2</sup>National Oceanic and Atmospheric Administration - <http://www.noaa.gov/>

<sup>3</sup>European Center for Medium-Range Weather Forecast - <http://www.ecmwf.int/>

<sup>4</sup>Instituto Francés de Investigación para la Explotación del Mar - <http://wwz.ifremer.fr/>

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 GENERAL**

Calibrar y validar el modelo numérico de base física de tercera generación WAVEWATCH III v. 4.18 para las costas de Chile continental e insular, con el objetivo de generar una base de datos de a lo menos 20 años de oleaje espectral.

### **2.2 ESPECÍFICOS**

- Determinar la extensión y resolución del dominio computacional y batimétrico, mediante la evaluación el desempeño de las simulaciones en relación a mediciones instrumentales y la comparación de los tiempos de cálculo obtenidos.
- Determinar la combinación de parametrizaciones físicas del modelo, que permitan representar de mejor forma las condiciones de generación y propagación de oleaje desde en la cuenca del Océano Pacífico hacia la costa chilena.
- Determinar la fuente de datos de reanálisis atmosférico que se utilizará para forzar el modelo y ajustar algunas de las parametrizaciones físicas más relevantes que intervienen en el proceso de generación de oleaje, para mejorar los resultados de las simulaciones.
- Establecer una metodología de cuantificación del desempeño de los escenarios de calibración en relación a datos instrumentales.
- Validar la base de datos generada en las costas de Chile continental e insular, mediante la comparación de resultados del modelo calibrado con registros provenientes de dispositivos de medición in-situ y de teledetección.

### 3 MARCO TEÓRICO

#### 3.1 DEFINICIÓN DE OLEAJE

Existen distintos tipos de ondas que conforman el movimiento vertical de la superficie libre del océano. Estas ondas pueden ser clasificadas en función de su periodo característico y fuerzas generadoras. En la Figura 3-1 se presenta la clasificación propuesta por Munk (1950) para los tipos de ondas en el océano. Según esta clasificación, el oleaje corresponde al grupo “*Ordinary Gravity Waves*”, conformado por ondas de gravedad producidas en la superficie libre del mar por perturbaciones de pequeña escala de la presión atmosférica y por la tensión del viento sobre la superficie, con periodos de onda entre los 1s y 30s.

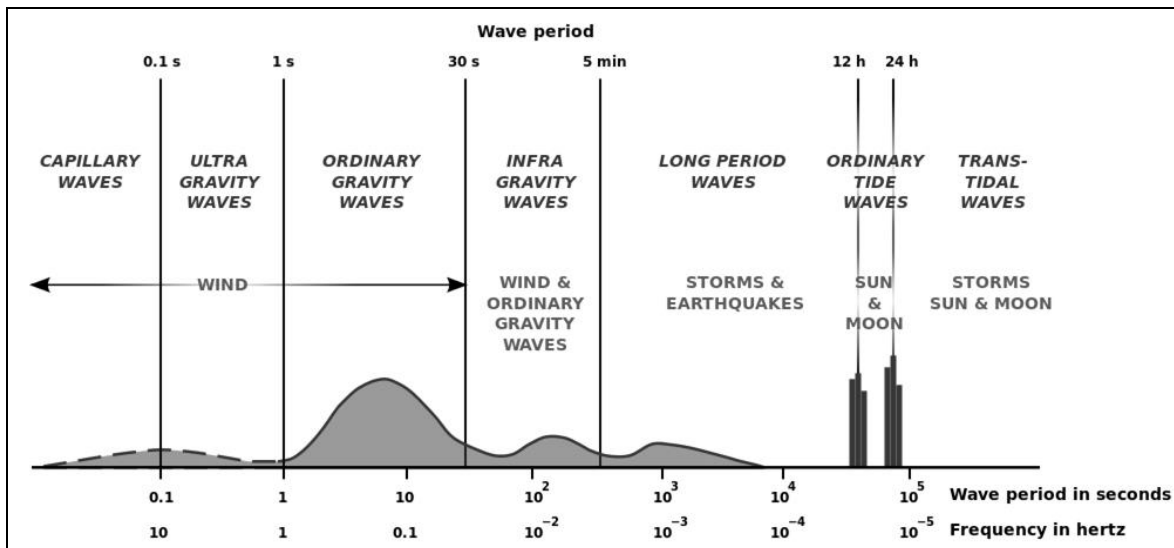


Figura 3-1. Clasificación de las desnivelaciones en la superficie libre del océano en función del periodo característico y fuerzas generadoras (Holthuijsen, 2007).

El crecimiento del oleaje se encuentra limitado por la acción del viento soplando sobre una superficie limitada, al cabo de un determinado periodo de tiempo el oleaje alcanza un estado de equilibrio, en el que la energía que aporta el viento es completamente disipada en procesos de rotura y transferida por interacciones entre ondas, alcanzando un estado de máxima energía, esta condición se denomina *oleaje totalmente desarrollado*. El desarrollo total del oleaje queda condicionado por un tiempo mínimo y una distancia mínima en la que el viento interactúa con la superficie del océano. Si alguna de esas condiciones no se cumple, el oleaje se encontrará limitado en su crecimiento. Esta condición se denomina *oleaje parcialmente desarrollado* (UNICAN, 2000).

Las ondas generadas en el océano debido a la acción del viento cambian aleatoriamente con el tiempo. En la zona de generación el oleaje es relativamente caótico, con ondas irregulares de cresta corta y con direcciones de propagación variables en relación a la dirección del viento generador. Esta condición se denomina *Mar de Viento* u *oleaje tipo SEA*. Cuando las olas se alejan de la zona de generación los procesos de dispersión y disipación regularizan la superficie del mar, de esta forma las componentes de mayor periodo se separan de las de menor periodo produciéndose una dispersión radial en el

sentido de la propagación. Por otra parte, las ondas que salen de la zona de generación lo hacen con distintas direcciones alrededor de la dirección predominante, produciéndose una dispersión angular. Este oleaje que abandona la zona de generación presenta olas de crestas más largas con periodos mayores y es denominado *Mar de Fondo* u *Oleaje tipo SWELL* (Silva, 2005 & UNICAN, 2000).

### 3.2 DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA DE OLEAJE

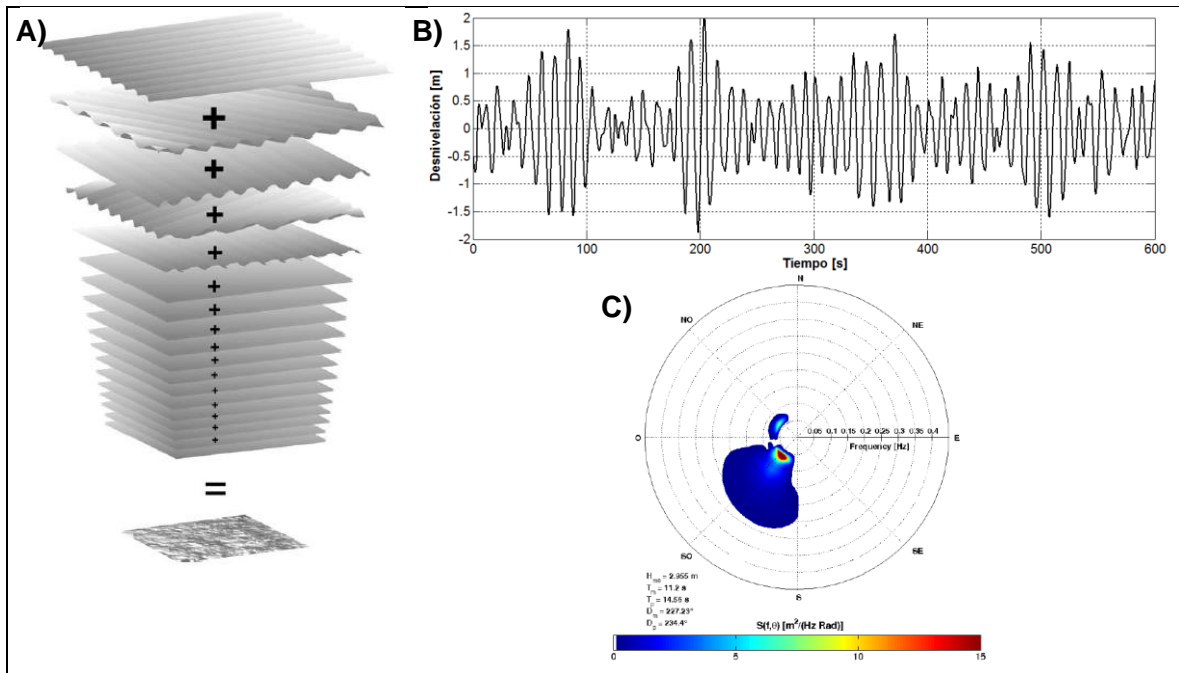
El oleaje es un proceso esencialmente aleatorio que puede ser considerado como un conjunto de ondas que viajan en distintas direcciones con distintas amplitudes y frecuencias. De esta forma, el oleaje puede ser estudiado como una superposición simple de ondas regulares como se describe en la ecuación [1]:

$$\eta(x, y, t) = \sum_{i=1}^n a_i \cos \left[ \frac{\sigma_i^2}{g} (x \cos \theta_i + y \sin \theta_i - \sigma_i t + \varepsilon_i) \right] \quad [1]$$

Donde  $a$  es la amplitud de la onda,  $\sigma$  la frecuencia angular ( $2\pi/T$ ),  $T$  el periodo de la onda,  $\theta$  el ángulo de incidencia con respecto al eje  $X$ ,  $\varepsilon$  la fase,  $x, y$  la posición espacial de la onda,  $t$  el tiempo y  $n$  son todas las posibles componente de onda en un punto.

En la Figura 3-2 A), se presenta una conceptualización de la superposición de ondas de distinta amplitud, dirección y frecuencia. Evaluar las propiedades del oleaje mediante un análisis ola-ola en el dominio del tiempo resulta altamente complejo. Sin embargo, al ser el oleaje un proceso aleatorio, este puede ser considerado como un proceso estocástico que cumple con los principios de ergodicidad y estacionariedad, por lo que es posible evaluar sus propiedades estadísticas en los dominios de la frecuencia y la probabilidad.

La primera referencia al oleaje como un proceso estadístico se debe al trabajo de Rudnick (1951), en el que tras un análisis de datos de oleaje medidos en el océano Pacífico, expone que el oleaje corresponde a un proceso estocástico gaussiano que depende de la magnitud del oleaje y la profundidad. Estudios posteriores determinaron que la normalidad del proceso disminuye al aumentar la amplitud de las ondas en profundidades reducidas.



**Figura 3-2.** Esquema representativo de un estado de mar. A). Descomposición del oleaje en ondas regulares (Pierson et al., 1955) B). Registro de desnivelaciones de 10 minutos, representativos de un estado de mar (Elaboración propia) C). Espectro direccional o bidimensional (Elaboración propia).

A partir de lo anterior, se define el concepto de estado de mar. Según Silva (2005), “*un estado de mar se define como aquella situación o periodo de tiempo en que, y debido a la inercia del fenómeno, se considera que existen un cierto equilibrio entre las fuerzas generadoras y restauradoras que invirtieren, lo cual produce que su manifestación permanezca en estado estacionario*”.

Es por esto que en la práctica usualmente se registran desnivelaciones en el océano durante periodos de tiempo lo suficientemente cortos para admitir la hipótesis de estacionariedad y lo suficientemente largos para que la muestra contenga un número suficiente de datos para analizar. Los indicadores estadísticos obtenidos a partir del análisis de los registros obtenidos durante estos periodos de tiempo son representativos de ventanas de tiempo de entre 1 y 3 horas (Silva, 2005).

Para la representación y análisis de una señal, existen dos formas actualmente adoptadas, siendo estas el análisis en el dominio del tiempo Figura 3-2 B) y la frecuencia Figura 3-2 C). La primera considera las propiedades estadísticas, parámetros y distribuciones de  $\eta(t)$ , directamente de la serie de tiempo. La segunda trata sobre la representación de la distribución de la energía del oleaje en función de las frecuencias que integran la señal, mediante una función de densidad espectral o espectro de oleaje.

### 3.2.1 ESPECTRO Y PARÁMETROS DESCRIPTORES

La energía total del oleaje se representa mediante la función de densidad espectral del desplazamiento vertical de la superficie del océano, o espectro de oleaje  $E(f, \theta)$ . El espectro de oleaje permite determinar la distribución de la energía en las componentes de distintas frecuencias y direcciones. Contiene información completa de un estado de mar la cual puede ser descrita mediante una serie de parámetros descriptores. En la Tabla 3-1 se presentan algunos de los parámetros espectrales utilizados para caracterizar un estado de mar.

**Tabla 3-1.** Parámetros espectrales utilizados para caracterizar un estado de mar (adaptado de UNICAN, 2000).

Parámetros Espectrales	Expresión
Momento de orden "n" [ $m_n$ ]	$m_n = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} f^n S(f, \theta) df d\theta$
Altura de ola del momento de orden cero [ $H_{m0}$ ]	$H_{m0} = 4\sqrt{m_0}$
Periodo medio [ $T_{m01}$ ]	$T_{m01} = m_0/m_1$
Periodo medio equivalente al periodo medio de cruces por cero [ $T_{m02} \approx T_z$ ]	$T_{m02} = \sqrt{m_0/m_2}$
Periodo energético [ $T_{m-10}$ ]	$T_{m-10} = m_{-1}/m_0$
Frecuencia peak [ $f_p$ ]	Frecuencia correspondiente al peak de energía en el espectro de frecuencias
Periodo peak [ $T_p$ ]	$T_p = 1/f_p$
Dirección media [ $D_m$ ]	$D_m = \text{atan} \frac{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} \text{sen}(\theta) S(f, \theta) df d\theta}{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} \text{cos}(\theta) S(f, \theta) df d\theta}$
Dirección peak [ $D_p$ ]	Dirección media del bin de frecuencia del espectro bidireccional que contiene a la frecuencia peak

### 3.3 MODELOS DE GENERACIÓN Y PROPAGACIÓN DE OLAJE

Los primeros estudios referidos a la generación de oleaje debido a la interacción entre la superficie libre del océano y el viento datan de la década del 1880, con los trabajos de Kelvin (1887) y Helmholtz (1888) (USACE, 2008). Sin embargo no fue hasta la segunda guerra mundial en el que el pronóstico del oleaje comenzó a cobrar real importancia. Uno de los primeros pronósticos en este campo fue realizado por Sverdrup & Munk (1947), quienes mediante el análisis dimensional y la observación de vientos y olas, lograron relacionar la altura y el periodo de ola significativa ( $H_s$  y  $T_s$ ) con la intensidad, la duración y la longitud que el viento transmite su energía al océano (*Fetch*) con el desarrollo del oleaje (Holthuijsen, 2007). Existen diversos tipos de modelos de generación de oleaje, según Montoya y Osorio (2007) estos se clasifican en modelos empíricos, de base física y heurísticos.

#### 3.3.1 MODELOS EMPÍRICOS

Los modelos empíricos parten de la base que el viento constituye el principal agente que interviene en la formación del oleaje. La intensidad de este último depende de la velocidad del viento en la superficie (usualmente a 10m,  $U_{10}$ ), la duración del temporal  $d$ , el Fetch  $F$  y la profundidad del cuerpo de agua  $h$  (UNICAN, 2000). Estos modelos funcionan bajo condiciones idealizadas, pues consideran una única ola que se propaga a profundidad constante bajo una condición de viento estacionario y uniforme.

Como se mencionó en el capítulo 3.1, el desarrollo del oleaje se encuentra condicionado por la duración y distancia mínima en la cual el viento transfiere su energía. Para oleaje completamente desarrollado en aguas profundas, Pierson y Moskowitz (1964) presentan las siguientes expresiones para determinar la altura [2] y periodo [3] adimensional:

$$\tilde{H}_s = \frac{gH_s}{U_{10}^2} = 0.24 \quad [2]$$

$$\tilde{T}_p = \frac{gT_p}{U_{10}^2} = 7.69 \quad [3]$$

Adicionalmente obtuvieron una expresión para el espectro de frecuencias bajo la condición de oleaje completamente desarrollado, denominado espectro de Pierson-Moskowitz [4].

$$E_{PM}(f) = \alpha_{PM} g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} \exp \left[ -\frac{5}{4} \left( \frac{f}{f_{PM}} \right)^{-4} \right] \quad [4]$$

Donde  $\alpha_{PM} = 0.0081$  y  $f_{PM}$  es la frecuencia peak del espectro, obtenida a partir de [3]. Para oleaje en desarrollo a profundidades arbitrarias las expresiones [2] y [3] fueron extendidas por Sverdrup, Munk y Bretschneider el año 1970, obteniendo así el denominado método SMB. Posteriormente este método fue modificado por Breugem y Holthuijsen (2007), obteniendo así las siguientes expresiones

$$\tilde{H}_{sh} = \tilde{H}_s \left[ \tanh(k_3 \bar{h}^{m_3}) \tanh\left(\frac{k_1 \bar{F}^{m_1}}{\tanh(k_3 \bar{h}^{m_3})}\right) \right]^p \quad [5]$$

$$\tilde{T}_{ph} = \tilde{T}_p \left[ \tanh(k_4 \bar{h}^{m_4}) \tanh\left(\frac{k_2 \bar{F}^{m_2}}{\tanh(k_4 \bar{h}^{m_4})}\right) \right]^q \quad [6]$$

Donde  $\tilde{H}_{sh}$  y  $\tilde{T}_{ph}$  corresponden a la altura y periodo adimensional a profundidades arbitrarias, respectivamente,  $\tilde{H}_s$  y  $\tilde{T}_p$  son la altura y periodo adimensional en aguas profundas,  $\bar{F}$  es el Fetch equivalente [7] y  $\bar{h}$  la profundidad dimensionada [8].

$$\bar{F} = \frac{gF_{eq}}{U_{10}^2} \quad [7]$$

$$\bar{h} = \frac{gh_{eq}}{U_{10}^2} \quad [8]$$

Los valores de los parámetros adimensionales de las expresiones [5] y [6], se presentan en la Tabla 3-2.

**Tabla 3-2.** Parámetros adimensionales de las expresiones propuestas por Breugem y Holthuijsen (2007) para oleaje en desarrollo a profundidades arbitrarias.

$\tilde{H}_{sh}$	$p$	$m_1$	$m_3$	$k_1$	$k_3$
	0.572	0.79	1.14	$4.41 \times 10^{-4}$	0.343
$\tilde{T}_{ph}$	$q$	$m_2$	$m_4$	$k_2$	$k_4$
	0.187	1.45	2.01	$2.77 \times 10^{-7}$	0.1

En el marco de proyecto JONSWAP<sup>5</sup>, Hasselmann y colaboradores (1973), proponen la siguiente expresión [9] para estimar el espectro de frecuencias para el oleaje en desarrollo en aguas profundas

$$E_{JONSWAP}(f) = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_p}\right)^{-4}\right] \gamma \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{f/f_p - 1}{\sigma}\right)^2\right] \quad [9]$$

Donde  $\gamma$  usualmente es 3.3 y  $\sigma$  queda definido según la expresión [10].

$$\alpha = \begin{cases} 0.07 & \text{si } f < f_p \\ 0.09 & \text{si } f \geq f_p \end{cases} \quad [10]$$

Mientras que en aguas poco profundas Bouws y colaboradores (1985), proponen la siguiente expresión para estimar el espectro de frecuencia del oleaje en desarrollo [11].

<sup>5</sup> Joint North Sea Wave Project

$$E_{TMA}(f) = E_{JONSWAP}(f) \frac{(\tanh(kh))^2}{\left(1 + \frac{zkh}{\sinh(2kh)}\right)} \quad [11]$$

Los modelos empíricos presentados, permiten estimar la información del oleaje de forma puntual y local bajo ciertas condiciones idealizadas. En la realidad, el viento que interactúa con el océano es variable en el tiempo y en el espacio, la batimetría es irregular y frentes de oleaje originados en zonas de generación interactúan entre sí, lo que hace que este tipo de modelos sea limitado.

### 3.3.2 MODELOS DE BASE FÍSICA

Los modelos de base física parten de la base que el oleaje es el resultado de la superposición de una gran cantidad de ondas regulares de distinta frecuencia, amplitud y dirección. Estos modelos plantean que toda información relacionada con la oscilación de la superficie del mar, se encuentra contenida en el espectro de varianza energética  $E(\sigma, \theta)$ , el cual distribuye la energía en la frecuencia  $\sigma$  y la dirección  $\theta$  (Holthuijsen, 2007). Cada componente del espectro varía en el espacio  $(x, y)$  y el tiempo  $(t)$ , de esta forma el espectro queda definido de la siguiente manera:

$$E(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta, x, y, t) \quad [12]$$

Estos modelos resuelven para cada componente del espectro, una ecuación diferencial que gobierna la evolución del mismo. La aproximación Euleriana de esta ecuación, proviene de la aplicación del balance de energía en una celda de malla cartesiana definida en el espacio geográfico. La Figura 3-3, muestra el cambio de energía a través de una celda de malla, donde esencialmente este cambio es el importe neto de energía en un instante de tiempo más un aporte de energía de generación local.

En ausencia de corrientes, la variación de energía de una componente del espectro se define a partir de la ecuación [13]. Esta expresión se denomina *ecuación de balance de energía espectral de oleaje*.

$$\frac{DE(\sigma, \theta, x, y, t)}{Dt} = S_t(\sigma, \theta, x, y, t) \quad [13]$$

El término a la izquierda, permite modelar la propagación del oleaje mientras que el de la derecha incorpora los procesos de aporte, disipación y transferencia de energía dentro del espectro. Este último es denominado el *término fuente* de la ecuación de balance de densidad espectral de oleaje.

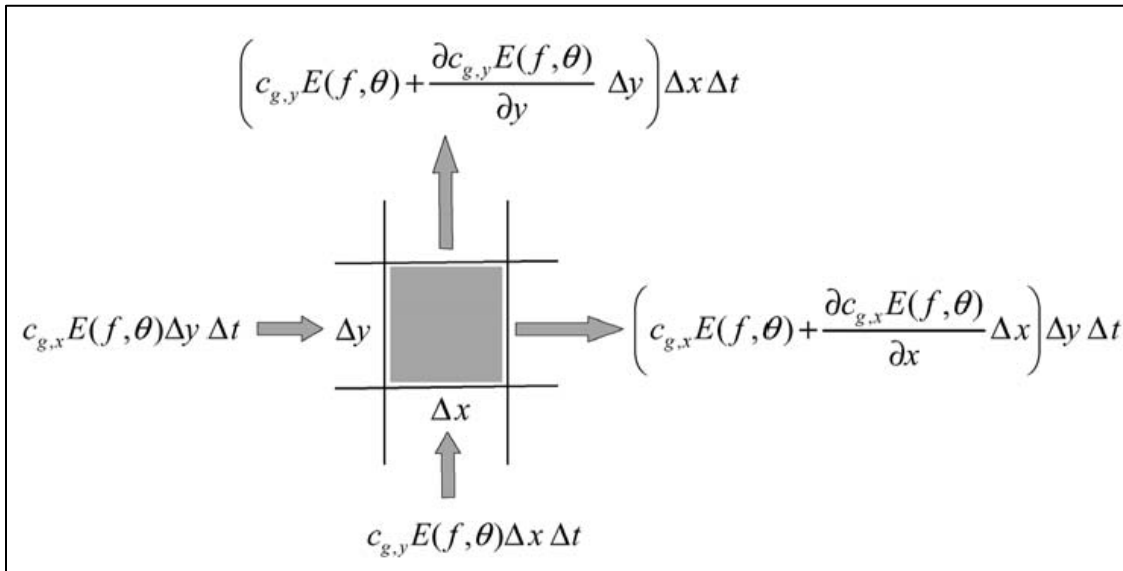
En ausencia de procesos que aportan o disipan energía  $S_t = 0$ , la energía que viaja por el tren de ondas se conserva. En presencia de corrientes, esto no ocurre debido a que estas últimas ejercen un trabajo sobre el oleaje. Whitham (1964) y Bretherton & Garret (1968) demostraron que la expresión [14] es conservativa, donde  $\sigma_r$  es la frecuencia intrínseca a cada componente del espectro, la cual se encuentra asociada a la frecuencia absoluta  $\sigma$  mediante una expresión del tipo efecto Doppler [15], que relaciona la velocidad horizontal de la corriente promediada en la vertical ( $U$ ) y el vector número de onda ( $\vec{k}$ ) (Tolman H. , 2014).

$$N(\sigma_r, \theta, x, y, t) = E(\sigma_r, \theta, x, y, t) / \sigma_r \quad [14]$$

$$\sigma = \sigma_r + 2\pi \vec{k}U \quad [15]$$

La expresión [14], es denominada acción de oleaje y su evolución se encuentra gobernada por la expresión [16], denominada ecuación de balance de acción de densidad espectral de oleaje (EBAO).

$$\frac{DN(\sigma_r, \theta, x, y, t)}{Dt} = S(\sigma_r, \theta, x, y, t) / \sigma_r \quad [16]$$



**Figura 3-3.** Cambio de energía a través de una celda de malla cartesiana definida en el espacio geográfico. Enfoque Euleriano para la derivación de la ecuación de balance de energía espectral de oleaje (Holthuijsen, 2007).

Los diferentes métodos numéricos y teorías utilizadas para estimar los términos fuentes de la ecuación [16], han permitido clasificar a los modelos de base física en primera, segunda y tercera generación, enumerados en función de las mejoras respecto a las limitaciones de las versiones anteriores. La Tabla 3-3, presenta algunas diferencias y ejemplos entre las distintas clasificaciones de los modelos de base física.

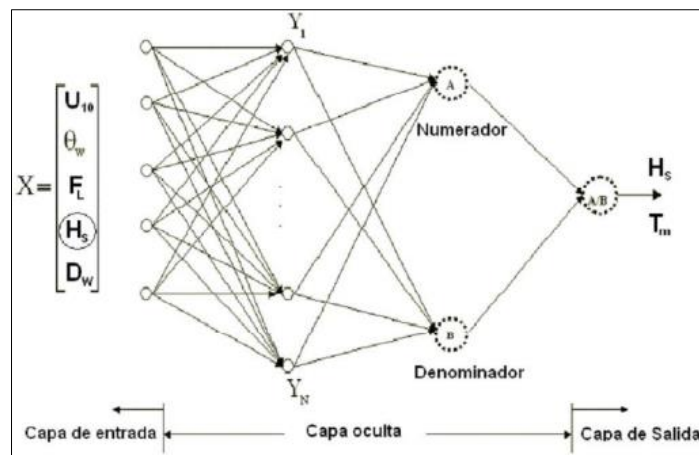
**Tabla 3-3.** Características y ejemplos entre distintas clasificaciones de modelos de generación y propagación de oleaje de base física, basados en la ecuación de balance de energía espectral de oleaje (adaptado de Lizano et. al, 2001).

<b>Tipo de Modelo</b>	<b>Características</b>	<b>Ejemplo</b>
<b>Primera Generación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No existe transferencia lineal entre componentes del oleaje (modelos desacoplados de primera generación).</li> <li>• Se asume un crecimiento lineal de la energía del oleaje debido al viento.</li> <li>• Sobreestiman la acción del viento y su fuerza de transferencia.</li> <li>• No considera interacciones no lineales entre componentes del espectro</li> </ul>	<p style="text-align: center;">ODGP (Cardone et. Al, 1976)            GSOWM (Cardone and Greenwood, 1985)</p>
<b>Segunda Generación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incorporan el acoplamiento entre componentes espectrales individuales de forma no lineal</li> <li>• Incorpora de forma paramétrica la transferencia no lineal entre componentes, utilizando el espectro JONSWAP.</li> <li>• Presentan un bajo desempeño en la transferencia de energía entre mar de viento y mar de fondo.</li> </ul>	<p style="text-align: center;">GONO (Sanders,1976)            HYP A (GUNTER et al., 1979)</p>
<b>Tercera Generación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La ecuación de balance de energía es calculada completamente, al igual que los términos no lineales y no impone una forma definida al espectro.</li> <li>• Permite observar el comportamiento temporal y espacial del espectro.</li> <li>• Mejora la transferencia de energía de mar de viento a mar de fondo.</li> </ul>	<p style="text-align: center;">WAVEWATCH III (Tolman, 2009)            WAM-Ciclo 4 (WAMDI, 1988)</p>

### 3.3.3 MODELOS HEURÍSTICOS

Los modelos heurísticos, permiten estimar el comportamiento de un sistema, sin la necesidad de conocer las relaciones entre los elementos que lo componen. Según Montoya y Osorio (2007) existen tres tipos de modelos heurísticos, siendo estos modelos basados en redes neuronales, autómatas celulares y lógica difusa.

Los modelos heurísticos basados en redes neuronales, emplean una arquitectura denominada redes neuronales de regresión generalizada (GRNN), la cual permite resolver cualquier problema de aproximación a alguna función, mediante la estimación de una función de distribución de probabilidad. Estos modelos funcionan en base a tres capas de neuronas, siendo estas, la capa de entrada, capa oculta y la capa de salida. En la Figura 3-4, se presenta un esquema del funcionamiento de un modelo neuronal basado en GRNN.



**Figura 3-4.** Esquema del funcionamiento de un modelo neuronal basado en GRNN, aplicado al pronóstico de oleaje (Montoya & Osorio, 2007)

En la capa de entrada se encuentra el estado de mar definido como  $X_t(U_{10}, \theta_w, F_L, H_s, D_w)$ , donde  $U_{10}$  es la velocidad del viento a 10m,  $\theta_w$  es la dirección del viento  $F_L$  el Fetch,  $H_s$  la altura significativa y  $D_w$  la profundidad del cuerpo de agua. En la capa oculta es donde las transformaciones no lineales son aplicadas a los datos de entrada a través de una función de transferencia. Los resultados son producidos en la capa de salida.

La ventaja de la aplicación de este tipo de modelos es que pueden ser aplicados de forma exitosa en aguas profundas y zonas costeras. Sin embargo es necesario contar con la suficiente información para utilizar durante el proceso de aprendizaje del modelo, lo que restringe su aplicación a estimaciones puntuales de oleaje donde se cuenten con información de viento local y parámetros de oleaje.

### 3.4 ECUACIÓN DE BALANCE DE ACCIÓN DE DENSIDAD ESPECTRAL DE OLAJE

En el capítulo anterior se presentó la ecuación de balance de acción de densidad espectral de oleaje (EBAO) [16]. La forma general y extendida de la EBAO para un sistema en coordenadas cartesianas está determinada por la siguiente expresión:

$$\frac{\partial N(\sigma, \theta, x, y, t)}{\partial t} + \frac{\partial C_{g,x} N(\sigma, \theta, x, y, t)}{\partial x} + \frac{\partial C_{g,y} N(\sigma, \theta, x, y, t)}{\partial y} + \frac{\partial C_{\theta} N(\sigma, \theta, x, y, t)}{\partial \theta} + \frac{\partial C_{\sigma} N(\sigma, \theta, x, y, t)}{\partial \sigma} = \frac{S(\sigma, \theta, x, y, t)}{\sigma} \quad [17]$$

Donde  $N(\sigma, \theta, x, y, t)$ , es la acción de densidad espectral,  $C_{g,x}$  y  $C_{g,y}$  son las velocidades de grupo en el eje  $x$  e  $y$ , respectivamente y  $C_{\sigma}$  y  $C_{\theta}$  son las velocidades de propagación en el dominio de la frecuencia y la dirección ante la presencia de corrientes determinadas por las expresiones [18] y [19], respectivamente.

$$C_{\sigma} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left( \frac{\partial d}{\partial t} + U \frac{\partial d}{\partial s} \right) - C_g k \frac{\partial U_n}{\partial n} \quad [18]$$

$$C_{\theta} = \frac{C_g}{c} \frac{\partial c}{\partial m} - \frac{\partial U_n}{\partial m} \quad [19]$$

Donde  $d$ , es la profundidad de la columna de agua,  $U$  es la velocidad de la corriente en el sentido de propagación de ésta (eje de coordenadas  $s$ ),  $U_n$  es la velocidad de la corriente en el sentido de propagación de las olas (eje de coordenadas  $n$ ),  $c$  es la celeridad de la onda y  $m$  es el eje en el paralelo a la cresta de la ola en el que existe transporte de energía debido a la presencia de corriente. La Figura 3-5, esquematiza la interacción ola-corriente.

El primer término de la forma extendida de la EBAO [17], representa la evolución local de la energía en el tiempo, el segundo y tercer término, representan la divergencia espacial del flujo de energía. Estos tres términos permiten describir el proceso de asomeramiento del oleaje. El cuarto término permite describir la refracción del oleaje debido a la presencia de corrientes. El quinto término describe el cambio de dirección de la energía debido a los procesos de refracción y difracción inducida por cambios de profundidad, fuertes variaciones espaciales y refracción inducida por corriente (Holthuijsen, 2007). El término a la derecha de la EBAO involucra los procesos físicos que aportan, transfieren y disipan energía a cada componente del espectro.

Battjes en 1994 (Holthuijsen, 2007), define la importancia relativa de los procesos físicos que afectan la evolución del oleaje a medida que este se propaga desde aguas profundas hacia aguas poco profundas (Tabla 3-4).

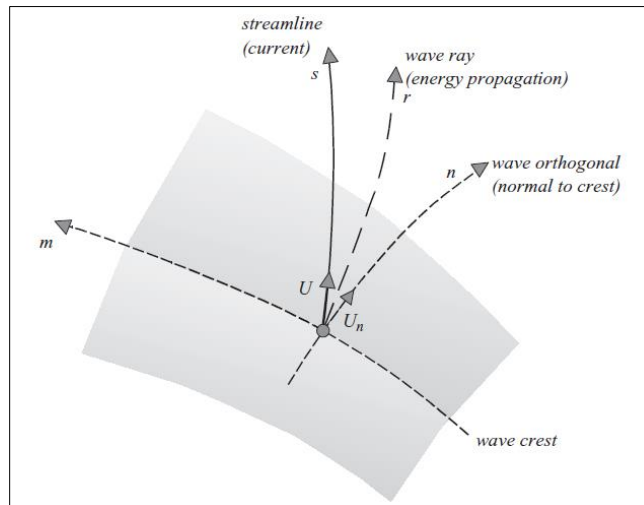
**Tabla 3-4.** Importancia relativa de los procesos que afectan la evolución del oleaje, adaptado de Battjes (1994) (Holthuijsen, 2007).

Proceso	Aguas Oceánicas	Aguas Costeras		
		Plataforma continental	Proximidad de la costa	Rada portuaria
Generación por viento	XXX	XXX	X	O
Interacción no lineal entre cuádrupletas	XXX	XXX	X	O
White-Capping	XXX	XXX	X	O
Fricción de fondo	O	XXX	XX	O
Refracción inducida por corrientes	O/X	XXX	XX	O
Refracción y asomeramiento inducidos por fondo	O	XXX	XXX	XX
Rotura inducida por el fondo	O	XXX	XXX	O
Interacción no lineal entre triadas	O	O	XX	XX
Reflexión	O	O	X/XX	XXX
Difracción	O	O	X	XXX

**XXX = Dominante; XX = Significativo; X = Importancia menor; O = Irrelevante**

Los procesos de mayor relevancia que modifican la evolución del oleaje en aguas oceánicas, corresponden a los procesos de generación o aporte de energía por viento ( $S_{viento}$ ), la disipación de energía por distintos procesos ( $S_{ds}$ ) y las interacciones no lineales entre componentes ( $S_{nl}$ ). En virtud de lo anterior, el término a la derecha de la EBAO puede ser representado mediante la expresión [20].

$$S(\sigma, \theta, x, y, t) = S_{viento} + S_{ds} + S_{nl} \quad [20]$$



**Figura 3-5.** Esquematización de la interacción ola-corriente (Holthuijsen, 2007).

### 3.4.1 TÉRMINOS FUENTE DE LA EBAO

#### 3.4.1.1 Generación por Viento

La mecánica de la generación del oleaje debido a la interacción entre la superficie libre del océano y el viento aún no está del todo definida, debido principalmente a la complejidad que presenta este fenómeno desde el punto de vista teórico, ya que involucra el movimiento turbulento del aire sobre una superficie que varía en el espacio y el tiempo. Distintos autores han formulado teorías que intentan explicar la dinámica de la generación de las olas. En la actualidad, una de las teorías más aceptadas corresponde a la de Phillips (1957) y Miles (1957) (Holthuijsen, 2007). A partir de esta teoría, matemáticos e ingenieros han derivado distintas parametrizaciones que han permitido obtener resultados satisfactorios desde el punto de vista ingenieril (Hauser, 2012).

Phillips postuló que la generación del oleaje se debe a una resonancia entre fluctuaciones de presión en el campo de viento con ondas que se propagan libremente en la superficie del océano, estas últimas son generadas a partir de las fluctuaciones de presión que se propagan en la dirección del viento, de esta forma el viento le transfiere su energía al oleaje (Figura 3-6). Phillips plantea que para un viento constante en el tiempo la transferencia de energía también lo es, resultando en un crecimiento lineal del oleaje que puede ser descrito mediante la expresión [21]:

$$S_{in,1}(f, \theta) = \alpha \quad ; \quad \alpha = (f, \theta, \vec{U}_w) \quad [21]$$

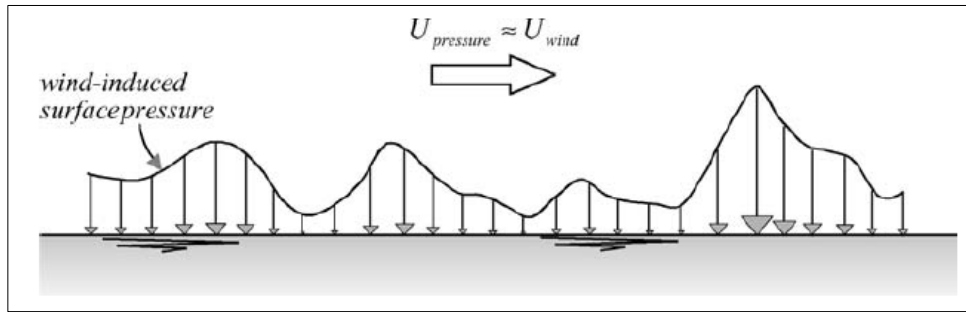
Donde  $\alpha$ , es un coeficiente que depende de  $f$ ,  $\theta$  y la velocidad del viento  $\vec{U}_w$ . Esta teoría da una explicación de la generación del oleaje asumiendo que el crecimiento no afecta el mecanismo que lo genera. En la realidad, dicha influencia es inevitable y aumenta en la medida que el oleaje evoluciona. Sobre la base de la teoría de Phillips, Miles postuló que el oleaje altera el movimiento del aire induciendo modificaciones en el campo de presiones sobre la superficie, generando una retroalimentación que favorece el crecimiento de las olas. La Figura 3-7 muestra el mecanismo de retroalimentación que postula Miles, donde la sección de la ola a barlovento induce presiones manométricas positivas, mientras que la sección a sotavento induce presiones manométricas negativas. Lo anterior se traduce en un trabajo positivo generado por el viento en la superficie libre del mar. Este mecanismo explica el rápido crecimiento de las olas luego de su formación, lo cual resulta en un crecimiento exponencial que se encuentra determinado por la expresión [22].

$$S_{in,2}(f, \theta) = \beta E(f, \theta) \quad ; \quad \beta \approx [U \cos(\theta - \theta_w)/c]^2 \quad [22]$$

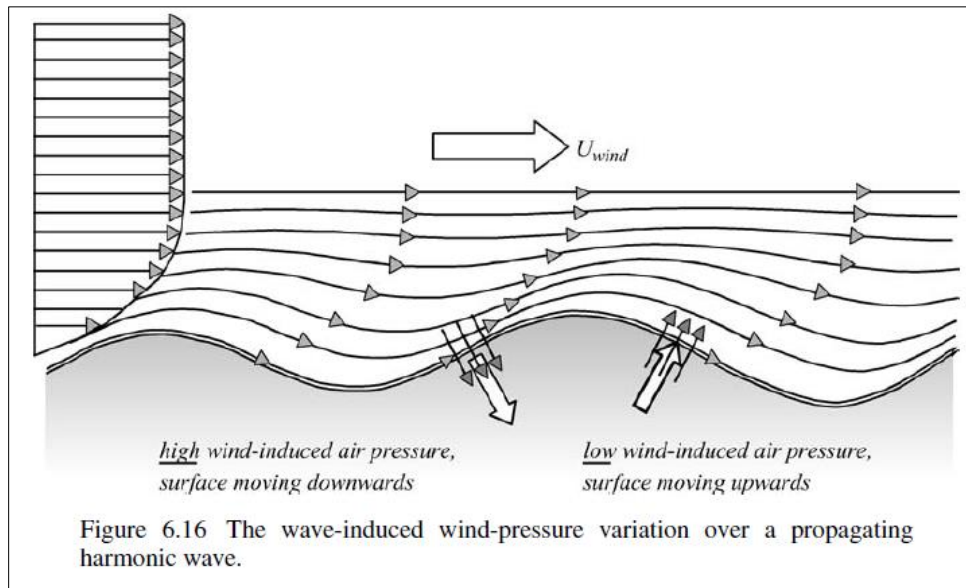
Donde  $\theta_w$ , es la dirección del viento y  $c$  es la velocidad de fase de la componente de onda.

El aporte de energía por parte del viento queda determinado por la combinación de las teorías de Phillips y Miles, y se expresa mediante la ecuación [23].

$$S_{in}(f, \theta) = S_{in,1}(f, \theta) + S_{in,2}(f, \theta) = \alpha + \beta E(f, \theta) \quad [23]$$



**Figura 3-6.** Esquematación de la mecánica de la generación de oleaje según Phillips (1957) (Holthuijsen, 2007).



**Figura 3-7.** Esquematación de la mecánica de la generación de oleaje según Miles (1957) (Holthuijsen, 2007).

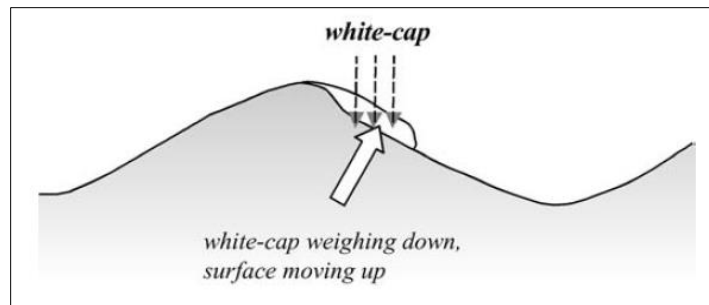
### 3.4.1.2 Disipación de Energía

El principal mecanismo de disipación de energía en aguas profundas es la rotura de las olas (whitecapping). Este fenómeno no cuenta con una definición precisa y representa un proceso altamente complejo desde el punto de vista teórico, debido a que trata sobre una hidrodinámica altamente no lineal que ocurre en una amplia gama de escalas, desde ondas de gravedad hasta ondas capilares y además existe una escasa cantidad de datos cuantitativos.

Hasselmann (1973), plantea que el whitecapping puede ser interpretado como un pulso de presión debido al propio peso del mismo, el que actúa sobre la fracción de ola a sotavento de la cresta (Figura 3-8), de esta forma, el whitecap realiza un trabajo negativo extrayendo energía del oleaje el cual puede ser representado mediante la expresión [24].

$$S_{wc}(f, \theta) = -\mu k E(f, \theta) \quad [24]$$

Donde  $k$ , es el número de onda y  $\mu$  es una función de propiedades no locales del espectro que introduce cierta no linealidad.



**Figura 3-8.** Esquematización de del proceso de rotura de las olas en aguas profundas (whitecapping) (Holthuijsen, 2007).

### 3.4.1.3 Interacciones no Lineales

El tercer mecanismo que juega un papel importante en el desarrollo del oleaje son las interacciones no lineales. Componentes de oleaje que entran en resonancia entre sí son las responsables de los procesos de transferencia de energía dentro del espectro de olas. Hasselmann (1962), demostró que en aguas profundas dos pares de componentes de oleaje (cuadruquetas) pueden intercambiar energía entre sí, si estas cumplen la condición de resonancia expuesta en la expresión [25] (Figura 3-9). Esta transferencia puede ser estimada mediante la integral de Boltzmann [26].

$$\begin{cases} \vec{k}_1 + \vec{k}_2 = \vec{k}_3 + \vec{k}_4 \\ f_1 + f_2 = f_3 + f_4 \end{cases} \quad [25]$$

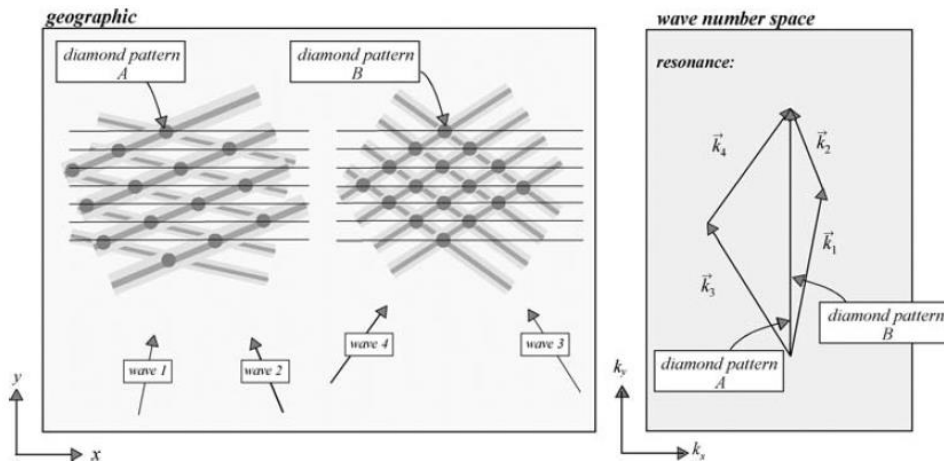
Donde  $\vec{k}_i$ , es el vector número de onda y  $f_i$  la frecuencia.

$$\begin{aligned} S_{nl,4}(\vec{k}_4) = & \iiint T_1(\vec{k}_1, \vec{k}_2, \vec{k}_1 + \vec{k}_2 - \vec{k}_4) E(\vec{k}_1) E(\vec{k}_2) E(\vec{k}_1 + \vec{k}_2 - \vec{k}_4) d\vec{k}_1 d\vec{k}_2 \\ & - \iiint T_2(\vec{k}_1, \vec{k}_2, \vec{k}_4) E(\vec{k}_1) E(\vec{k}_2) d\vec{k}_1 d\vec{k}_2 \end{aligned} \quad [26]$$

Donde  $\vec{k}_4$ , es el vector número de onda de la componente de oleaje que entra en resonancia con  $\vec{k}_1, \vec{k}_2$  y  $\vec{k}_3 = \vec{k}_1 + \vec{k}_2 - \vec{k}_4$ .  $T_1$  y  $T_2$ . Son coeficientes de transferencia o acoplamiento que garantizan que solo las componentes que cumplan con la condición de resonancia contribuyan a la integral.

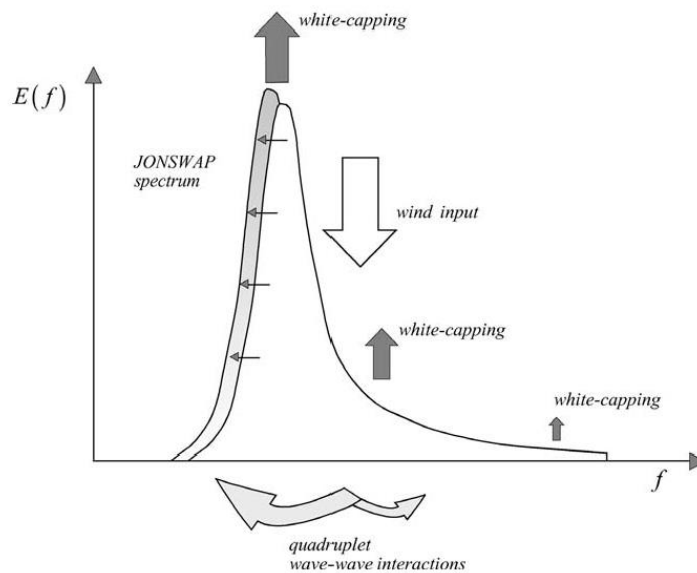
Junto con los procesos mencionados en los títulos anteriores, las interacciones no lineales entre cuadruquetas constituyen uno de los mecanismos más relevantes que afectan el desarrollo del oleaje en aguas profundas. Éste, no aporta ni resta energía al espectro de oleaje, sino que la redistribuye dentro de este último.

El cálculo de la integral de Boltzmann es costosa computacionalmente. Investigadores han desarrollado diferentes técnicas para resolver este problema. Hasselmann (1985), propuso la técnica conocida como aproximación de interacción discreta (DIA). Esta técnica ha sido utilizada en una gran cantidad de modelos de generación de oleaje operacionales con resultados satisfactorios en tiempos de cálculo razonables.



**Figura 3-9.** Esquema ilustrativo de la interacción entre cuádrupletas en aguas profundas. (Holthuijsen, 2007)

La Figura 3-10, muestra un esquema cualitativo de la transformación de energía dentro de un espectro JONSWAP en aguas profundas, debido a los procesos descritos en el capítulo 3.4.1. Las interacciones no lineales en cuádrupletas transfieren una fracción significativa de energía desde el rango medio de frecuencias hacia frecuencias más bajas y una fracción más reducida hacia las altas frecuencias. La energía transferida por el viento hacia las olas, se manifiesta en la frecuencia peak del espectro y en las frecuencias más altas. La disipación de energía inducida por whitecapping actúa a lo largo del espectro de frecuencias, drenando la mayor cantidad de energía en las bajas frecuencias y en el peak del espectro.



**Figura 3-10.** Esquema cualitativo de la transformación de energía dentro de un espectro JONSWAP, debido a los distintos procesos que afectan el desarrollo del oleaje en aguas profundas (Holthuijsen, 2007).

### 3.5 MODELO WAVEWATCH III V. 4.18

El modelo WAVEWATCH III v.4.18 (WWIII), es un modelo base física de generación y propagación de olas oceánicas de tercera generación, distribuido por la Marine Modeling and Analysis Branch (MMAB) de la National Center for Environmental Prediction (NCEP) de Estados Unidos. El modelo WWIII, estima la densidad de acción del oleaje [14] sobre la base de la ecuación de balance de acción densidad espectral de oleaje aplicada a un espectro definido en el espacio  $X = (x, y)$ , el tiempo  $t$ , el vector número de onda  $k = (k_x, k_y)$  y la dirección  $\theta$ .

$$\frac{\partial N(k, \theta, X, t)}{\partial t} + \nabla_x (C_g + U) N(k, \theta, X, t) + \frac{\partial}{\partial k} \dot{k} N(k, \theta, X, t) + \frac{\partial}{\partial \theta} \dot{\theta} N(k, \theta, X, t) = \frac{S_t(k, \theta, X, t)}{\sigma} \quad [27]$$

Donde,  $C_g$  es la velocidad de grupo,  $U$  es la velocidad de la corriente promediada en la vertical y en el tiempo, las variables  $\dot{k}$  y  $\dot{\theta}$  [28] muestran las tasas de variación de densidad de acción de oleaje al interior del espectro en los dominios de la frecuencia (implícitamente escrito como número de ondas  $k = 2\pi/L$ , siendo  $L$  la longitud de onda) y la dirección, inducidos por efectos batimétricos e interacción ola-corriente.

$$\dot{k} = -\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial s} - k \frac{\partial U}{\partial s} \quad \dot{\theta} = -\frac{1}{k} \left[ \frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + k \frac{\partial U}{\partial m} \right] \quad [28]$$

En la ecuación [28], los términos de la izquierda conforman la parte cinemática de la ecuación y constituyen los procesos involucrados en la propagación del oleaje en escalas oceánicas, mientras que los términos de la derecha, conocidos como “términos fuente”, involucran los procesos físicos que aportan, transfieren y disipan energía a cada componente del espectro. En la ecuación [29] se exponen todos los procesos físicos que en la actualidad se encuentran disponibles en WWIII (Tolman H. L., 2014).

$$S_t = S_{ln} + S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{db} + S_{tr} + S_{sc} + S_{ice} + S_{ref} + S_{xx} \quad [29]$$

Donde,  $S_{ln}$ : Crecimiento lineal,  $S_{in}$ : Crecimiento exponencial,  $S_{nl}$ : Interacción no lineal entre cuádrupletas ola-ola,  $S_{ds}$ : Disipación por rotura en aguas profundas y viento-swell,  $S_{bot}$ : Interacción del oleaje con el fondo marino,  $S_{db}$ : Disipación por rotura del oleaje inducida por fondo,  $S_{tr}$ : Interacción no lineal entre triadas ola-ola,  $S_{sc}$ : Dispersión inducida por fondo,  $S_{ice}$ : Interacción ola-hielo,  $S_{ref}$ : Reflexión por línea de costa y obstáculos,  $S_{xx}$ : Término fuente definido por el usuario.

### 3.5.1 ESQUEMAS NUMÉRICOS Y PARAMETRIZACIONES DE PROCESOS FÍSICOS

En el apartado 3.4.1, se exponen los procesos físicos más relevantes que intervienen en el desarrollo del oleaje en aguas profundas. A continuación se detallan los esquemas numéricos empleados por el modelo WWIII y las parametrizaciones de los procesos físicos de mayor relevancia que intervienen en la generación y propagación del oleaje en aguas profundas.

### 3.5.2 RESOLUCIÓN NUMÉRICA

El modelo resuelve la ecuación Euleriana de balance de acción de densidad espectral de oleaje a través de un esquema explícito de diferencias finitas, mediante la discretización de la malla espacial, del dominio espectral y el tiempo de simulación.

La malla espacial es regular y puede ser representada en coordenadas cartesianas  $(x, y)$  o en coordenadas esféricas  $(\phi, \lambda)$ . Queda definida en base a los incrementos definidos por el usuario  $(\Delta x, \Delta y$  o  $\Delta\phi$  y  $\Delta\lambda)$ . En las fronteras del dominio, la energía que se propagada desde el agua hacia la tierra es absorbida completamente sin reflexión. En los bordes activos, la energía que se propaga saliendo del dominio es completamente absorbida, mientras que las componentes que se propagan hacia dentro lo hace con la condición de borde impuesta.

La malla espectral, queda definida por el usuario en el dominio de las frecuencias y las direcciones. El dominio de las frecuencias es definido mediante una escala logarítmica, el cual es construido mediante la definición de la frecuencia más baja, el factor de incremento de frecuencias  $X_f$  y la cantidad de frecuencias [30]. Respecto a las condiciones de borde del dominio espectral, en el dominio de las direcciones éstas no son necesarias debido a que se resuelven completamente, mientras que para el dominio de las frecuencias, el modelo considera que para frecuencias menores a la frecuencia más baja impuesta por el usuario, no existe energía, mientras que para las frecuencias mayores a la frecuencia más alta impuesta, el modelo asume una forma paramétrica del espectro.

$$f_{m+1} = X_f f_m \quad ; \quad X_f = 1.1 \quad [30]$$

Donde  $f$ , es la frecuencia posterior a la frecuencia inicial.

El modelo avanza en el tiempo resolviendo por separado los distintos procesos involucrados en la EBAO, mediante la aplicación de distintos pasos de tiempo. El modelo WWIII, utiliza cuatro pasos de tiempo.

El paso de tiempo global  $(\Delta t_g)$ , corresponde al paso mediante el cual la solución completa avanza en el tiempo, además determina cada cuanto tiempo se actualizan las forzantes del modelo (viento, concentraciones de hielo, corrientes, entre otros).

El paso de tiempo de la propagación espacial  $(\Delta t_{x,y})$ , es definido por el usuario a partir de la frecuencia más baja considerada en el dominio espectral (debido a que es la componente de energía que se propaga más rápido). Para componentes de mayor frecuencia, el modelo determina internamente el paso de tiempo adecuado. De esta forma, cada componente se

propaga en el espacio con su propio paso de tiempo, resultando en tiempos de cálculo más cortos y eficientes.

El tercer paso de tiempo ( $\Delta t_k$ ), es el definido para resolver la propagación dentro del espectro. En general, para aguas profundas este adopta el valor de  $\Delta t_g$ , mientras que para aguas intermedias este es reducido a una fracción de  $\Delta t_g$  para evitar inestabilidades significativas debido a la refracción inducida por el fondo.

El último paso de tiempo ( $\Delta t_s$ ), es utilizado para la integración de los términos fuentes. El usuario define un paso de tiempo mínimo (usualmente  $\Delta t_s = 15$ ) y el modelo ajusta internamente este paso de tiempo de forma conveniente.

Los pasos de tiempo  $\Delta t_g$ ,  $\Delta t_{x,y}$  y  $\Delta t_k$  se definen mediante las expresiones [31], [32] y [33], respectivamente (Spindler & Tolman, 2008).

$$\Delta t_g = 2 \text{ o } 3 \text{ veces } \Delta t_{x,y} \quad [31]$$

$$\Delta t_{x,y} = \frac{\Delta x}{C_g} = 123766 * \Delta x * \cos(lat_{max}) * f_{min} \quad [32]$$

$$\Delta t_k = \frac{1}{2} \Delta t_g \quad [33]$$

Donde  $\Delta x$  es la resolución de la malla computacional,  $lat_{max}$  es la máxima latitud absoluta contenida en el dominio en grados y  $f_{min}$  es la frecuencia mínima.

Para resolver la propagación espectral, el modelo WWIII resuelve la expresión [34]. Para hacerlo, el usuario puede escoger entre los Switches que se exponen en la Tabla 3-5. Los esquemas numéricos de orden superior empleados por WWIII son susceptibles a la difusión numérica, o lo que se conoce como *Efecto Garden Sprinkler* (GSE), donde un campo continuo de concentración de energía en el espacio es segregado en varios campos discretos. Para aliviar este efecto, el modelo WWIII incorpora dos técnicas, las que se presentan en la Tabla 3-6.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial C_{g,x}N}{\partial x} + \frac{\partial C_{g,y}N}{\partial y} = 0 \quad [34]$$

**Tabla 3-5.** Esquemas numéricos disponibles en el modelo WWIII (Tolman H., 2014)

<b>Esquema de propagación</b>	
<i>PR1</i>	Esquema de primer orden (Tolman H. , User Manual and system documentation of WAVEWATCH III version 4.18, 2014)
<i>UNO</i>	Esquema de advección de segundo orden
<i>UQ</i>	Ultimate-Quick-Est

**Tabla 3-6.** Técnicas de alivio del Efecto Garden Sprinkler (GSE). Incorporadas en el modelo WWIII (Tolman H., 2014).

<b>Técnica de alivio GSE</b>	
PR0/PR1	Sin técnica de alivio
PR2	Término difusión corrección
PR3	Promediación espacial de Tolman

Para resolver la evolución del espectro, el modelo WWIII utiliza la expresión [35]. Al igual que para la propagación espacial, el modelo emplea los esquemas expuestos en la Tabla 3-5.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial C_{\theta} N}{\partial \theta} + \frac{\partial C_{\sigma} N}{\partial \sigma} = 0 \quad [35]$$

Finalmente, el modelo estima los términos fuentes mediante la resolución de la expresión [36].

$$\frac{\partial N}{\partial t} = S \quad [36]$$

Al igual que en el modelo WAM, el modelo WWIII utiliza un esquema semi-implícito (WAMDIG 1988), el cual estima el incremento de la acción del oleaje mediante la expresión [37].

$$\Delta N(k, \theta) = \frac{S(k, \theta)}{1 - \epsilon D(k, \theta) \Delta t} \quad [37]$$

Donde  $D$ , representa los términos diagonales de la derivada de los términos fuente  $S$  respecto a  $N$ .  $\epsilon$ , es el *offset* del esquema, originalmente  $\epsilon = 0.5$ , sin embargo actualmente fue modificado a  $\epsilon = 1$ , debido a que presenta mejores resultados al utilizar pasos de tiempo relativamente largos. Finalmente,  $\Delta t$  es el tiempo restante para alcanzar el paso de tiempo global  $\Delta t_g$ .

### 3.5.3 PARAMETRIZACIONES FÍSICAS

El modelo WWIII, ofrece la posibilidad de escoger entre las distintas parametrizaciones de los procesos físicos expuestos en la expresión [29]. La Tabla 3-7, muestra todas las parametrizaciones físicas disponibles en la versión 4.18 del modelo WAVEWATCH III. Los procesos de dispersión y rotura inducida por fondo e interacciones no lineales entre triadas cuentan con una única parametrización, mientras que los procesos de crecimiento y disipación de energía debido al viento, interacciones no lineales entre cuádrupletas y disipación inducida por fondo, disponen de varias opciones que el usuario puede elegir.

**Tabla 3-7.** Parametrizaciones de procesos físicos disponibles en WWIII.

<b>Crecimiento y Disipación de Energía debido al Viento (<math>S_{ln}, S_{in}, S_{ds}</math>)</b>	<b>Switch</b>
Calavari & Malonatte-Rizzoli (1981)	LN1
Spectral seeding WWIII	SEED
WAM cycle 3 (Snyder et al., 1981 & Komen et al., 1984)	ST1
Tolman & Chalikov (1996)	ST2 ; STAB2
WAM cycle 4 (Bidlot et al., 2005)	ST3 ; STAB3
Ardhuin et al.(2010)	ST4
BYDRZ	ST6
<b>Interacciones no Lineales entre Cuádrupletas (<math>S_{nl}</math>)</b>	<b>Switch</b>
DIA (Aproximación por interacciones discretas) (Hasselmann et al., 1985)	NL1
Integral de Boltzmann (WRT)	NL2
Generalized Multiple DIA (GMD) (Aproximación por interacciones discretas generalizada)	NL3
<b>Disipación Inducida por el Fondo (<math>S_{bot}</math>)</b>	<b>Switch</b>
JONSWAP (Hasselmann et al., 1973)	BT1
SHOWEX	BT4
Disipación inducida por fondo fangoso	BT8
<b>Rotura Inducida por Fondo (<math>S_{db}</math>)</b>	<b>Switch</b>
Battjes & Janssen 1978	DB1/MLIM
<b>Dispersión por fondo (<math>S_{sc}</math>)</b>	<b>Switch</b>
Ardhuin & Magne, 2007	BS1
<b>Interacciones no Lineales entre Triadas (<math>S_{tr}</math>)</b>	<b>Switch</b>
Modelo LTA (Eldeberky, 1996)	TR1

La Tabla 3-4, expone los procesos físicos más relevantes que afectan a la generación y propagación del oleaje en aguas profundas. A continuación se detallan algunas de las parametrizaciones empleadas por el modelo WWIII para describir los procesos de crecimiento y disipación de energía debido al viento e interacciones no lineales entre cuádrupletas.

### 3.5.3.1 Crecimiento y Disipación de Energía Debido al Viento

Para estimar el crecimiento lineal de energía, el modelo WWIII brinda la opción de escoger entre dos opciones, el aporte lineal de energía propuesto por Cavaleri y Malonate-Rizzoli (1981) (LN1) y el término de crecimiento espectral (SEED). Este último, a diferencia del primer término, garantiza el crecimiento lineal de energía en presencia de vientos con velocidades relativamente bajas.

El crecimiento y decaimiento no lineal de la energía, es aproximado mediante cinco paquetes de parametrizaciones físicas, ST1, ST2, ST3, ST4 y ST6.

El paquete ST1, corresponde a los términos fuente de aporte no lineal de energía debido al viento, empleados por el modelo WAM en sus ciclos 1 a 3 [38] y la disipación por White-Capping propuesta por Komen et al., (1984) [40].

$$S_{in}(k, \theta) = C_{in} \frac{\rho_a}{\rho_w} \max \left[ 0, \frac{28u_*}{c} \cos(\theta - \theta_w) \right] \sigma N(k, \theta) \quad [38]$$

$$u_* = u_{10} \sqrt{(0.8 + 0.065u_{10})10^{-3}} \quad [39]$$

Donde  $C_{in}$  es una constante empírica,  $\rho_a$  y  $\rho_w$ , la densidad del aire y el agua respectivamente y  $c$  es la celeridad de fase descrita mediante la expresión  $\sigma/k$ .

$$S_{ds}(k, \theta) = C_{ds} \hat{\sigma} \frac{k}{\hat{k}} \left( \frac{\hat{\alpha}}{\hat{\alpha}_{PM}} \right)^2 N(k, \theta) \quad [40]$$

$$\hat{\sigma} = (\sigma^{-1})^{-1} \quad [41]$$

$$\hat{\alpha} = E \hat{k}^2 g^{-2} \quad [42]$$

$$\hat{k} = (1/\sqrt{k})^{-2} \quad [43]$$

Donde  $C_{ds}$  es una constante empírica,  $\hat{\alpha}_{PM}$  corresponde al factor de forma del espectro Pearson Moskowitz.

El paquete ST2, corresponde a los términos fuente propuestos por Tolman & Chalikov (1996), constituidos por un término de crecimiento de energía [44] y dos términos disipativos [45], uno para bajas frecuencias [47] y otro para altas frecuencias [48].

$$S_{in}(k, \theta) = \sigma\beta N(k, \theta) \quad [44]$$

Donde  $\beta$ , es un parámetro adimensional de crecimiento de energía, que depende de la velocidad del viento a la altura correspondiente al dato de entrada. Durante los ensayos de implementación de este término fuente en escalas globales, se detectó que la disipación de la energía del mar de fondo inducida por vientos opuestos era severamente sobreestimada. Para corregir esta deficiencia, Tolman (2002) incorpora una corrección de la velocidad del viento que permite contrarrestar esta subestimación en el crecimiento de la energía en aguas profundas, el cual fue incluido en el término fuente del Switch STAB2 (Tolman H., 2014).

Los términos de disipación de energía, son incorporados mediante una combinación lineal entre la constituyente de disipación de energía asociada a bajas frecuencias y la constituyente de disipación asociada a las altas frecuencias, la cual queda establecida mediante la expresión [45]

$$S_{ds}(k, \theta) = \mathcal{A}S_{ds,l} + (1 - \mathcal{A})S_{ds,h} \quad [45]$$

$$\mathcal{A} = \begin{cases} 1 & \text{para } f < f_1 \\ \frac{f - f_2}{f_1 - f_2} & \text{para } f_1 \leq f < f_2 \\ 0 & \text{para } f_2 \leq f \end{cases} \quad [46]$$

La componente de disipación de bajas frecuencias, constituye una analogía a la disipación por turbulencia y se encuentra definida por la expresión [47].

$$S_{ds,l} = -2u_*hk^2\phi N(k, \theta) \quad [47]$$

Donde  $h$ , es un factor de mezcla determinado por la cantidad de energía contenida en las frecuencias altas y  $\phi$  es una función empírica que describe el desarrollo del campo de ondas.

Finalmente, la componente de disipación de frecuencias altas se define a partir de la expresión [48].

$$S_{ds,h} = -a_0 \left(\frac{u_*}{g}\right)^2 f^3 \alpha_n^B N(k, \theta) \quad [48]$$

Donde  $\alpha_n$  es el coeficiente adimensional de Phillips para altas frecuencias y  $a_0$  es un coeficiente empírico.

El paquete ST3, se basa en los términos fuente empleados por el modelo WAM en su ciclo 4. Corresponde a un término fuente de aporte no lineal de energía inducida por el viento [49] que incorpora un término disipativo asociado al decaimiento del mar de fondo, debido a la pérdida de energía producto de la interacción con la atmosfera al recorrer largas

distancias [50]. El término de disipación de energía, representa los procesos de saturación de energía en el espectro de oleaje y la interacción con turbulencia [51].

$$S_{in}(k, \theta)^{WAM} = \frac{\rho_a \beta_{max}}{\rho_w \kappa^2} e^Z Z^4 \left( \frac{u_*}{C} + z_\alpha \right)^2 \cos^{p_{in}}(\theta - \theta_u) \sigma N(k, \theta) + S_{out}(k, \theta) \quad [49]$$

Donde  $\beta_{max}$ , es un parámetro adimensional de crecimiento de energía,  $\kappa$  es la constante de von Kármán y  $p_{in}$ , es una constante que controla la distribución direccional de la energía aportada por el término  $S_{in}$ .

$$S_{out}(k, \theta) = 2s_1 \kappa \frac{\rho_a}{\rho_w} \left( \frac{u_*}{C} \right)^2 \left[ \cos(\theta - \theta_u) - \frac{\kappa C}{u_* \log(kz_0)} \right] \quad [50]$$

Donde  $s_1$ , es el parámetro que activa o desactiva el término  $S_{out}$ .

$$S_{ds}(k, \theta)^{WAM} = C_{ds} \bar{\alpha}^2 \bar{\sigma} \left[ \delta_1 \frac{k}{\bar{k}} + \delta_2 \left( \frac{k}{\bar{k}} \right)^2 \right] N(k, \theta) \quad [51]$$

Donde  $C_{ds}$ ,  $\delta_1$  y  $\delta_2$  son parámetros adimensionales.

Las Tablas 3-8 y 3-9, muestran los parámetros adimensionales de los términos  $S_{in}$  y  $S_{out}$ , respectivamente, que pueden ser modificados por el usuario.

Par.	WWATCH var.	namelist	WAM4	BJA	Bidlot 2012
$z_u$	ZWND	SIN3	10.0	10.0	10.0
$\alpha_0$	ALPHA0	SIN3	0.01	0.0095	0.0095
$\beta_{max}$	BETAMAX	SIN3	1.2	1.2	1.2
$p_{in}$	SINTHP	SIN3	2	2	2
$z_\alpha$	ZALP	SIN3	0.0110	0.0110	0.0080
$s_1$	SWELLF	SIN3	0.0	0.0	1.0

**Tabla 3-8.** Valores de los parámetros empíricos adimensionales del término  $S_{in}$  del paquete ST3 (Tolman H., 2014).

Par.	WWATCH var.	namelist	WAM4	BJA	Bidlot 2012
$C_{ds}$	SDSC1	SDS3	-4.5	-2.1	-1.33
$p$	WNMEANP	SDS3	-0.5	0.5	0.5
$p_{tail}$	WNMEANPTAIL	SDS3	-0.5	0.5	0.5
$\delta_1$	SDSDELTA1	SDS3	0.5	0.4	0.5
$\delta_2$	SDSDELTA2	SDS3	0.5	0.6	0.5

**Tabla 3-9.** Valores de los parámetros empíricos adimensionales del término  $S_{ds}$  del paquete ST3 (Tolman H., 2014).

El paquete ST4 se basa principalmente en el paquete ST3. Utiliza la parte positiva del término de aporte de energía  $S_{in}$  [49] del paquete ST3 e incorpora una reducción en el término  $u_*$  [39] reescribiéndolo como  $u'_*(k)$  [52], de esta forma se reduce el coeficiente de roce frente a fuertes vientos permitiendo mejorar notablemente la disipación basada en la saturación de energía en el espectro. Adicionalmente, la parte negativa del término de entrada de energía es replanteado mediante una combinación entre la disipación de energía inducida por la interacción con la capa viscosa y la interacción con la capa turbulenta de la superficie libre [53].

$$(u'_*)^2 = \left| u_*^2 (\cos\theta_u, \sin\theta_u) - |S_u| \int_0^k \int_0^{2\pi} \frac{S_{in}(k', \theta)}{C} (\cos\theta, \sin\theta) dk' d\theta \right| \quad [52]$$

Donde  $|S_u|$ , es un parámetro que puede ser utilizado para sensibilizar la respuesta ante fuertes vientos, de esta forma si  $S_u = 0$ , la energía aportada por el término  $S_{in}$  podría ser sobreestimada en gran medida.

El decaimiento de energía del término  $S_{in}$  [49], se define como:

$$S_{out}(k, \theta) = r_{vis} S_{out,vis}(k, \theta) + r_{tur} S_{out,tur}(k, \theta) \quad [53]$$

Donde:

$$r_{vis} = 0.5(1 - \tanh((Re - Re_c)/s_7)) \quad [54]$$

$$r_{tur} = 0.5(1 + \tanh((Re - Re_c)/s_7)) \quad [55]$$

$$S_{out,vis}(k, \theta) = -s_5 \frac{\rho_\alpha}{\rho_w} \{2k\sqrt{2\nu\sigma}\} N(k, \theta) \quad [56]$$

$$S_{out,tur}(k, \theta) = -\frac{\rho_\alpha}{\rho_w} \{16f_e\sigma^2 u_{orb,s}/g\} N(k, \theta) \quad [57]$$

Donde  $Re$ , corresponde al número de Reynolds,  $f_e$  es una constante,  $Re_c$  es un parámetro adimensional que puede ser modificado por el usuario y  $u_{orb,s}$  es la velocidad orbital en la superficie definida como:

$$u_{orb,s} = 2 \left[ \iiint \sigma^3 N(k, \theta) dk d\theta \right]^{1/2} \quad [58]$$

El término disipativo  $S_{ds}$ , se encuentra constituido por la suma entre los términos asociados a la saturación de energía dentro del espectro y un término de rotura acumulativo.

$$S_{ds}(k, \theta) = \sigma \frac{C_{ds}^{sat}}{B_r^2} \left[ \delta_a \max\{B(k) - B_r, 0\}^2 + (1 - \delta_a) \max\{B'(k) - B_r, 0\}^2 \right] N(k, \theta) \quad [59]$$

$$+ S_{bk,cu}(k, \theta) + S_{turb}(k, \theta)$$

Donde:

$$B(k) = \max\{B'(k, \theta), \theta \in [0, 2\pi[ \} \quad [60]$$

$$S_{bk, cu}(k, \theta) = \frac{-14.2C_{cu}}{\pi^2} N(k, \theta) \int_0^{r_{cu}^2 k} \int_0^{2\pi} \max\{\sqrt{B(f', \theta')} - \sqrt{B_r}, 0\}^2 d\theta' dk' \quad [61]$$

$$S_{turb}(k, \theta) = -2C_{turb} \sigma \cos(\theta_u - \theta) k \frac{\rho_a u_*^2}{g \rho_w} N(k, \theta) \quad [62]$$

Donde  $C_{cu}$ ,  $R_{cu}$ ,  $B_r$  y  $C_{turb}$  son parámetros adimensionales empíricos modificables por el usuario.

Las Tablas 3-10 y 3-11, muestran los parámetros adimensionales de los términos  $S_{in}$  y  $S_{out}$ , respectivamente, que pueden ser modificados por el usuario. Los coeficientes adimensionales expuestos por los TEST451 y TEST451f, corresponden a las recomendaciones propuestas por Arduin para vientos ECMWF y CFSR respectivamente. El TEST405 y TEST500 son comúnmente empleados para situaciones donde las áreas de influencia del viento son relativamente cortas y donde la rotura inducida por fondo es significativa (Arduin, et al., 2010 ; Arduin, et al., 2011).

Par.	WWATCH var.	namelist	TEST451	TEST451f	TEST405	TEST500
$z_u$	ZWND	SIN4	10.0	10.0	10.0	10.0
$\alpha_0$	ALPHA0	SIN4	0.0095	0.0095	0.0095	0.0095
$\beta_{max}$	BETAMAX	SIN4	1.52	1.33	1.55	1.52
$p_{in}$	SINTHP	SIN4	2	2	2	2
$z_\alpha$	ZALP	SIN4	0.006	0.006	0.006	0.006
$s_u$	TAUWSHELTER	SIN4	1.0	1.0	0.0	1.0
$s_1$	SWELLF	SIN4	0.8	0.8	0.8	0.8
$s_2$	SWELLF2	SIN4	-0.018	-0.018	-0.018	-0.018
$s_3$	SWELLF3	SIN4	0.015	0.015	0.015	0.015
$Re_c$	SWELLF4	SIN4	$10^5$	$10^5$	$10^5$	$10^5$
$s_5$	SWELLF5	SIN4	1.2	1.2	1.2	1.2
$s_6$	SWELLF6	SIN4	0.	0.	0.	0.
$s_7$	SWELLF7	SIN4	$2.3 \times 10^5$	$2.3 \times 10^5$	0.0	0.0
$z_r$	ZORAT	SIN4	0.04	0.04	0.04	0.04
$z_{0,max}$	ZOMAX	SIN4	1.002	1.002	0.002	1.002

**Tabla 3-10.** Valores de los parámetros empíricos adimensionales del término  $S_{in}$  del paquete ST4 (Tolman H. 2014).

Par.	WWATCH var.	namelist	TEST451	TEST405	TEST500
$p$	WNMEANP	SDS4	0.5	0.5	0.5
$p_{tail}$	WNMEANPTAIL	SDS4	0.5	0.5	0.5
$f_{FM}$	FXFM3	SDS4	9.9	2.5	9.9
	SDSC1	SDS4	0	0	1.0
$C_{ds}^{sat}$	SDSC2	SDS4	$-2.2 \times 10^{-5}$	$-2.2 \times 10^{-5}$	0.0
$C_{ds}^{BCK}$	SDSBCK	SDS4	0	0	0.185
$C_{ds}^{HCK}$	SDSHCK	SDS4	0	1.5	1.5
$\Delta_{\theta}$	SDSDTH	SDS4	80	80	80
$B_r$	SDSBR	SDS4	0.0009	0.00085	0.0009
$C_{cu}$	SDSCUM	SDS4	-0.40344	0.0	-0.40344
$s_B$	SDSCOS	SDS4	2.0	0.0	2.0
$B_0$	SDSC4	SDS4	1.0	1.0	1.0
$p^{sat}$	SDSP	SDS4	2.0	2.0	2.0
$C_{turb}$	SDSC5	SDS4	0.0	0.0	0.0
$\delta_d$	SDSC6	SDS4	0.3	0.3	0.3
$C$	NLPROP	SNL1	$2.5 \times 10^7$	$2.7 \times 10^7$	$2.5 \times 10^7$

**Tabla 3-11.** Valores de los parámetros empíricos adimensionales del término  $S_{ds}$  del paquete ST4 (Tolman H., 2014).

El paquete ST6, incorpora parametrizaciones basadas en la observación de los procesos físicos que modifican la evolución del oleaje en aguas profundas. Incluye el término de aporte de energía debido al viento [63], y dos términos disipativos inducidos por whitecapping y por turbulencia [69] y disipación de mar de fondo [72].

El término de aporte de energía  $S_{in}$  se encuentra definido por la expresión [63], y considera una reducción en la intensidad del viento ante condiciones de vientos a altas velocidades, además determina una dependencia en la tasa de crecimiento de energía respecto a la pendiente de las olas generadas, lo que influye directamente en el comportamiento no lineal del término fuente  $S_{in}$ .

$$S_{in}(k, \theta) = \frac{\rho_a}{\rho_w} \sigma \gamma(k, \theta) N(k, \theta) \quad [63]$$

Donde:

$$\gamma(k, \theta) = G \sqrt{B_n} W \quad [64]$$

$$G = 2.8 - \left(1 - \tanh(10\sqrt{B_n}W - 11)\right) \quad [65]$$

$$B_n = A(k)N(k)\sigma k^3 \quad [66]$$

$$W = \left(\frac{U}{c} - 1\right)^2 \quad [67]$$

Donde  $A(k)$  se define a partir de la expresión [68].

$$A^{-1}(k) = \int_0^{2\pi} [N(k, \theta)/N_{\max(k)} d\theta] \quad ; \quad N_{\max} = \max\{N(k, \theta)\} \quad [68]$$

El término de disipación de energía por whitecapping ( $S_{ds}$ ), es aproximado a partir de observaciones de rotura de olas en Lago George – Estados Unidos. Este término, incorpora un límite de saturación de energía para la rotura de las olas en aguas profundas, el efecto acumulativo de la rotura de ondas cortas inducido por la rotura de ondas más largas y un término de disipación no lineal de energía debido a fuertes vientos. El término  $S_{ds}$  del paquete ST6 queda definido a partir de la expresión [69].

$$S_{ds}(k, \theta) = [T_1(k, \theta) + T_2(k, \theta)]N(k, \theta) \quad [69]$$

Donde  $T_1$ , define la rotura de las olas en función del espectro de oleaje y  $T_2$  representa el proceso de rotura acumulativa de ondas cortas inducidas por la rotura de ondas más largas.

$$T_1(k) = a_1 A(k) \frac{\sigma}{2\pi} \left[ \frac{\Delta(k)}{\mathcal{F}(k)} \right]^{p_1} \quad [70]$$

$$T_2(k) = a_2 \int_0^k A(k) \frac{C_g}{2\pi} \left[ \frac{\Delta(k)}{\mathcal{F}(k)} \right]^{p_2} dk \quad [71]$$

Donde  $a_1, a_2, p_1$  y  $p_2$  son parámetros adimensionales definidos por el usuario y  $\Delta(k)/\mathcal{F}(k)$ , es el límite de saturación del término disipativo  $S_{ds}$ , definido en función del espectro de energía  $\mathcal{F}(k)$ . La Tabla 3-12, muestra los valores por defecto de los parámetros antes mencionados.

Par.	WWATCH var.	namelist	
$F_T$	SDSET	SDS6	T
$a_1$	SDSA1	SDS6	6.24E-7
$p_1$	SDSP1	SDS6	4
$a_2$	SDSA2	SDS6	8.74E-6
$p_2$	SDSP2	SDS6	4
$a_0$	SINA0	SIN6	0.04
$b_1$	SWLB1	SWL6	0.25E-3
FAC	CDFAC	FLX4	1.00E-4

**Tabla 3-12.** Valores de los parámetros empíricos adimensionales del término  $S_{ds}$  del paquete ST6, T representa la activación del umbral de normalización del espectro (Tolman H., 2014).

Finalmente, el proceso de disipación por mar de fondo es representado a partir de la expresión [72].

$$S_{swl}(k, \theta) = -\frac{2}{3}b_1\sigma\sqrt{B_n}N(k, \theta) \quad [72]$$

Donde  $b_1$ , es un parámetro adimensional definido por el usuario.

### 3.5.3.2 Interacciones no Lineales entre Cuadrupletas

El modelo WWIII dispone de tres alternativas para la estimación de la transferencia de energía dentro del espectro debido a interacciones no lineales en aguas profundas. El método de aproximación por interacción discreta (DIA, por sus siglas en inglés) (Switch NL1), un método de desarrollo completo de la integral de Boltzmann (WRT) (Switch NL2) y finalmente la expansión del método DIA, denominado generalización múltiple del método de aproximación por interacción discreta (GMD) (Switch NL3).

El *Switch* NL1 (DIA), consiste en la resolución de un único par resonante de ondas, asumiendo la condición  $k_1 = k_2$ . De esta forma la condición de resonancia que el modelo resuelve queda definida por la expresión [73].

$$\left. \begin{aligned} k_1 + k_2 &= k_3 + k_4 \\ \sigma_2 &= \sigma_1 \\ \sigma_3 &= (1 + \lambda_{nl})\sigma_1 \\ \sigma_4 &= (1 - \lambda_{nl})\sigma_1 \end{aligned} \right\} \quad [73]$$

Donde  $\lambda_{nl}$ , es un parámetro adimensional definido por el usuario. Finalmente, el término  $S_{nl}$ , es estimado a partir de la siguiente expresión:

$$\begin{pmatrix} \delta S_{nl,1} \\ \delta S_{nl,2} \\ \delta S_{nl,3} \end{pmatrix} = D \begin{pmatrix} -2 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} C g^{-4} f_{r,1}^{11} \left[ F_1^2 \left( \frac{F_3}{(1 + \lambda_{nl})^4} + \frac{F_4}{(1 - \lambda_{nl})^4} \right) - \frac{2F_1 F_3 F_4}{(1 - \lambda_{nl}^2)^4} \right] \quad [74]$$

Donde  $F_n = F(f_{r,n}, \theta)$  con  $n = 1,2,3,4$ ,  $\delta S_{nl,n} = \delta S_{nl,n}(f_{r,n}, \theta)$  y  $C$  es una constante de proporcionalidad. La Tabla 3-13, expone los valores de los parámetros adimensionales del término  $S_{nl}$  del Switch DIA.

	$\lambda_{nl}$	$C$
WAM-3	0.25	$2.78 \cdot 10^7$
ST4 (Ardhuin et al.)	0.25	$2.50 \cdot 10^7$
Tolman and Chalikov	0.25	$1.00 \cdot 10^7$

**Tabla 3-13.** Valores de los parámetros empíricos adimensionales del término  $S_{nl}$  del Switch DIA (Tolman H., 2014).

El *Switch* WRT (Webb-Resio-Tracy), consiste en un método de resolución completa de la integral de Boltzmann. Esta integral, describe la razón de cambio de la acción de densidad espectral de oleaje para un número particular de componentes de onda resonantes entre sí. La condición de resonancia es determinada mediante la ecuación [75].

$$\left. \begin{aligned} k_1 + k_2 &= k_3 + k_4 \\ \sigma_1 + \sigma_2 &= \sigma_3 + \sigma_4 \end{aligned} \right\} \quad [75]$$

La razón de cambio para la densidad de acción  $N_1(k_1)$  correspondiente a la componente de onda del primera par resonante se expresa como:

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = \iiint G(k_1, k_2, k_3, k_4) \delta(k_1 + k_2 - k_3 - k_4) \delta(\sigma_1 + \sigma_2 - \sigma_3 - \sigma_4) [N_1 N_3 (N_4 - N_2) + N_2 N_4 (N_3 - N_1)] dk_2 dk_3 dk_4 \quad [76]$$

Donde  $G$ , es una función compleja de acoplamiento entre componentes. El método WRF, representa un cálculo exacto del proceso de interacciones no lineales en aguas profundas, sin embargo el costo computacional asociado, es excesivamente alto, típicamente entre  $10^3$  y  $10^4$  veces más tiempo de cálculo requerido que el método DIA.

Finalmente, el *Switch* NL3 (GMD), corresponde a una extensión del método DIA, el cual incorpora el desarrollo de más componentes resonantes, la resolución de la ecuación para profundidades arbitrarias y la expansión en la definición de componentes resonantes, lo que permite expandir la condición de resonancia a la expresión:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= a_1 \sigma_r \\ \sigma_2 &= a_2 \sigma_r \\ \sigma_3 &= a_3 \sigma_r \\ \sigma_4 &= a_4 \sigma_r \\ \theta_{12} &= \theta_1 \pm \theta_{12} \end{aligned} \right\} \quad [77]$$

Donde  $a_1 + a_2 = a_3 + a_4$ , satisfacen la condición de resonancia expuesta en [77],  $\sigma_r$  es una frecuencia de referencia y  $\theta_{12}$  corresponde al ángulo de desfase entre  $k_1$  y  $k_2$ .

Finalmente, el aporte del término  $S_{nl}$  es calculado mediante la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \delta S_{nl,1} \\ \delta S_{nl,2} \\ \delta S_{nl,3} \\ \delta S_{nl,4} \end{pmatrix} &= D \begin{pmatrix} -1 \\ -1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \left( \frac{1}{n_{q,d}} C_{deep} B_{deep} \right. \\ &+ \frac{1}{n_{q,s}} C_{shal} B_{shal} \left. \left[ \frac{c_{g,1} F_1}{k_1 \sigma_1} \frac{c_{g,2} F_2}{k_2 \sigma_2} \left( \frac{c_{g,3} F_3}{k_3 \sigma_3} + \frac{c_{g,4} F_4}{k_4 \sigma_4} \right) \right. \right. \\ &\left. \left. - \frac{c_{g,3} F_3}{k_3 \sigma_3} \frac{c_{g,4} F_4}{k_4 \sigma_4} \left( \frac{c_{g,1} F_1}{k_1 \sigma_1} + \frac{c_{g,2} F_2}{k_2 \sigma_2} \right) \right] \right) \end{aligned} \quad [78]$$

Donde  $B_{deep}$  y  $B_{shal}$  son funciones de escala para aguas profundas y poco profundas, respectivamente, las que son determinadas a partir de las expresiones [79] y [80].  $C_{deep}$ ,  $C_{shal}$ ,  $n_{q,l}$  y  $n_{q,s}$  son constantes de proporcionalidad definidas por el usuario.

$$B_{deep} = \frac{k^{4+m} \sigma^{13-2m}}{(2\pi)^{11} g^{4-m} - c_g^2} \quad [79]$$

$$B_{shal} = \frac{g^2 k^{11}}{(2\pi)^{11} c_g} (kd)^n \quad [80]$$

Donde  $m$  y  $n$  son parámetros adimensionales definidos por el usuario.

Cada parametrización y paquete de parametrizaciones físicas cuenta con su propio set de parámetros adimensionales, los que controlan el balance de la EBAO. La dificultad que presenta la calibración de los modelos de tercera generación, es la determinación de estos parámetros adimensionales de tal forma de representar adecuadamente las condiciones de generación y propagación de oleaje en un determinado sector.

## 4 MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1 CLUSTER DE SERVIDORES Y COMPILACIÓN DEL MODELO WAVEWATCH III V. 4.18

Para la implementación del modelo espectral de olas oceánicas de tercera generación WWIII v.4.18, el proyecto Fondef-IDEA IT3I20006 “Un Atlas de Oleaje para Chile” adquirió dos servidores Dell PowerEdge R815, los cuales se incorporaron como nodos de cómputo al clúster de servidores compartidos por el CIMFAV<sup>6</sup> y la Escuela de Ingeniería Civil Oceánica de la Universidad de Valparaíso. De esta forma se contó con un total de 224 núcleos, de los cuales 96 fueron utilizados para realizar pruebas con el modelo. La Tabla 4-1, expone las características del clúster de servidores.

**Tabla 4-1.** Características del clúster de servidores del CIMFAV y la Escuela de Ingeniería Civil Oceánica – UV.

<b>Rol</b>	Head Node (existente)
<b>Marca y Modelo</b>	Dell R715
<b>Procesadores</b>	2 procesadores AMD Opteron 6378 de 2.4 Ghz de 16 núcleos cada uno
<b>Memoria</b>	32 GB de RAM (16x2GB)
<b>Storage</b>	2 Discos duros SAS de 1 TB, 7.2K (raid 1) 2 Discos duros SAS de 1.2 TB, 10K (raid 0)
<b>Rol</b>	Node-1 (existente)
<b>Marca y Modelo</b>	Dell R815
<b>Procesadores</b>	4 procesadores AMD Opteron 6378 de 2.4 Ghz de 16 núcleos cada uno
<b>Memoria</b>	256 GB de RAM (32x8GB)
<b>Storage</b>	2 Discos duros SAS de 146 GB, 15K (raid 1) 2 Discos duros SAS de 1.2 TB, 10K (raid 0)
<b>Rol</b>	Node-2 (existente)
<b>Marca y Modelo</b>	Dell R815
<b>Procesadores</b>	4 procesadores AMD Opteron 6378 de 2.4 Ghz de 16 núcleos cada uno
<b>Memoria</b>	256 GB de RAM (32x8GB)
<b>Storage</b>	2 Discos duros SAS de 146 GB, 15K (raid 1) 2 Discos duros SAS de 1.2 TB, 10K (raid 0)
<b>Rol</b>	Node-3 (adquirido por el proyecto)
<b>Marca y Modelo</b>	Dell R815
<b>Procesadores</b>	4 procesadores AMD Opteron 6378 de 2.4 Ghz de 12 núcleos cada uno
<b>Memoria</b>	128 GB de RAM (16x8GB)
<b>Storage</b>	2 Discos duros SAS de 146 GB, 15K (raid 1) 4 Discos duros SAS de 1 TB, 7.2K (raid 5)
<b>Rol</b>	Node-4 (adquirido por el proyecto)
<b>Marca y Modelo</b>	Dell R815
<b>Procesadores</b>	4 procesadores AMD Opteron 6378 de 2.4 Ghz de 12 núcleos cada uno
<b>Memoria</b>	128 GB de RAM (16x8GB)
<b>Storage</b>	2 Discos duros SAS de 146 GB, 15K (raid 1) 4 Discos duros SAS de 1 TB, 7.2K (raid 5)

<sup>6</sup> Centro de Investigación y Modelamiento de Fenómenos Aleatorios – Valparaíso.

Antes de instalar el modelo WWIII v. 4.18, el usuario debe realizar la selección de una serie de características con las que contará el modelo final. Estas características son seleccionadas mediante *Switches* de activación o compilación. El modelo agrupa los *Switches* de compilación en dos grupos: *Mandatory Switches* y *Optional Switches*. El primer grupo consta de parametrizaciones físicas, algunas constantes, precisión de los números reales, entre otros, mientras que el segundo grupo controla salidas opcionales del modelo, grado de paralelización, entre otros.

El modelo WW4 v. 4.18 fue compilado tomando como base la combinación de *Switches* propuesta por el *Institut Français de recherche pour l'exploitation de la mer*<sup>7</sup> (Ifremer) (Tolman H., 2014). En la Tabla 4-2, se presentan algunos de los *Switches* más relevantes utilizados.

Es importante resaltar que el modelo WWIII v. 4.18 fue compilado bajo un protocolo de memoria distribuida utilizando bibliotecas MPI. De esta forma el modelo se encuentra preparado para correr en paralelo, permitiendo utilizar de manera óptima las características del clúster de servidores y en consecuencia llevar los tiempos de cómputo a escalas manejables.

**Tabla 4-2.** Resumen de parametrizaciones contenidos en el Switch\_Ifremer1.

Proceso	Parametrización o Switches	Observación
Modelo de hardware	DIST	Memoria distribuida con interfaz de paso de mensajes (procesamiento en paralelo)
Protocolo de paso de mensajes	MPI	
Esquema de propagación	UQ	Esquema de propagación de tercer orden (Leonard, 1975 & Davis & More, 1982)*
Técnica de alivio del efecto Garden Sprinkler	PR3	Técnica de promediación de Tolman (Tolman H. , 2002)*
Crecimiento lineal de la energía debido al viento	SEED	(Tolman H. , User Manual and system documentation of WAVEWATCH III version 4.18, 2014)*
Crecimiento y disipación no lineal de la energía debido al viento	ST4	(Arduin et al., 2010)*
Interacciones no lineales	NL1	Aproximación por interacciones discretas (Hasselmann et al., 1985)*
Fricción de fondo	BT4	Esquema de fricción de fondo SHOWEX (Arduin et al., 2002)

\* Switches que se modificaron en la etapa de selección de paquetes físicos del modelo, capítulo 4.3.2

<sup>7</sup> Instituto Francés de Investigación para la Explotación del Mar.

## 4.2 FUENTES DE DATOS

Los modelos numéricos que simulan la generación y propagación del oleaje, se encuentran condicionados por la disponibilidad de datos de campos de vientos generalmente a 10m de altura, concentraciones de mar de hielo e información batimétrica, que permita describir de forma detallada las irregularidades en el fondo marino, la costa y obstáculos en general (islas, formaciones rocosas, entre otros).

Para calibrar el modelo y validar sus resultados se emplean bases de datos instrumentales, que pueden ser clasificadas en dos categorías en función de los dispositivos utilizados para su obtención. El primer grupo denominado mediciones de campo, corresponde a datos obtenidos a partir de boyas direccionales y escalares posicionadas de manera fija para determinar la evolución de la superficie libre del océano en un punto, mientras que el segundo grupo, denominado teledetección, corresponde a datos obtenidos a partir de altimetría satelital, el cual entrega información del oleaje de forma global y con errores relativamente bajos (SatOC, 2010).

A continuación se describen los conjuntos de datos utilizados para forzar el modelo WWIII v. 4.18 y la información utilizada para la calibración y validación de este.

### 4.2.1 CONJUNTO DE DATOS BATIMÉTRICOS Y LINEA DE COSTA

Siguiendo las recomendaciones de Gallardo (2015), quien comparó la exactitud de las bases de datos GEBCO y ETOPO2v2 a lo largo de las costas de Chile, se utilizó el conjunto de datos batimétricos globales ETOPO2v2 (NGDC, 2006). Esta base de datos de libre acceso presenta información de sondajes de buques de investigación e instituciones oceanográficas locales, junto con datos de altimetría satelital y otras fuentes, para elaborar cartas digitales del fondo marino. Presenta una resolución espacial de 2' x 2' (aproximadamente 1.853Km en el ecuador) acotada entre las latitudes 90° Sur, 90° norte y longitudes 180° Oeste 180° este. El conjunto de datos ETOPO2V2 se encuentra constituido por 6 fuentes de información. En la Figura 4-1 se presenta la cobertura aproximada de las distintas fuentes que constituyen el conjunto de datos ETOPO2V2 y en la Tabla 4-3 el detalle de estas.

La línea de costa, junto con detalles de islas y formaciones rocosas significativas y más pequeñas que una celda de la malla computacional, fue obtenida de la base de datos GSHHG<sup>8</sup> (Wessel & Smith, 1996). Esta base de datos de libre acceso cuenta con 5 niveles de resolución (Tabla 4-4). Para este trabajo se utilizó el conjunto de datos con 40m de resolución.

---

<sup>8</sup> A Global Self-Consistent, Hierarchical, High-resolution Geography

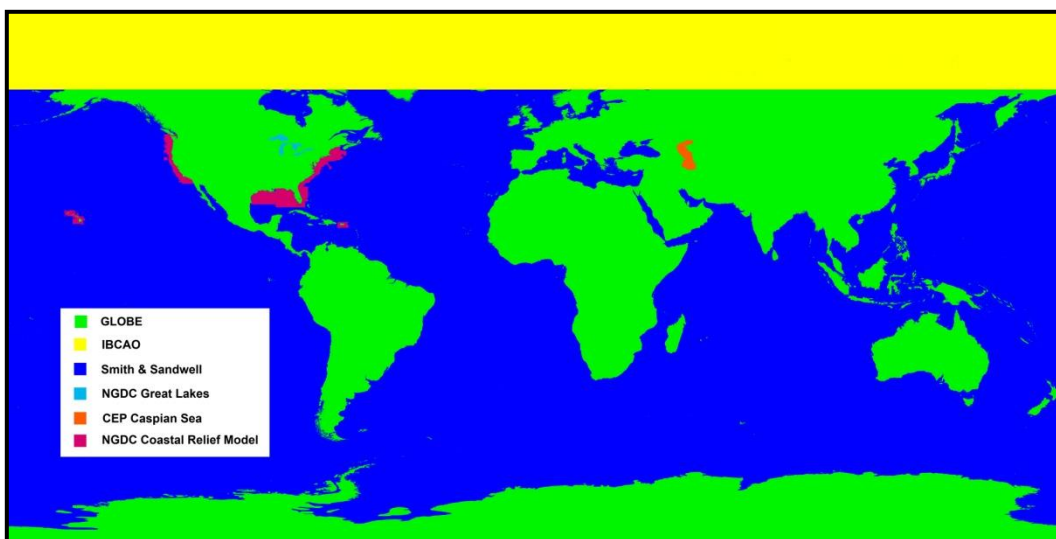


Figura 4-1. Fuentes de información del conjunto de datos batimétricos ETOPO2v2 (NGDC, 2006)

Tabla 4-3. Detalle de fuentes de información del conjunto de datos batimétricos ETOPO2v2 (NGDC, 2006)

Fuente de Información	Descripción
Smith & Sandwell	Etopo2v2 contiene la versión 8.2 de la base de datos Smith & Sandwell, cuenta con una resolución de 2' x 2'. La información fue derivada de radares satelitales.
GLOBE	Corresponde a un conjunto de datos topográficos de más de 8 agencias estadounidenses y extranjeras, con una resolución de 30' x 30'.
IBCAO	Base de datos digital, contiene información a partir de la latitud 64° Norte.
NGDC Coastal Relief Model (CRM)	Modelo de relieve costero para las costas de Estados Unidos
NGDC Great Lakes Bathymetric Data	Conjunto de datos batimétricos de grandes lagos de Estados Unidos
Caspian Sea Bathymetry	Datos batimétricos digitalizados del programa ambiental del Mar Caspio Caspio

Tabla 4-4. Niveles de resolución de la base de datos GSHHG

Nivel	Resolución
Full	0.04Km
High	0.2Km
Intermediate	1Km
Low	5Km
Crude	25Km

Para generar las batimetrías y máscaras de obstrucción que fueron utilizadas en este trabajo, se utilizó el algoritmo de generación de mallas *GridGen* (Chawla & Tolman, 2013). Este algoritmo permite generar mallas de batimetrías, obstrucciones y máscaras de información relevante para el modelo como puntos mojados, secos, bordes activos y puntos excluidos y se encuentra incluido en el paquete de instalación del modelo WWIII.

## 4.2.2 DATOS DE REANÁLISIS ATMOSFÉRICO

Los reanálisis atmosféricos constituyen una fuente de información valiosa en el campo de los estudios climáticos y oceanográficos. La información entregada por estas bases de datos consiste en información generada a partir de modelos numéricos de predicción atmosférica reprocesadas mediante la aplicación de técnicas de asimilación de datos. Para esto son utilizados datos obtenidos a partir de instrumentos de medición in-situ y de teledetección.

A continuación se presentan algunos de los proyectos de reanálisis existentes:

### 4.2.2.1 NCEP R1/R2

La NCEP en conjunto con otras organizaciones gubernamentales de Estados Unidos ha desarrollado dos bases de datos de reanálisis atmosférico que cubren el periodo de tiempo comprendido entre el año 1948 a la actualidad.

La primera base de datos denominada Reanálisis-1 (R1), corresponde a un proyecto desarrollado por la NCEP en conjunto con la National Center for Atmospheric Research (NCAR). Esta base de datos contiene información desde el año 1948 a la fecha y presenta una resolución de  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  en la horizontal y 29 niveles sigmas verticales con pasos de tiempo de 6 horas (Kalnay et al., 1996).

La segunda base de datos, denominada Reanálisis-2 (R2), corresponde a un proyecto desarrollado por la NCEP en conjunto con el Department of Energy de Estados Unidos (DOE) que consiste en una mejora del Reanálisis 1 mediante la identificación de errores y actualización de algunas parametrizaciones de los procesos físicos. Esta base de datos contiene información desde el año 1979 a la fecha y presenta una resolución horizontal de  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  con 29 niveles sigmas verticales con pasos de tiempo de 6 horas (Kanamitsu et al., 2002).

### 4.2.2.2 NOAA CFSR

La base de datos del Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) fue desarrollada bajo la dirección de la NCEP y corresponde a un esfuerzo para generar una estimación acertada de un registro continuo y uniforme del estado del océano y la atmosfera para aplicaciones de monitoreo y diagnóstico del clima. Contiene información entre los años 1979 y 2009 y ha sido extendida hasta marzo del 2011, presenta una resolución horizontal de  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  con 64 niveles sigmas verticales con pasos de tiempo de 1 hora (Saha et al., 2010).

#### 4.2.2.3 NOAA CFSv2

La base de datos del CFSv2 corresponde a un análisis operacional de datos atmosféricos. Contiene información entre el año 2011 a la actualidad, presenta una resolución horizontal de 0.2°, 0.5°, 1° y 2.5° con 64 niveles sigmas verticales con pasos de tiempo de 1 hora (Saha et al., 2014).

#### 4.2.2.4 ERA-Interim

La base de datos ERA-Interim fue desarrollada por el European Centre for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF) y corresponde a un esfuerzo para mejorar el análisis ERA-40 a través del desarrollo de un nuevo sistema de asimilación variacional de datos denominado 4D-Var. Contiene información desde el año 1979 a la actualidad, presenta una resolución horizontal de 0.703125° x 0.703125° y 60 niveles sigmas verticales con pasos de tiempo cada 3 horas. (Dee et al., 2011)

En la Tabla 4-5, se presenta un resumen comparativo de las bases de datos de reanálisis antes mencionadas.

**Tabla 4-5.** Resumen comparativo de bases de datos de reanálisis disponibles

Reanálisis	Periodo de Tiempo		Resolución Horizontal	Niveles Verticales	Fuente
	Inicio	Término			
R1	1948	actualidad	2.5° x 2.5°	29	CPC <sup>9</sup>
R2	1979	actualidad	2.5° x 2.5°	29	NCDC <sup>10</sup>
CFSR	1979	03/2011	0.5° x 0.5°	64	NOMADS <sup>11</sup>
CFSv2	2011	actualidad	0.2°, 0.5°, 1° y 2.5°	64	NOMADS <sup>12</sup>
ERA-Interim	1979	actualidad	0.5° x 0.5°	60	ECMWF <sup>13</sup>

Debido a la baja resolución que presentan las bases de datos R1 y R2, para este trabajo solo fue considerado el uso de las bases de datos ERA-Interim, CFSR y CFS-v2.

<sup>9</sup> <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/wesley/reanalysis.html>

<sup>10</sup> <http://www.ncdc.noaa.gov/has/HAS.FileAppRouter?datasetname=NCDOEGR2MON&subqueryby=STATION&appName=&outdest=FILE>

<sup>11</sup> <http://nomads.ncdc.noaa.gov/data.php?name=access#cfsr>

<sup>12</sup> <http://nomads.ncdc.noaa.gov/data.php?name=access#cfsr>

<sup>13</sup> <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/>

## 4.2.3 MEDICIONES DE BOYAS Y ALTÍMETROS SATELITALES

### 4.2.3.1 Mediciones de Boyas

Las mediciones de boyas utilizadas en este trabajo corresponden a registros de estados de mar en aguas profundas obtenidas a partir de 6 boyas direccionales y 2 escalares. Esta información fue facilitada por el proyecto CORFO-INNOVA 09CN14-5718 y el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada. Los datos fueron utilizados para evaluar el desempeño del modelo WWIII v. 4.18 durante la etapa de calibración y posterior validación.

En las Tablas 4-6 y 4-7, se presenta la información de cada una de las boyas utilizadas.

**Tabla 4-6.** Boyas disponibles utilizadas en la calibración y validación de la base de datos generada con modelo WWIII

Nombre	Localidad	Ubicación		Profundidad [m]	Periodo de medición		Fuente
		Lat.[°]	Lon.[°]		Inicio	Término	
<b>B1</b>	Arica	-19.37	-84.37	5441	2009-10-29	2013-12-31†	NOAA-NDBC
<b>B2</b>	Valparaíso	-32.99	-71.82	465	2009-08-30	2010-10-10	SHOA
<b>B3</b>	Valparaíso	-32.93	-71.67	190	2000-08-01	2003-08-01†	SHOA
<b>B4</b>	Valparaíso	-32.98	-71.62	190	1979-06-07	1981-08-10	SHOA
<b>B5</b>	V Región	-XX.XX	-XX.XX*	150	2011-06-16	2013-12-21†	CORFO-INNOVA*
<b>B6</b>	Constitución	-35.3	-73	710	1984-02-18	1985-02-22	SHOA
<b>B7</b>	VII Región	-XX.XX	-XX.XX	150	2011-09-16	2012-05-16†	CORFO-INNOVA*
<b>B8</b>	XIV Región	-XX.XX	-XX.XX	150	2012-11-21	2013-07-30	CORFO-INNOVA*

\* La ubicación exacta de los instrumentos no puede ser revelada debido a un acuerdo de confidencialidad con el proyecto CORFO-INNOVA 09CN14-5718.

† Registros no continuos.

**Tabla 4-7.** Detalle de información registrada por las boyas utilizadas en la calibración y validación de la base de datos generada con modelo WWIII

Nombre	Tipo	Intervalo de tiempo entre registros	Cantidad de estados de mar registrados	Información disponible
<b>B1</b>	Direccional	1 hora	47380	$S(f)^*$ , $H_{m0}$ , $T_m$ , $D_p$
<b>B2</b>	Direccional	3 horas	3207	$S(f, \theta)$ $\dagger$ , $H_{m0}$ , $T_m$ , $D_m$
<b>B3</b>	Direccional	1 hora	14750	$S(f, \theta)$ , $H_{m0}$ , $T_m$ , $D_m$
<b>B4</b>	Escalar	3 horas	2290	$H_{m0}$ , $T_m$
<b>B5</b>	Direccional	1 hora	14963	$S(f, \theta)$ , $H_{m0}$ , $T_m$ , $D_m$
<b>B6</b>	Escalar	3 horas	2885	$H_{m0}$ , $T_m$
<b>B7</b>	Direccional	1 hora	2394	$S(f, \theta)$ , $H_{m0}$ , $T_m$ , $D_m$
<b>B8</b>	Direccional	1 hora	5066	$S(f, \theta)$ , $H_{m0}$ , $T_m$ , $D_m$

$S(f)$ : Espectro de oleaje en el dominio de la frecuencia.

$S(f, \theta)$ : Espectro de oleaje en el dominio de la frecuencia y la dirección

#### 4.2.3.2 Altimetros Satelitales y Proyecto ESA Globwave

Los altímetros emiten ondas de radar, las que son reflejadas en la superficie libre del océano. De esta forma es posible determinar el nivel de mar, como la diferencia entre la distancia satélite-superficie (deducida a partir del tiempo que tarda la onda en ir y volver) y la posición del satélite respecto a una superficie de referencia arbitraria (el centro de la tierra o una superficie regular que se aproxima a su forma real, como por ejemplo un elipsoide referencial). También se puede determinar la altura de las olas y la velocidad del viento a partir de la amplitud y forma de la onda reflejada que depende casi en su totalidad del estado de mar bajo la zona iluminada por el radar. De esta forma si la superficie del mar se encuentra calma la señal reflejada es similar a la emitida, mientras que si el estado de mar es caótico la señal reflejada será difusa y deformada (AVISO, 2015).

Este método de obtención de alturas de olas no registra individualmente las ondas, si no que la rugosidad de la superficie libre del mar, la cual es cuantificada como una altura de ola significativa que representa la zona iluminada por el radar.

En general los altímetros son capaces de registrar información con una frecuencia de muestreo cercana a 1 Hz y anchos de pasada entre los 0 y 500 km, proporcionando datos cada 6 a 7 km, dependiendo de la velocidad y altura a la que se encuentra orbitando el satélite.

La Figura 4-2 muestra un esquema idealizado del funcionamiento de un radar altimétrico.

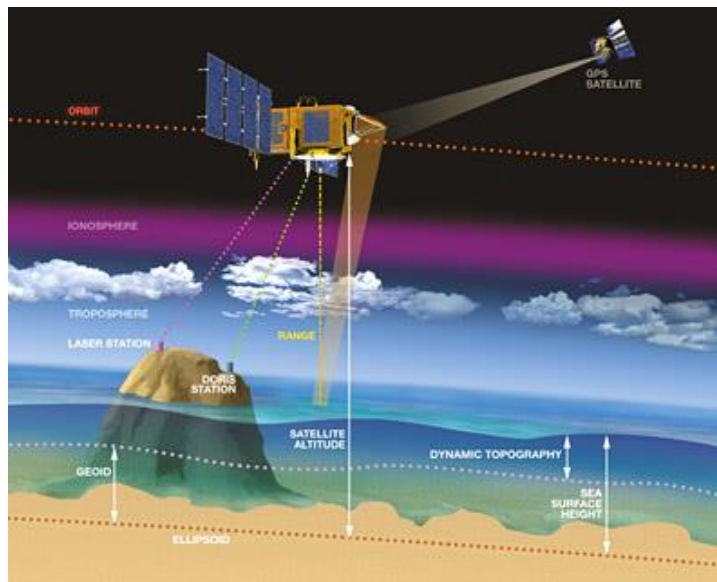


Figura 4-2. Esquema del funcionamiento de un altímetro de radar (AVISO, 2015)

El proyecto ESA Globwave corresponde a una iniciativa de la European Space Agency (ESA), subsidiada por el Centre National D'études Spatiales (CNES) de Francia. El objetivo de este proyecto es facilitar datos de oleaje adquiridos a partir de radares altimétricos para usos científicos, operacionales y comerciales.

El proyecto ESA Globwave, posibilita el acceso a la base de datos L2P, conformada por datos provenientes de distintas misiones satelitales, en formato estándar y con información respecto a la calidad del dato (SatOC, 2010).

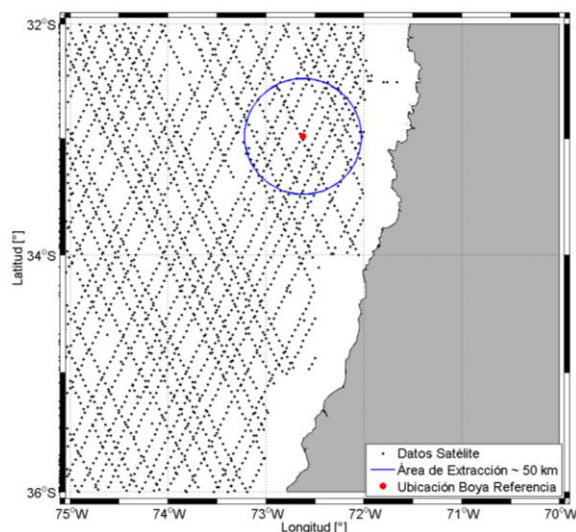
En la Tabla 4-8 se presenta el detalle de la información de las 6 misiones satelitales cuyos datos son distribuidos por el proyecto ESA-Globwave.

**Tabla 4-8.** Detalle de los datos históricos de alturas de ola obtenidas a partir de altimetría satelital, distribuidos por el proyecto ESA-Globwave.

Nombre	Misión	Duración de la misión		N° de ciclos
		Inicio	Término	
Sat1	ERS-1	1992-02-01	1996-06-02	3, 35 o 168 días*
Sat2	ERS-2	1995-05-15	2003-05-22	35 días
Sat3	ENVISAT	2002-08-26	2012-04-08	2 o 25 días
Sat4	Topex-Poseidon	1992-09-25	2005-10-08	10 días
Sat5	Jason-1	2002-02-15	a la fecha	10 días
Sat6	GFO	2000-01-08	2008-07-23	17 días

\* Ciclos variables de 3 , 35 y 168 días, debido a la falta de rutas fijas de paso del satélite en el globo terrestre

La información satelital utilizada, corresponde a aquellos datos contenidos dentro de un área circular de radio cercano a 50 km (SatOC, 2010), cuyo centro corresponde a la ubicación de alguna boya o punto de interés. La Figura 4-3, muestra un esquema de extracción de datos satelitales para una boya referencial. El set de datos satelitales es construido a partir de la agrupación de registros de cada misión que posea una trayectoria que pase por el área de extracción.



**Figura 4-3.** Esquema de extracción de datos satelitales en un radio cercano a 50 km respecto a una boya de referencia (Elaboración propia).

### 4.3 METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN

La calibración del modelo se abordó en tres etapas. La primera, consiste en la selección de la extensión y resolución del dominio computacional que se utilizará durante la calibración y posterior generación de la base de datos de oleaje espectral. La segunda corresponde a la selección de los esquemas físicos del modelo WWIII v.4.18, que intervienen en los procesos de generación y propagación del oleaje en aguas profundas. La tercera etapa consiste en la selección de la base de datos de forzantes atmosféricas que se utilizarán para alimentar el modelo de generación de ondas, junto con la modificación de algunas de las parametrizaciones físicas de los esquemas seleccionados previamente, con el objetivo de aumentar el desempeño de los resultados del modelo.

Los periodos de tiempo que fueron utilizados para las simulaciones de los escenarios de calibración, fueron seleccionados en función de la cantidad y fechas disponibles de los datos mencionados el capítulo 4.2.3. En la Tabla 4-9, se presentan los intervalos de tiempo utilizados en las etapas 2 y 3 del proceso de calibración del modelo WWIII v.4.18.

**Tabla 4-9.** Periodos de simulación utilizados para calibrar el modelo WWIII v.4.18

<b>Periodos de simulación</b>	1981 a 1985
	1992 a 1993
	2000 a 2003
	2007 a 2013

La Figura 4-4 presenta un esquema simplificado de la metodología de calibración empleada durante este trabajo.

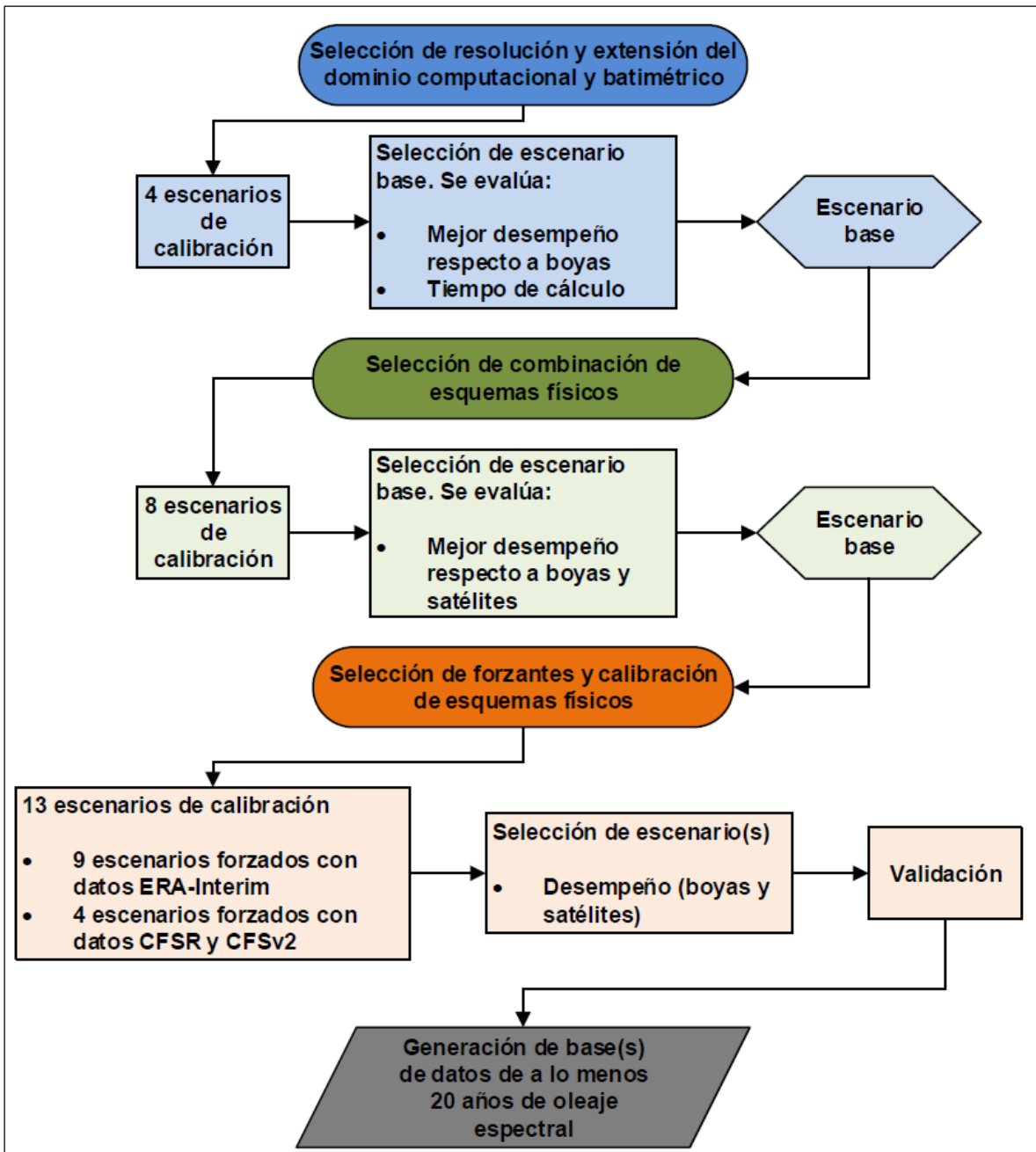


Figura 4-4. Esquema simplificado de la metodología de calibración empleada

#### 4.3.1 SELECCIÓN DE LA RESOLUCIÓN Y EXTENSIÓN DEL DOMINIO COMPUTACIONAL Y BATIMÉTRICO

El oleaje en Chile presenta una alta complejidad, debido a que las olas que inciden en la costa pueden tener diferentes mecanismos y fuentes de generación. De esta forma, frente a las costas de Chile se presenta un oleaje multimodal, el cual puede estar compuesto por ondas asociadas principalmente a tres mecanismos de generación (SHOA, 2005):

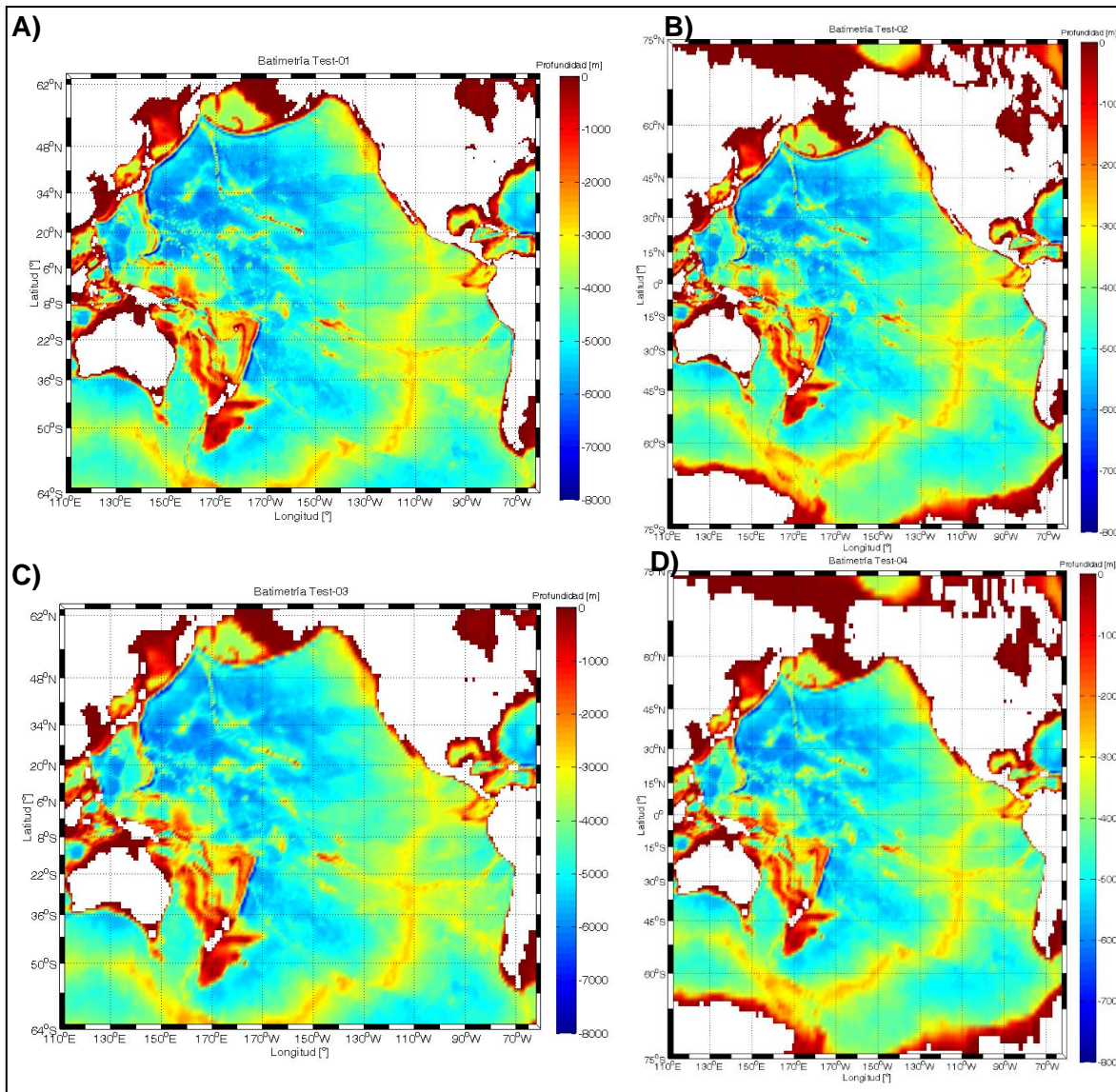
- Swell del hemisferio sur: son olas de gran tamaño generadas por Ciclones Extra Tropicales que se propagan hacia la costa, con una constante disminución de su altura y aumento de su período, llegando a nuestras costas con mayores intensidades durante la temporada de invierno.
- Swell del hemisferio norte: son olas generadas en cercanías a las islas Aleutianas, perteneciente al Estado de Alaska, EE.UU., se propagan hacia el sur llegando desde el NW de las aguas profundas de nuestro país durante la temporada de verano, y son encubiertas por la olas que se generan en el hemisferio SW
- Ciclones tropicales: se generan en las aguas de América Central y se propagan hacia el sur hasta las costas del país, son de baja frecuencia de ocurrencia, pero relevantes para el oleaje extremo o de diseño.

Es por lo anterior, que para simular la generación y propagación de oleaje frente a las costas de Chile, es necesario utilizar un modelo cuyo dominio computacional considere toda la cuenca del Pacífico y de esta forma tener en cuenta todas las posibles componentes del oleaje asociadas a distintas fuentes y mecanismos de generación. Para la selección de la resolución y extensión del dominio computacional que será utilizado durante este trabajo, se plantearon 4 escenarios los cuales se presentan en la Tabla 4-10.

**Tabla 4-10.** Escenarios planteados para la selección de la resolución y extensión del dominio computacional que será utilizado durante el trabajo

Escenario	Resolución	Rango longitud [°]	Rango latitud [°]	Cantidad de puntos de malla	Cantidad de puntos activos	Fuente batimetría	Fuente línea de costa y sub-mallas
Test-01	0.5° x 0.5°	-64 a 64	110 a 300	97660	75585	Etopo2v2	GSHHG/Full
Test-02	0.5° x 0.5°	-75 a 75	110 a 300	114380	85375	Etopo2v2	GSHHG/Full
Test-03	1° x 1°	-64 a 64	110 a 300	24510	18765	Etopo2v2	GSHHG/Full
Test-04	1° x 1°	-75 a 75	110 a 300	28690	20854	Etopo2v2	GSHHG/Full

En la Figura 4-5, se presentan las batimetrías generadas a partir de la información planteada en la Tabla 4-10.



**Figura 4-5.** Batimetrías utilizadas para la simulación de los escenarios planteados en la Tabla 4-10, generadas a partir de la base de datos ETOPO2v2 mediante al algoritmo *GridGen*. A). Test\_01. B). Test\_02. C). Test\_03. D). Test\_04 (Elaboración propia).

Como se mencionó en el capítulo 3.5.2 del presente, el modelo utiliza 4 pasos de tiempo para resolver la EBAO. Estos pasos de tiempo son dependientes de la resolución y la extensión del dominio computacional. En la Tabla 4-11, se presentan los pasos de tiempo utilizados en los escenarios plantados para la selección de la resolución y extensión del dominio computacional del modelo WWIII v.4.18.

**Tabla 4-11.** Pasos de tiempo del modelo WWIII v.4.18, empleados en los escenarios planteados en la Tabla 4-10

<b>Escenario</b>	$\Delta t_g$	$\Delta t_{xy}$	$\Delta t_k$	$\Delta t_s$
<b>Test-01</b>	1800	940	900	15
<b>Test-02</b>	1100	600	550	15
<b>Test-03</b>	3750	1870	1870	15
<b>Test-04</b>	2200	1100	1100	15

El objetivo de esta etapa, es seleccionar el escenario cuyo dominio computacional presente resultados consistentes con los registros de boya y tiempos de cálculo relativamente bajos. Se utilizaron las configuraciones y forzantes del modelo expuestas en la Tabla 4-12.

**Tabla 4-12.** Configuración y forzantes base utilizadas en el modelo WWIII v.4.18 para los escenarios planteados en la Tabla 4-10.

<b>Resolución espectral</b>	29 frecuencias , 24 direcciones
<b>Frecuencia inicial</b>	0.0345 s
<b>Frecuencia final</b>	0.4975 s
<b>Dirección inicial</b>	7.5°
<b>Dirección final</b>	352.5°
<b>Forzantes</b>	ERA-Interim
<b>Compilación modelo</b>	Switch_lfremmer1, Tabla 4-2
<b>Periodo de simulación</b>	01/01/2013 hasta 31/12/2013

Para cuantificar el desempeño de los escenarios planteados en la Tabla 4-10 se compararon los resultados de las simulaciones con los registros de las boyas B1, B5 y B8 para el año 2013. La estimación del desempeño se realizó en base a los indicadores estadísticos contenidos en las Tablas 4-19 y 4-20 del capítulo 4.3. Finalmente el escenario seleccionado en esta etapa servirá como base para las etapas de calibración posteriores.

#### 4.3.2 SELECCIÓN DE ESQUEMAS FÍSICOS

El objetivo de esta etapa, es determinar la combinación de esquemas físicos que representen de mejor manera las condiciones de generación y propagación de oleaje en la cuenca del océano Pacífico. Para esta etapa de calibración, se plantearon 8 escenarios de simulación en los cuales, se alternaron los esquemas de crecimiento y disipación de energía, transferencias de energía debido a interacciones no lineales en aguas profundas y técnicas de alivio del efecto GSE, los cuales son expuestos en el capítulo 3.5.2. En la Tabla 4-13, se presentan los escenarios planteados para la selección de paquetes y parametrizaciones físicas del modelo WWIII v.4.18.

**Tabla 4-13.** Escenarios de simulación planteados para la selección de paquetes y parametrizaciones físicas en la calibración del modelo WWIII v.4.18

Escenario	Término inicialización ( $S_{in}$ )	Paquete de crecimiento y disipación ( $S_{in}$ )	Interacciones no lineales ( $S_{nl}$ )	Técnica de alivio de GSE y esquema de propagación
<b>Test-08</b>	SEED	ST1	DIA	PR3 / UQ
<b>Test-09</b>	SEED	ST2/STAB2	DIA	PR3 / UQ
<b>Test-10</b>	SEED	ST3/STAB3	DIA	PR3 / UQ
<b>Test-11</b>	SEED	ST4	DIA	PR3 / UQ
<b>Test-12</b>	SEED	ST6	DIA	PR3 / UQ
<b>Test-13</b>	SEED	ST4	GMD	PR3 / UQ
<b>Test-14</b>	SEED	ST4	DIA	PR2 / UQ
<b>Test-15</b>	LN1	ST4	DIA	PR3 / UQ

Como se mencionó en el capítulo 3.5.3, cada esquema físico del modelo cuenta con su propio set de parametrizaciones y coeficientes adimensionales. Para los escenarios planteados en la Tabla 4-13, se utilizó la configuración por defecto de cada esquema físico. Se simularon los intervalos de tiempo expuestos en la Tabla 4-9, para cuantificar el desempeño de los escenarios de planteados en la Tabla 4-13, se utilizó la metodología propuesta en el capítulo 4.3.4. La metodología señalada consiste en una combinación entre factores de importancia e indicadores estadísticos, parámetros de oleaje y métodos de comparación. Esta metodología fue desarrollada por el equipo de trabajo del proyecto Fondef-IDeA IT3120006 “Un Atlas de Oleaje para Chile”. La Tabla 4-14, muestra los factores importancia utilizados durante esta etapa del proceso de calibración.

**Tabla 4-14.** Factores de importancia relativa utilizados en la metodología de cuantificación de desempeño de los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-13

Parámetros Oleaje	Factor de Importancia ( $\omega_{(k)}^{WP}$ )
Hm0	0.33
Tm	0.33
Dm	0.33
Total $\Sigma$	1
Indicador estadístico	Factor de Importancia ( $\omega_{(j)}^{EP}$ )
MAE	0.2
RMSE	0.2
BIAS	0.2
SS	0.2
R <sup>2</sup>	0.2
Total $\Sigma$	1
Tipo de comparación	Factor de Importancia ( $\omega_{(l)}^{TD}$ )
Allb	0.16
5%b	0.14
Alls	0.14
5%s	0.14
3bMDA	0.14
3bPOT	0.14
PDAExt	0.14
Total $\Sigma$	1

La Tabla 4-15, muestra la información utilizada para contrastar los resultados de las simulaciones planteadas para la selección de los esquemas y parametrizaciones físicas del modelo WWIII v.4.18.

**Tabla 4-15.** Información utilizada para contrastar los resultados de los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-13.

Nombre	Zona	Ubicación		Fuente
		Lat. [°]	Lon. [°]	
<b>B1</b>	NORTE	-19.37	-84.37	NOAA-NDBC
<b>S1</b>	NORTE	-19.37	-84.37	ESA Globwave
<b>B2</b>	CENTRO	-32.99	-71.82	SHOA
<b>S2</b>	CENTRO	-32.99	-71.82	ESA Globwave
<b>B3</b>	CENTRO	-32.93	-71.67	SHOA
<b>S3</b>	CENTRO	-32.93	-71.67	ESA Globwave
<b>B5</b>	CENTRO	-XX.XX	-XX.XX	CORFO-INNOVA
<b>S5</b>	CENTRO	-XX.XX	-XX.XX	ESA Globwave
<b>B7</b>	SUR	-XX.XX	-XX.XX	CORFO-INNOVA
<b>S7</b>	SUR	-XX.XX	-XX.XX	ESA Globwave
<b>B8</b>	SUR	-XX.XX	-XX.XX	CORFO-INNOVA
<b>S8</b>	SUR	-XX.XX	-XX.XX	ESA Globwave

#### 4.3.3 SELECCIÓN DE FORZANTES Y CALIBRACIÓN DE ESQUEMAS FÍSICOS

El objetivo de esta etapa, es mejorar el desempeño del escenario de calibración seleccionado en los capítulos anteriores. Para esto, se utilizaron otras fuentes de información de datos atmosféricos reanalizados y además se modificaron algunas parametrizaciones de los procesos físicos más relevantes en la generación y propagación de oleaje en aguas profundas que fueron seleccionadas a partir de los resultados de los escenarios planteados en el capítulo anterior.

En el capítulo 4.2.2, se presentaron algunas de las fuentes de información con datos de reanálisis que podrían ser utilizadas para alimentar el modelo WWIII v.4.18. En la actualidad las bases de datos de reanálisis más utilizadas en el campo de la simulación de la generación de oleaje son: ERA-Interim, CFSR y CFSv2. Esto debido principalmente a que estas fuentes de información se someten constantemente a validaciones y actualizaciones por parte de los organismos encargados de mantenerlas.

Diversos estudios focalizados en la calibración de modelos de generación de oleaje con fines ingenieriles y científicos, han llegado a la conclusión que las bases de datos de reanálisis utilizadas para alimentar a los modelos de tercera generación, presentan diferencias en la calidad de la información para distintos periodos de tiempo, así como diferencias significativas en la caracterización de fuertes vientos, los cuales son los causantes, en su mayoría, del oleaje extremo que llega a las costas (Arduin et al., 2011). Rasche & Arduin (2013), plantean que la base de datos CFSR presenta una sobreestimación de la velocidad del viento en relación a la base de datos ERA-Interim. Esto cobra importancia al momento de representar de manera adecuada el oleaje extremo que llega a las costas de Chile.

Una de las principales dificultades en la calibración de los modelos matemáticos basados en la EBAO, es el control del crecimiento, la disipación y transferencia de energía en el espectro de olas, es decir la calibración de los términos fuentes de la EBAO. Esto principalmente debido a los siguientes puntos:

- La diferencia existente entre la información entregada por las distintas bases de datos de reanálisis, lo que conlleva a que la calibración realizada a un modelo forzado con una fuente de información, no sea necesariamente válida si se aplica a otra.
- La influencia de condiciones locales de los sectores en los que se realiza la simulación de la generación y propagación del oleaje.

La Tabla 4-16, expone los escenarios de simulación planteados para la calibración de los esquemas físicos del modelo WWIII v.4.18 y para la selección de la base de datos reanálisis atmosférico que será utilizada para forzar el modelo.

**Tabla 4-16.** Escenarios de simulación planteados para la selección de forzantes y calibración parametrizaciones físicas y coeficientes adimensionales del modelo WWIII v.4.18

Escenario	Crecimiento $S_{in}$		Disipación $S_{ds}$		Forzante
	$Betamax$	$Z_{0,max}$	$C_{ds}^{sat}$	$B_r$	
<b>Test-11</b> ¥	1.52	1.002	-0.000022	0.0009	ERA
<b>Test-16</b>	1.15	1.002	-0.000022	0.0009	ERA
<b>Test-17</b>	1.33	1.002	-0.000022	0.0009	ERA
<b>Test-18</b>	1.425	1.002	-0.000022	0.0009	ERA
<b>Test-19</b>	1.52	1.002	-0.000022	0.0008	ERA
<b>Test-20</b>	1.425	1.002	-0.000022	0.00085	ERA
<b>Test-21</b>	1.4	1.002	-0.000022	0.00085	ERA
<b>Test-22</b>	1.52	1.002	-0.00003	0.0009	ERA
<b>Test-23</b> ¥	1.52	1.002	-0.000022	0.0009	ERA
<b>Test-24</b>	1.52	1.01	-0.000022	0.0009	ERA
<b>Test-07B</b>	1.33	1.002	-0.000022	0.0009	CFSR y CFSv2
<b>Test-08B</b>	1.52	1.002	-0.000022	0.0009	CFSR y CFSv2
<b>Test-09B</b>	1.4	1.002	-0.000022	0.0009	CFSR y CFSv2
<b>Test-10B</b>	1.2	1.002	-0.000022	0.0009	CFSR y CFSv2

¥, La diferencia entre el Test-11 y el Test-23 es el paso de tiempo del modelo. Para el segundo se utiliza un paso de tiempo global de 3600 segundos

Para evaluar el desempeño de los escenarios planteados en la Tabla 4-16, se utilizó la metodología planteada en el capítulo 4.3.4, utilizando los factores de importancia que se presentan en la Tabla 4-17.

**Tabla 4-17.** Factores de importancia relativa utilizados en la metodología de cuantificación de desempeño de los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-16.

	Global	Solo Clima Extremo	Solo Clima Medio	Global Mayor Ponderación Hm0
Parámetros Oleaje	Factor de Importancia $(\omega_{(k)}^{WP})$	Factor de Importancia $(\omega_{(k)}^{WP})$	Factor de Importancia $(\omega_{(k)}^{WP})$	Factor de Importancia $(\omega_{(k)}^{WP})$
$H_{m0}$	0.33	0.33	0.33	<b>0.5</b>
$T_m$	0.33	0.33	0.33	<b>0.25</b>
$D_m$	0.33	0.33	0.33	<b>0.25</b>
Total $\Sigma$	1	1	1	1
Indicador estadístico	Factor de Importancia $(\omega_{(j)}^{EP})$	Factor de Importancia $(\omega_{(j)}^{EP})$	Factor de Importancia $(\omega_{(j)}^{EP})$	Factor de Importancia $(\omega_{(j)}^{EP})$
$MAE$	0.2	0.2	0.2	0.2
$RMSE$	0.2	0.2	0.2	0.2
$BIAS$	0.2	0.2	0.2	0.2
$Skill$	0.2	0.2	0.2	0.2
$R^2$	0.2	0.2	0.2	0.2
Total $\Sigma$	1	1	1	1
Tipo de comparación	Factor de Importancia $(\omega_{(l)}^{TD})$	Factor de Importancia $(\omega_{(l)}^{TD})$	Factor de Importancia $(\omega_{(l)}^{TD})$	Factor de Importancia $(\omega_{(l)}^{TD})$
$Allb$	0.16	0	<b>0.33</b>	0.16
$5\%b$	0.14	<b>0.25</b>	0	0.14
$Alls$	0.14	0	<b>0.33</b>	0.14
$5\%s$	0.14	<b>0.25</b>	0	0.14
$3bMDA$	0.14	0	<b>0.33</b>	0.14
$3bPOT$	0.14	<b>0.25</b>	0	0.14
$PDAExt$	0.14	<b>0.25</b>	0	0.14
Total $\Sigma$	1	1	1	1

Debido a que el interés es determinar el desempeño de los escenarios de simulación en las condiciones de clima medio y clima extremo, es que se utilizaron 4 combinaciones de factores de importancia, lo cuales se presentan en la Tabla 4-17.

La Tabla 4-18, muestra la información utilizada para contrastar los resultados de las simulaciones planteadas para la selección de los esquemas y parametrizaciones físicas del modelo WWIII v.4.18.

**Tabla 4-18.** Información utilizada para contrastar los resultados de los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-16

Nombre	Zona	Ubicación		Fuente
		Lat.[°]	Lon.[°]	
<b>B1</b>	Norte	-19.37	-84.37	NOAA-NDBC
<b>S2</b>	Norte	-19	-72	ESA Globwave
<b>S3</b>	Norte	-20	-72	ESA Globwave
<b>S4</b>	Norte	-22	-72	ESA Globwave
<b>S5</b>	Norte	-23.5	-71.5	ESA Globwave
<b>S6</b>	Norte	-25	-72	ESA Globwave
<b>B2</b>	Centro	-32.99	-71.82	SHOA
<b>B3</b>	Centro	-32.93	-71.67	SHOA
<b>B5</b>	Centro	-XX.XX	-XX.XX	CORFO-INNOVA
<b>S10</b>	Centro	-28	-72.5	ESA Globwave
<b>S11</b>	Centro	-31	-73	ESA Globwave
<b>S12</b>	Centro	-35	-73.5	ESA Globwave
<b>S13</b>	Centro	-38	-74.5	ESA Globwave
<b>B7</b>	Centro	-XX.XX	-XX.XX	CORFO-INNOVA
<b>B8</b>	Centro	-XX.XX	-XX.XX	CORFO-INNOVA
<b>S16</b>	Centro	-40	-74.5	ESA Globwave
<b>S17</b>	Centro	-42	-75	ESA Globwave
<b>S18</b>	Sur	-44	-76.5	ESA Globwave
<b>S19</b>	Sur	-46	-77.5	ESA Globwave
<b>S20</b>	Sur	-48	-77.5	ESA Globwave
<b>S21</b>	Sur	-53	-76	ESA Globwave
<b>S22</b>	Sur	-57	-68	ESA Globwave
<b>S23</b>	Insular	-27	-110	ESA Globwave
<b>S24</b>	Insular	-34	-81	ESA Globwave

#### 4.3.4 CUANTIFICACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LOS ESCENARIOS DE CALIBRACIÓN

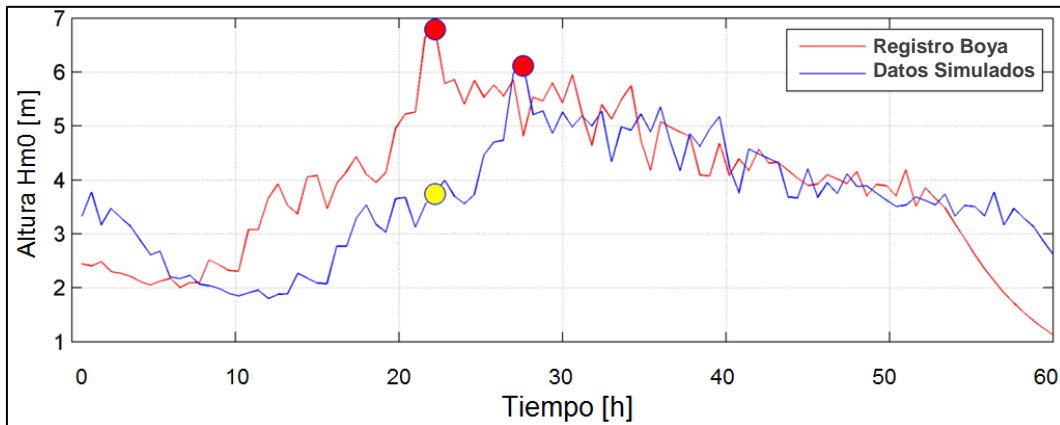
La siguiente metodología tiene como objetivo la determinación de un único valor que permita estimar la calidad de los escenarios de calibración planteados en los capítulos anteriores. Este valor denominado “*Índice de Desempeño Unitario*” (de ahora en adelante IDU), consiste en una combinación lineal de indicadores estadísticos normalizados sobre la base de un análisis multicriterio, que tiene como objetivo establecer factores de importancia a cada estadígrafo, tipos de análisis de los datos y parámetros de oleaje obtenido mediante las simulaciones. En la Tabla 4-19 se presentan los indicadores estadísticos utilizados en las comparaciones de las variables  $H_{m0}$  y  $T_m$ . Para la comparación de la dirección media ( $D_m$ ), se utilizaron los indicadores de estadística circular que se presentan en la Tabla 4-20.

**Tabla 4-19.** Indicadores estadísticos utilizados.  $P_i$  y  $O_i$  corresponden a los datos modelados y observados en el instante  $i$  respectivamente, mientras que  $N$  es la cantidad de datos coincidentes y comparables en ambas series.

Indicador Estadístico	Ecuación
Error absoluto medio (MAE)	$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N  P_i - O_i $
Error cuadrático medio (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}$
Error medio (BIAS)	$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i - O_i$
Índice de SS (SS)	$SS = 1 - \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N O_i^2}}$
Coefficiente de determinación ( $R^2$ )	$R^2 = \frac{Cov(O, P)^2}{S_o^2 S_p^2}$ Donde $Cov(O, P)$ es la covarianza entre $O$ y $P$ y $S_o, S_p$ desviaciones típicas de $O$ y $P$ respectivamente.
Promedio de la diferencia entre alturas extremas (PDAExt)	Promedio de las diferencias entre las alturas máximas registradas por la boya, obtenidas mediante la metodología <i>Peak Over Threshold (POT)</i> , y la máximas alturas simuladas contenidas dentro de una ventana de tiempo de 1.5 días antes y 1.5 días después de la fecha de cada evento extremo registrado por la boya y obtenido mediante <i>POT</i> (Figura 4-6).

**Tabla 4-20.** Indicadores de estadística circular para la evaluación del desempeño en la selección de esquemas físicos y calibración del modelo (Zar, 1998).  $P_i$  y  $O_i$  corresponden a los datos modelados y observados en el instante  $i$  respectivamente, mientras que  $N$  es la cantidad de datos de ambas series.

Indicadores Estadísticos Circulares	Ecuación
Error absoluto medio (MAE)	$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i \in I}  O_i - P_i  + \frac{1}{N} \sum_{i \in I^c} (360 -  O_i - P_i )$ Donde $I = \{i \in \{1, 2, 3, \dots, N\} /  O_i - P_i  \leq 180\}$ y $I^c = \{1, 2, 3, \dots, N\} \setminus I$
Error cuadrático medio (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i \in I} (O_i - P_i)^2 + \frac{1}{N} \sum_{i \in I^c} (360 -  O_i - P_i )^2}$ Donde $I = \{i \in \{1, 2, 3, \dots, N\} /  O_i - P_i  \leq 180\}$ y $I^c = \{1, 2, 3, \dots, N\} \setminus I$
Coefficiente de determinación ( $R^2$ )	$R^2 = \frac{\left( 4 \left[ \left( \sum_{i=1}^N \cos O_i \cos P_i \right) \left( \sum_{i=1}^N \sin O_i \sin P_i \right) - \left( \sum_{i=1}^N \cos O_i \sin P_i \right) \left( \sum_{i=1}^N \sin O_i \cos P_i \right) \right]^2}{\left[ N^2 - \left( \sum_{i=1}^N \cos (2O_i) \right)^2 - \left( \sum_{i=1}^N \sin (2O_i) \right)^2 \right] \left[ N^2 - \left( \sum_{i=1}^N \cos (2P_i) \right)^2 - \left( \sum_{i=1}^N \sin (2P_i) \right)^2 \right]}$



**Figura 4-6.** Desfase temporal de la altura máxima simulada y registrada por la boya. Los círculos rojos indican las alturas máximas. El círculo amarillo muestra la altura simulada coincidente en el tiempo con la máxima altura registrada por la boya.

Los indicadores estadísticos contenidos en la Tabla 4-19, generalmente son utilizados para cuantificar las tendencias centrales de las diferencias entre los datos simulados y observados, lo que es útil para evaluar el desempeño del modelo en la representación del clima medio del oleaje. Sin embargo, uno de los objetivos de este trabajo es calibrar el modelo teniendo en consideración los valores extremos del oleaje. A continuación se detalla la metodología aplicada para la cuantificación del desempeño de los escenarios de calibración planteados en este trabajo y que considera el estudio del comportamiento de los datos simulados para ambos climas de oleaje.

**Paso 1:** Definición de los casos de comparación.

*Clima Medio*

- a) Comparación de datos simulados coincidentes en el tiempo con mediciones de boyas (denominado *Allb*).
- b) Comparación de datos simulados coincidentes en el tiempo con mediciones de satelitales (denominado *Alls*).
- c) Comparación de casos representativos de grupos de datos (clústeres) obtenidos de registros de boya, mediante la metodología *Maximum Dissimilarity Algorithm (MDA)* (Camus et al., 2011), con datos simulados coincidentes en el tiempo (denominado *3bMDA*) (ANEXO A).

## Clima Extremo

- a) Comparación de datos simulados coincidentes en el tiempo con mediciones de boyas, cuyas alturas se encuentren sobre el percentil 95 ( $H_{m0} > H_{m0_{95\%}}$ ) (denominado 5%*b*).
- b) Comparación de datos simulados coincidentes en el tiempo con mediciones de satélites, cuyas alturas se encuentren sobre el percentil 95 ( $H_{m0} > H_{m0_{95\%}}$ ) (denominado 5%*s*).
- c) Comparación de eventos extremos seleccionados de registros de boya, mediante la metodología *Peak Over Threshold (POT)*, con las máximas alturas obtenidas de las simulaciones, dentro de una ventana de tiempo de  $\pm 1.5$  días respecto a la fecha de cada evento extremo registrado por la boya (denominado 3*bPOT*).

**Paso 2:** Cálculo de los indicadores estadísticos contenidos en la Tabla 4-19 para todas las comparaciones expuestas en el paso anterior, salvo para el caso **c**) de clima extremo, en el que se determinará el indicador *PDAExt*.

**Paso 3:** Normalización de los indicadores estadísticos entre los distintos escenarios de simulación, mediante las ecuaciones [81], [82] y [83].

$$X_{norm} = \frac{X_i - \min(X)}{\max(X) - \min(X)}; \quad 0 \geq X_{norm} \geq 1, \text{ Para } R^2 \text{ y } SS \quad [81]$$

$$X_{norm} = 1 - \frac{X_i - \min(X)}{\max(X) - \min(X)}; \quad 0 \geq X_{norm} \geq 1, \text{ Para } MAE \text{ y } RMSE \quad [82]$$

$$X_{norm} = 1 - \frac{X_i - \min(\text{abs}(X))}{\max(\text{abs}(X)) - \min(\text{abs}(X))}; \quad 0 \geq X_{norm} \geq 1, \text{ Para } BIAS \text{ y } PDAExt \quad [83]$$

**Paso 4:** Asignación de factores de importancia

- Asignación de un factor de importancia relativa a cada indicador estadístico ( $\omega_{(j)}^{EP}$ ).
- Asignación de un factor de importancia relativa para cada método de comparación expuesto en el Paso 1 ( $\omega_{(l)}^{TD}$ ).
- Asignación de un factor de importancia relativa a los parámetros de resumen  $H_{m0}$ ,  $T_m$  y  $D_m$  ( $\omega_{(k)}^{WP}$ ).

**Paso 5:** Mediante una combinación lineal entre los indicadores estadísticos normalizados y los factores de importancia relativa mencionados en el Paso 4, se cuantifica el desempeño general de los escenarios de simulación obteniendo una nota (IDU) entre 0 y 1 para cada escenario. La combinación lineal se describe mediante las expresiones [84], [85] y [86].

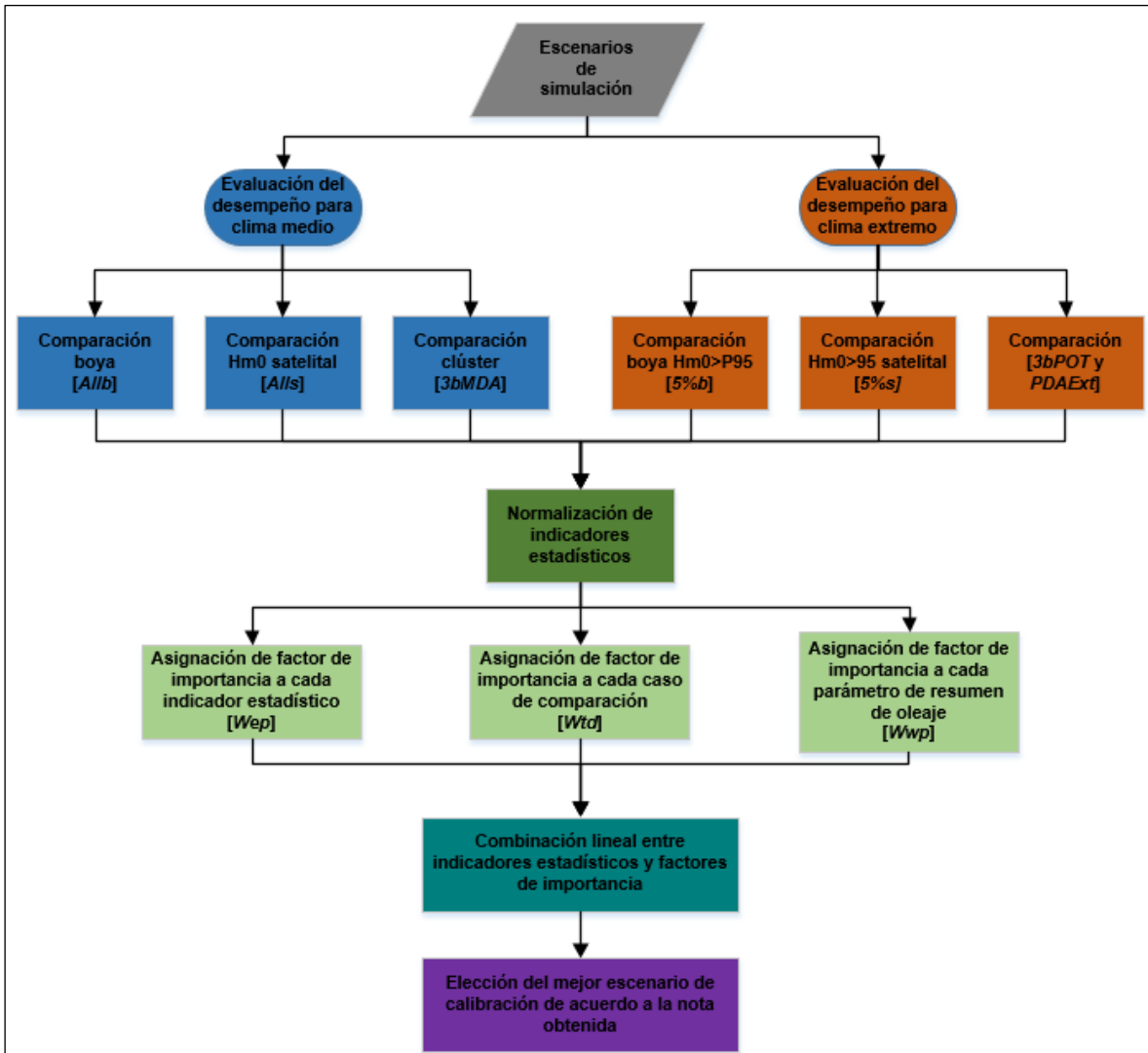
$$IDU_{(i,k,l)}^{EP} = \sum_{j=1}^5 \omega_{(j)}^{EP} \times X_{norm(i,j,k,l)} \quad \text{con } j = MAE, R^2, RMSE, SS, BIAS \text{ y } PDAExt \quad [84]$$

$$IDU_{(i,l)}^{WP} = \sum_{k=1}^3 \omega_{(k)}^{WP} \times IDU_{(i,k,l)}^{EP} \quad \text{con } k = H_{m0}, T_m, D_m \quad [85]$$

$$IDU_{(i)} = \sum_{l=1}^7 \omega_{(l)}^{TD} \times IDU_{(i,l)}^{WP} \quad \text{con } l = Allb, Alls, 5\%b, 5\%s, 3bMDA, 3bPOT, PDAExt \quad [86]$$

Donde  $i$  representa cada escenario,  $j$  es cada indicador estadístico,  $k$  cada parámetro de oleaje,  $l$  cada tipo de análisis realizado,  $\omega_{(j)}^{EP}$  es el peso asignado a cada indicador estadístico.  $\omega_{(k)}^{WP}$  es el peso asignado a cada parámetro de oleaje y  $\omega_{(l)}^{TD}$  el peso asignado a cada tipo de comparación realizada.

La Figura 4-7 muestra un esquema simplificado con la metodología antes descrita.



**Figura 4-7.** Esquema simplificado de la metodología utilizada para la cuantificación del desempeño de los escenarios de calibración planteados.

#### 4.3.5 VALIDACIÓN DEL MODELO

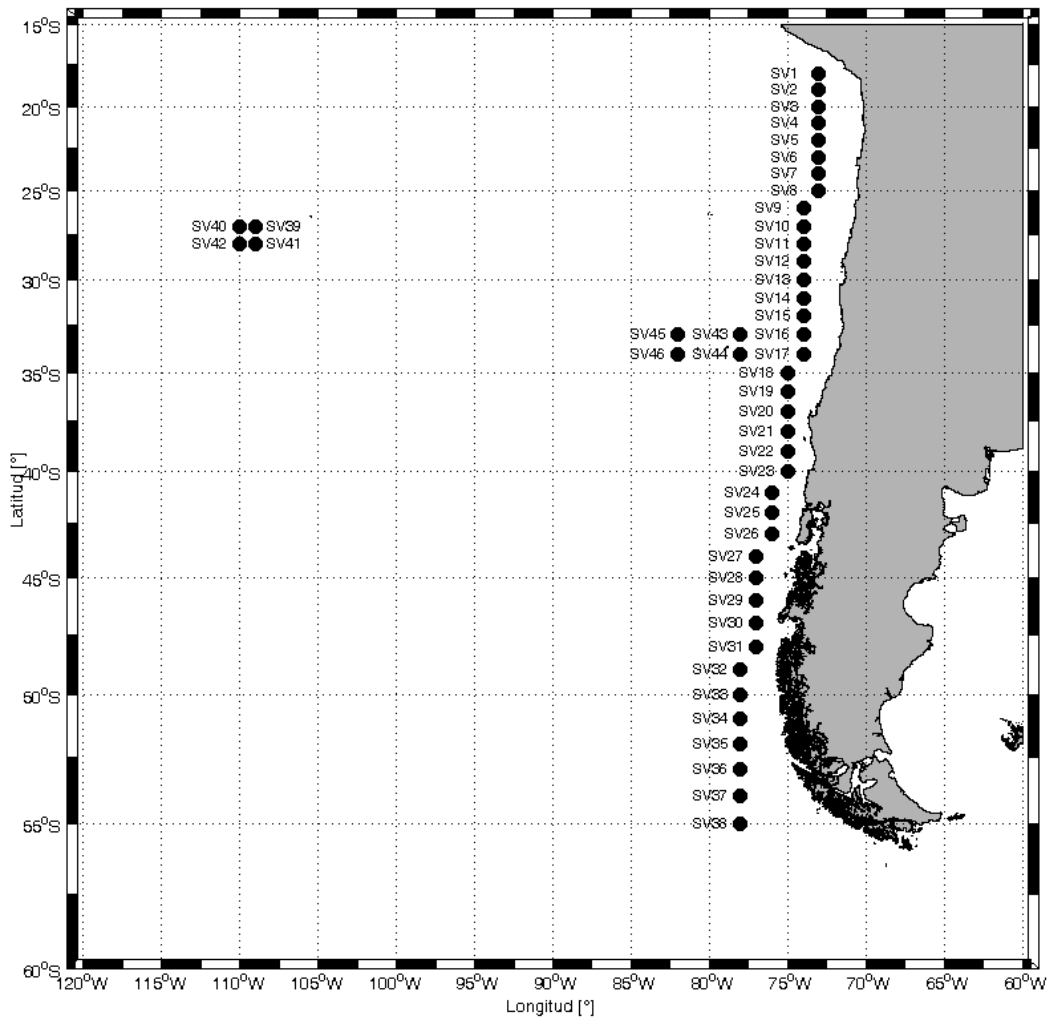
La validación del modelo, se realizó mediante la comparación de los espectros contenidos en los registros de la boya B5 y los espectros obtenidos a partir del modelo ya calibrado, mediante dos metodologías.

La primera, a partir de la aplicación del indicador estadístico *RMSE* a los espectros promediados en el tiempo y el análisis del sesgo entre cada espectro registrado por la boya B5 y obtenido a partir del modelo ya calibrado, integrados en el dominio de la frecuencia y de la dirección. El segundo mediante una comparación cualitativa de la forma de los espectros, mediante la aplicación de envolventes y percentiles a las componentes de frecuencia y dirección del espectro de oleaje.

Adicionalmente, se compararon alturas  $H_{m0}$  obtenidas a partir de los altímetros satelitales expuestos en la Tabla 4-8 con las alturas obtenidas a partir del modelo calibrado, en 46 nodos distribuidos en las costas de Chile continental e insular. Los nodos utilizados se presentan en la Figura 4-8 y Tabla 4-21.

**Tabla 4-21.** Coordenadas de extracción de datos satelitales utilizadas para la validación del modelo WWIII.

Satélite Validación #	Ubicación		Satélite Validación #	Ubicación	
	Latitud [°]	Longitud [°]		Latitud [°]	Longitud [°]
SV1	-18	-73	SV24	-41	-76
SV2	-19	-73	SV25	-42	-76
SV3	-20	-73	SV26	-43	-76
SV4	-21	-73	SV27	-44	-77
SV5	-22	-73	SV28	-45	-77
SV6	-23	-73	SV29	-46	-77
SV7	-24	-73	SV30	-47	-77
SV8	-25	-73	SV31	-48	-77
SV9	-26	-74	SV32	-49	-78
SV10	-27	-74	SV33	-50	-78
SV11	-28	-74	SV34	-51	-78
SV12	-29	-74	SV35	-52	-78
SV13	-30	-74	SV36	-53	-78
SV14	-31	-74	SV37	-54	-78
SV15	-32	-74	SV38	-55	-78
SV16	-33	-74	SV39	-27	-109
SV17	-34	-74	SV40	-27	-110
SV18	-35	-75	SV41	-28	-109
SV19	-36	-75	SV42	-28	-110
SV20	-37	-75	SV43	-33	-78
SV21	-38	-75	SV44	-34	-78
SV22	-39	-75	SV45	-33	-82
SV23	-40	-75	SV46	-34	-82



**Figura 4-8.** Ubicación de las coordenadas de extracción de datos satelitales utilizadas en la validación del modelo WWIII.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 SELECCIÓN DE LA RESOLUCIÓN Y EXTENSIÓN DEL DOMINIO COMPUTACIONAL Y BATIMÉTRICO

El objetivo de esta etapa, es determinar la configuración de malla batimétrica que aplicada al modelo permita obtener resultados consistentes con la realidad en tiempos de cálculo relativamente bajos. Los resultados de las simulaciones fueron comparados con los registros de 3 boyas (B1, B5 y B8). En la Tabla 5-1, se presentan los indicadores estadísticos obtenidos tras simulaciones realizadas en base a las configuraciones expuestas en la Tabla 4-10. La Tabla 5-2 muestra el promedio de indicadores de cada escenario de calibración. Los indicadores marcados en rojo, representan los escenarios que mostraron un mejor desempeño en relación a los demás.

**Tabla 5-1.** Indicadores estadísticos boyas B1, B5 y B8 v/s escenarios planteados en la Tabla 4-10.

	B1				B5				B8			
	Test-01	Test-02	Test-03	Test-04	Test-01	Test-02	Test-03	Test-04	Test-01	Test-02	Test-03	Test-04
N° Datos	2916				2620				1405			
$H_{m0}$												
MAE [m]	<b>0.202</b>	0.204	0.205	0.204	0.400	0.401	0.307	<b>0.302</b>	0.400	0.417	0.284	<b>0.277</b>
RMSE [m]	0.255	0.256	<b>0.253</b>	0.254	0.498	0.497	<b>0.392</b>	0.397	0.482	0.501	<b>0.353</b>	0.359
BIAS [m]	<b>0.091</b>	0.093	0.106	0.098	0.334	0.332	0.168	<b>0.149</b>	0.328	0.346	<b>0.096</b>	0.134
R <sup>2</sup>	0.874	0.871	<b>0.879</b>	0.875	0.757	0.755	<b>0.759</b>	0.755	0.855	0.847	<b>0.870</b>	0.867
$T_m$												
MAE [s]	0.483	0.484	<b>0.464</b>	0.470	0.793	<b>0.788</b>	0.844	0.843	0.689	0.733	<b>0.656</b>	0.671
RMSE [s]	0.685	0.687	<b>0.657</b>	0.664	<b>1.029</b>	1.030	1.056	1.058	0.925	0.982	<b>0.868</b>	0.887
BIAS [s]	-0.064	<b>-0.036</b>	-0.076	-0.051	-0.129	<b>-0.086</b>	-0.355	-0.322	0.369	0.468	<b>0.175</b>	0.223
R <sup>2</sup>	0.750	0.750	<b>0.764</b>	0.761	0.552	0.555	<b>0.563</b>	<b>0.563</b>	<b>0.705</b>	0.701	0.700	0.702
$D_m$												
MAE [°]	<b>26.011</b>	26.037	26.089	26.131	13.855	14.250	<b>13.154</b>	13.532	10.769	11.561	<b>9.065</b>	9.528
RMSE [°]	34.094	<b>34.116</b>	34.176	34.228	16.598	16.966	<b>15.902</b>	16.289	13.646	14.430	<b>11.739</b>	12.197
BIAS [°]	<b>-17.346</b>	-17.426	-17.534	-17.638	-12.702	-13.234	<b>-11.575</b>	-12.106	-9.265	-10.311	<b>-6.775</b>	-7.524
R <sup>2</sup>	0.408	0.409	0.411	<b>0.412</b>	<b>0.472</b>	0.471	0.470	0.467	0.736	0.733	<b>0.756</b>	<b>0.756</b>

**Tabla 5-2.** Promedio de indicadores estadísticos de los escenarios planteados en la Tabla 4-10.

		Test-01	Test-02	Test-03	Test-04
$H_{m0}$	MAE [m]	0.334	0.341	0.265	<b>0.261</b>
	RMSE [m]	0.412	0.418	<b>0.333</b>	0.337
	BIAS [m]	0.251	0.257	<b>0.123</b>	0.127
	R <sup>2</sup>	0.829	0.824	<b>0.836</b>	0.832
$T_m$	MAE [s]	<b>0.655</b>	0.668	<b>0.655</b>	0.661
	RMSE [s]	0.880	0.900	<b>0.860</b>	0.870
	BIAS [s]	0.059	0.115	-0.085	<b>-0.050</b>
	R <sup>2</sup>	0.669	0.669	<b>0.676</b>	0.675
$D_m$	MAE [°]	16.878	17.283	<b>16.103</b>	16.397
	RMSE [°]	21.446	21.837	<b>20.606</b>	20.905
	BIAS [°]	-13.104	-13.657	<b>-11.961</b>	-12.423
	R <sup>2</sup>	0.539	0.538	<b>0.546</b>	0.545

En general el Test-03 (Tabla 4-10), presenta un desempeño levemente superior a los demás escenarios. Se observa que el modelo tiende a representar de mejor forma las alturas ( $H_{m0}$ ) que los periodos ( $T_m$ ) y las direcciones medias ( $D_m$ ). Para el caso de  $H_{m0}$ , se obtuvieron coeficientes de determinación ( $R^2$ ) de 0.879 para B1, 0.759 para B5 y 0.87 para B8, mientras que para  $T_m$  estos son de 0.764 para B1, 0.563 para B5 y 0.705 para B8. En

el caso de las direcciones medias, se observan coeficientes inferiores a 0.5, salvo para la boya B8 que presenta un  $R^2$  de 0.756. Finalmente los escenarios planteados presentan una tendencia a la sobrestimación de  $H_{m0}$ , lo cual se ve reflejado en los indicadores *MAE*, *RMSE* y *BIAS*.

En la Figura 5-1, se muestran los diagramas de dispersión resultantes de la comparación entre las boyas B1, B5 y B8 con el Test-03. A partir de ésta, es posible observar un buen ajuste de los datos medios de  $H_{m0}$  para las tres boyas analizadas. Sin embargo, se presenta una subestimación por parte del Test-03 para los eventos más energéticos, esta situación se repite en las tres boyas analizadas y para cada escenario de simulación planteado. La Figura 5-2, expone los tiempos de cálculo por año de simulación de los escenarios planteados para la etapa de selección de la resolución de la malla computacional y batimétrica. A partir de esta, se observan diferencias significativas en los tiempos de cálculo entre la utilización de mallas de computacionales a 0.5° de resolución respecto a las de 1° de resolución, los que alcanzas diferencias cercanas a las 19 horas para mallas acotadas entre las latitudes -75° y 75° (Test-02 respecto a Test-04).

En términos generales, los resultados obtenidos a partir de los escenarios de simulación planteados para la selección de la malla computacional y batimétrica no presentan diferencias significativas entre sí. El Test-03, fue seleccionado como escenario base para la etapa de calibración del modelo, esto debido a la consistencia de los resultados obtenidos a partir de la configuración planteada para este escenario, con los datos registrados por las boyas B1, B5 y B8 y los bajos tiempos de cálculo, permitiendo realizar numerosas simulaciones en periodos de tiempo razonables.

**Tabla 5-3.** Tiempos de cálculo por año de simulación, escenarios planteados en la Tabla 4-10

Escenario	Tiempo de cálculo por año de simulación [HH:MM]
Test_01	13:17
Test_02	22:23
Test_03	02:10
Test_04	03:39

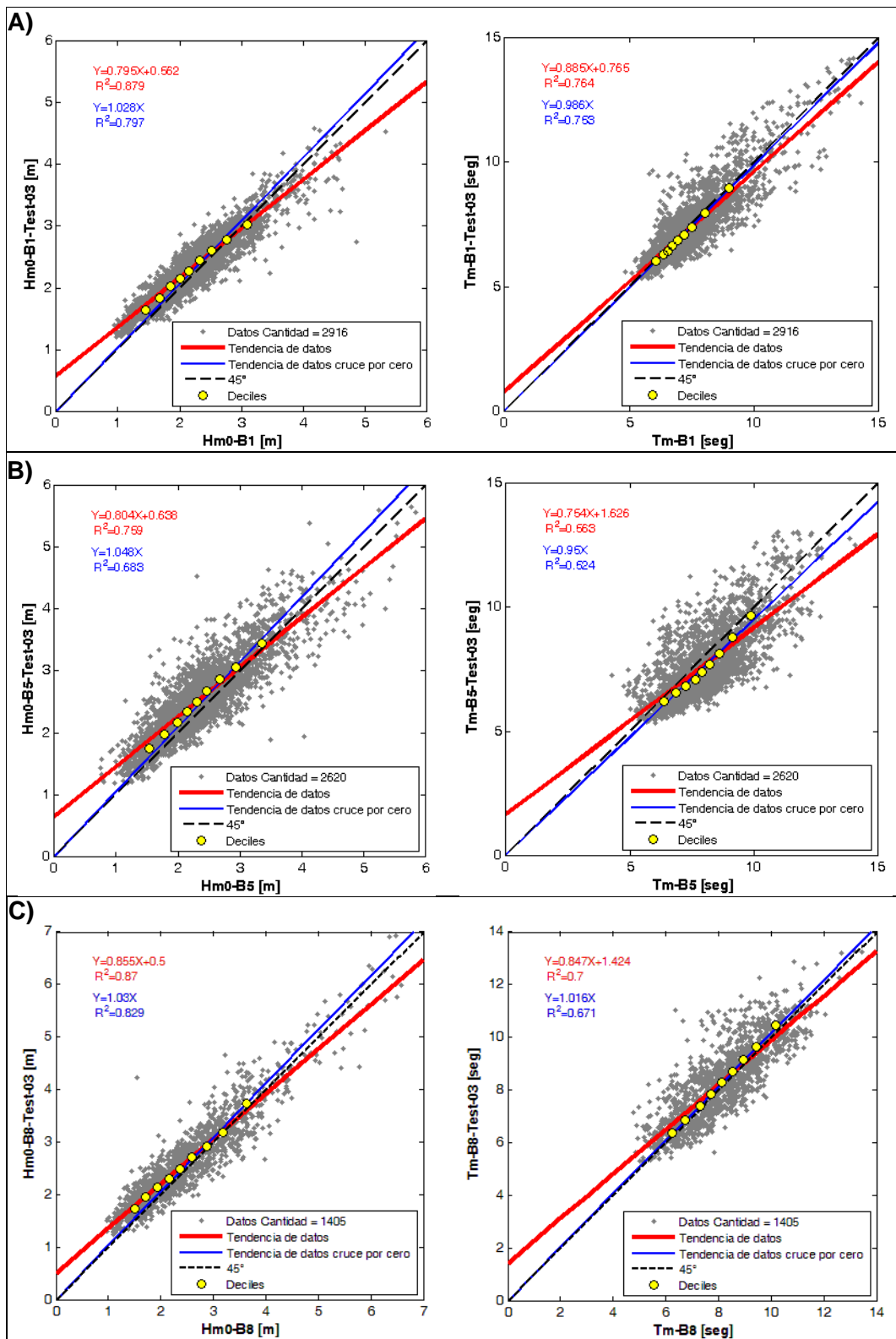


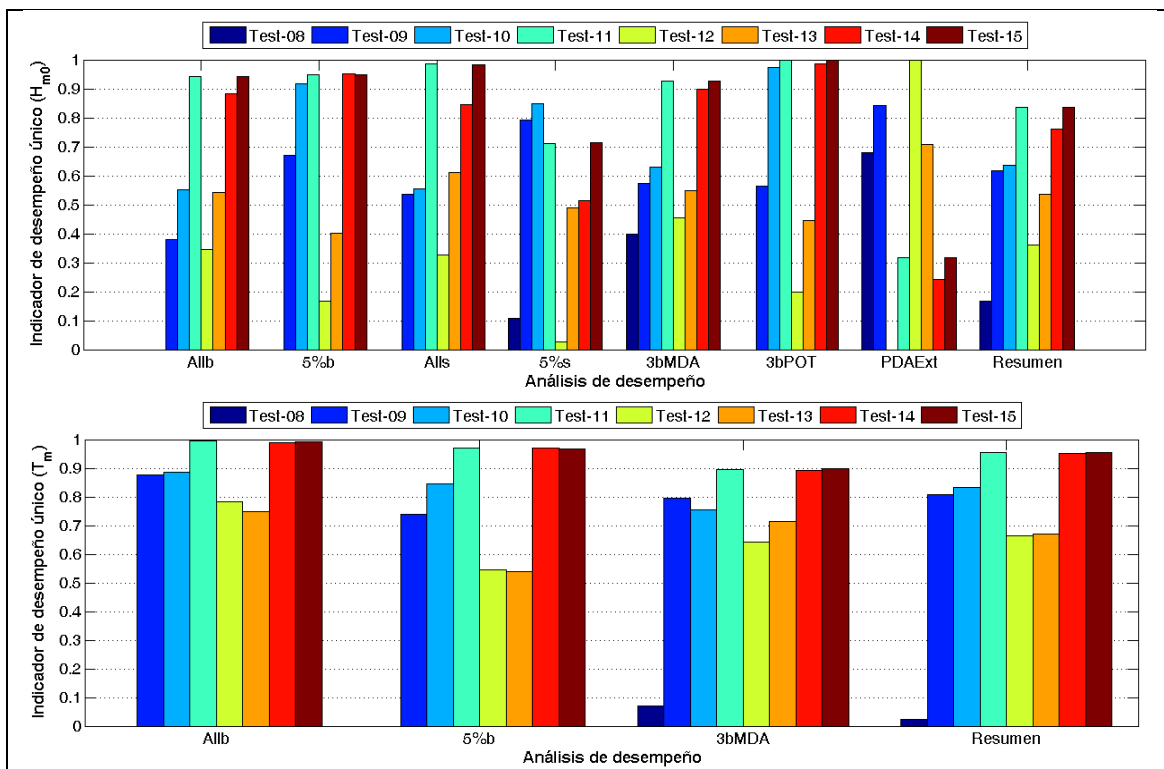
Figura 5-1. Gráficos de dispersión, izquierda  $H_{m0}$ , derecha  $T_m$ , A) Boya B1 v/s Test-03, B) Boya B5 v/s Test-03, C) Boya B8 v/s Test-03.

## 5.2 SELECCIÓN DE ESQUEMAS FÍSICOS

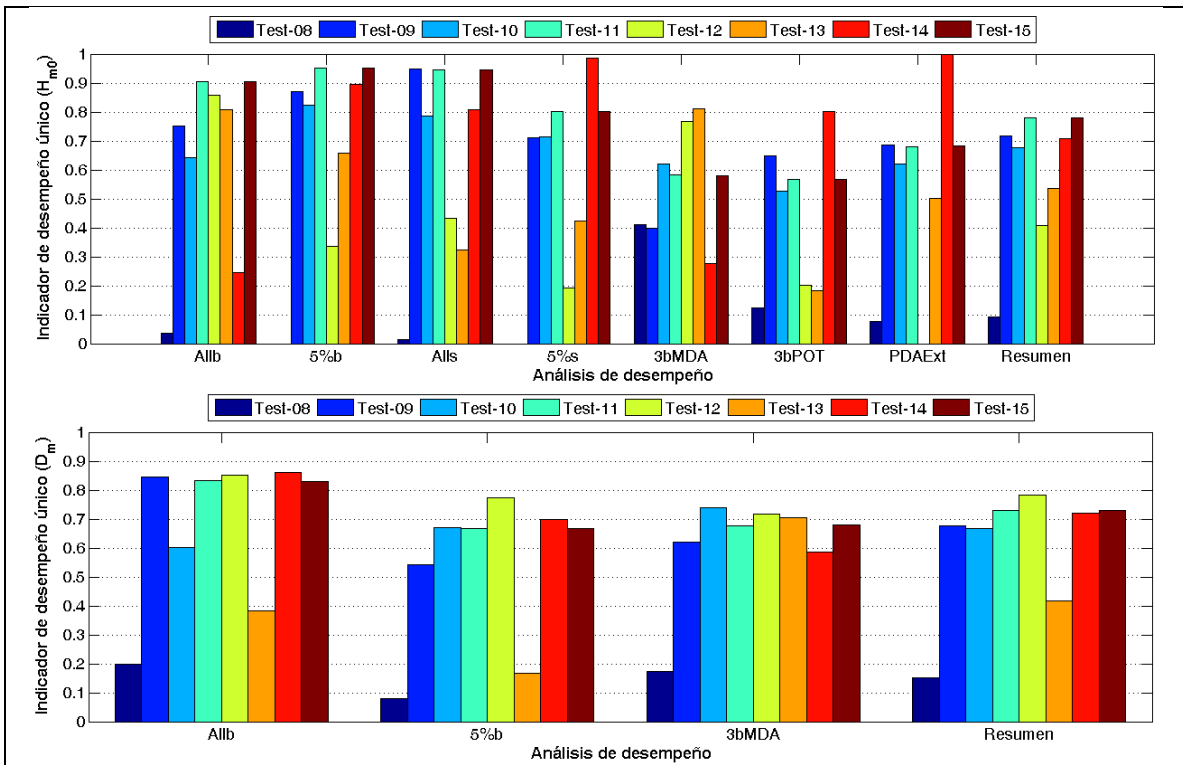
### 5.2.1 DESEMPEÑO DE ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

A continuación se presentan los resultados obtenidos tras la aplicación de la metodología de cuantificación del desempeño de escenarios de calibración, planteada en el capítulo 4.3.4. Los resultados de las comparaciones entre registros satelitales y de boyas con los resultados de las simulaciones, se presentan en el Anexo B.

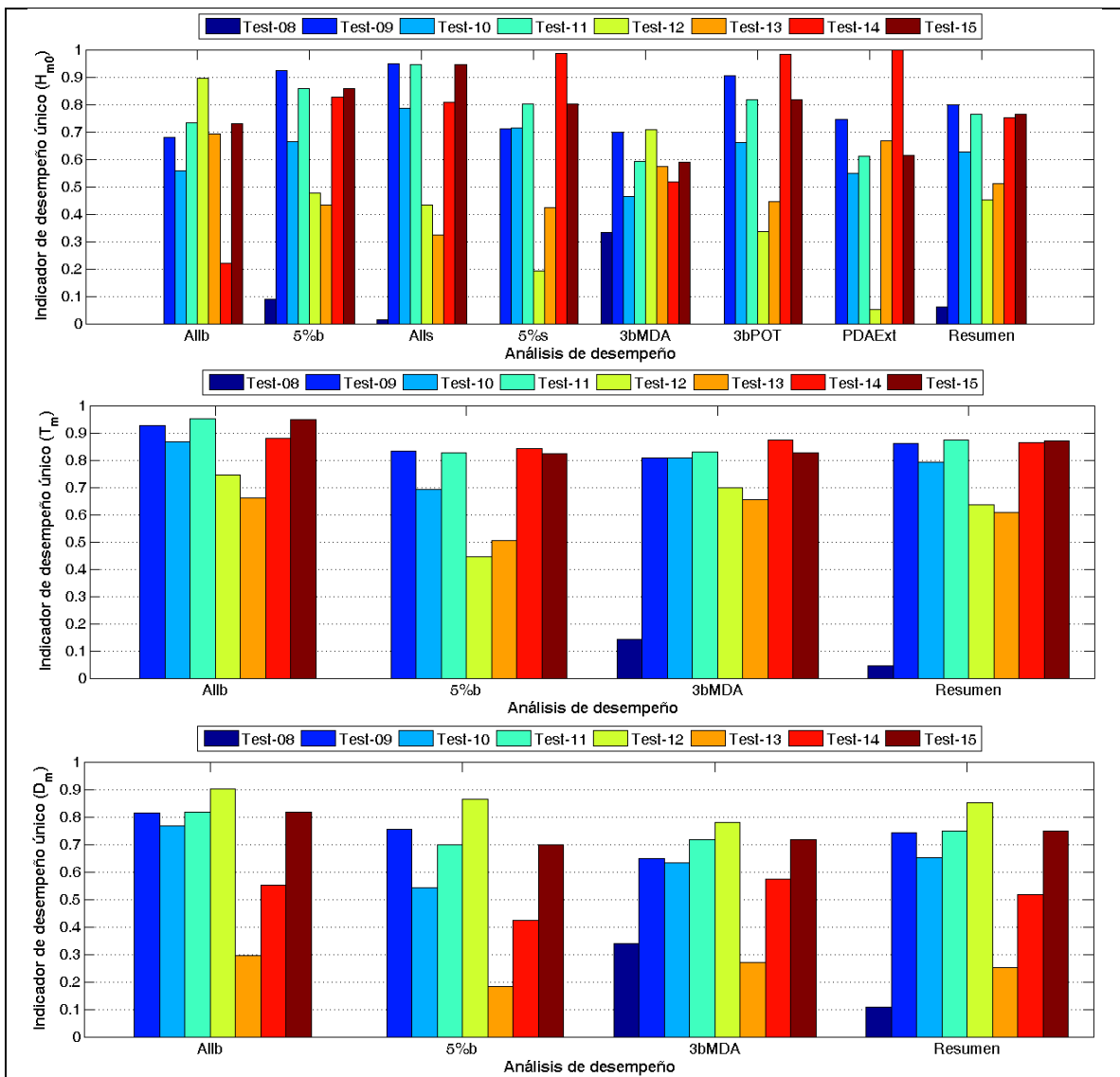
Las figuras que se muestran a continuación, contienen los índices de desempeño asociados a los distintos métodos de comparación de datos utilizados, para cada parámetro de oleaje en las distintas coordenadas de comparación de datos satelitales y de boya.



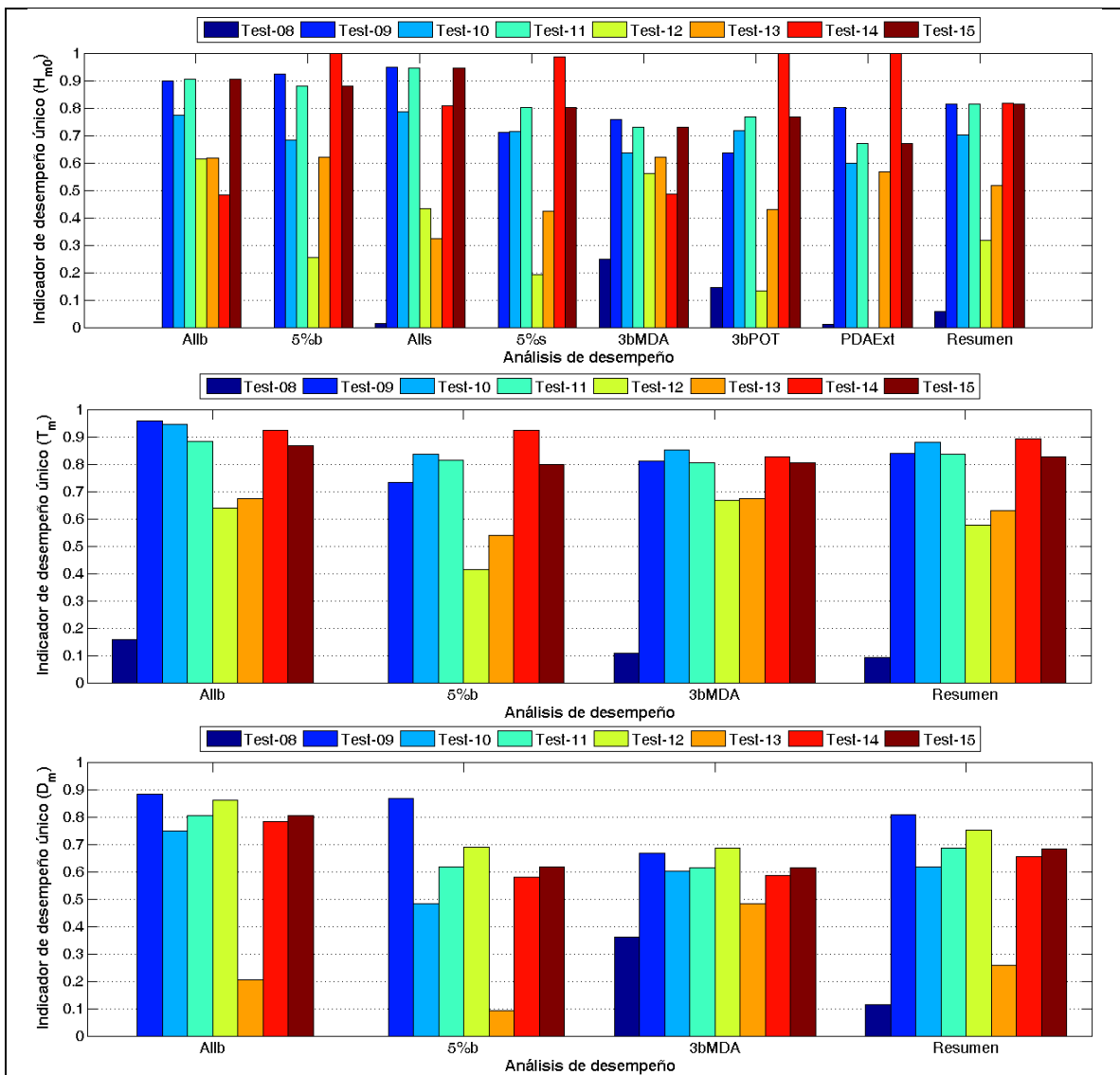
**Figura 5-2.** Índices de desempeño para distintos tipos de análisis entre los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-13 y la información de B1 y S1. Arriba, desempeño de  $H_{m0}$ . Abajo, desempeño de  $T_m$ .



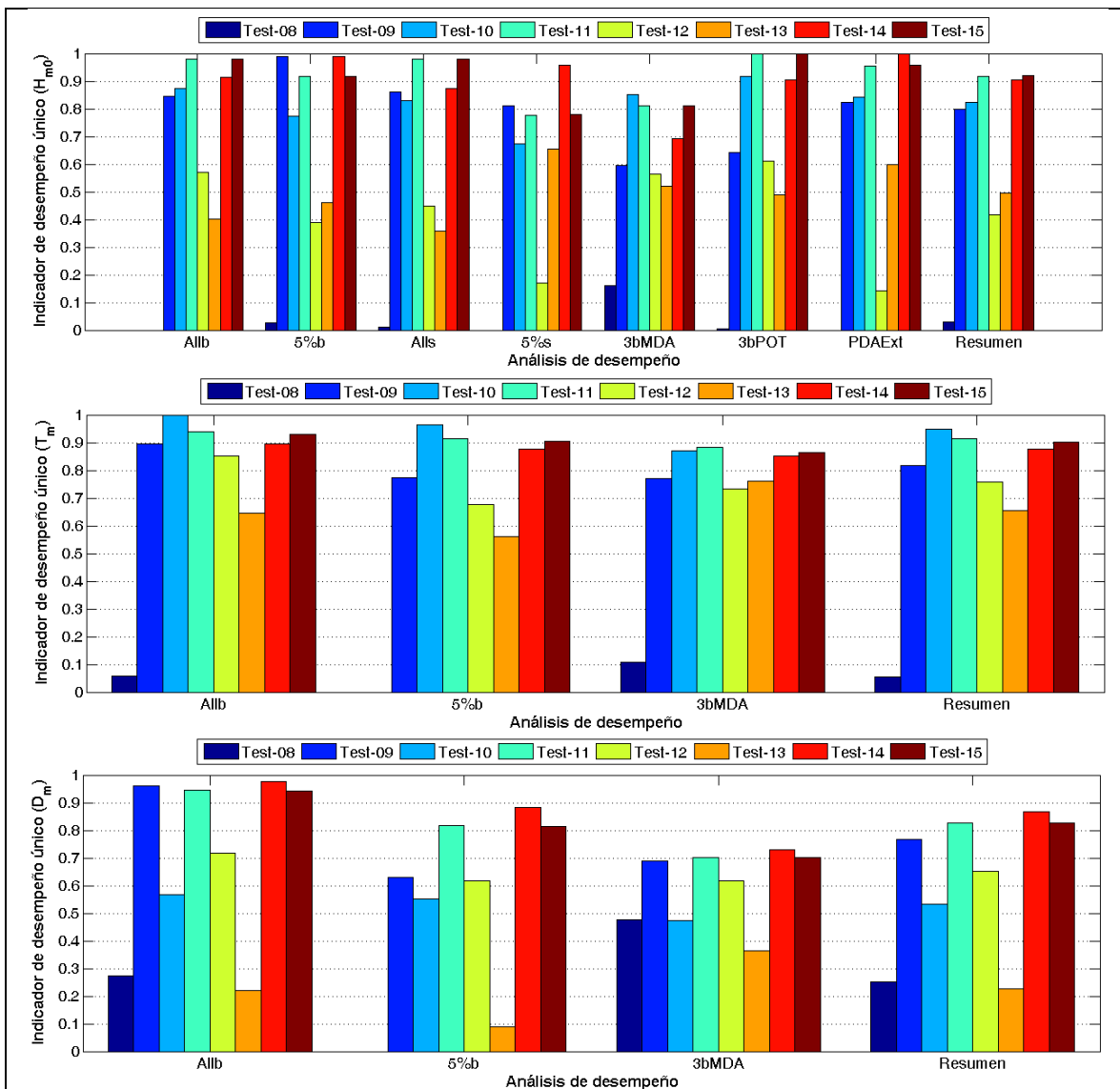
**Figura 5-3.** Índices de desempeño para distintos tipos de análisis entre los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-13 y la información de B2 y S2. Arriba, desempeño de  $H_{m0}$ . Abajo, desempeño de  $D_m$ .



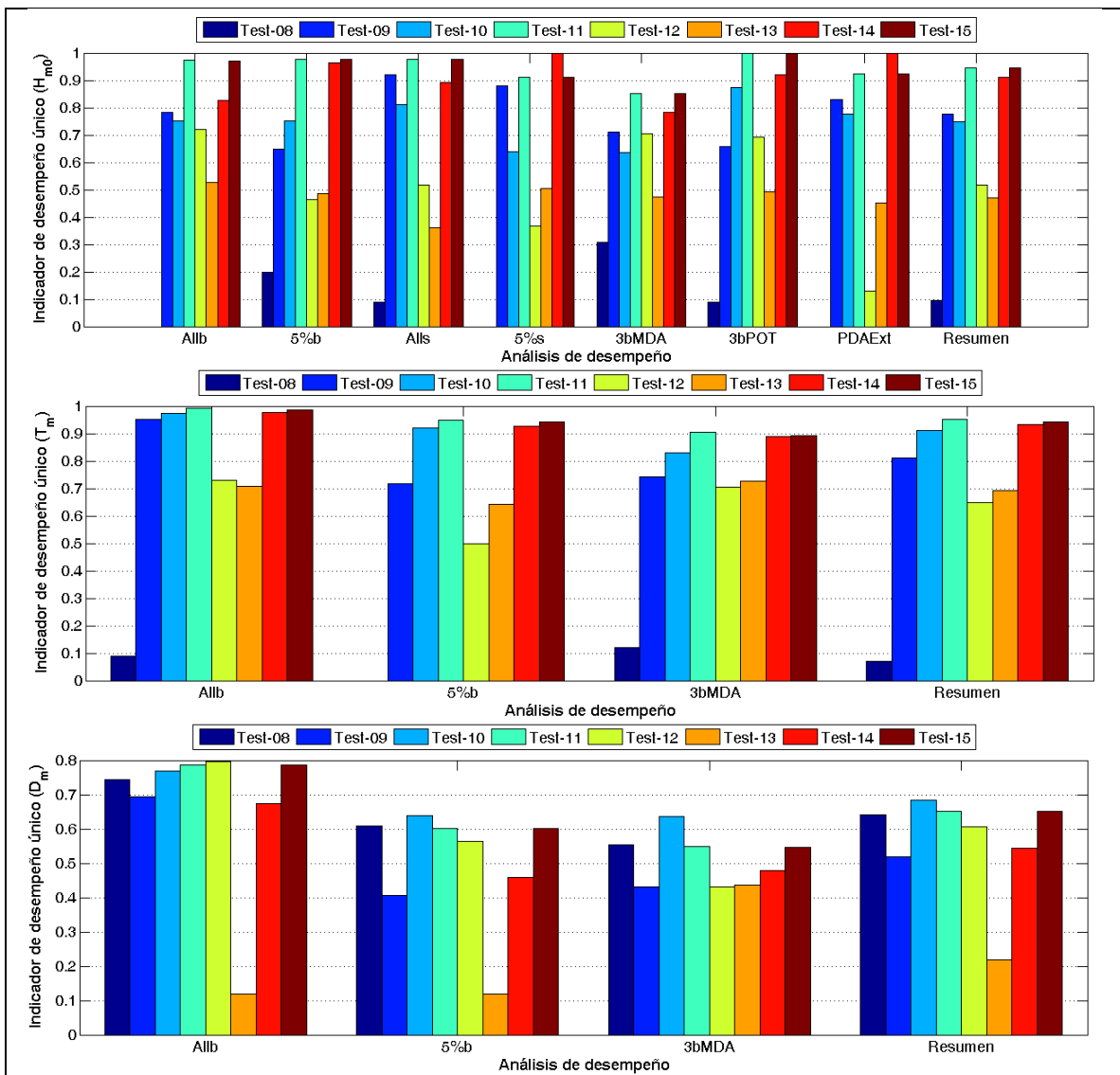
**Figura 5-4.** Índices de desempeño para distintos tipos de análisis entre los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-13 y la información de B3 y S3. Arriba, desempeño de  $H_{m0}$ . Centro, desempeño de  $T_m$ . Abajo, desempeño de  $D_m$ .



**Figura 5-5.** Índices de desempeño para distintos tipos de análisis entre los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-13 y la información de B5 y S5. Arriba, desempeño de  $H_{m0}$ . Centro, desempeño de  $T_m$ . Abajo, desempeño de  $D_m$ .



**Figura 5-6.** Índices de desempeño para distintos tipos de análisis entre los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-13 y la información de B7 y S7. Arriba, desempeño de  $H_{m0}$ . Centro, desempeño de  $T_m$ . Abajo, desempeño de  $D_m$ .



**Figura 5-7.** Índices de desempeño para distintos tipos de análisis entre los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-13 y la información de B8 y S8. Arriba, desempeño de  $H_{m0}$ . Centro, desempeño de  $T_m$ . Abajo, desempeño de  $D_m$ .

A partir de los resultados expuestos, se observa:

- Los resultados obtenidos a partir del Test-08 (Esquema de crecimiento y disipación ST1) presentan los peores resultados en relación a los demás escenarios de calibración. Este comportamiento se repite en todos los tipos de análisis realizados.
- Los escenarios Test-11 y Test-15 no presentan diferencias significativas entre sí, esto debido a que el término fuente modificado corresponde al proceso de crecimiento lineal de la energía debido al viento ( $S_{ln}$ ). El término SEED (Test-11) a diferencia del término LN1 (Test-15), cuenta con mejoras en la estimación del aumento de energía en el espectro de olas debido a vientos débiles, lo que se traduce en una leve mejora en la estimación de las alturas  $H_{m0}$ .
- La activación del paquete de parametrizaciones físicas ST6, no produce un impacto significativo en la representación de  $H_{m0}$  y  $T_m$ , sin embargo presenta un IDU levemente superior en la estimación de  $D_m$  en comparación a los demás escenarios planteados.
- La diferencia entre el Test-11 y el Test-13 es el método de resolución de las interacciones no lineales entre cuádrupletas. La activación del Switch NL3 (método de GMD) en el Test-13, no produce un impacto significativo en la representación de  $H_{m0}$ ,  $T_m$  y  $D_m$ . La estimación del término  $S_{nl}$  mediante la utilización del Switch NL1 (método DIA), presenta resultados levemente superiores en tiempos de cálculo más bajos, esto debido principalmente a que el método DIA utiliza solo un par de componentes resonantes para estimar la razón de cambio de energía entre componentes del espectro, a diferencia del método GMD que utiliza más componentes.
- La diferencia entre el Test-11 y el Test-14, es la técnica utilizada para aliviar el efecto GSE. La activación del Switch PR2 (término difusivo correctivo) en el escenario Test-14, produce resultados similares al escenario Test-11 (Switch PR3, técnica de promediación del Tolman), en la representación de  $H_{m0}$ ,  $T_m$  y  $D_m$ .
- En términos generales, los escenarios Test-11, Test-14 y Test-15, tienden a presentar los IDU más altos en relación a los demás escenarios planteados para la selección de esquemas y parametrizaciones físicas.

## 5.2.2 RESUMEN DE RESULTADOS

La Tabla 5-4, expone el resumen del desempeño de los escenarios de calibración en función de las zonas de estudio (norte, centro y sur de Chile) y de los parámetros de oleaje  $H_{m0}$ ,  $T_m$  y  $D_m$ .

Se observa que el Test-11 tiende a presentar un mejor desempeño que los demás escenarios planteados en la representación de  $H_{m0}$ ,  $T_m$  y  $D_m$ . El Test-08, es el escenario que presenta el desempeño más bajo.

Se decidió utilizar el Test-11 como escenario base para la siguiente etapa de calibración del modelo, la cual consiste en la modificación de algunos parámetros adimensionales de los paquetes de términos fuentes asociados a los procesos de crecimiento y disipación de la energía del oleaje debido al viento, junto con la selección de la fuente de datos de forzantes reanalizadas que será utilizada para alimentar al modelo ya calibrado.

**Tabla 5-4.** Resumen de índices de desempeño de los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-13.

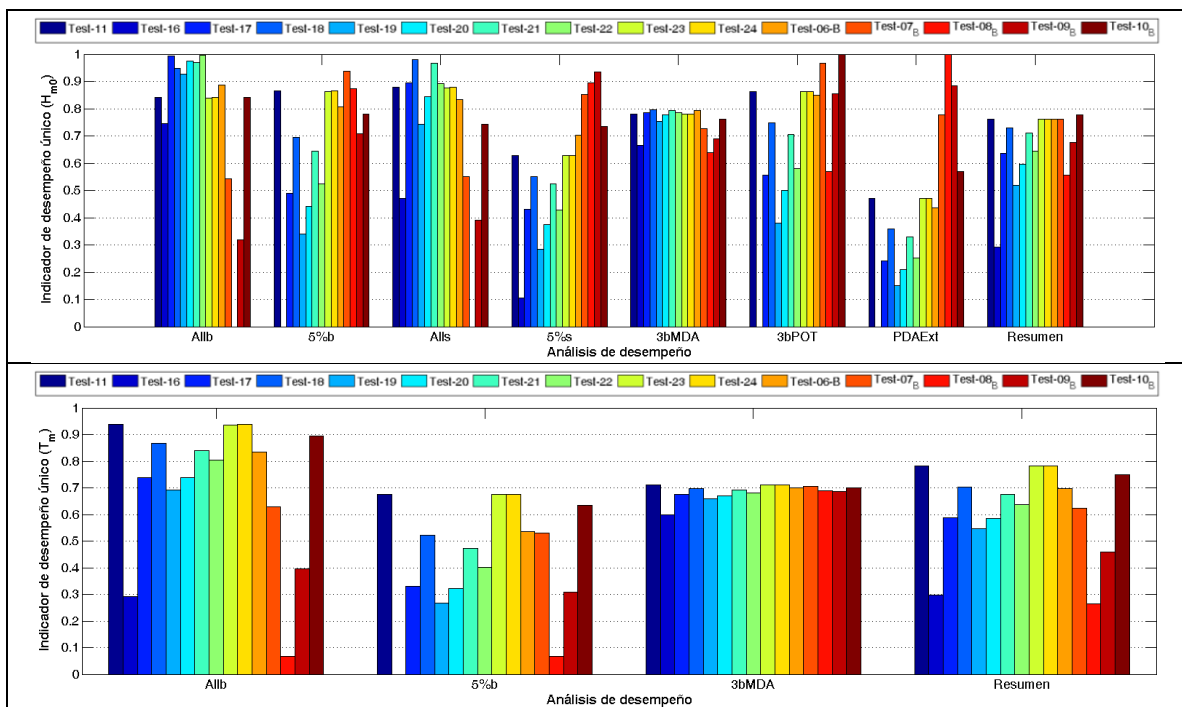
Escenario	Desempeño Global	Desempeño $H_{m0}$	Desempeño $T_m$	Desempeño $D_m$	Desempeño Zona norte	Desempeño Zona centro	Desempeño Zona sur
Test-08	0.134	0.100	0.051	0.285	0.094	0.084	0.078
Test-09	0.742	0.727	0.823	0.693	0.712	0.786	0.782
Test-10	0.722	0.697	0.866	0.627	0.734	0.705	0.787
Test-11	<b>0.837</b>	<b>0.851</b>	<b>0.914</b>	<b>0.730</b>	<b>0.896</b>	<b>0.787</b>	<b>0.879</b>
Test-12	0.545	0.406	0.657	0.712	0.511	0.546	0.608
Test-13	0.487	0.513	0.655	0.265	0.603	0.493	0.488
Test-14	0.800	0.809	0.912	0.668	0.857	0.757	0.838
Test-15	0.835	0.851	0.909	<b>0.730</b>	0.895	0.785	0.877

## 5.3 SELECCIÓN DE FORZANTES Y CALIBRACIÓN DE ESQUEMAS FÍSICOS

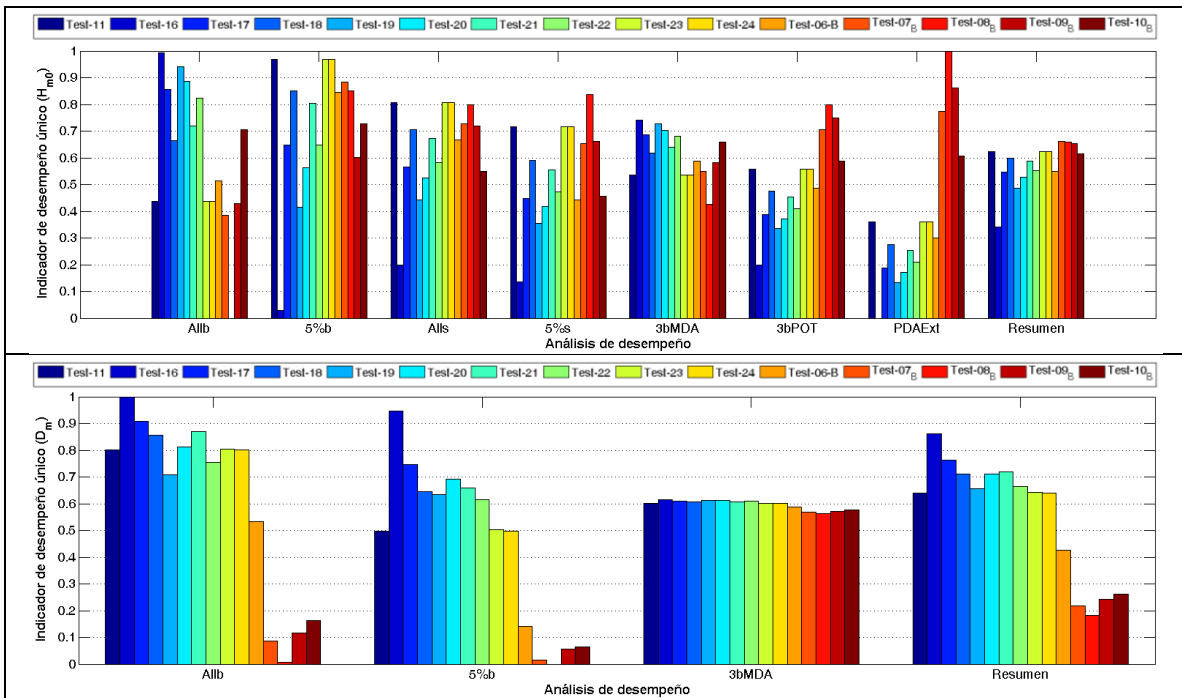
A continuación se presentan los resultados obtenidos tras la aplicación de la metodología de cuantificación del desempeño de escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-16. Los resultados de las comparaciones entre registros satelitales y de boyas con los resultados de las simulaciones, se presentan en el Anexo B.

Las figuras que se muestran a continuación, contienen los índices de desempeño asociados a los distintos métodos de comparación de datos utilizados, para cada parámetro de oleaje en las distintas coordenadas de comparación de datos satelitales y de boya.

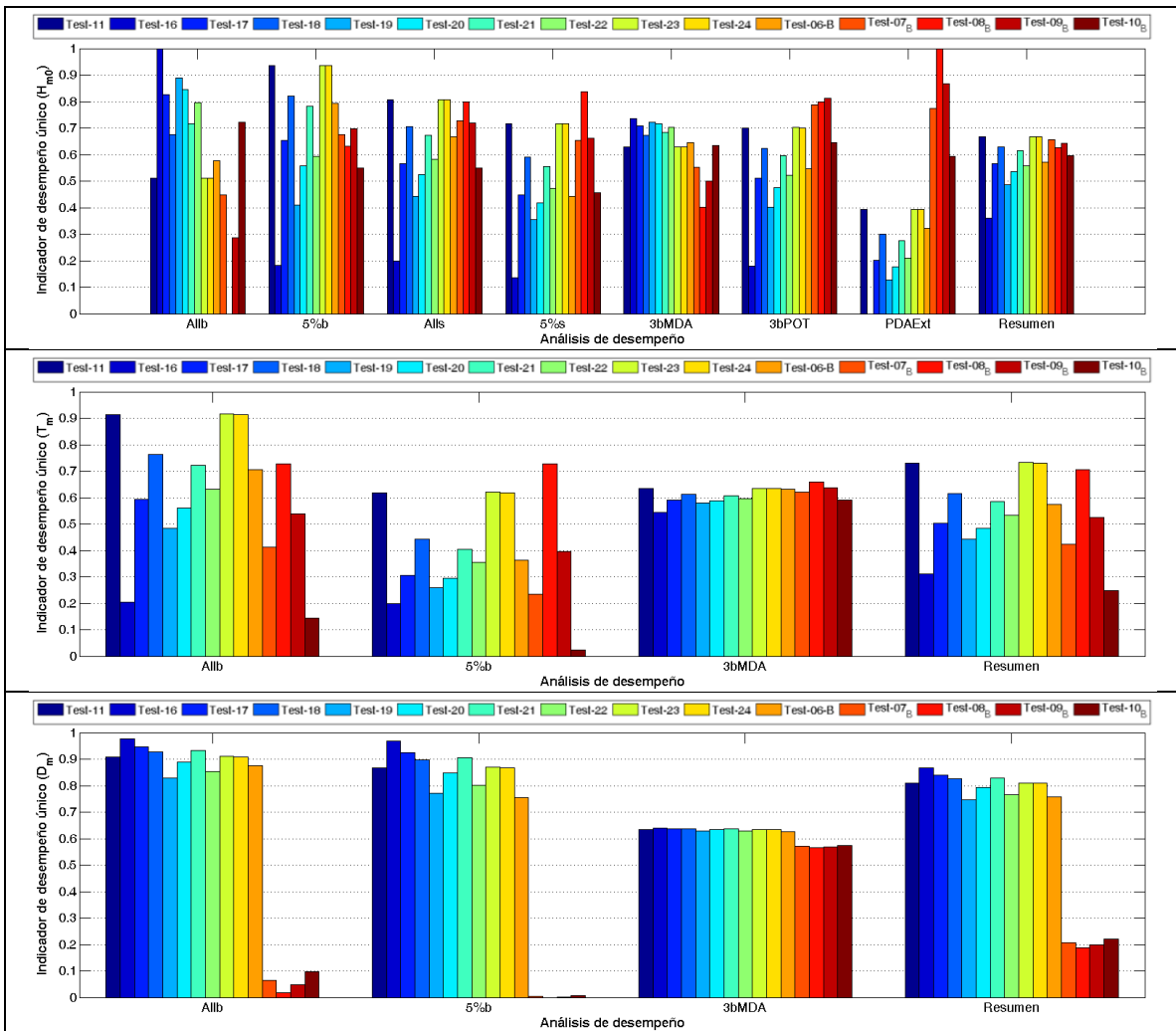
### 5.3.1 DESEMPEÑO DE ESCENARIOS DE SIMULACIÓN



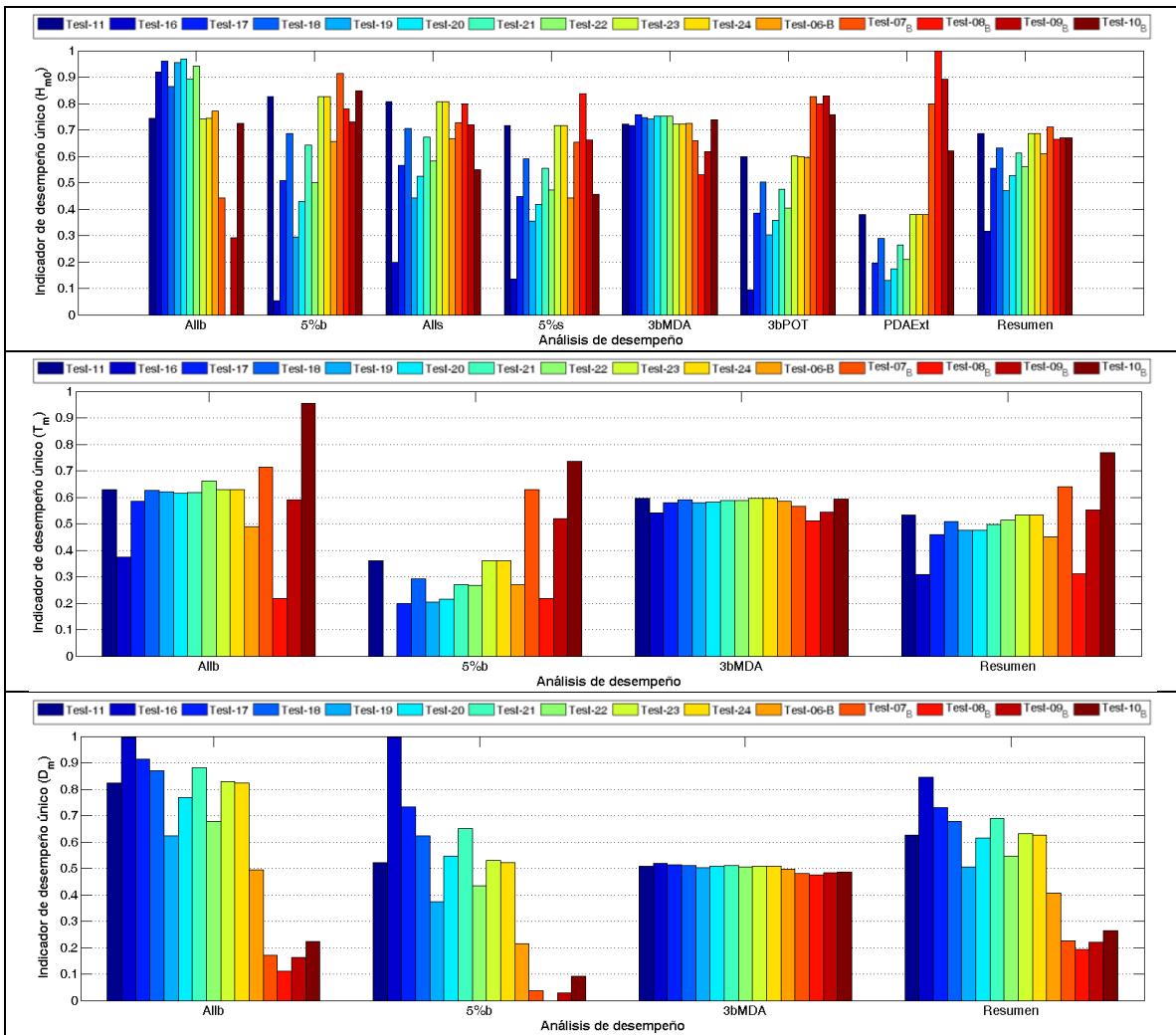
**Figura 5-8.** Índices de desempeño para distintos tipos de análisis entre los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-16 y la información de B1 y S1. Arriba, desempeño de  $H_{m0}$ . Abajo, desempeño de  $T_m$ .



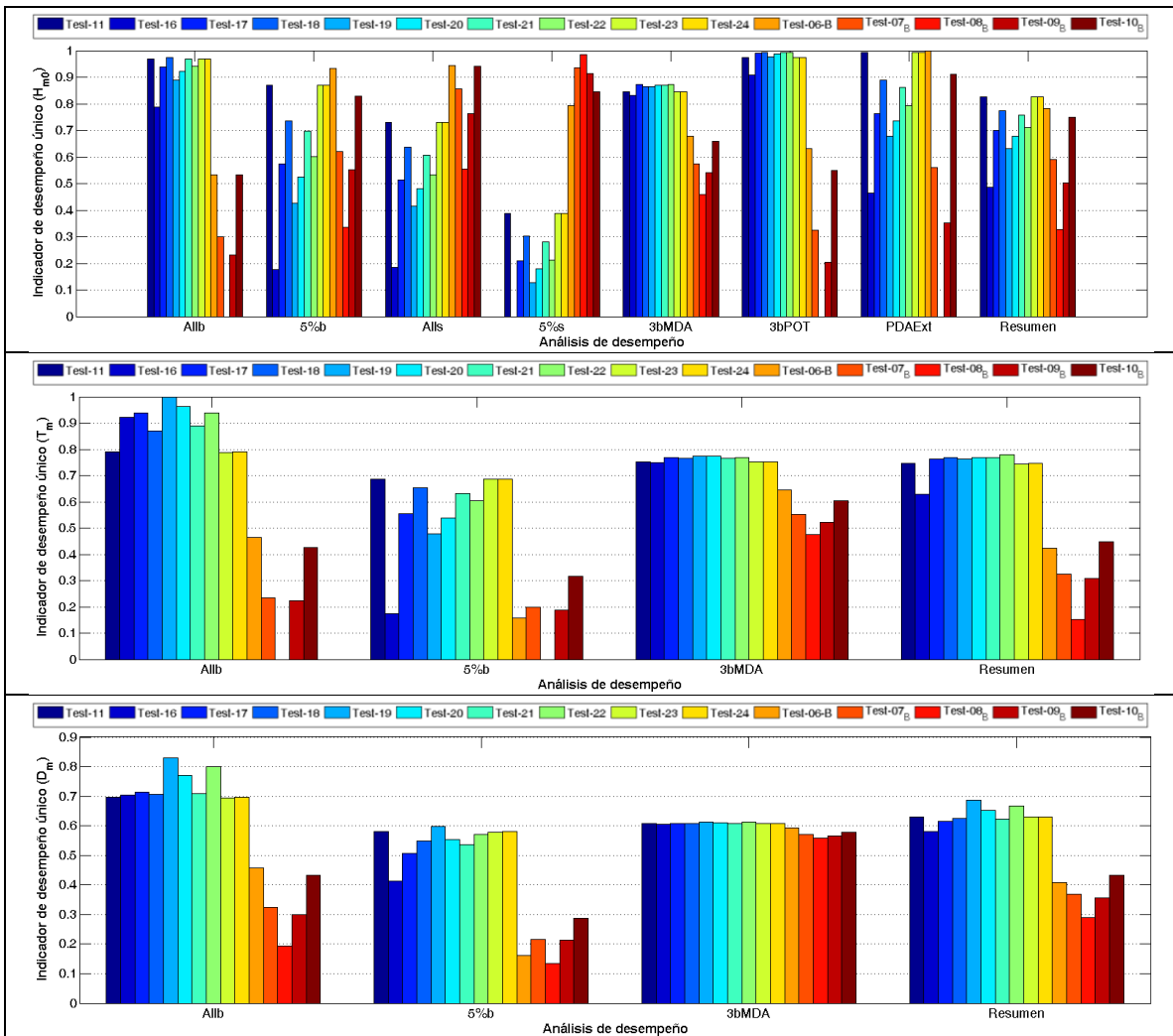
**Figura 5-9.** Índices de desempeño para distintos tipos de análisis entre los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-16 y la información de B2 y S2. Arriba, desempeño de  $H_{m0}$ . Abajo, desempeño de  $D_m$ .



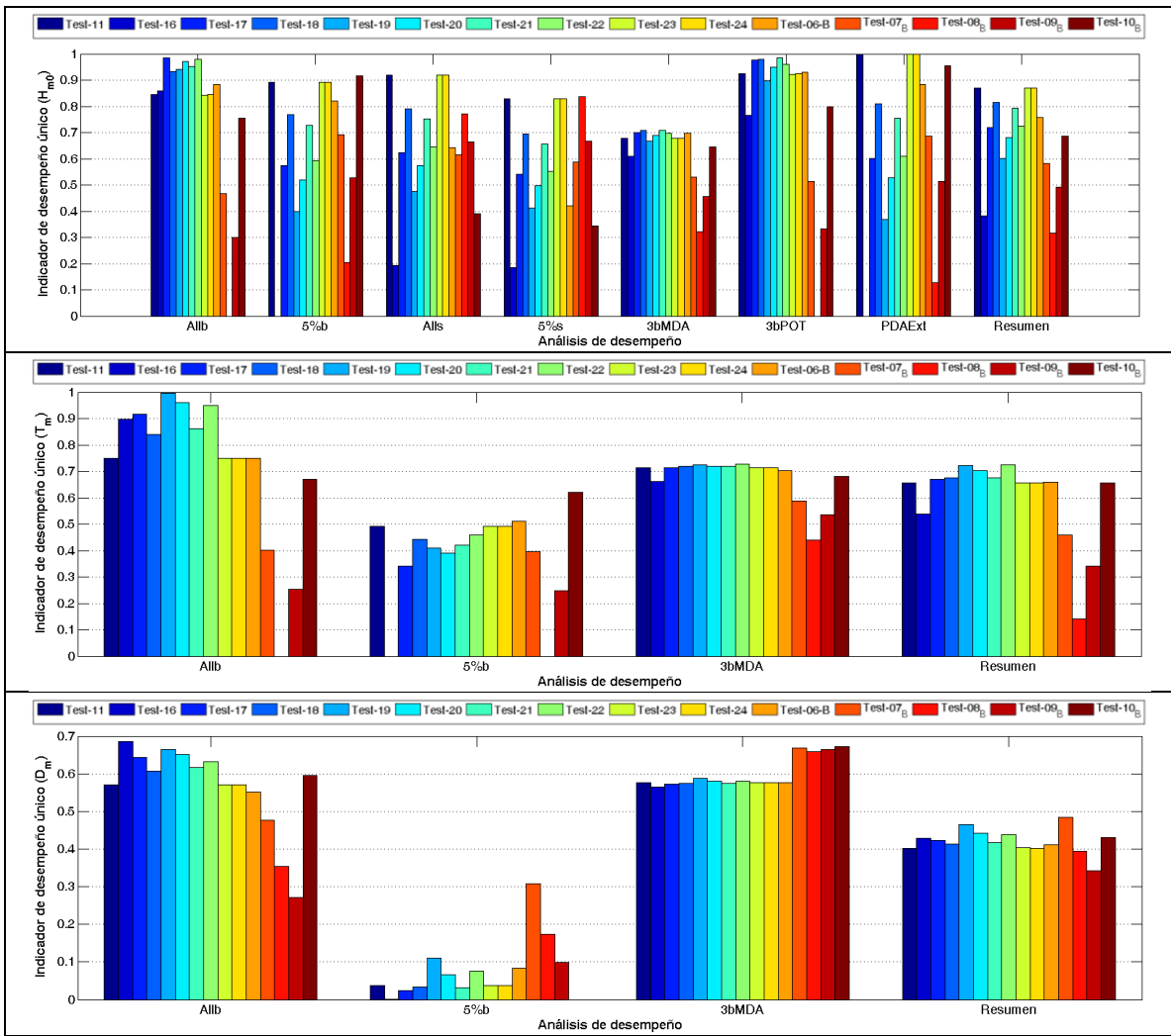
**Figura 5-10.** Índices de desempeño para distintos tipos de análisis entre los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-16 y la información de B3 y S3. Arriba, desempeño de  $H_{m0}$ . Centro, desempeño  $T_m$ . Abajo, desempeño de  $D_m$ .



**Figura 5-11.** Índices de desempeño para distintos tipos de análisis entre los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-16 y la información de B5 y S5. Arriba, desempeño de  $H_{m0}$ . Centro, desempeño  $T_m$ . Abajo, desempeño de  $D_m$ .



**Figura 5-12.** Índices de desempeño para distintos tipos de análisis entre los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-16 y la información de B7 y S7. Arriba, desempeño de  $H_{m0}$ . Centro, desempeño  $T_m$ . Abajo, desempeño de  $D_m$ .



**Figura 5-13.** Índices de desempeño para distintos tipos de análisis entre los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-16 y la información de B8 y S8. Arriba, desempeño de  $H_{m0}$ . Centro, desempeño  $T_m$ . Abajo, desempeño de  $D_m$ .

A partir de los resultados expuestos, se observa que:

- La modificación del time-step (Test-23 en relación a Test-11) y el aumento del límite de aporte de energía debido al viento ( $Z_{0,max}$ ) (Test-24 en relación a Test-11), para los escenarios modelados con forzantes ERA-Interim no tienen impacto en sus resultados.
- Para  $H_{m0}$ , evaluado en clima extremo, los mejores resultados se observan en los escenarios forzados con datos del reanálisis atmosférico CFSR. Esto se ve reflejado en el desempeño del Test-08B, el cual presenta el IDU más elevado, lo cual es consistente, debido a que presenta el  $\beta_{max}$  más elevado en relación a los demás escenarios planteados. En virtud de lo anterior, es posible concluir que la utilización de un mayor  $\beta_{max}$  aumenta la representación de los eventos más energéticos.
- Los escenarios forzados con datos del reanálisis ERA-Interim, presentan una subestimación en la energía del oleaje respecto a los escenarios forzados con datos del reanálisis atmosférico CFSR. El Test-11, equivalente en parámetros ajustados al Test-08B, presenta un IDU inferior en la representación de los eventos más energéticos.
- Los escenarios modelados con forzantes ERA-Interim entregan los mejores resultados para  $T_m$ , siendo el Test-11 el escenario mejor evaluado.
- Los escenarios Test-16, 17 y 21 que fueron forzados con datos del reanálisis atmosférico ERA-Interim y con los menores  $\beta_{max}$  entregan los mejores resultados para  $D_m$ .
- Se observó que el aumento en el valor de  $\beta_{max}$ , mejora el desempeño en la representación de  $H_{m0}$  para eventos más energéticos, sin alterar de forma considerable la representación de  $H_{m0}$  en clima medio.
- Los escenarios forzados con datos del reanálisis ERA-Interim, presentan una subestimación en la energía del oleaje respecto a los escenarios forzados con datos CFSR. Sin embargo, el aumento del parámetro  $\beta_{max}$ , permite compensar esta subestimación. Por tanto, es razonable que los resultados globales del escenario Test-11 posean el IDU mejor evaluado, ya que en general, los escenarios forzados con datos ERA-Interim tienden a presentar el mejor ajuste para clima medio y al contar con el  $\beta_{max}$  más elevado, además presenta un buen ajuste para los eventos más energéticos.

### 5.3.2 RESUMEN DE RESULTADOS

La Tabla 5-6, expone el resumen del desempeño de los escenarios de calibración en función de las zonas de estudio (norte, centro y sur de Chile) y de los parámetros de oleaje  $H_{m0}$ ,  $T_m$  y  $D_m$ . La Tabla 5-6, presenta el ranking con los tres escenarios de simulación que presentaron un mejor desempeño.

Se observa que el escenario que presenta el mejor desempeño en la representación del clima de olas en las zonas norte, centro y sur de Chile, corresponde al Test-11. A partir de la Tabla 5-6, es posible apreciar que el Test-11 es el escenario mejor evaluado en el desempeño global de resultados, tanto para clima extremo y clima medio.

Se decidió utilizar el Test-11 para la generación del reanálisis de oleaje en las costas de Chile, esto debido principalmente a que este escenario presenta el un buen desempeño en la representación de los distintos climas de oleaje frente a las costas de Chile.

**Tabla 5-5.** Resumen de índices de desempeño de los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-16.

Escenario		Desempeño Global	Desempeño $H_{m0}$	Desempeño $T_m$	Desempeño $D_m$	Desempeño Zona norte	Desempeño Zona centro	Desempeño Zona sur
Global	Test-11	<b>0.634</b>	0.613	<b>0.705</b>	0.604	<b>0.706</b>	<b>0.634</b>	0.740
	Test-16	0.485	0.391	0.397	<b>0.681</b>	0.346	0.503	0.619
	Test-17	0.589	0.543	0.595	0.648	0.577	0.587	0.727
	Test-18	0.620	0.588	0.662	0.628	0.658	0.616	<b>0.744</b>
	Test-19	0.554	0.491	0.583	0.606	0.527	0.515	0.658
	Test-20	0.578	0.526	0.600	0.627	0.565	0.557	0.700
	Test-21	0.613	0.578	0.646	0.633	0.640	0.609	0.741
	Test-22	0.590	0.547	0.637	0.606	0.604	0.562	0.702
	Test-07_B	0.489	<b>0.646</b>	0.515	0.321	0.642	0.442	0.394
	Test-08_B	0.365	0.533	0.306	0.265	0.433	0.448	0.216
	Test-09_B	0.443	0.615	0.441	0.285	0.539	0.462	0.344
Test-10_B	0.508	0.595	0.604	0.341	0.653	0.428	0.501	
Global Mayor Ponderación $H_{m0}$	Test-11	<b>0.634</b>	0.613	<b>0.705</b>	0.604	<b>0.706</b>	<b>0.630</b>	<b>0.772</b>
	Test-16	0.465	0.391	0.397	<b>0.681</b>	0.346	0.471	0.577
	Test-17	0.582	0.543	0.595	0.648	0.577	0.575	0.728
	Test-18	0.617	0.588	0.662	0.628	0.658	0.609	0.762
	Test-19	0.543	0.491	0.583	0.606	0.527	0.506	0.653
	Test-20	0.570	0.526	0.600	0.627	0.565	0.548	0.700
	Test-21	0.609	0.578	0.646	0.633	0.640	0.600	0.755
	Test-22	0.584	0.547	0.637	0.606	0.604	0.556	0.711
	Test-07_B	0.532	<b>0.646</b>	0.515	0.321	0.642	0.483	0.445
	Test-08_B	0.410	0.533	0.306	0.265	0.433	0.505	0.244
	Test-09_B	0.489	0.615	0.441	0.285	0.539	0.511	0.385
Test-10_B	0.533	0.595	0.604	0.341	0.653	0.459	0.559	
Clima Medio	Test-11	<b>0.714</b>	0.728	<b>0.756</b>	0.663	<b>0.806</b>	0.678	0.755
	Test-16	0.629	0.634	0.556	<b>0.715</b>	0.566	0.604	0.716
	Test-17	0.704	0.731	0.709	0.695	0.761	0.671	0.777
	Test-18	0.708	<b>0.742</b>	0.743	0.679	0.804	0.680	<b>0.773</b>
	Test-19	0.683	0.701	0.705	0.663	0.725	0.624	0.735
	Test-20	0.698	0.722	0.715	0.679	0.754	0.652	0.760
	Test-21	0.713	0.741	0.736	0.683	0.796	<b>0.679</b>	0.776
	Test-22	0.703	0.731	0.736	0.664	0.780	0.652	0.755
	Test-07_B	0.534	0.638	0.564	0.417	0.637	0.495	0.435
	Test-08_B	0.353	0.325	0.379	0.366	0.345	0.418	0.286
	Test-09_B	0.476	0.553	0.501	0.388	0.519	0.482	0.395
Test-10_B	0.578	0.634	0.654	0.462	0.738	0.494	0.526	
Clima Extremo	Test-11	<b>0.511</b>	0.495	<b>0.585</b>	0.469	0.575	<b>0.549</b>	<b>0.686</b>
	Test-16	0.270	0.168	0.062	<b>0.589</b>	0.067	0.395	0.452
	Test-17	0.409	0.364	0.343	0.533	0.333	0.469	0.628
	Test-18	0.470	0.438	0.479	0.506	0.468	0.513	0.674
	Test-19	0.357	0.295	0.315	0.473	0.267	0.364	0.519
	Test-20	0.393	0.341	0.347	0.503	0.317	0.424	0.586
	Test-21	0.454	0.421	0.445	0.511	0.435	0.500	0.663
	Test-22	0.414	0.371	0.415	0.470	0.372	0.429	0.599
	Test-07_B	0.413	0.691	0.419	0.140	<b>0.615</b>	0.399	0.307
	Test-08_B	0.326	<b>0.730</b>	0.180	0.077	0.461	0.436	0.103
	Test-09_B	0.359	0.668	0.328	0.092	0.512	0.394	0.249
Test-10_B	0.376	0.548	0.494	0.099	0.532	0.308	0.426	

**Tabla 5-6.** Ranking de desempeño de escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-16.

	Ranking de desempeño	Escenario Global		Escenario Hm0		Escenario Tm		Escenario Dm	
		IDU	Test	IDU	Test	IDU	Test	IDU	Test
<b>Global</b>	1	0.63	Test-11	0.65	Test-07_B	0.7	Test-11	0.68	Test-16
	2	0.62	Test-18	0.62	Test-09_B	0.66	Test-18	0.65	Test-17
	3	0.61	Test-21	0.61	Test-11	0.65	Test-21	0.63	Test-21
<b>Clima Extremo</b>	1	0.52	Test-11	0.73	Test-08_B	0.59	Test-11	0.59	Test-16
	2	0.47	Test-18	0.69	Test-07_B	0.49	Test-10_B	0.53	Test-17
	3	0.46	Test-21	0.67	Test-09_B	0.48	Test-18	0.51	Test-21
<b>Clima Medio</b>	1	0.72	Test-11	0.74	Test-18	0.76	Test-11	0.72	Test-16
	2	0.72	Test-21	0.74	Test-21	0.74	Test-18	0.69	Test-17
	3	0.72	Test-18	0.73	Test-22	0.74	Test-21	0.68	Test-21
<b>Global Mayor Ponderación Hm0</b>	1	0.63	Test-11	0.64	Test-07_B	0.7	Test-11	0.67	Test-16
	2	0.62	Test-18	0.61	Test-09_B	0.66	Test-18	0.64	Test-17
	3	0.61	Test-21	0.6	Test-11	0.64	Test-21	0.63	Test-21

## 5.4 VALIDACIÓN

### 5.4.1 COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON REGISTROS DE OLEAJE OBTENIDOS MEDIANTE BOYAS

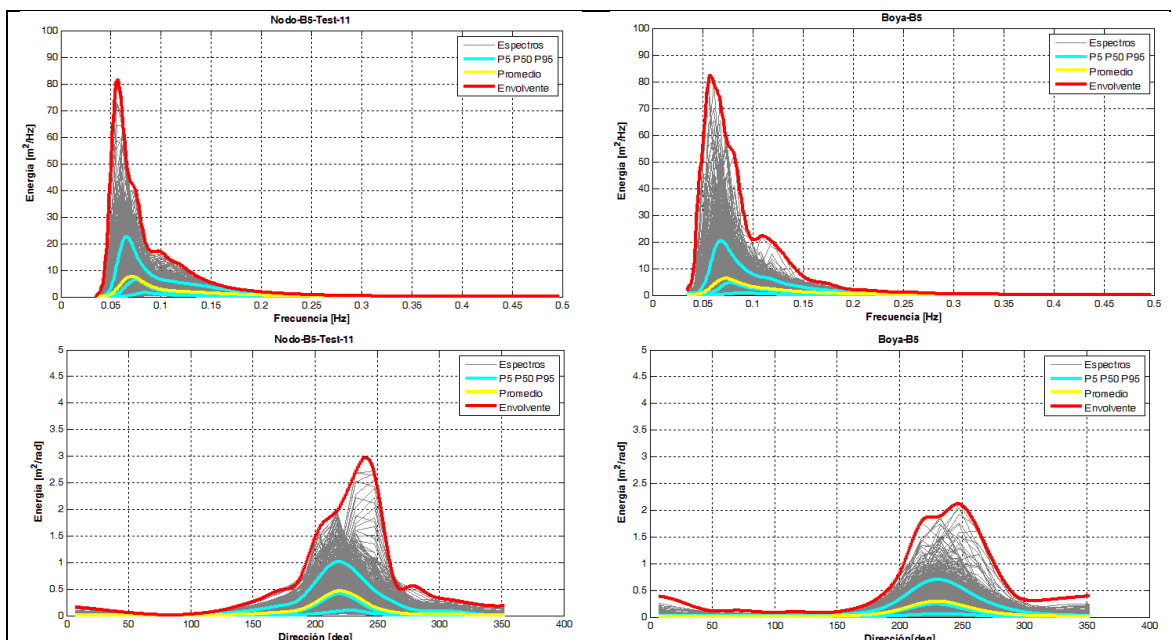
A continuación se presentan los resultados obtenidos tras la comparación la base de datos generada a partir del Test-11 y los registros de oleaje de las boyas expuestas en la Tabla 4-6. La Tabla 5-7, presenta el resumen de indicadores estadísticos obtenidos tras las comparaciones realizadas. La Figura 5-14, muestra la comparación de la forma de los espectros registrados por la boya B5 y los espectros de la base de datos generada en la misma coordenada, se presentan envolventes generadas a partir de los percentiles  $P_5$ ,  $P_{50}$ ,  $P_{95}$  y  $P_{100}$  para cada componente de frecuencia y dirección de los espectros integrados en los dominios de la frecuencia y dirección, respectivamente. La Figura 5-15, expone los gráficos 2DH y 3D, de error cuadrático medio (RMSE), obtenido al promediar en el tiempo los espectros registrados por la boya B5 y los espectros de la base de datos generada, también se presentan gráficos de sesgo en el tiempo de los espectros integrados en el dominio de la frecuencia y la dirección.

A partir de las comparaciones realizadas, se puede observar:

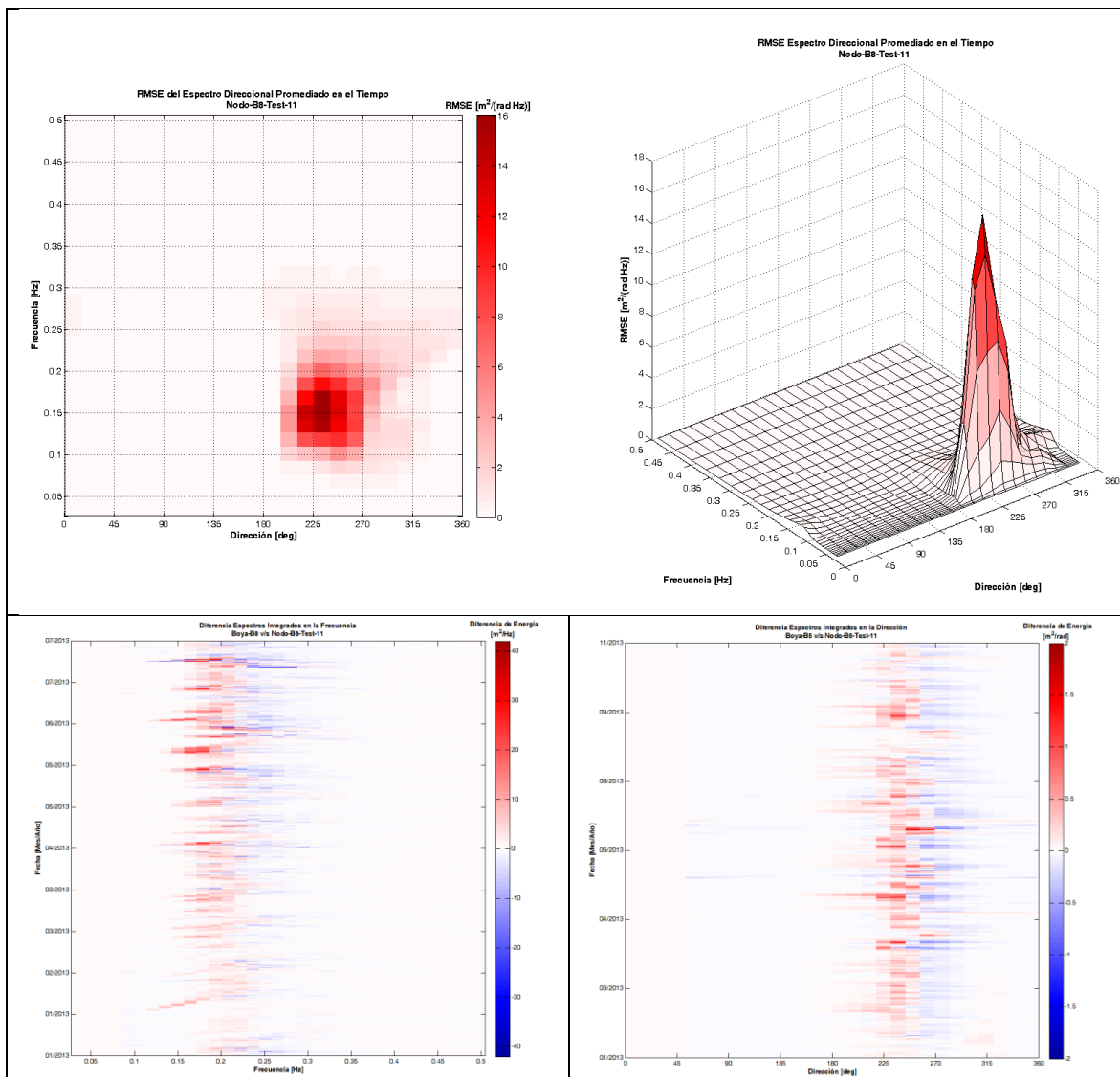
- Para el caso de  $H_{m0}$ , el modelo presenta coeficientes de determinación ( $R^2$ ) de 0.86, para la boya B1, con errores medios cuadráticos de 0.27 metros. Los máximos errores (RMSE) observados, se presentan en la comparación de los datos del modelo con los registros de la boya B3 (Valparaíso), presentando un RMSE de 0.43 metros y un  $R^2$  de 0.73.
- Para el caso de  $T_m$ , en general se observan sesgos inferiores al segundo y RMSE que no superan los 3 segundos. El desempeño más bajo, se observa nuevamente en la comparación de resultados con los datos de la boya B3.
- Finalmente para  $D_m$ , se observan errores RMSE que oscilan entre los  $9.92^\circ$  y  $15.86^\circ$ , los índices de determinación  $R^2$  obtenidos son superiores al 0.5, alcanzando un máximo de 0.79 en la comparación de resultados con la boya B8.
- Respecto a la comparación de los espectros registrados por la boya B5, a partir de la Figura 5-14, es posible apreciar que en general, el modelo presenta una correcta representación de la forma de los espectros integrados en el dominio de la frecuencia, sobre todo al considerar la representación de los peak's de energía. Sin embargo es posible observar una tendencia a la subestimación de componentes de onda acotadas entre los 0.1 Hz y 0.2 Hz.
- Para el caso de los espectros integrados en el dominio de la dirección, se observa una tendencia a la subestimación de componentes de onda provenientes de la dirección Weste-SurWeste ( $225^\circ$  y  $250^\circ$ ).

**Tabla 5-7.** Resumen de indicadores estadísticos resultantes de la comparación de los datos registrados por la boyas expuestas en la Tabla 4-6, con los datos generados a partir del Test-11.

	B1	B2	B3	B5	B7	B8
<b><math>H_{m0}</math></b>						
<b>N° Datos</b>	15792	3207	4250	5001	793	1685
<b>MAE</b>	0.21	0.33	0.34	0.30	0.25	0.28
<b>RMSE</b>	0.27	0.43	0.43	0.40	0.34	0.36
<b>BIAS</b>	0.11	0.23	0.23	0.15	0.02	0.12
<b>Skill</b>	0.89	0.83	0.81	0.84	0.87	0.86
<b>R<sup>2</sup></b>	0.86	0.75	0.73	0.76	0.79	0.87
<b><math>T_m</math></b>						
<b>MAE</b>	0.45		2.58	0.83	0.62	0.63
<b>RMSE</b>	0.62	<b>Sin Datos</b>	2.83	1.07	0.83	0.84
<b>BIAS</b>	0.09		2.55	0.23	0.21	0.16
<b>Skill</b>	0.92		0.73	0.87	0.90	0.90
<b>R<sup>2</sup></b>	0.78		0.54	0.57	0.78	0.73
<b><math>D_m</math></b>						
<b>MAE</b>		7.76	9.77	13.13	7.13	9.44
<b>RMSE</b>	<b>Sin Datos</b>	9.92	12.81	15.86	10.61	12.66
<b>BIAS</b>		5.90	4.99	11.72	2.89	7.00
<b>Skill</b>		0.56	0.43	0.30	0.53	0.44
<b>R<sup>2</sup></b>		0.66	0.61	0.53	0.74	0.79



**Figura 5-14.** Comparación de forma de espectros registrados por la boya B5 (Izquierda) con espectros obtenidos a partir del Test-11 (Derecha). Arriba, espectros integrados en el dominio de la frecuencia. Abajo, espectros integrados en el dominio de la dirección



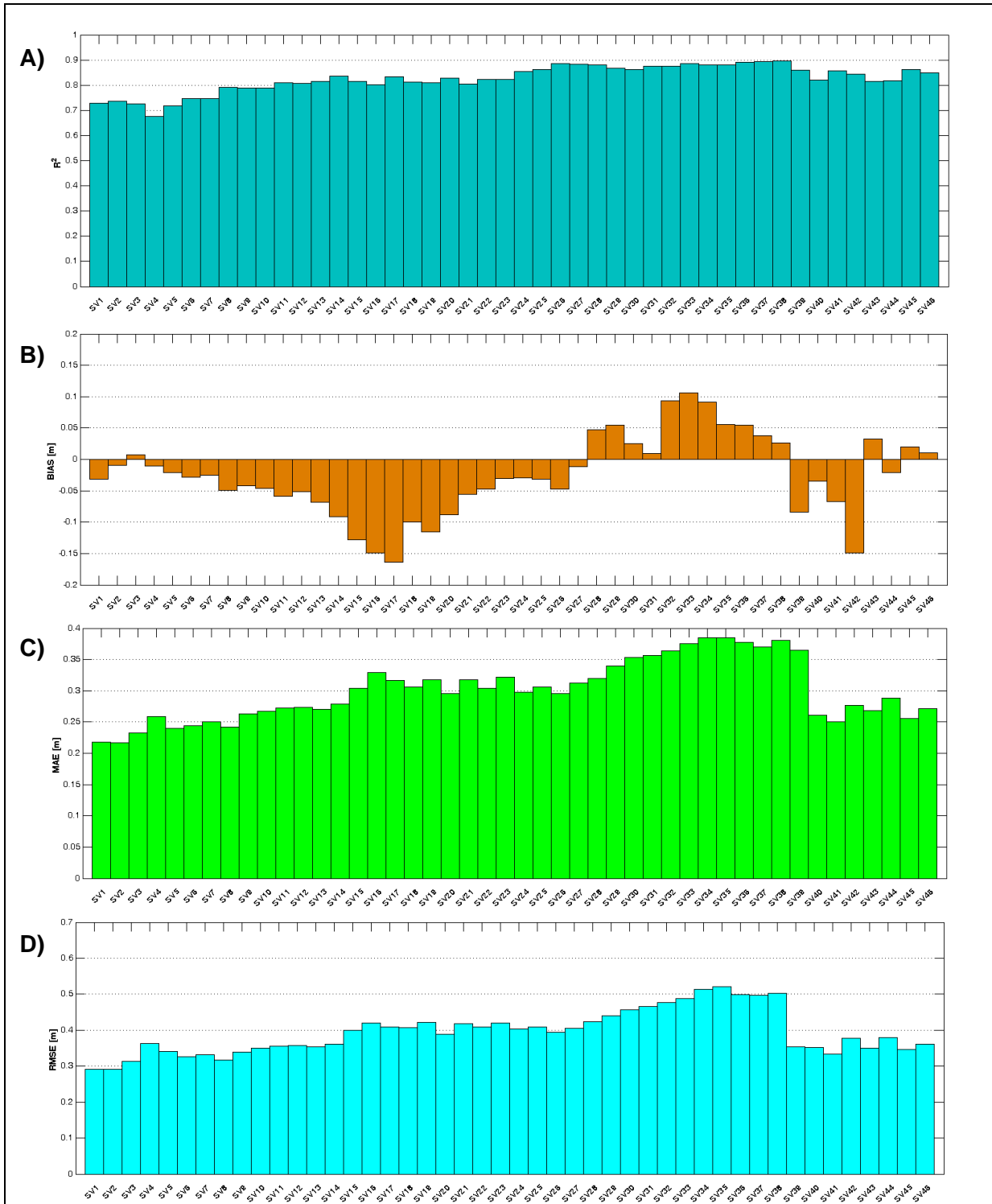
**Figura 5-15.** Gráficos de desempeño del Test-11, en la representación del espectro de oleaje, comparación con espectros registrados por la boya B5. Arriba, gráficos en el dominio de la frecuencia y la dirección de *RMSE* promediado en el tiempo gráfico 2DH (Izquierda) y gráfico 3D (Derecha). Abajo, gráficos de sesgo de los espectros en el tiempo, espectros integrados en el dominio de la frecuencia (Izquierda) y espectros integrados en el dominio de la dirección (Derecha).

#### 5.4.2 COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON REGISTROS SATELITALES

A continuación se presentan los resultados obtenidos tras la comparación de la base de datos generada a partir del escenario Test-11 con información satelital extraída en 46 nodos distribuidos a lo largo de la costa de Chile continental e insular. La Figura 5-16, expone los indicadores estadísticos  $R^2$ ,  $BIAS$ ,  $MAE$  y  $RMSE$  obtenidos.

A partir de los resultados, es posible observar:

- La base de datos generada, presenta coeficientes de determinación superiores a 0.7, alcanzado un máximo de 0.82 en la zona central de Chile.
- Los sesgos observados, oscilan entre los 0.12 y -0.17 metros, presentando mayores diferencias en el sector del norte chico del país. En isla de pascua, se presenta una tendencia a la subestimación de la altura  $H_{m0}$ , la que alcanza un máximo de -0.15 metros.
- Se observa una tendencia al aumento del error  $RMSE$  hacia las latitudes más altas (sur de Chile).



**Figura 5-16.** Resumen de indicadores estadísticos obtenidos a partir de la comparación de alturas  $H_{m0}$  de altímetros satélites en las coordenadas expuestas en la Tabla 4-21 con alturas obtenidas del escenario Test-11. A). Indicador estadístico  $R^2$ , B). Indicador estadístico  $BIAS$ , C). Indicador estadístico  $MAE$  y D). Indicador estadístico  $RMSE$ .

## 6 CONCLUSIONES

La calibración del modelo WAVEWATCH III v.4.18 fue lograda de manera exitosa mediante un análisis exhaustivo de la sensibilidad del modelo ante la variación de la resolución y extensión del dominio computacional y batimétrico, la selección de parametrizaciones de algunos de los procesos físicos involucrados en la ecuación de la balance de acción de densidad espectral de oleaje, la modificación de los parámetros adimensionales de algunas parametrizaciones físicas y la utilización de distintas bases de datos de forzantes reanalizadas para alimentar al modelo de olas.

- Relativo a la selección del dominio computacional y batimétrico

El uso de batimetrías de distinta resolución ( $0.5^\circ$  y  $1^\circ$ ) y extensión (latitudes entre  $-64^\circ$  y  $64^\circ$  o  $-75^\circ$  y  $75^\circ$ ), no produce un impacto significativo en los resultados de las simulaciones. Sin embargo, los tiempos de cálculo asociados a la utilización de una malla de resolución  $0.5^\circ$  asciende a las 22.5 horas por año de simulación en comparación a las 2.2 horas por un escenario cuya malla presente una resolución de  $1^\circ$ .

- Relativo a la selección de parametrizaciones físicas

El paquete de parametrizaciones del proceso de aporte y disipación de la energía debido al viento ST1 ( $S_{in}$  y  $S_{ds}$ ), presenta el desempeño más bajo, en relación al resto de los escenarios de simulación planteados.

La utilización de los switches asociados a la parametrización del proceso de aporte lineal de energía debido al viento ( $S_{in}$ ) LN1 o SEED, no produce un impacto significativo en los resultados de las simulaciones.

Si bien, el método de estimación de transferencia de energía dentro del espectro de olas, debido a interacciones no lineales entre cuadrupletas ( $S_{nl}$ ), mediante el método GMD (Switch NL3), presenta mejoras en la parametrización del proceso físico, respecto al método DIA (Switch NL1), los mejores ajustes de los resultados del modelo con las mediciones fueron obtenidos tras la utilización de este último.

El paquete de parametrizaciones de los términos  $S_{in}$  y  $S_{ds}$  ST4, es el que presenta un mejor desempeño en la representación del clima medio y extremo de oleaje frente a las costas de Chile.

- Relativo al ajuste de parámetros adimensionales de las parametrizaciones de los procesos físicos y a la selección de la base de datos de forzantes del modelo

La modificación del límite de aporte de energía debido al viento ( $Z_{0,max}$ ), no influye de manera significativa en los resultados de las simulaciones.

En general, la modificación de los parámetros adimensionales  $\beta_{max}$ ,  $Z_{0,max}$ ,  $C_{ds}^{sat}$  y  $B_r$  del paquete ST4 no influyen de manera significativa en las de las variables  $T_m$  y  $D_m$ .

La modificación del parámetro de crecimiento de energía debido al viento  $\beta_{max}$ , altera considerablemente los resultados del modelo. El aumento del valor de este parámetro adimensional, repercute en un aumento de la altura  $H_{m0}$ . Adicionalmente se observó que el aumento de  $\beta_{max}$ , mejora el desempeño del modelo en la representación de alturas  $H_{m0}$  más energéticas (eventos extremos), afectando en menor forma los valores de  $H_{m0}$  más cercanos al promedio de la estadística.

Los escenarios de calibración forzados a partir de datos del reanálisis atmosférico CFSR, tienden a sobreestimar las alturas  $H_{m0}$  en relación a los escenarios forzados con datos del reanálisis ERA-Interim. Adicionalmente, se observó que los modelos forzados con datos ERA-Interim, tienden a presentar un mejor desempeño en la estimación del clima medio de oleaje, mientras que los escenarios forzados con datos CFSR, tienden a presentar un mejor desempeño para datos de clima extremo.

El escenario que presentó un mejor desempeño global, en relación a los demás escenarios planteados, fue el Test-11. Este escenario se basó en la combinación de parametrizaciones físicas contenidas en el Switch\_lfremmer1. Éste incluye el paquete ST4 empleado por el lfremmer en la generación de la base de datos de reanálisis de oleaje global del proyecto IOWAGA.

- Relativo a la validación de resultados de la base de datos generada a partir del Test-11

Para el caso de  $H_{m0}$ , se observan coeficientes de determinación  $R^2$  de 0.86 con errores  $RMSE$  de 0,27 metros.

El desempeño más bajo observado, se registra en la boya B3 (Valparaíso), con errores  $RMSE$  de 0.43 metros y  $R^2$  de 0.73.

Los espectros simulados, presentan un correcto ajuste a los espectros medios analizados, sin embargo se observa una tendencia a la sobre estimación entre las frecuencias 0.1Hz y 0.2Hz. Para la dirección, se presenta una tendencia a la subestimación de componentes de onda provenientes del oeste-suroeste.

Respecto a los datos comparados con información satelital, la base de datos generada, presenta coeficientes de determinación superiores a 0.7, alcanzado un máximo de 0.82 en la zona central de Chile. Se observa una tendencia a disminuir el desempeño del modelo en las latitudes bajas (sur de Chile).

## **7 RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS**

En virtud de los resultados obtenidos tras el proceso de selección de la extensión y resolución de la malla batimétrica y computacional, se recomienda:

- Para aplicaciones en el océano pacífico y con el objetivo de generar información en aguas profundas, se recomienda emplear un mallado del dominio a una resolución de  $1^\circ \times 1^\circ$ . Esto, garantiza resultados confiables en tiempos de cálculo razonables.
- Para obtener resultados confiables en las cercanías de la costa y en profundidades más reducidas, se recomienda aumentar la resolución en un dominio acotado frente a la costa empleando metodologías de anidamiento bidireccional (Tolman H., 2007).

En lo relativo a la selección de parametrizaciones y paquetes físicos:

- Se aconseja emplear la combinación de parametrizaciones físicas contenidas en el Switch de compilación "switch\_lfremmer1", presente en el paquete de compilación del modelo Wavewatch III v.4.18. Éste, incorpora los esquemas de crecimiento y disipación de energía del oleaje (paquete ST4) empleados por el IFREMER en la generación de su base de datos de oleaje de reanálisis global.

En lo relativo a la base de datos de reanálisis atmosféricos y al ajuste de parametrizaciones y para trabajos futuros se recomienda:

- A la luz de los resultados obtenidos, y para una nueva actualización de la base de datos generada, se recomienda aumentar el valor del parámetro  $\beta_{max}$ , con el objetivo de mantener la calidad de los resultados del modelo en la representación del clima medio y aumentarla en clima extremo.
- Sensibilizar otros coeficientes de las parametrizaciones físicas del paquete de términos fuentes ST4.
- Calibrar una base de datos especial para la representación del clima extremo, empleando la base de datos de reanálisis atmosférico CFSR y CFSv2.
- Determinar la calidad de los vientos reanalizados respecto a mediciones. Para evaluar la posibilidad de asimilar la información de viento con el objetivo de generar un mejor Input para el modelo Wavewatch III v.4.18.

## 8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ardhuin, F., Hanafin, J., Quilfen, Y., Chapron, B., Quwffeulou, P., & Obrebski, M. (2011). Calibration of the "IOWAGA" global wave hindcast (1991-2011) using ECMWF and CFRS winds. *12th International Workshop in Wave Hindcasting and Forecasting, Kohala Coast, Hawai'i*, 1-13.

Ardhuin, F., Reilly, W., Herbres, T., & Jessen, P. (2002). Swell tranformation across the continental shelf. Part I: Attenuation and directional brodening. *Journal of Physical Oceanography*, 1921-1939.

Ardhuin, F., Rogers, E., Babanin, A., Filipot, J.-F., Magne, R., Roland, A., . . . Collard, F. (2010). Semiempirical dissipation source functions for ocean wave Part I: Definition, calibration and validation. *Journal of Physical Oceanography*, 1917-1941.

AVISO. (16 de 12 de 2015). *Principio de la Altimetría*. Obtenido de AVISO Satellite Altimetry Data: <http://www.aviso.altimetry.fr/es/techniques/altimetria/principio.html>

Booij, N., & Holthuijsen, L. (1987). Propagation of ocean waves in discrete spectral wave models. *Journal of Computatonal Physics*, 307-326.

Booij, N., & Holthuijsen, L. (1987). Propagation of ocean weaves in a discrete spectral wave models. *Journal of Computational Physics*, 307-326.

Bouws, E., Gunther, W., Rosenthal, W., & Vincent, C. (1985). Similarity of the wind wave spectrum in finite depth wate: 1. spectral form. *Journal of Geophysical Research Vol 90*, 975-986.

Breugem, W., & Holthuijsen, L. (2007). Generalized shallow water wave growth from lake george. *Journal of Waterway, Por, Coast, and Ocean Engineering, Vol 133*, 173-182.

Camus, P., Mendez, F., Medina, R., & Cofiño, A. (2011). Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate. *Coastal Engineering 54*, 453-462.

CEM. (2008). Chapter II: Meteorology and wave climate. En USACE, *Coastal Engineering Manual* (págs. 1-77). Washington, DC.

CEPAL. (2012). *Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe ; Dinámicas, tendencias y variabilidad climática*. CEPAL.

Chawla, A., & Tolman, H. (2013). Automated grid generation for wavewatch III. *Technical note, MMAB contribution, NCEP, NOAA, 77*.

Cruz, J., Thomson, M., & Stavroulia, E. (2009). *Preliminary site selection Chilean marine energy resources*. Report by Garrad-Hassan and partners Ltd. for the Inter-American Development Bank, Document number 1005/BR/02 Issue B.

Davis, R., & More, E. (1982). A numerical study of vortex shedding from rectangles. *Journal of Fluid Mechanics*, 475-506.

Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., . . . Vitart, F. (2011). The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 553-597.

Gallardo, A. (2015). *Calibración y validación del modelo STWAVE mediante mediciones y modelación matemática en un sector ubicado en la Región de Valparaíso*. Universidad de Valparaíso: Memoria del proyecto para optar al título de Ingeniero Civil Oceánico.

Gelci, R., Cazalé, H., & Vassal, J. (1957). Prévission de la houle. La méthode des densités spectroangulaires. *Bulletin d'information du Comité d'Océanographie et d'Estude des Côtes Vol.9*, 416-435.

Hasselmann, K., Barnett, T., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D., Enke, K., . . . Walden, H. (1973). *Measurements of wind-wave growth and swell decay during the joint north sea wave project (JONSWAP)*. Hamburg: Deutsches Hydrographisches Intitut.

Hasselmann, S., & Hasselmann, K. (1985). Computations and parametrizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum Part I: A new method for efficient computations of the exact nonlinear transfer integral. *Journal of Phisycal Oceanography*, 1369-1377.

Hauser, R. A. (2012). *Evaluación del potencial undimotriz de Uruguay*. Universidad de la República, Facultad de Ingeniería, Instituto de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Ambiental.

Holthuijsen, L. H. (2007). *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge University Press.

Holthuijsen, L. H. (2007). *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge University Press.

Jeffreys, H. (1924). On the formation of waves by wind. *Royal Society of London*, 189-208.  
Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., . . . Joseph, D. (1996). The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis project. *Bulletin og the American Meteorological Society*, 437-471.

Kanamitsu, M., Ebisuzaki, W., Woollen, J., Yang, S.-K., Hnilo, },, Fiorino, M., & Potter, G. (2002). NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Ocean Meteorological Society*, 1631-1643.

Leonard, B. (1975). A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratric upstream interpolation. *Computational Method Applied Mechanics and Engineering*, 59-98.

Lizano, O., Ocampo, F., Alvarado, L., Vega, R., & Puig, J. (2001). Evaluación de modelos numéricos de tercera generación para el pronóstico de oleaje en Centroamérica y México. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 40-49.

Lucero, F. (2015). *Caracterización de energía del oleaje utilizando selección de climas de oleaje y métodos de propagación calibrados*. Universidad Técnica Federico Santa María:

Memoria de título y tesis de grado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Civil y al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil.

Molina, M. (2011). *Estudio no estacionario de clima medio de oleaje en la costa central de Chile*. Memoria del proyecto para optar al título de Ingeniero Civil Oceánico.

Monárdez, P., Acuña, H., & Scott, D. (2008). Evaluation of the potential of wave energy in Chile. *Proceedings of the ASME 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, (págs. 1-9). Portugal.

Montoya, R., & Osorio, A. (2007). Los modelos de generación de oleaje de viento: características, evolución y futuras aplicaciones en Colombia. *Avances en Recursos Hidráulicos, Volumen 15*, 47-74.

Munk, W. H. (1950). Origin and generation of waves. *Institute of Geophysics and Scripps Institution of Oceanography*, 1-4.

NGDC. (06 de 2006). *National Centers for Environmental Information*. Recuperado el 01 de 09 de 2014, de 2-Minute Gridded Global Relief Data (ETOPO2v2): <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/fliers/01mgg04.html>

Ossandón, Á. (2014). *Caracterización del recurso energético del oleaje en la zona centro-sur de Chile*. Universidad Técnica Federico Santa María: Memoria de título y tesis de grado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Civil y al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil.

Pierson, W., & Moskowitz, L. (1964). A proposed spectral form for fully developed wind sea based on the similarity theory of S.A. Kitaigorodskii. *Journal of Geophysical Research Vol. 69, No. 24*, 5181-5190.

Pierson, W., Neuman, G., & James, R. (1955). *Practical methods for observing and forecasting ocean waves*. U.S Naval Oceanographic Office.

Rascle, N., & Ardhuin, F. (2013). A global wave parameter database for geophysical applications. Part 2: Model validation with improved source term parameterization. *Ocean Modelling 70*, 174-188.

Rudnick, P. (1951). *Correlograms for pacific ocean waves*. University of California Marine Physical Laboratory.

Saha, S., & al, e. (2010). *NCEP Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) Selected Hourly Time-Series Products, January 1979 to December 2010*. Recuperado el 03 de 2015, de Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory.: <http://dx.doi.org/10.5065/D6513W89>

Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., . . . Becker, E. (2014). The NCEP Climate Forecast System Version 2. *Journal of Climate 27*, 2185-2208.

SatOC. (2010). *Satellite wave data quality report, DUE GlobWave*. Logica.

Scott, D., Resio, D., & Pantoja, C. (2002). *Swell propagation and nearshore wave climate*. Recuperado el 01 de 08 de 2015, de Documento de la base de datos del Coastal Hydraulics Laboratory (CHL) USACE: [http://chl.erdc.usace.army.mil/Media/2/4/7/Scott\\_Resio\\_Pantoja.pdf](http://chl.erdc.usace.army.mil/Media/2/4/7/Scott_Resio_Pantoja.pdf)

SHOA. (2005). *Instrucciones oceanográficas N°1, Especificaciones técnicas para mediciones y análisis oceanográficos*. Tercera Edición.

SHOA. (2005). *Publicación N° 3201. Instrucciones oceanográficas N°1: Especificaciones técnicas para mediciones y análisis oceanográficos 3ª Edición 2005*. Obtenido de Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada: [http://www.shoa.cl/servicios/descargas/pdf/pub3201\\_3ed-v4\\_2015.pdf](http://www.shoa.cl/servicios/descargas/pdf/pub3201_3ed-v4_2015.pdf)

Silva, R. (2005). *Análisis y descripción estadística del oleaje*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Intituto de Ingeniería, Ciudad Universitaria.

Spindler, D., & Tolman, H. (2008). *Example of WAVEWATCH III for the NE Pacific*. Technical Note.

Sverdrup, H., & Munk, W. (1947). *Wind, sea, and swell: theory of relations for forecasting*. United States Navy Department, Hydrographic Office.

Tolman, H. (2002). Alleviating the garden sprinkler effect in wind wave models. *Ocean Modelling*, 269-289.

Tolman, H. (2007). *Development of a multi-grid version of Wavewatch III*. 88pp + Appendices: Tech. Note 256, NOAA/NWS/NCEP/MMAB.

Tolman, H. (2014). *User Manual and system documentation of WAVEWATCH III version 4.18*. Environmental Modeling Center, Marine Modeling and Analysis Branch.

UNICAN. (2000). *Dinámicas, Documento de referencia, Volumen 1*. Santander: Universidad de Cantabria.

USACE. (2008). *Coastal engineering manual, Part II-Chapter 2, Meteorology and wave*. U.S. Army Corps of Engineers.

Wessel, P., & Smith, W. (1996). A global, self-consistent, hierarchical, high-resolution shoreline database. *Journal of Geophysical Research*, Vol 101 N= B\$, 8741-8743.

Zar, J. H. (1998). *Biostatistical analysis*. Prentice Hall, 605-668.

## **ANEXO A: CLÚSTER DE DATOS UTILIZADOS DURANTE LA CALIBRACIÓN DEL MODELO WWIII**

**Tabla A-1.** Clúster de datos obtenidos de la boya B1

Clúster	N° datos	%	Datos representativos			
			Fecha / Hora	Hm0 [m]	Tm [s]	Dm [°]
1	26	0.055	2013-07-03 15:00:00	5.35	14.34	224
2	1864	3.934	2008-07-20 02:00:00	1.16	5.3	32
3	2127	4.489	2009-06-07 10:00:00	0.93	8.06	212
4	350	0.739	2009-09-27 16:00:00	4.58	7.39	139
5	13	0.027	2008-10-27 20:00:00	2.28	13.42	320
6	2070	4.369	2013-06-05 11:00:00	3.82	9.11	252
7	206	0.435	2011-07-11 11:00:00	2.64	13.48	175
8	516	1.089	2009-03-15 23:00:00	1.79	5.12	131
9	18243	38.504	2008-01-11 21:00:00	1.93	5.82	298
10	5493	11.593	2011-08-03 12:00:00	3.24	7.03	74
11	6579	13.886	2013-01-25 06:00:00	1.62	9.39	349
12	8492	17.923	2009-11-04 22:00:00	3	6.48	193
13	156	0.329	2011-06-18 22:00:00	5.19	11.44	166
14	1245	2.628	2012-01-06 19:00:00	2.05	11.48	243

**Tabla A-2.** Datos representativos de los clúster de datos obtenidos de la boya B2

Clúster	N° datos	%	Datos representativos			
			Fecha / Hora	Hm0 [m]	Tm [s]	Dm [°]
1	269	8.388	2010-07-06 09:00:00	3.15	8	345
2	63	1.964	2009-09-16 21:00:00	3.08	20	211
3	1119	34.892	2010-08-15 21:00:00	1.3	13.3	280
4	403	12.566	2009-11-07 09:00:00	3.52	10	214
5	653	20.362	2010-06-14 03:00:00	3.88	15.4	293
6	286	8.918	2009-10-09 06:00:00	1.02	11.8	218
7	272	8.481	2010-06-17 18:00:00	1.82	6.3	292
8	79	2.463	2010-03-21 06:00:00	1.14	18.2	239
9	54	1.684	2010-06-03 18:00:00	4.16	15.4	236
10	9	0.281	2010-07-06 15:00:00	4.49	10	314

**Tabla A-3.** Datos representativos de los clúster de datos obtenidos de la boya B3

Clúster	N° datos	%	Datos representativos			
			Fecha / Hora	Hm0 [m]	Tm [s]	Dm [°]
1	602	4.083	2000-08-25 20:00:00	0.97	5.2	235.9
2	32	0.217	2002-10-10 06:00:00	5.71	13.9	233.9
3	97	0.658	2000-09-10 00:00:00	3.72	7.8	333
4	2988	20.264	2001-06-04 22:00:00	3.21	11	157.9
5	267	1.811	2001-07-07 01:00:00	2.17	15.9	255
6	29	0.197	2001-07-28 15:00:00	1.03	4.6	335
7	261	1.77	2002-10-17 02:00:00	3.3	8.5	232.6
8	122	0.827	2001-06-04 23:00:00	3.96	16.7	200
9	3492	23.683	2003-03-19 12:00:00	1.69	12	199.6
10	6210	42.116	2002-08-28 22:00:00	2.11	8.7	283.4
11	645	4.374	2002-02-26 10:00:00	0.85	11.8	249.9

**Tabla A-4.** Datos representativos de los clúster de datos obtenidos de la boya B5

Clúster	N° datos	%	Datos representativos			
			Fecha / Hora	Hm0 [m]	Tm [s]	Dm [°]
1	9	0.06	2013-07-03 14:00:00	6.79	13.52	255.78
2	70	0.468	2013-09-05 00:00:00	0.74	4.26	285.05
3	1168	7.806	2013-07-31 13:00:00	2.02	11.15	216.48
4	158	1.056	2013-05-27 23:00:00	4.2	7.18	315.09
5	3	0.02	2013-06-26 20:00:00	6.33	7.9	232.07
6	210	1.403	2012-03-20 14:00:00	2.47	5.84	213.51
7	164	1.096	2011-08-10 05:00:00	3.86	13.15	272.7
8	1903	12.718	2013-04-15 16:00:00	1.21	8.78	278.7
9	282	1.885	2013-04-08 13:00:00	4.86	11.42	215.24
10	1626	10.867	2012-05-26 00:00:00	1.83	5.47	343.23
11	3688	24.647	2011-07-15 14:00:00	3.56	8.63	253.24
12	3691	24.668	2013-05-27 17:00:00	2.52	6.11	288.8
13	1859	12.424	2013-12-09 01:00:00	1.12	8.3	226.9
14	132	0.882	2012-08-16 12:00:00	4.99	10.12	277.98

**Tabla A-5.** Datos representativos de los clúster de datos obtenidos de la boya B7

Clúster	N° datos	%	Datos representativos			
			Fecha / Hora	Hm0 [m]	Tm [s]	Dm [°]
1	3	0.126	2011-10-07 01:00:00	4.76	15.17	226.86
2	190	7.976	2012-05-05 20:00:00	1.47	4.95	311.99
3	824	34.593	2012-03-08 14:00:00	2.27	7.49	193.99
4	80	3.359	2011-09-27 14:00:00	2.14	12.94	259.2
5	212	8.9	2012-05-15 19:00:00	3.92	7.61	276.37
6	133	5.584	2011-10-04 00:00:00	0.99	7.05	251.43
7	126	5.29	2011-10-29 20:00:00	4.55	9.41	220.66
8	798	33.501	2012-03-13 05:00:00	2.62	8.85	244.17
9	16	0.672	2011-09-27 18:00:00	3.68	14.77	266.14

**Tabla A-6.** Datos representativos de los clúster de datos obtenidos de la boya B8

Clúster	N° datos	%	Datos representativos			
			Fecha / Hora	Hm0 [m]	Tm [s]	Dm [°]
1	11	0.217	2013-05-28 13:00:00	7.63	12	262.16
2	10	0.197	2013-02-21 23:00:00	1.07	4.98	230.92
3	154	3.04	2012-12-18 05:00:00	2.92	6.32	348.66
4	43	0.849	2013-04-28 07:00:00	3.78	13.87	247.03
5	24	0.474	2013-06-26 18:00:00	5.43	7.94	306.84
6	1653	32.636	2012-12-06 00:00:00	2.63	7.34	283.85
7	894	17.651	2013-06-25 20:00:00	2.69	10.12	208.61
8	7	0.138	2012-12-01 02:00:00	1.06	4.94	317.65
9	135	2.665	2013-06-01 11:00:00	5.48	9.2	257.69
10	376	7.423	2013-03-16 17:00:00	1.31	10.58	256.42
11	314	6.199	2013-01-07 05:00:00	3.56	7.57	243.09
12	1021	20.158	2012-11-30 18:00:00	1.13	5.31	270.03
13	423	8.351	2013-05-10 11:00:00	3.75	7.93	317.12

## ANEXO B: INDICADORES ESTADÍSTICOS SELECCIÓN DE ESQUEMAS Y PARAMETRIZACIONES FÍSICAS

Tabla B-1. Indicadores estadísticos obtenidos al comparar los resultados de las simulaciones planteadas en la Tabla 4-13 con los registros de B1 y S1.

Hm0	Indicadores Estadísticos Globales [BOYA]								Indicadores Estadísticos > Percentil 95 [BOYA]							
	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15
N° Datos	15792	15792	15792	15792	15792	15792	15792	15792	800	800	800	800	800	800	800	800
MAE	0.410	0.377	0.346	0.212	0.349	0.254	0.224	0.212	0.954	0.448	0.324	0.313	0.850	0.634	0.305	0.312
RMSE	0.524	0.441	0.409	0.265	0.440	0.354	0.278	0.266	1.087	0.552	0.408	0.410	0.956	0.787	0.405	0.409
BIAS	-0.371	0.335	0.292	0.108	-0.336	-0.159	0.128	0.109	-0.953	0.204	-0.019	-0.239	-0.848	-0.612	-0.220	-0.238
3bMDA	1.312	0.447	0.485	0.768	1.511	1.151	0.739	0.767								
Skill	0.778	0.813	0.827	0.887	0.813	0.850	0.882	0.887	0.718	0.857	0.894	0.894	0.752	0.796	0.895	0.894
R <sup>2</sup>	0.655	0.821	0.793	0.858	0.807	0.748	0.853	0.858	0.114	0.175	0.300	0.414	0.169	0.195	0.404	0.414
Hm0	Indicadores Estadísticos Globales [Satélite]								Indicadores Estadísticos > Percentil 95 [Satélite]							
	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15
N° Datos	518	518	518	518	518	518	518	518	26	26	26	26	26	26	26	26
MAE	0.442	0.348	0.318	0.217	0.395	0.287	0.240	0.217	0.948	0.451	0.350	0.420	0.917	0.737	0.566	0.419
RMSE	0.552	0.416	0.394	0.285	0.487	0.384	0.323	0.285	1.052	0.530	0.498	0.570	1.040	0.823	0.719	0.569
BIAS	-0.401	0.288	0.224	0.053	-0.384	-0.211	0.024	0.054	-0.948	0.146	-0.126	-0.304	-0.917	-0.736	-0.496	-0.302
Skill	0.770	0.827	0.836	0.881	0.797	0.840	0.866	0.881	0.734	0.866	0.874	0.856	0.737	0.792	0.818	0.856
R <sup>2</sup>	0.642	0.801	0.739	0.810	0.792	0.744	0.744	0.810	0.226	0.138	0.130	0.104	0.057	0.368	0.111	0.104
Hm0	Indicadores Estadísticos Eventos Extremos (POT)															
	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15								
N° Datos	25	25	25	25	25	25	25	25								
MAE	0.750	0.508	0.339	0.316	0.707	0.567	0.320	0.316								
RMSE	0.912	0.607	0.419	0.412	0.851	0.714	0.416	0.412								
BIAS	0.750	0.508	0.339	0.316	0.707	0.567	0.320	0.316								
Skill	0.740	0.828	0.880	0.882	0.755	0.795	0.881	0.882								
R <sup>2</sup>	0.400	0.565	0.746	0.745	0.595	0.606	0.732	0.746								
Tm	Indicadores Estadísticos Globales [BOYA]								Indicadores Estadísticos > Percentil 95 [BOYA]							
	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15
N° Datos	15792	15792	15792	15792	15792	15792	15792	15792	800	800	800	800	800	800	800	800
MAE	2.166	0.547	0.549	0.448	0.713	0.684	0.454	0.450	2.922	0.750	0.602	0.611	1.308	1.008	0.594	0.614
RMSE	2.355	0.776	0.720	0.617	0.883	0.933	0.628	0.620	3.164	1.065	0.806	0.783	1.475	1.369	0.766	0.785
BIAS	-2.166	-0.403	0.175	-0.088	-0.441	-0.501	-0.038	-0.088	-2.922	-0.643	-0.278	-0.546	-1.295	-0.921	-0.519	-0.547
Skill	0.684	0.896	0.903	0.917	0.881	0.875	0.916	0.917	0.645	0.880	0.909	0.912	0.834	0.846	0.914	0.912
R <sup>2</sup>	0.546	0.733	0.704	0.782	0.679	0.655	0.772	0.780	0.541	0.762	0.802	0.886	0.819	0.665	0.884	0.885

**Tabla B-2.** Indicadores estadísticos obtenidos al comparar los resultados de las simulaciones planteadas en la Tabla 4-13 con los registros de B2 y S2.

Hm0	Indicadores Estadísticos Globales [BOYA]								Indicadores Estadísticos > Percentil 95 [BOYA]							
	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15
N° Datos	3207	3207	3207	3207	3207	3207	3207	3207	162	162	162	162	162	162	162	162
MAE	0.473	0.373	0.372	0.335	0.337	0.339	0.476	0.335	1.104	0.421	0.459	0.351	0.824	0.640	0.390	0.351
RMSE	0.600	0.463	0.475	0.428	0.438	0.455	0.573	0.428	1.231	0.550	0.567	0.470	0.932	0.803	0.514	0.470
BIAS	-0.389	0.300	0.224	0.225	-0.228	-0.117	0.442	0.226	-1.101	0.029	-0.352	-0.128	-0.811	-0.507	0.207	-0.127
3bMDA	2.421	1.874	2.200	2.036	2.553	1.971	1.749	2.035								
Skill	0.763	0.817	0.812	0.831	0.827	0.820	0.773	0.831	0.699	0.865	0.861	0.885	0.772	0.804	0.874	0.885
R <sup>2</sup>	0.607	0.774	0.667	0.751	0.736	0.672	0.760	0.751	0.223	0.319	0.342	0.346	0.259	0.369	0.341	0.346
Hm0	Indicadores Estadísticos Globales [Satélite]								Indicadores Estadísticos > Percentil 95 [Satélite]							
	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15
N° Datos	849	849	849	849	849	849	849	849	42	42	42	42	42	42	42	42
MAE	0.795	0.304	0.368	0.326	0.638	0.568	0.335	0.326	1.526	0.709	0.878	0.761	1.434	1.023	0.489	0.759
RMSE	0.907	0.402	0.473	0.421	0.749	0.702	0.440	0.421	1.589	0.833	0.941	0.832	1.475	1.190	0.613	0.831
BIAS	-0.781	-0.109	-0.197	-0.187	-0.625	-0.536	-0.083	-0.186	-1.526	-0.689	-0.878	-0.761	-1.434	-1.023	-0.470	-0.759
Skill	0.683	0.860	0.835	0.853	0.738	0.755	0.846	0.853	0.663	0.823	0.800	0.823	0.687	0.747	0.870	0.824
R <sup>2</sup>	0.725	0.799	0.769	0.820	0.821	0.718	0.744	0.820	0.234	0.346	0.500	0.498	0.380	0.324	0.481	0.499
Hm0	Indicadores Estadísticos Eventos Extremos (POT)															
	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15								
N° Datos	25	25	25	25	25	25	25	25								
MAE	1.048	0.616	0.666	0.637	1.047	0.905	0.461	0.637								
RMSE	1.104	0.703	0.746	0.720	1.102	0.985	0.550	0.719								
BIAS	1.048	0.616	0.666	0.637	1.047	0.905	0.461	0.637								
Skill	0.632	0.765	0.753	0.761	0.633	0.671	0.818	0.761								
R <sup>2</sup>	0.544	0.529	0.513	0.513	0.564	0.511	0.511	0.513								
Dm	Indicadores Estadísticos Globales [BOYA]								Indicadores Estadísticos > Percentil 95 [BOYA]							
	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15
N° Datos	3207	3207	3207	3207	3207	3207	3207	3207	162	162	162	162	162	162	162	162
MAE	14.912	7.779	8.432	7.763	7.281	12.579	7.703	7.765	9.214	5.760	6.051	6.204	5.538	7.498	6.626	6.205
RMSE	18.088	10.058	10.671	9.921	9.455	15.581	9.898	9.925	11.879	8.657	7.664	8.240	7.525	9.859	8.803	8.237
BIAS	-10.810	-6.246	-2.324	-5.896	-5.131	-9.324	-6.240	-5.901	-4.974	-4.116	-4.483	-4.942	-3.891	-4.590	-5.613	-4.943
Skill	0.202	0.550	0.524	0.556	0.576	0.314	0.557	0.556	0.473	0.609	0.650	0.626	0.656	0.559	0.603	0.627
R <sup>2</sup>	0.478	0.671	0.565	0.659	0.663	0.516	0.678	0.659	0.773	0.887	0.880	0.901	0.899	0.789	0.908	0.901

**Tabla B-3.** Indicadores estadísticos obtenidos al comparar los resultados de las simulaciones planteadas en la Tabla 4-13 con los registros de B3 y S3.

Hm0	Indicadores Estadísticos Globales [BOYA]								Indicadores Estadísticos > Percentil 95 [BOYA]							
	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15
N° Datos	4250	4250	4250	4250	4250	4250	4250	4250	218	218	218	218	218	218	218	218
MAE	0.442	0.361	0.366	0.338	0.303	0.340	0.431	0.338	0.998	0.370	0.506	0.414	0.765	0.625	0.471	0.414
RMSE	0.565	0.436	0.456	0.425	0.398	0.446	0.530	0.426	1.131	0.464	0.634	0.514	0.869	0.785	0.578	0.514
BIAS	-0.359	0.300	0.207	0.231	-0.184	-0.133	0.252	0.232	-0.989	-0.042	-0.395	-0.219	-0.763	-0.460	-0.002	-0.218
3bMDA	1.980	1.296	1.476	1.419	1.934	1.367	1.062	1.418								
Skill	0.754	0.810	0.802	0.815	0.827	0.806	0.769	0.815	0.707	0.880	0.836	0.867	0.775	0.797	0.850	0.867
R <sup>2</sup>	0.598	0.791	0.649	0.728	0.733	0.655	0.624	0.728	0.197	0.219	0.195	0.227	0.256	0.148	0.216	0.227
Hm0	Indicadores Estadísticos Globales [Satélite]								Indicadores Estadísticos > Percentil 95 [Satélite]							
	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15
N° Datos	849	849	849	849	849	849	849	849	42	42	42	42	42	42	42	42
MAE	0.795	0.304	0.368	0.326	0.638	0.568	0.335	0.326	1.526	0.709	0.878	0.761	1.434	1.023	0.489	0.759
RMSE	0.907	0.402	0.473	0.421	0.749	0.702	0.440	0.421	1.589	0.833	0.941	0.832	1.475	1.190	0.613	0.831
BIAS	-0.781	-0.109	-0.197	-0.187	-0.625	-0.536	-0.083	-0.186	-1.526	-0.689	-0.878	-0.761	-1.434	-1.023	-0.470	-0.759
Skill	0.683	0.860	0.835	0.853	0.738	0.755	0.846	0.853	0.663	0.823	0.800	0.823	0.687	0.747	0.870	0.824
R <sup>2</sup>	0.725	0.799	0.769	0.820	0.821	0.718	0.744	0.820	0.234	0.346	0.500	0.498	0.380	0.324	0.481	0.499
Hm0	Indicadores Estadísticos Eventos Extremos (POT)															
	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15								
N° Datos	25	25	25	25	25	25	25	25								
MAE	1.058	0.506	0.688	0.599	0.892	0.775	0.528	0.598								
RMSE	1.171	0.629	0.797	0.710	1.019	0.900	0.631	0.709								
BIAS	1.058	0.506	0.688	0.599	0.892	0.775	0.528	0.598								
Skill	0.641	0.807	0.756	0.783	0.689	0.725	0.806	0.783								
R <sup>2</sup>	0.540	0.605	0.613	0.630	0.603	0.563	0.665	0.630								
Tm	Indicadores Estadísticos Globales [BOYA]								Indicadores Estadísticos > Percentil 95 [BOYA]							
	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15
N° Datos	4250	4250	4250	4250	4250	4250	4250	4250	218	218	218	218	218	218	218	218
MAE	4.943	2.801	2.687	2.578	3.046	3.166	2.602	2.573	5.705	3.503	3.383	3.352	4.111	3.569	3.151	3.351
RMSE	5.152	3.019	2.960	2.831	3.288	3.439	2.892	2.828	5.864	3.639	3.634	3.537	4.281	3.804	3.340	3.537
BIAS	-4.943	-2.792	-2.672	-2.554	-3.023	-3.152	-2.574	-2.549	-5.705	-3.503	-3.383	-3.352	-4.111	-3.567	-3.142	-3.351
Skill	0.504	0.709	0.715	0.727	0.683	0.669	0.721	0.727	0.506	0.694	0.694	0.702	0.640	0.680	0.719	0.702
R <sup>2</sup>	0.380	0.591	0.497	0.540	0.490	0.450	0.482	0.537	0.295	0.650	0.341	0.506	0.444	0.369	0.507	0.503
Dm	Indicadores Estadísticos Globales [BOYA]								Indicadores Estadísticos > Percentil 95 [BOYA]							
	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15
N° Datos	4250	4250	4250	4250	4250	4250	4250	4250	218	218	218	218	218	218	218	218
MAE	18.440	9.701	10.902	9.765	9.112	15.205	11.747	9.767	16.406	9.191	10.325	9.575	9.078	12.108	10.411	9.577
RMSE	24.225	12.772	14.303	12.806	12.077	19.562	15.454	12.812	19.615	12.641	13.075	12.583	12.081	14.872	13.624	12.583
BIAS	-7.165	-5.415	-2.046	-4.985	-4.570	-6.537	-6.511	-4.991	-5.555	-4.169	-5.053	-5.341	-4.483	-3.897	-4.926	-5.342
Skill	-0.082	0.435	0.369	0.434	0.465	0.136	0.319	0.433	0.133	0.441	0.422	0.443	0.465	0.345	0.399	0.443
R <sup>2</sup>	0.494	0.615	0.544	0.607	0.627	0.523	0.555	0.606	0.726	0.837	0.828	0.846	0.851	0.778	0.812	0.846

**Tabla B-4.** Indicadores estadísticos obtenidos al comparar los resultados de las simulaciones planteadas en la Tabla 4-13 con los registros de B5 y S5.

Hm0	Indicadores Estadísticos Globales [BOYA]								Indicadores Estadísticos > Percentil 95 [BOYA]							
	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15
N° Datos	5001	5001	5001	5001	5001	5001	5001	5001	250	250	250	250	250	250	250	250
MAE	0.506	0.323	0.330	0.303	0.366	0.359	0.411	0.303	1.188	0.387	0.560	0.436	1.024	0.661	0.346	0.435
RMSE	0.628	0.406	0.424	0.398	0.478	0.471	0.514	0.399	1.309	0.532	0.701	0.577	1.119	0.833	0.491	0.576
BIAS	-0.461	0.238	0.125	0.150	-0.295	-0.225	0.357	0.151	-1.176	-0.082	-0.488	-0.319	-1.013	-0.583	-0.002	-0.318
3bMDA	2.275	1.474	1.677	1.607	2.285	1.709	1.271	1.606								
Skill	0.752	0.840	0.833	0.843	0.811	0.814	0.797	0.842	0.697	0.877	0.837	0.866	0.740	0.807	0.886	0.866
R <sup>2</sup>	0.682	0.817	0.713	0.764	0.761	0.722	0.771	0.763	0.077	0.242	0.193	0.269	0.170	0.235	0.274	0.269
Hm0	Indicadores Estadísticos Globales [Satélite]								Indicadores Estadísticos > Percentil 95 [Satélite]							
	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15
N° Datos	849	849	849	849	849	849	849	849	42	42	42	42	42	42	42	42
MAE	0.795	0.304	0.368	0.326	0.638	0.568	0.335	0.326	1.526	0.709	0.878	0.761	1.434	1.023	0.489	0.759
RMSE	0.907	0.402	0.473	0.421	0.749	0.702	0.440	0.421	1.589	0.833	0.941	0.832	1.475	1.190	0.613	0.831
BIAS	-0.781	-0.109	-0.197	-0.187	-0.625	-0.536	-0.083	-0.186	-1.526	-0.689	-0.878	-0.761	-1.434	-1.023	-0.470	-0.759
Skill	0.683	0.860	0.835	0.853	0.738	0.755	0.846	0.853	0.663	0.823	0.800	0.823	0.687	0.747	0.870	0.824
R <sup>2</sup>	0.725	0.799	0.769	0.820	0.821	0.718	0.744	0.820	0.234	0.346	0.500	0.498	0.380	0.324	0.481	0.499
Hm0	Indicadores Estadísticos Eventos Extremos (POT)															
	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15								
N° Datos	25	25	25	25	25	25	25	25								
MAE	1.434	0.767	0.896	0.837	1.336	1.051	0.625	0.837								
RMSE	1.520	0.907	0.999	0.942	1.443	1.157	0.728	0.942								
BIAS	1.434	0.767	0.896	0.837	1.336	1.051	0.625	0.837								
Skill	0.587	0.751	0.730	0.743	0.606	0.683	0.802	0.743								
R <sup>2</sup>	0.663	0.564	0.691	0.688	0.596	0.606	0.701	0.688								
Tm	Indicadores Estadísticos Globales [BOYA]								Indicadores Estadísticos > Percentil 95 [BOYA]							
	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15
N° Datos	5001	5001	5001	5001	5001	5001	5001	5001	250	250	250	250	250	250	250	250
MAE	2.671	0.831	0.809	0.834	1.126	1.144	0.778	0.840	3.544	1.078	1.055	0.951	1.693	1.192	0.775	0.952
RMSE	2.853	1.047	1.035	1.070	1.352	1.406	1.035	1.081	3.657	1.331	1.279	1.175	1.918	1.496	0.975	1.176
BIAS	-2.670	-0.468	-0.338	-0.226	-0.747	-0.840	0.015	-0.219	-3.544	-1.016	-0.818	-0.786	-1.663	-0.987	-0.539	-0.787
Skill	0.652	0.872	0.874	0.869	0.835	0.828	0.874	0.868	0.647	0.871	0.876	0.886	0.815	0.855	0.906	0.886
R <sup>2</sup>	0.596	0.618	0.604	0.572	0.512	0.542	0.577	0.566	0.619	0.668	0.726	0.732	0.666	0.682	0.748	0.732
Dm	Indicadores Estadísticos Globales [BOYA]								Indicadores Estadísticos > Percentil 95 [BOYA]							
	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15
N° Datos	5001	5001	5001	5001	5001	5001	5001	5001	250	250	250	250	250	250	250	250
MAE	19.332	13.071	13.093	13.129	12.588	17.689	13.292	13.136	17.425	13.132	14.498	14.097	13.920	14.573	14.430	14.100
RMSE	22.974	15.598	16.095	15.857	15.302	21.410	16.003	15.866	21.177	15.270	16.963	16.310	16.133	18.105	16.481	16.314
BIAS	-15.530	-12.160	-9.491	-11.722	-11.119	-15.058	-12.127	-11.726	-15.529	-12.491	-13.829	-13.466	-13.246	-11.985	-13.966	-13.468
Skill	-0.022	0.313	0.291	0.301	0.326	0.051	0.295	0.301	0.062	0.327	0.253	0.282	0.289	0.202	0.274	0.281
R <sup>2</sup>	0.434	0.583	0.437	0.526	0.519	0.477	0.527	0.525	0.585	0.681	0.640	0.656	0.658	0.576	0.670	0.656

**Tabla B-5.** Indicadores estadísticos obtenidos al comparar los resultados de las simulaciones planteadas en la Tabla 4-13 con los registros de B7 y S7.

Hm0	Indicadores Estadísticos Globales [BOYA]								Indicadores Estadísticos > Percentil 95 [BOYA]							
	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15
N° Datos	793	793	793	793	793	793	793	793	40	40	40	40	40	40	40	40
MAE	0.675	0.288	0.287	0.254	0.461	0.448	0.276	0.254	1.274	0.222	0.442	0.314	0.948	0.633	0.220	0.313
RMSE	0.775	0.382	0.373	0.339	0.554	0.564	0.369	0.339	1.324	0.295	0.492	0.363	0.994	0.715	0.286	0.362
BIAS	-0.652	0.101	-0.007	0.021	-0.430	-0.381	0.162	0.022	-1.274	-0.002	-0.421	-0.234	-0.948	-0.604	-0.020	-0.233
3bMDA	0.905	0.502	0.494	0.438	0.836	0.612	0.416	0.437								
Skill	0.704	0.854	0.858	0.871	0.789	0.785	0.859	0.871	0.682	0.929	0.882	0.913	0.761	0.828	0.931	0.913
R <sup>2</sup>	0.677	0.755	0.748	0.787	0.794	0.687	0.796	0.787	0.149	0.432	0.377	0.444	0.355	0.102	0.430	0.444
Hm0	Indicadores Estadísticos Globales [Satélite]								Indicadores Estadísticos > Percentil 95 [Satélite]							
	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15
N° Datos	647	647	647	647	647	647	647	647	32	32	32	32	32	32	32	32
MAE	0.914	0.394	0.436	0.383	0.684	0.658	0.392	0.383	1.755	0.907	1.073	0.909	1.562	1.199	0.781	0.908
RMSE	1.047	0.522	0.575	0.514	0.825	0.804	0.523	0.513	1.927	1.146	1.260	1.134	1.747	1.413	1.008	1.133
BIAS	-0.905	-0.167	-0.305	-0.238	-0.661	-0.613	-0.181	-0.238	-1.755	-0.808	-1.062	-0.868	-1.562	-1.154	-0.737	-0.867
Skill	0.644	0.823	0.805	0.826	0.720	0.727	0.822	0.826	0.631	0.780	0.758	0.783	0.665	0.729	0.807	0.783
R <sup>2</sup>	0.683	0.707	0.729	0.754	0.728	0.680	0.713	0.754	0.146	0.252	0.247	0.227	0.161	0.338	0.296	0.227
Hm0	Indicadores Estadísticos Eventos Extremos (POT)															
	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15								
N° Datos	25	25	25	25	25	25	25	25								
MAE	0.708	0.499	0.446	0.425	0.546	0.532	0.452	0.425								
RMSE	0.785	0.612	0.536	0.533	0.633	0.633	0.564	0.533								
BIAS	0.708	0.499	0.446	0.425	0.546	0.532	0.452	0.425								
Skill	0.741	0.798	0.821	0.825	0.788	0.791	0.814	0.825								
R <sup>2</sup>	0.569	0.596	0.631	0.647	0.626	0.567	0.645	0.647								
Tm	Indicadores Estadísticos Globales [BOYA]								Indicadores Estadísticos > Percentil 95 [BOYA]							
	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15
N° Datos	793	793	793	793	793	793	793	793	40	40	40	40	40	40	40	40
MAE	2.523	0.670	0.573	0.624	0.743	0.908	0.683	0.631	3.366	0.763	0.643	0.616	1.120	0.877	0.604	0.616
RMSE	2.753	0.868	0.756	0.833	0.927	1.189	0.905	0.844	3.495	0.915	0.775	0.723	1.288	1.062	0.697	0.723
BIAS	-2.520	-0.064	0.045	0.214	-0.300	-0.455	0.390	0.223	-3.366	-0.355	-0.421	-0.254	-1.088	-0.591	-0.043	-0.257
Skill	0.670	0.896	0.909	0.900	0.889	0.857	0.891	0.899	0.654	0.909	0.923	0.928	0.872	0.895	0.931	0.928
R <sup>2</sup>	0.672	0.738	0.800	0.776	0.731	0.621	0.769	0.772	0.611	0.704	0.792	0.782	0.783	0.615	0.771	0.782
Dm	Indicadores Estadísticos Globales [BOYA]								Indicadores Estadísticos > Percentil 95 [BOYA]							
	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15
N° Datos	793	793	793	793	793	793	793	793	40	40	40	40	40	40	40	40
MAE	11.029	7.120	8.982	7.131	8.053	10.703	6.927	7.132	11.584	6.244	6.489	5.920	6.120	9.288	5.598	5.921
RMSE	15.081	10.597	12.309	10.610	11.459	24.433	10.578	10.618	14.798	9.212	7.693	7.903	8.172	11.415	7.804	7.902
BIAS	6.603	2.469	6.481	2.888	3.729	1.948	1.843	2.881	8.853	2.875	4.765	2.903	3.246	5.861	1.675	2.903
Skill	0.335	0.528	0.455	0.527	0.491	-0.092	0.528	0.527	0.348	0.586	0.649	0.640	0.629	0.493	0.645	0.641
R <sup>2</sup>	0.691	0.742	0.720	0.743	0.711	0.693	0.737	0.742	0.610	0.503	0.734	0.642	0.623	0.561	0.619	0.642

**Tabla B-6.** Indicadores estadísticos obtenidos al comparar los resultados de las simulaciones planteadas en la Tabla 4-13 con los registros de B8 y S8.

Hm0	Indicadores Estadísticos Globales [BOYA]								Indicadores Estadísticos > Percentil 95 [BOYA]							
	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15
N° Datos	1686	1686	1686	1686	1686	1686	1686	1686	84	84	84	84	84	84	84	84
MAE	0.591	0.342	0.347	0.283	0.355	0.391	0.338	0.284	1.230	0.541	0.576	0.374	0.834	0.682	0.387	0.374
RMSE	0.729	0.431	0.438	0.362	0.476	0.512	0.417	0.363	1.314	0.700	0.718	0.495	0.956	0.862	0.491	0.495
BIAS	-0.545	0.205	0.058	0.124	-0.297	-0.206	0.235	0.125	-1.230	0.078	-0.530	-0.141	-0.829	-0.428	0.001	-0.140
3bMDA	1.169	0.422	0.470	0.338	1.053	0.761	0.268	0.338								
Skill	0.726	0.837	0.835	0.864	0.821	0.807	0.843	0.863	0.744	0.864	0.860	0.904	0.814	0.832	0.904	0.904
R <sup>2</sup>	0.756	0.843	0.799	0.868	0.861	0.767	0.865	0.868	0.682	0.498	0.680	0.684	0.622	0.505	0.654	0.684
Hm0	Indicadores Estadísticos Globales [Satélite]								Indicadores Estadísticos > Percentil 95 [Satélite]							
	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15
N° Datos	1460	1460	1460	1460	1460	1460	1460	1460	74	74	74	74	74	74	74	74
MAE	0.903	0.368	0.439	0.368	0.646	0.632	0.383	0.367	1.644	0.780	1.034	0.825	1.373	1.062	0.738	0.824
RMSE	1.034	0.496	0.570	0.488	0.784	0.795	0.513	0.488	1.775	0.978	1.171	0.970	1.508	1.299	0.912	0.969
BIAS	-0.898	-0.130	-0.310	-0.216	-0.628	-0.573	-0.182	-0.216	-1.644	-0.603	-0.991	-0.711	-1.373	-0.968	-0.584	-0.710
Skill	0.649	0.832	0.807	0.834	0.734	0.730	0.826	0.835	0.657	0.811	0.774	0.813	0.709	0.749	0.824	0.813
R <sup>2</sup>	0.731	0.751	0.760	0.790	0.772	0.684	0.753	0.790	0.283	0.342	0.331	0.368	0.345	0.295	0.377	0.368
Hm0	Indicadores Estadísticos Eventos Extremos (POT)															
	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15								
N° Datos	25	25	25	25	25	25	25	25								
MAE	0.910	0.500	0.404	0.343	0.552	0.548	0.392	0.343								
RMSE	1.007	0.606	0.509	0.436	0.658	0.666	0.496	0.437								
BIAS	0.910	0.500	0.404	0.343	0.552	0.548	0.392	0.343								
Skill	0.743	0.847	0.871	0.889	0.833	0.830	0.874	0.889								
R <sup>2</sup>	0.649	0.646	0.715	0.742	0.736	0.574	0.740	0.742								
Tm	Indicadores Estadísticos Globales [BOYA]								Indicadores Estadísticos > Percentil 95 [BOYA]							
	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15
N° Datos	1686	1686	1686	1686	1686	1686	1686	1686	84	84	84	84	84	84	84	84
MAE	2.260	0.676	0.672	0.642	0.799	0.839	0.662	0.645	2.677	0.743	0.523	0.481	1.086	0.626	0.472	0.481
RMSE	2.460	0.921	0.936	0.918	1.060	1.162	0.950	0.922	2.759	0.916	0.637	0.618	1.248	0.787	0.601	0.618
BIAS	-2.255	-0.186	0.203	0.149	-0.312	-0.382	0.297	0.153	-2.677	-0.649	0.089	-0.260	-1.064	-0.410	-0.154	-0.261
Skill	0.697	0.886	0.885	0.887	0.869	0.857	0.883	0.886	0.712	0.904	0.934	0.936	0.870	0.918	0.937	0.936
R <sup>2</sup>	0.641	0.673	0.685	0.688	0.603	0.610	0.691	0.686	0.536	0.594	0.678	0.693	0.577	0.719	0.679	0.693
Dm	Indicadores Estadísticos Globales [BOYA]								Indicadores Estadísticos > Percentil 95 [BOYA]							
	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15
N° Datos	1686	1686	1686	1686	1686	1686	1686	1686	84	84	84	84	84	84	84	84
MAE	10.509	9.903	9.262	9.466	9.088	12.160	10.120	9.466	8.777	9.851	8.289	9.353	9.414	12.017	9.958	9.350
RMSE	14.069	13.436	12.190	12.702	12.567	23.051	13.456	12.703	11.142	13.757	10.878	12.449	12.448	38.692	13.306	12.445
BIAS	-1.239	-8.058	-1.941	-7.020	-5.524	-4.777	-8.024	-7.026	3.796	-6.112	-4.984	-5.934	-4.744	0.321	-6.761	-5.931
Skill	0.379	0.407	0.460	0.438	0.444	-0.026	0.406	0.438	0.505	0.393	0.516	0.449	0.449	-0.838	0.412	0.449
R <sup>2</sup>	0.743	0.787	0.693	0.790	0.759	0.704	0.783	0.791	0.822	0.742	0.829	0.790	0.764	0.823	0.770	0.790

# ANEXO C: INDICADORES ESTADÍSTICOS CALIBRACIÓN Y SELECCIÓN DE FORZANTES

Tabla C-1. Indicadores estadísticos obtenidos al comparar los resultados de las simulaciones planteadas en la Tabla 4-16 con los registros de B1 y S1.

Hm0	Indicadores Estadísticos Globales [BOYA]														Indicadores Estadísticos > Percentil 95 [BOYA]															
	Test -11	Test -16	Test -17	Test -18	Test -19	Test -20	Test -21	Test -22	Test -23	Test -24	Test-06-B	Test-07_B	Test-08_B	Test-09_B	Test-10_B	Test -11	Test -16	Test -17	Test -18	Test -19	Test -20	Test -21	Test -22	Test -23	Test -24	Test-06-B	Test-07_B	Test-08_B	Test-09_B	Test-10_B
N° Datos	1579	1579	1579	1579	1579	1579	1579	1579	1579	1579	1579	1579	1579	1579	1579	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
MAE	0.21	0.21	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.21	0.21	0.20	0.25	0.34	0.28	0.21	0.31	0.62	0.44	0.37	0.51	0.47	0.39	0.44	0.31	0.31	0.33	0.28	0.30	0.32	0.34
RMSE	0.27	0.29	0.25	0.25	0.26	0.25	0.25	0.25	0.27	0.27	0.26	0.31	0.40	0.34	0.26	0.41	0.71	0.54	0.47	0.61	0.57	0.49	0.54	0.41	0.41	0.43	0.37	0.38	0.41	0.43
BIAS	0.11	0.13	0.01	0.05	0.06	0.03	0.04	0.00	0.11	0.11	0.08	0.18	0.30	0.20	0.09	0.24	0.62	0.42	0.33	0.51	0.45	0.35	0.42	0.24	0.24	0.27	0.13	0.02	0.13	0.27
3bMDA	0.77	1.20	0.98	0.87	1.06	1.01	0.90	0.97	0.77	0.77	0.80	0.49	0.29	0.39	0.68															
Skill	0.89	0.88	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.81	0.86	0.88	0.84	0.85	0.87	0.86	0.89	0.89	0.89	0.90	0.90	0.89	0.89
R <sup>2</sup>	0.86	0.85	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.84	0.81	0.81	0.85	0.41	0.32	0.37	0.40	0.37	0.38	0.39	0.38	0.41	0.41	0.41	0.40	0.36	0.33	0.40
Hm0	Indicadores Estadísticos Globales [Satélite]														Indicadores Estadísticos > Percentil 95 [Satélite]															
	Test -11	Test -16	Test -17	Test -18	Test -19	Test -20	Test -21	Test -22	Test -23	Test -24	Test-06-B	Test-07_B	Test-08_B	Test-09_B	Test-10_B	Test -11	Test -16	Test -17	Test -18	Test -19	Test -20	Test -21	Test -22	Test -23	Test -24	Test-06-B	Test-07_B	Test-08_B	Test-09_B	Test-10_B
N° Datos	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	518	518	518	518	518	518	518	518	518	518	950	950	950	950	950
MAE	0.31	0.62	0.44	0.37	0.51	0.47	0.39	0.44	0.31	0.31	0.33	0.28	0.30	0.32	0.34	0.22	0.25	0.21	0.21	0.23	0.22	0.21	0.21	0.22	0.22	0.22	0.24	0.30	0.26	0.23
RMSE	0.41	0.71	0.54	0.47	0.61	0.57	0.49	0.54	0.41	0.41	0.43	0.37	0.38	0.41	0.43	0.28	0.34	0.29	0.28	0.30	0.29	0.28	0.29	0.28	0.28	0.29	0.31	0.37	0.33	0.30
BIAS	0.24	0.62	0.42	0.33	0.51	0.45	0.35	0.42	0.24	0.24	0.27	0.13	0.02	0.13	0.27	0.05	0.18	0.06	0.00	0.11	0.08	0.02	0.05	0.05	0.05	0.02	0.09	0.21	0.12	0.01
Skill	0.89	0.81	0.86	0.88	0.84	0.85	0.87	0.86	0.89	0.89	0.89	0.90	0.90	0.89	0.89	0.88	0.86	0.88	0.88	0.87	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.87	0.84	0.86	0.87
R <sup>2</sup>	0.41	0.32	0.37	0.40	0.37	0.38	0.39	0.38	0.41	0.41	0.41	0.40	0.36	0.33	0.40	0.81	0.82	0.82	0.81	0.82	0.82	0.81	0.81	0.81	0.81	0.80	0.78	0.77	0.77	0.79
Hm0	Indicadores Estadísticos Eventos Extremos (POT)																													
	Test -11	Test -16	Test -17	Test -18	Test -19	Test -20	Test -21	Test -22	Test -23	Test -24	Test-06-B	Test-07_B	Test-08_B	Test-09_B	Test-10_B															
N° Datos	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25															
MAE	0.32	0.50	0.38	0.34	0.42	0.39	0.35	0.38	0.32	0.32	0.32	0.31	0.41	0.34	0.30															
RMSE	0.41	0.64	0.50	0.44	0.55	0.51	0.46	0.49	0.41	0.41	0.42	0.39	0.50	0.42	0.38															
BIAS	0.32	0.50	0.38	0.34	0.42	0.39	0.35	0.38	0.32	0.32	0.32	0.31	0.41	0.34	0.30															
Skill	0.88	0.82	0.86	0.87	0.84	0.85	0.87	0.86	0.88	0.88	0.88	0.89	0.86	0.88	0.89															
R <sup>2</sup>	0.75	0.66	0.71	0.73	0.70	0.71	0.73	0.72	0.75	0.75	0.75	0.79	0.76	0.78	0.78															
Tm	Indicadores Estadísticos Globales [BOYA]														Indicadores Estadísticos > Percentil 95 [BOYA]															
	Test -11	Test -16	Test -17	Test -18	Test -19	Test -20	Test -21	Test -22	Test -23	Test -24	Test-06-B	Test-07_B	Test-08_B	Test-09_B	Test-10_B	Test -11	Test -16	Test -17	Test -18	Test -19	Test -20	Test -21	Test -22	Test -23	Test -24	Test-06-B	Test-07_B	Test-08_B	Test-09_B	Test-10_B
N° Datos	1579	1579	1579	1579	1579	1579	1579	1579	1579	1579	1579	1579	1579	1579	1579	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
MAE	0.45	0.52	0.47	0.46	0.47	0.47	0.46	0.46	0.45	0.45	0.46	0.48	0.53	0.50	0.46	0.61	0.87	0.72	0.66	0.74	0.72	0.67	0.69	0.61	0.61	0.64	0.52	0.49	0.54	0.58
RMSE	0.62	0.70	0.64	0.62	0.65	0.64	0.63	0.63	0.62	0.62	0.63	0.66	0.73	0.69	0.63	0.78	1.05	0.90	0.84	0.93	0.90	0.85	0.88	0.78	0.78	0.81	0.69	0.66	0.72	0.75
BIAS	0.09	0.34	0.21	0.15	0.24	0.22	0.16	0.20	0.09	0.09	0.11	0.10	0.22	0.13	0.00	0.55	0.85	0.69	0.61	0.71	0.69	0.63	0.66	0.55	0.55	0.58	0.36	0.26	0.36	0.46
Skill	0.92	0.91	0.91	0.92	0.91	0.91	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.91	0.90	0.91	0.92	0.91	0.88	0.90	0.91	0.90	0.90	0.90	0.90	0.91	0.91	0.91	0.92	0.93	0.92	0.92
R <sup>2</sup>	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.77	0.74	0.75	0.78	0.89	0.86	0.88	0.88	0.87	0.88	0.88	0.88	0.89	0.89	0.88	0.88	0.87	0.86	0.87

**Tabla C-2.** Indicadores estadísticos obtenidos al comparar los resultados de las simulaciones planteadas en la Tabla 4-16 con los registros de B2 y S2.

Hm0	Indicadores Estadísticos Globales [BOYA]														Indicadores Estadísticos > Percentil 95 [BOYA]																
	Test -11	Test -16	Test -17	Test -18	Test -19	Test -20	Test -21	Test -22	Test -23	Test -24	Test-06-B	Test-07_B	Test-08_B	Test-09_B	Test-10_B	Test -11	Test -16	Test -17	Test -18	Test -19	Test -20	Test -21	Test -22	Test -23	Test -24	Test-06-B	Test-07_B	Test-08_B	Test-09_B	Test-10_B	
N° Datos	3207	3207	3207	3207	3207	3207	3207	3207	3207	3207	3207	3207	3207	3207	3207	162	162	162	162	162	162	162	162	162	162	162	162	162	162	162	
MAE	0.33	0.27	0.28	0.30	0.27	0.28	0.30	0.28	0.33	0.33	0.32	0.34	0.40	0.33	0.30	0.35	0.58	0.43	0.38	0.48	0.45	0.39	0.43	0.35	0.35	0.37	0.36	0.35	0.40	0.40	
RMSE	0.43	0.35	0.36	0.39	0.35	0.36	0.38	0.37	0.43	0.43	0.41	0.43	0.49	0.42	0.38	0.47	0.69	0.55	0.50	0.60	0.56	0.51	0.54	0.47	0.47	0.49	0.48	0.47	0.51	0.52	
BIAS	0.23	0.05	0.09	0.16	0.04	0.07	0.14	0.10	0.23	0.23	0.19	0.23	0.31	0.19	0.14	0.13	0.54	0.33	0.22	0.41	0.36	0.25	0.32	0.13	0.13	0.20	0.15	0.06	0.24	0.28	
3bMDA	1.21	1.49	1.35	1.28	1.39	1.36	1.30	1.33	1.21	1.21	1.26	0.89	0.72	0.83	1.02																
Skill	0.83	0.86	0.86	0.85	0.86	0.86	0.85	0.85	0.83	0.83	0.84	0.83	0.80	0.83	0.85	0.88	0.83	0.87	0.88	0.85	0.86	0.88	0.87	0.88	0.88	0.88	0.88	0.89	0.87	0.87	
R²	0.75	0.77	0.76	0.76	0.77	0.76	0.76	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.73	0.74	0.76	0.35	0.33	0.34	0.35	0.34	0.34	0.34	0.35	0.35	0.34	0.34	0.34	0.33	0.33	0.34	
Hm0	Indicadores Estadísticos Globales [Satélite]														Indicadores Estadísticos > Percentil 95 [Satélite]																
	Test -11	Test -16	Test -17	Test -18	Test -19	Test -20	Test -21	Test -22	Test -23	Test -24	Test-06-B	Test-07_B	Test-08_B	Test-09_B	Test-10_B	Test -11	Test -16	Test -17	Test -18	Test -19	Test -20	Test -21	Test -22	Test -23	Test -24	Test-06-B	Test-07_B	Test-08_B	Test-09_B	Test-10_B	
N° Datos	849	849	849	849	849	849	849	849	849	849	1453	1453	1453	1453	1453	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	76	76	76	76	76
MAE	0.33	0.48	0.39	0.35	0.42	0.40	0.36	0.38	0.33	0.33	0.35	0.33	0.31	0.33	0.38	0.76	1.18	0.96	0.86	1.03	0.98	0.88	0.94	0.76	0.76	0.83	0.68	0.53	0.64	0.83	
RMSE	0.42	0.60	0.49	0.45	0.53	0.50	0.46	0.49	0.42	0.42	0.45	0.43	0.40	0.42	0.48	0.83	1.23	1.02	0.92	1.08	1.04	0.94	1.00	0.83	0.83	0.89	0.78	0.64	0.75	0.91	
BIAS	0.19	0.45	0.31	0.25	0.36	0.33	0.27	0.31	0.19	0.19	0.24	0.19	0.07	0.16	0.30	0.76	1.18	0.96	0.86	1.03	0.98	0.88	0.94	0.76	0.76	0.79	0.66	0.47	0.62	0.82	
Skill	0.85	0.79	0.83	0.84	0.82	0.84	0.83	0.85	0.85	0.85	0.84	0.85	0.86	0.85	0.83	0.82	0.74	0.78	0.80	0.77	0.78	0.80	0.79	0.82	0.82	0.81	0.83	0.86	0.84	0.80	
R²	0.82	0.84	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.82	0.82	0.82	0.81	0.79	0.80	0.82	0.50	0.45	0.48	0.49	0.48	0.48	0.49	0.48	0.50	0.50	0.36	0.39	0.38	0.37	0.38	
Hm0	Indicadores Estadísticos Eventos Extremos (POT)																														
	Test -11	Test -16	Test -17	Test -18	Test -19	Test -20	Test -21	Test -22	Test -23	Test -24	Test-06-B	Test-07_B	Test-08_B	Test-09_B	Test-10_B																
N° Datos	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25																	
MAE	0.64	0.86	0.75	0.69	0.78	0.76	0.70	0.73	0.64	0.64	0.68	0.50	0.43	0.47	0.58																
RMSE	0.72	0.93	0.82	0.77	0.85	0.83	0.78	0.81	0.72	0.72	0.76	0.59	0.51	0.56	0.66																
BIAS	0.64	0.86	0.75	0.69	0.78	0.76	0.70	0.73	0.64	0.64	0.68	0.50	0.43	0.47	0.58																
Skill	0.76	0.69	0.73	0.75	0.72	0.72	0.74	0.73	0.76	0.76	0.75	0.81	0.83	0.82	0.78																
R²	0.51	0.54	0.53	0.52	0.53	0.53	0.52	0.53	0.51	0.51	0.52	0.46	0.44	0.46	0.48																
Dm	Indicadores Estadísticos Globales [BOYA]														Indicadores Estadísticos > Percentil 95 [BOYA]																
	Test -11	Test -16	Test -17	Test -18	Test -19	Test -20	Test -21	Test -22	Test -23	Test -24	Test-06-B	Test-07_B	Test-08_B	Test-09_B	Test-10_B	Test -11	Test -16	Test -17	Test -18	Test -19	Test -20	Test -21	Test -22	Test -23	Test -24	Test-06-B	Test-07_B	Test-08_B	Test-09_B	Test-10_B	
N° Datos	3207	3207	3207	3207	3207	3207	3207	3207	3207	3207	3207	3207	3207	3207	3207	162	162	162	162	162	162	162	162	162	162	162	162	162	162	162	
MAE	7.76	7.63	7.69	7.72	7.87	7.77	7.71	7.82	7.76	7.76	7.97	8.35	8.40	8.32	8.29	6.20	5.91	6.06	6.13	6.11	6.09	6.11	6.13	6.20	6.20	6.36	6.52	6.58	6.42	6.42	
RMSE	9.92	9.75	9.82	9.87	10.0	9.91	9.86	9.95	9.92	9.92	10.16	10.59	10.66	10.56	10.52	8.24	8.10	8.16	8.19	8.12	8.14	8.19	8.16	8.24	8.24	8.41	8.57	8.62	8.50	8.50	
BIAS	5.90	5.86	5.88	5.89	6.05	5.96	5.89	6.02	5.89	5.90	6.10	6.46	6.44	6.44	6.47	4.94	4.52	4.75	4.85	4.82	4.79	4.82	4.84	4.94	4.94	5.10	5.30	5.38	5.19	5.18	
Skill	0.56	0.56	0.56	0.56	0.55	0.56	0.56	0.55	0.56	0.55	0.55	0.53	0.53	0.53	0.53	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.62	0.61	0.61	0.62	0.62	
R²	0.66	0.68	0.67	0.66	0.66	0.67	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.65	0.64	0.63	0.64	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.89	0.90	0.90	

**Tabla C-3.** Indicadores estadísticos obtenidos al comparar los resultados de las simulaciones planteadas en la Tabla 4-16 con los registros de B3 y S3.

Hm0	Indicadores Estadísticos Globales [BOYA]														Indicadores Estadísticos > Percentil 95 [BOYA]																
	Test -11	Test -16	Test -17	Test -18	Test -19	Test -20	Test -21	Test -22	Test -23	Test -24	Test-06-B	Test-07_B	Test-08_B	Test-09_B	Test-10_B	Test -11	Test -16	Test -17	Test -18	Test -19	Test -20	Test -21	Test -22	Test -23	Test -24	Test-06-B	Test-07_B	Test-08_B	Test-09_B	Test-10_B	
N° Datos	4250	4250	4250	4250	4250	4250	4250	4250	4250	4250	4894	4894	4894	4894	4894	218	218	218	218	218	218	218	218	218	218	247	247	247	247	247	
MAE	0.34	0.25	0.28	0.31	0.27	0.28	0.30	0.28	0.34	0.34	0.32	0.34	0.43	0.37	0.29	0.41	0.61	0.48	0.44	0.53	0.50	0.44	0.48	0.41	0.41	0.44	0.46	0.47	0.46	0.49	
RMSE	0.43	0.33	0.36	0.39	0.35	0.35	0.38	0.36	0.43	0.43	0.40	0.43	0.54	0.47	0.38	0.51	0.72	0.59	0.55	0.65	0.61	0.56	0.60	0.51	0.51	0.55	0.55	0.57	0.55	0.58	
BIAS	0.23	0.02	0.11	0.17	0.06	0.09	0.16	0.11	0.23	0.23	0.19	0.22	0.36	0.28	0.12	0.22	0.58	0.39	0.30	0.47	0.42	0.33	0.39	0.22	0.22	0.28	0.13	0.06	0.06	0.28	
3bMDA	1.42	1.82	1.61	1.51	1.69	1.64	1.54	1.61	1.42	1.42	1.49	1.04	0.81	0.94	1.22																
Skill	0.81	0.85	0.84	0.83	0.85	0.85	0.83	0.84	0.81	0.81	0.82	0.81	0.76	0.79	0.84	0.87	0.81	0.85	0.86	0.83	0.84	0.86	0.85	0.87	0.87	0.86	0.86	0.85	0.86	0.85	
R²	0.73	0.76	0.75	0.74	0.75	0.75	0.74	0.74	0.73	0.73	0.72	0.71	0.69	0.70	0.73	0.23	0.22	0.23	0.23	0.22	0.22	0.23	0.22	0.23	0.23	0.22	0.20	0.20	0.20	0.21	
Hm0	Indicadores Estadísticos Globales [Satélite]														Indicadores Estadísticos > Percentil 95 [Satélite]																
	Test -11	Test -16	Test -17	Test -18	Test -19	Test -20	Test -21	Test -22	Test -23	Test -24	Test-06-B	Test-07_B	Test-08_B	Test-09_B	Test-10_B	Test -11	Test -16	Test -17	Test -18	Test -19	Test -20	Test -21	Test -22	Test -23	Test -24	Test-06-B	Test-07_B	Test-08_B	Test-09_B	Test-10_B	
N° Datos	849	849	849	849	849	849	849	849	849	849	1453	1453	1453	1453	1453	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	76	76	76	76	76	
MAE	0.33	0.48	0.39	0.35	0.42	0.40	0.36	0.38	0.33	0.33	0.35	0.33	0.31	0.33	0.38	0.76	1.18	0.96	0.86	1.03	0.98	0.88	0.94	0.76	0.76	0.83	0.68	0.53	0.64	0.83	
RMSE	0.42	0.60	0.49	0.45	0.53	0.50	0.46	0.49	0.42	0.42	0.45	0.43	0.40	0.42	0.48	0.83	1.23	1.02	0.92	1.08	1.04	0.94	1.00	0.83	0.83	0.89	0.78	0.64	0.75	0.91	
BIAS	0.19	0.45	0.31	0.25	0.36	0.33	0.27	0.31	0.19	0.19	0.24	0.19	0.07	0.16	0.30	0.76	1.18	0.96	0.86	1.03	0.98	0.88	0.94	0.76	0.76	0.79	0.66	0.47	0.62	0.82	
Skill	0.85	0.79	0.83	0.84	0.82	0.82	0.84	0.83	0.85	0.85	0.84	0.85	0.86	0.85	0.83	0.82	0.74	0.78	0.80	0.77	0.78	0.80	0.79	0.82	0.82	0.81	0.83	0.86	0.84	0.80	
R²	0.82	0.84	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.82	0.82	0.82	0.81	0.79	0.80	0.82	0.50	0.45	0.48	0.49	0.48	0.48	0.49	0.48	0.50	0.50	0.36	0.39	0.38	0.37	0.38	
Hm0	Indicadores Estadísticos Eventos Extremos (POT)																														
	Test -11	Test -16	Test -17	Test -18	Test -19	Test -20	Test -21	Test -22	Test -23	Test -24	Test-06-B	Test-07_B	Test-08_B	Test-09_B	Test-10_B																
N° Datos	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25																	
MAE	0.60	0.78	0.67	0.63	0.72	0.69	0.64	0.67	0.60	0.60	0.64	0.57	0.53	0.55	0.63																
RMSE	0.71	0.91	0.80	0.75	0.84	0.81	0.76	0.80	0.71	0.71	0.75	0.69	0.64	0.66	0.75																
BIAS	0.60	0.78	0.67	0.63	0.72	0.69	0.64	0.67	0.60	0.60	0.64	0.57	0.53	0.55	0.63																
Skill	0.78	0.72	0.76	0.77	0.74	0.75	0.77	0.76	0.78	0.78	0.77	0.79	0.80	0.80	0.77																
R²	0.63	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.62	0.63	0.64																
Tm	Indicadores Estadísticos Globales [BOYA]														Indicadores Estadísticos > Percentil 95 [BOYA]																
	Test -11	Test -16	Test -17	Test -18	Test -19	Test -20	Test -21	Test -22	Test -23	Test -24	Test-06-B	Test-07_B	Test-08_B	Test-09_B	Test-10_B	Test -11	Test -16	Test -17	Test -18	Test -19	Test -20	Test -21	Test -22	Test -23	Test -24	Test-06-B	Test-07_B	Test-08_B	Test-09_B	Test-10_B	
N° Datos	4250	4250	4250	4250	4250	4250	4250	4250	4250	4250	4894	4894	4894	4894	4894	218	218	218	218	218	218	218	218	218	218	247	247	247	247	247	
MAE	2.58	2.83	2.70	2.63	2.74	2.71	2.65	2.68	2.58	2.58	2.61	2.73	2.60	2.68	2.83	3.35	3.61	3.47	3.41	3.49	3.47	3.42	3.44	3.35	3.35	3.41	3.31	3.19	3.26	3.41	
RMSE	2.83	3.06	2.94	2.88	2.97	2.95	2.90	2.93	2.83	2.83	2.87	2.97	2.86	2.92	3.06	3.54	3.78	3.65	3.59	3.67	3.65	3.60	3.62	3.54	3.54	3.59	3.54	3.43	3.49	3.63	
BIAS	2.55	2.82	2.68	2.61	2.72	2.69	2.63	2.67	2.55	2.55	2.59	2.71	2.58	2.66	2.82	3.35	3.61	3.47	3.41	3.49	3.47	3.42	3.44	3.35	3.35	3.41	3.31	3.19	3.26	3.41	
Skill	0.73	0.71	0.72	0.72	0.71	0.72	0.72	0.72	0.73	0.73	0.72	0.71	0.73	0.72	0.71	0.70	0.68	0.69	0.70	0.69	0.69	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.71	0.71	0.69	0.69	
R²	0.54	0.56	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.54	0.54	0.52	0.53	0.52	0.53	0.54	0.51	0.53	0.52	0.51	0.51	0.52	0.51	0.52	0.51	0.51	0.49	0.39	0.37	0.38	0.40	
Dm	Indicadores Estadísticos Globales [BOYA]														Indicadores Estadísticos > Percentil 95 [BOYA]																
	Test -11	Test -16	Test -17	Test -18	Test -19	Test -20	Test -21	Test -22	Test -23	Test -24	Test-06-B	Test-07_B	Test-08_B	Test-09_B	Test-10_B	Test -11	Test -16	Test -17	Test -18	Test -19	Test -20	Test -21	Test -22	Test -23	Test -24	Test-06-B	Test-07_B	Test-08_B	Test-09_B	Test-10_B	
N° Datos	4250	4250	4250	4250	4250	4250	4250	4250	4250	4250	4894	4894	4894	4894	4894	218	218	218	218	218	218	218	218	218	218	247	247	247	247	247	
MAE	9.77	9.64	9.70	9.73	9.91	9.80	9.73	9.85	9.76	9.77	9.81	11.18	11.26	11.21	11.12	9.57	9.45	9.52	9.55	9.67	9.60	9.54	9.64	9.57	9.57	9.79	11.57	11.73	11.62	11.47	
RMSE	12.8	12.6	12.7	12.7	12.9	12.8	12.7	12.8	12.8	12.8	12.8	12.75	14.49	14.62	14.54	14.40	12.5	12.5	12.5	12.5	12.6	12.6	12.5	12.6	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5
BIAS	1	2	1	6	5	3	4	8	0	1	5	6	8	1	6	8	8	4	5	6	8	1	6	6	8	8	12.68	15.34	15.50	15.40	15.24
Skill	4.99	5.02	5.00	4.99	5.11	5.05	4.99	5.11	4.98	4.99	4.93	5.65	5.62	5.64	5.69	5.34	4.90	5.14	5.24	5.26	5.21	5.22	5.27	5.34	5.34	5.68	7.84	8.14	7.95	7.62	
R²	0.43	0.44	0.44	0.44	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.44	0.36	0.36	0.36	0.36	0.44	0.45	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.32	0.32	0.32	0.33	
R²	0.61	0.62	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.58	0.54	0.53	0.54	0.55	0.85	0.84	0.85	0.85	0.84	0.84	0.85	0.84	0.85	0.85	0.83	0.79	0.79	0.79	0.79	

**Tabla C-4.** Indicadores estadísticos obtenidos al comparar los resultados de las simulaciones planteadas en la Tabla 4-16 con los registros de B5 y S5.

Hm0	Indicadores Estadísticos Globales [BOYA]													Indicadores Estadísticos > Percentil 95 [BOYA]																
	Test-11	Test-16	Test-17	Test-18	Test-19	Test-20	Test-21	Test-22	Test-23	Test-24	Test-06-B	Test-07-B	Test-08-B	Test-09-B	Test-10-B	Test-11	Test-16	Test-17	Test-18	Test-19	Test-20	Test-21	Test-22	Test-23	Test-24	Test-06-B	Test-07-B	Test-08-B	Test-09-B	Test-10-B
N° Datos	5001	5001	5001	5001	5001	5001	5001	5001	5001	5001	5001	5001	5001	5001	5001	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250
MAE	0.30	0.27	0.27	0.28	0.27	0.27	0.28	0.27	0.30	0.30	0.30	0.35	0.45	0.38	0.30	0.44	0.74	0.56	0.49	0.63	0.58	0.51	0.55	0.44	0.44	0.48	0.40	0.42	0.42	0.45
RMSE	0.40	0.36	0.35	0.37	0.36	0.35	0.37	0.36	0.40	0.40	0.39	0.47	0.59	0.51	0.40	0.58	0.85	0.69	0.63	0.75	0.71	0.64	0.68	0.58	0.58	0.62	0.57	0.59	0.59	0.60
BIAS	0.15	0.11	0.02	0.09	0.03	0.00	0.07	0.03	0.15	0.15	0.11	0.24	0.38	0.28	0.13	0.32	0.72	0.51	0.41	0.59	0.54	0.44	0.50	0.32	0.32	0.38	0.15	0.03	0.11	0.30
3bMDA	1.61	1.98	1.79	1.70	1.85	1.81	1.72	1.77	1.61	1.61	1.61	1.19	0.99	1.10	1.37	0.87	0.80	0.84	0.85	0.83	0.84	0.85	0.84	0.87	0.87	0.86	0.87	0.86	0.86	0.86
Skill	0.84	0.86	0.86	0.85	0.86	0.86	0.86	0.86	0.84	0.84	0.85	0.81	0.77	0.80	0.84	0.87	0.80	0.84	0.85	0.83	0.84	0.85	0.84	0.87	0.87	0.86	0.87	0.86	0.86	0.86
R <sup>2</sup>	0.76	0.80	0.78	0.77	0.78	0.78	0.77	0.78	0.76	0.76	0.76	0.73	0.70	0.71	0.75	0.27	0.25	0.26	0.27	0.25	0.26	0.27	0.26	0.27	0.27	0.26	0.27	0.25	0.25	0.28
Hm0	Indicadores Estadísticos Globales [Satélite]													Indicadores Estadísticos > Percentil 95 [Satélite]																
Test-11	Test-16	Test-17	Test-18	Test-19	Test-20	Test-21	Test-22	Test-23	Test-24	Test-06-B	Test-07-B	Test-08-B	Test-09-B	Test-10-B	Test-11	Test-16	Test-17	Test-18	Test-19	Test-20	Test-21	Test-22	Test-23	Test-24	Test-06-B	Test-07-B	Test-08-B	Test-09-B	Test-10-B	
N° Datos	849	849	849	849	849	849	849	849	849	849	1453	1453	1453	1453	1453	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	76	76	76	76	76
MAE	0.33	0.48	0.39	0.35	0.42	0.40	0.36	0.38	0.33	0.33	0.35	0.33	0.31	0.33	0.38	0.76	1.18	0.96	0.86	1.03	0.98	0.88	0.94	0.76	0.76	0.83	0.68	0.53	0.64	0.83
RMSE	0.42	0.60	0.49	0.45	0.53	0.50	0.46	0.49	0.42	0.42	0.45	0.43	0.40	0.42	0.48	0.83	1.23	1.02	0.92	1.08	1.04	0.94	1.00	0.83	0.83	0.89	0.78	0.64	0.75	0.91
BIAS	0.19	0.45	0.31	0.25	0.36	0.33	0.27	0.31	0.19	0.19	0.24	0.19	0.07	0.16	0.30	0.76	1.18	0.96	0.86	1.03	0.98	0.88	0.94	0.76	0.76	0.79	0.66	0.47	0.62	0.82
Skill	0.85	0.79	0.83	0.84	0.82	0.82	0.84	0.83	0.85	0.85	0.84	0.85	0.86	0.85	0.83	0.82	0.74	0.78	0.80	0.77	0.78	0.80	0.79	0.82	0.82	0.81	0.83	0.86	0.84	0.80
R <sup>2</sup>	0.82	0.84	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.82	0.82	0.82	0.81	0.79	0.80	0.82	0.50	0.45	0.48	0.49	0.48	0.48	0.49	0.48	0.50	0.50	0.36	0.39	0.38	0.37	0.38
Hm0	Indicadores Estadísticos Eventos Extremos (POT)																													
Test-11	Test-16	Test-17	Test-18	Test-19	Test-20	Test-21	Test-22	Test-23	Test-24	Test-06-B	Test-07-B	Test-08-B	Test-09-B	Test-10-B																
N° Datos	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25																
MAE	0.84	1.12	0.97	0.90	1.02	0.98	0.92	0.96	0.84	0.84	0.84	0.67	0.60	0.64	0.76															
RMSE	0.94	1.22	1.07	1.00	1.12	1.09	1.02	1.06	0.94	0.94	0.94	0.77	0.70	0.73	0.85															
BIAS	0.84	1.12	0.97	0.90	1.02	0.98	0.92	0.96	0.84	0.84	0.84	0.67	0.60	0.64	0.76															
Skill	0.74	0.67	0.71	0.73	0.69	0.70	0.72	0.71	0.74	0.74	0.74	0.79	0.81	0.80	0.77															
R <sup>2</sup>	0.69	0.66	0.68	0.69	0.68	0.68	0.69	0.68	0.69	0.69	0.69	0.67	0.63	0.66	0.70															
Tm	Indicadores Estadísticos Globales [BOYA]													Indicadores Estadísticos > Percentil 95 [BOYA]																
Test-11	Test-16	Test-17	Test-18	Test-19	Test-20	Test-21	Test-22	Test-23	Test-24	Test-06-B	Test-07-B	Test-08-B	Test-09-B	Test-10-B	Test-11	Test-16	Test-17	Test-18	Test-19	Test-20	Test-21	Test-22	Test-23	Test-24	Test-06-B	Test-07-B	Test-08-B	Test-09-B	Test-10-B	
N° Datos	5001	5001	5001	5001	5001	5001	5001	5001	5001	5001	5001	5001	5001	5001	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	
MAE	0.83	0.89	0.85	0.84	0.85	0.85	0.84	0.84	0.83	0.83	0.85	0.82	0.85	0.82	0.80	0.95	1.16	1.04	0.99	1.05	1.04	1.00	1.01	0.95	0.95	0.97	0.87	0.84	0.87	0.92
RMSE	1.07	1.10	1.07	1.07	1.07	1.07	1.06	1.07	1.07	1.09	1.08	1.15	1.10	1.04	1.17	1.39	1.27	1.22	1.28	1.27	1.23	1.24	1.17	1.17	1.19	1.06	1.01	1.05	1.11	
BIAS	0.23	0.50	0.36	0.29	0.39	0.37	0.31	0.34	0.23	0.23	0.23	0.05	0.19	0.09	0.07	0.79	1.07	0.92	0.85	0.95	0.93	0.87	0.89	0.79	0.79	0.79	0.59	0.49	0.57	0.69
Skill	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.86	0.87	0.87	0.89	0.87	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.89	0.89	0.88	0.90	0.90	0.90	0.89
R <sup>2</sup>	0.57	0.60	0.59	0.58	0.60	0.59	0.58	0.59	0.57	0.57	0.57	0.57	0.55	0.57	0.59	0.73	0.71	0.72	0.73	0.72	0.72	0.73	0.72	0.73	0.73	0.75	0.75	0.74	0.75	
Dm	Indicadores Estadísticos Globales [BOYA]													Indicadores Estadísticos > Percentil 95 [BOYA]																
Test-11	Test-16	Test-17	Test-18	Test-19	Test-20	Test-21	Test-22	Test-23	Test-24	Test-06-B	Test-07-B	Test-08-B	Test-09-B	Test-10-B	Test-11	Test-16	Test-17	Test-18	Test-19	Test-20	Test-21	Test-22	Test-23	Test-24	Test-06-B	Test-07-B	Test-08-B	Test-09-B	Test-10-B	
N° Datos	5001	5001	5001	5001	5001	5001	5001	5001	5001	5001	5001	5001	5001	5001	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	
MAE	13.13	12.97	13.05	13.09	13.21	13.13	13.08	13.18	13.13	13.13	13.31	13.68	13.76	13.70	13.62	14.10	13.77	13.94	14.02	14.07	14.01	14.00	14.04	14.09	14.10	14.26	14.89	15.06	14.92	14.74
RMSE	15.86	15.64	15.75	15.80	15.93	15.84	15.79	15.89	15.85	15.86	16.06	16.59	16.70	16.62	16.50	16.31	15.95	16.14	16.23	16.32	16.23	16.20	16.27	16.31	16.31	16.49	17.10	17.28	17.14	16.95
BIAS	11.72	11.72	11.72	11.72	11.88	11.80	11.72	11.85	11.72	11.72	11.90	11.83	11.80	11.82	11.86	13.47	13.13	13.31	13.39	13.43	13.37	13.37	13.40	13.46	13.47	13.65	14.43	14.61	14.46	14.27
Skill	0.30	0.31	0.31	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.29	0.27	0.26	0.27	0.27	0.28	0.30	0.29	0.29	0.28	0.29	0.29	0.28	0.28	0.28	0.27	0.25	0.24	0.24	0.25
R <sup>2</sup>	0.53	0.55	0.54	0.53	0.54	0.54	0.53	0.53	0.53	0.53	0.52	0.48	0.47	0.48	0.49	0.66	0.67	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.65	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66

**Tabla C-5.** Indicadores estadísticos obtenidos al comparar los resultados de las simulaciones planteadas en la Tabla 4-16 con los registros de B7 y S7.

Hm0	Indicadores Estadísticos Globales [BOYA]														Indicadores Estadísticos > Percentil 95 [BOYA]															
	Test -11	Test -16	Test -17	Test -18	Test -19	Test -20	Test -21	Test -22	Test -23	Test -24	Test-06-B	Test-07_B	Test-08_B	Test-09_B	Test-10_B	Test -11	Test -16	Test -17	Test -18	Test -19	Test -20	Test -21	Test -22	Test -23	Test -24	Test-06-B	Test-07_B	Test-08_B	Test-09_B	Test-10_B
N° Datos	793	793	793	793	793	793	793	793	793	793	793	793	793	793	793	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
MAE	0.25	0.32	0.26	0.25	0.28	0.27	0.25	0.26	0.25	0.25	0.41	0.47	0.57	0.48	0.38	0.31	0.63	0.44	0.37	0.52	0.47	0.39	0.44	0.31	0.31	0.25	0.32	0.42	0.33	0.25
RMSE	0.34	0.41	0.35	0.34	0.37	0.35	0.34	0.35	0.34	0.34	0.51	0.61	0.74	0.63	0.51	0.36	0.67	0.49	0.42	0.56	0.52	0.44	0.48	0.36	0.36	0.33	0.44	0.57	0.48	0.35
BIAS	0.02	0.25	0.11	0.04	0.16	0.13	0.06	0.10	0.02	0.02	0.35	0.42	0.54	0.41	0.30	0.23	0.63	0.42	0.32	0.51	0.45	0.35	0.41	0.23	0.23	0.16	0.23	0.36	0.18	0.09
3bMDA	0.44	0.68	0.55	0.49	0.59	0.56	0.50	0.53	0.44	0.44	0.43	0.64	0.90	0.74	0.48	0.44	0.43	0.44	0.44	0.45	0.45	0.44	0.45	0.44	0.41	0.30	0.27	0.32	0.32	
Skill	0.87	0.84	0.87	0.87	0.86	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.80	0.77	0.72	0.76	0.81	0.91	0.84	0.88	0.90	0.86	0.88	0.89	0.88	0.91	0.91	0.92	0.89	0.86	0.88	0.92
R²	0.79	0.81	0.80	0.79	0.80	0.80	0.80	0.80	0.79	0.79	0.70	0.70	0.65	0.66	0.72	0.44	0.43	0.44	0.44	0.45	0.45	0.44	0.45	0.44	0.41	0.30	0.27	0.32	0.32	
Hm0	Indicadores Estadísticos Globales [Satélite]														Indicadores Estadísticos > Percentil 95 [Satélite]															
	Test -11	Test -16	Test -17	Test -18	Test -19	Test -20	Test -21	Test -22	Test -23	Test -24	Test-06-B	Test-07_B	Test-08_B	Test-09_B	Test-10_B	Test -11	Test -16	Test -17	Test -18	Test -19	Test -20	Test -21	Test -22	Test -23	Test -24	Test-06-B	Test-07_B	Test-08_B	Test-09_B	Test-10_B
N° Datos	647	647	647	647	647	647	647	647	647	647	1109	1109	1109	1109	1109	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
MAE	0.38	0.55	0.45	0.41	0.48	0.46	0.42	0.44	0.38	0.38	0.34	0.35	0.40	0.36	0.35	0.91	1.36	1.11	1.00	1.21	1.14	1.03	1.11	0.91	0.91	0.65	0.57	0.54	0.56	0.65
RMSE	0.51	0.69	0.59	0.55	0.62	0.60	0.56	0.58	0.51	0.51	0.45	0.46	0.52	0.48	0.45	1.13	1.54	1.32	1.22	1.40	1.35	1.25	1.31	1.13	1.13	0.78	0.70	0.67	0.70	0.80
BIAS	0.24	0.51	0.37	0.30	0.42	0.39	0.32	0.36	0.24	0.24	0.04	0.06	0.21	0.10	0.06	0.87	1.36	1.11	0.98	1.21	1.14	1.02	1.10	0.87	0.87	0.46	0.33	0.10	0.28	0.52
Skill	0.83	0.77	0.80	0.81	0.79	0.80	0.81	0.80	0.83	0.83	0.85	0.84	0.82	0.84	0.85	0.78	0.71	0.75	0.77	0.73	0.74	0.76	0.75	0.78	0.78	0.85	0.86	0.87	0.86	0.84
R²	0.75	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.75	0.75	0.75	0.74	0.73	0.74	0.75	0.23	0.21	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.23	0.23	0.35	0.42	0.41	0.39	0.42
Hm0	Indicadores Estadísticos Eventos Extremos (POT)																													
	Test -11	Test -16	Test -17	Test -18	Test -19	Test -20	Test -21	Test -22	Test -23	Test -24	Test-06-B	Test-07_B	Test-08_B	Test-09_B	Test-10_B															
N° Datos	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25																
MAE	0.41	0.45	0.41	0.40	0.42	0.41	0.40	0.41	0.41	0.41	0.57	0.67	0.82	0.73	0.57															
RMSE	0.51	0.54	0.51	0.50	0.51	0.51	0.50	0.50	0.51	0.51	0.67	0.78	0.93	0.84	0.68															
BIAS	0.41	0.45	0.41	0.40	0.42	0.41	0.40	0.41	0.41	0.41	0.57	0.67	0.82	0.73	0.57															
Skill	0.83	0.82	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.77	0.74	0.69	0.72	0.77															
R²	0.65	0.65	0.65	0.65	0.66	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.62	0.56	0.53	0.54	0.58															
Tm	Indicadores Estadísticos Globales [BOYA]														Indicadores Estadísticos > Percentil 95 [BOYA]															
	Test -11	Test -16	Test -17	Test -18	Test -19	Test -20	Test -21	Test -22	Test -23	Test -24	Test-06-B	Test-07_B	Test-08_B	Test-09_B	Test-10_B	Test -11	Test -16	Test -17	Test -18	Test -19	Test -20	Test -21	Test -22	Test -23	Test -24	Test-06-B	Test-07_B	Test-08_B	Test-09_B	Test-10_B
N° Datos	793	793	793	793	793	793	793	793	793	793	793	793	793	793	793	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	
MAE	0.62	0.61	0.60	0.61	0.59	0.59	0.61	0.60	0.62	0.62	0.71	0.76	0.82	0.77	0.71	0.62	0.72	0.65	0.63	0.67	0.66	0.64	0.64	0.62	0.62	0.66	0.59	0.58	0.58	0.60
RMSE	0.83	0.80	0.79	0.81	0.78	0.79	0.80	0.79	0.83	0.83	0.97	1.03	1.10	1.03	0.97	0.72	0.87	0.78	0.75	0.81	0.79	0.76	0.77	0.72	0.72	0.84	0.74	0.73	0.74	0.75
BIAS	0.21	0.08	0.07	0.15	0.01	0.05	0.13	0.08	0.22	0.21	0.08	0.30	0.42	0.30	0.19	0.25	0.51	0.37	0.31	0.43	0.40	0.33	0.37	0.25	0.25	0.31	0.17	0.10	0.20	0.25
Skill	0.90	0.90	0.90	0.90	0.91	0.91	0.90	0.90	0.90	0.90	0.88	0.88	0.87	0.88	0.88	0.93	0.91	0.92	0.93	0.92	0.92	0.93	0.92	0.93	0.92	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
R²	0.78	0.78	0.78	0.78	0.79	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.68	0.68	0.66	0.66	0.70	0.78	0.78	0.78	0.78	0.79	0.79	0.78	0.79	0.78	0.78	0.71	0.75	0.74	0.75	0.76
Dm	Indicadores Estadísticos Globales [BOYA]														Indicadores Estadísticos > Percentil 95 [BOYA]															
	Test -11	Test -16	Test -17	Test -18	Test -19	Test -20	Test -21	Test -22	Test -23	Test -24	Test-06-B	Test-07_B	Test-08_B	Test-09_B	Test-10_B	Test -11	Test -16	Test -17	Test -18	Test -19	Test -20	Test -21	Test -22	Test -23	Test -24	Test-06-B	Test-07_B	Test-08_B	Test-09_B	Test-10_B
N° Datos	793	793	793	793	793	793	793	793	793	793	793	793	793	793	793	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	
MAE	7.13	7.11	7.11	7.12	6.99	7.05	7.11	7.02	7.13	7.13	7.48	7.49	7.61	7.51	7.40	5.92	6.06	5.99	5.95	6.02	6.00	5.96	5.99	5.92	5.92	6.11	5.56	5.55	5.52	5.56
RMSE	10.6	10.5	10.5	10.4	10.5	10.5	10.5	10.6	10.6	11.21	11.55	11.74	11.61	11.40	7.90	8.19	8.05	7.97	7.98	8.01	7.99	8.00	7.91	7.90	8.95	8.51	8.55	8.50	8.49	
BIAS	1	9	8	9	6	2	9	0	1	1	1	11.55	11.74	11.61	11.40	2.90	3.06	2.99	2.94	3.03	3.00	2.95	2.97	2.91	2.90	3.1	1.03	1.16	0.95	0.88
Skill	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.50	0.49	0.48	0.48	0.49	0.64	0.63	0.63	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.60	0.62	0.61	0.62	0.62
R²	0.74	0.74	0.74	0.74	0.75	0.75	0.74	0.75	0.74	0.74	0.72	0.71	0.70	0.70	0.71	0.64	0.62	0.63	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.54	0.57	0.57	0.57	0.57

**Tabla C-6.** Indicadores estadísticos obtenidos al comparar los resultados de las simulaciones planteadas en la Tabla 4-16 con los registros de B8 y S8.

Hm0	Indicadores Estadísticos Globales [BOYA]														Indicadores Estadísticos > Percentil 95 [BOYA]																
	Test -11	Test -16	Test -17	Test -18	Test -19	Test -20	Test -21	Test -22	Test -23	Test -24	Test-06-B	Test-07_B	Test-08_B	Test-09_B	Test-10_B	Test -11	Test -16	Test -17	Test -18	Test -19	Test -20	Test -21	Test -22	Test -23	Test -24	Test-06-B	Test-07_B	Test-08_B	Test-09_B	Test-10_B	
N° Datos	1685	1685	1685	1685	1685	1685	1685	1685	1685	1685	1685	1685	1685	1685	1685	84	84	84	84	84	84	84	84	84	84	84	84	84	84		
MAE	0.28	0.27	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.28	0.28	0.27	0.36	0.48	0.40	0.30	0.37	0.64	0.44	0.39	0.52	0.47	0.40	0.44	0.37	0.37	0.39	0.49	0.63	0.53	0.43	
RMSE	0.36	0.38	0.34	0.34	0.35	0.34	0.34	0.34	0.36	0.36	0.35	0.46	0.59	0.51	0.38	0.50	0.79	0.60	0.53	0.67	0.62	0.55	0.60	0.49	0.50	0.53	0.60	0.78	0.66	0.52	
BIAS	0.12	0.15	0.01	0.06	0.06	0.03	0.04	0.00	0.12	0.12	0.07	0.28	0.44	0.34	0.16	0.14	0.63	0.38	0.26	0.50	0.42	0.29	0.38	0.14	0.14	0.24	0.23	0.50	0.33	0.02	
3bMDA	0.34	0.80	0.52	0.43	0.63	0.56	0.45	0.52	0.34	0.34	0.39	0.48	0.74	0.56	0.36																
Skill	0.86	0.86	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.86	0.86	0.87	0.83	0.78	0.81	0.86	0.90	0.85	0.88	0.90	0.87	0.88	0.89	0.88	0.90	0.90	0.90	0.88	0.85	0.87	0.90	
R²	0.87	0.88	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.85	0.84	0.85	0.86	0.68	0.65	0.67	0.68	0.68	0.67	0.68	0.68	0.68	0.68	0.69	0.70	0.69	0.69	0.70	
Hm0	Indicadores Estadísticos Globales [Satélite]														Indicadores Estadísticos > Percentil 95 [Satélite]																
	Test -11	Test -16	Test -17	Test -18	Test -19	Test -20	Test -21	Test -22	Test -23	Test -24	Test-06-B	Test-07_B	Test-08_B	Test-09_B	Test-10_B	Test -11	Test -16	Test -17	Test -18	Test -19	Test -20	Test -21	Test -22	Test -23	Test -24	Test-06-B	Test-07_B	Test-08_B	Test-09_B	Test-10_B	
N° Datos	1460	1460	1460	1460	1460	1460	1460	1460	1460	1460	2679	2679	2679	2679	2679	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	135	135	135	135	135	
MAE	0.37	0.52	0.43	0.39	0.46	0.44	0.40	0.42	0.37	0.37	0.40	0.40	0.38	0.39	0.45	0.82	1.20	0.99	0.90	1.07	1.02	0.92	0.98	0.83	0.83	0.94	0.85	0.73	0.81	0.97	
RMSE	0.49	0.66	0.56	0.52	0.59	0.57	0.53	0.55	0.49	0.49	0.54	0.53	0.49	0.52	0.59	0.97	1.34	1.14	1.05	1.21	1.16	1.07	1.13	0.97	0.97	1.13	1.03	0.90	0.99	1.16	
BIAS	0.22	0.48	0.35	0.28	0.40	0.36	0.30	0.34	0.22	0.22	0.29	0.26	0.12	0.21	0.36	0.71	1.19	0.94	0.82	1.04	0.98	0.85	0.94	0.71	0.71	0.86	0.72	0.48	0.65	0.91	
Skill	0.83	0.78	0.81	0.82	0.80	0.81	0.82	0.81	0.83	0.83	0.82	0.82	0.83	0.82	0.80	0.81	0.74	0.78	0.80	0.77	0.78	0.79	0.78	0.81	0.81	0.78	0.80	0.83	0.81	0.78	
R²	0.79	0.80	0.79	0.79	0.80	0.80	0.79	0.79	0.79	0.79	0.77	0.76	0.75	0.75	0.76	0.37	0.36	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.28	0.28	0.29	0.29	0.27	
Hm0	Indicadores Estadísticos Eventos Extremos (POT)																														
	Test -11	Test -16	Test -17	Test -18	Test -19	Test -20	Test -21	Test -22	Test -23	Test -24	Test-06-B	Test-07_B	Test-08_B	Test-09_B	Test-10_B																
N° Datos	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25																	
MAE	0.34	0.42	0.34	0.33	0.36	0.34	0.33	0.34	0.34	0.34	0.33	0.47	0.64	0.53	0.38																
RMSE	0.44	0.53	0.43	0.42	0.46	0.44	0.42	0.43	0.44	0.44	0.43	0.61	0.80	0.68	0.49																
BIAS	0.34	0.42	0.34	0.33	0.36	0.34	0.33	0.34	0.34	0.34	0.33	0.47	0.64	0.53	0.38																
Skill	0.89	0.87	0.89	0.89	0.88	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.85	0.80	0.83	0.88																
R²	0.74	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.74	0.74	0.74	0.74	0.72	0.70	0.72	0.74																
Tm	Indicadores Estadísticos Globales [BOYA]														Indicadores Estadísticos > Percentil 95 [BOYA]																
	Test -11	Test -16	Test -17	Test -18	Test -19	Test -20	Test -21	Test -22	Test -23	Test -24	Test-06-B	Test-07_B	Test-08_B	Test-09_B	Test-10_B	Test -11	Test -16	Test -17	Test -18	Test -19	Test -20	Test -21	Test -22	Test -23	Test -24	Test-06-B	Test-07_B	Test-08_B	Test-09_B	Test-10_B	
N° Datos	1685	1685	1685	1685	1685	1685	1685	1685	1685	1685	1685	1685	1685	1685	1685	84	84	84	84	84	84	84	84	84	84	84	84	84	84		
MAE	0.63	0.62	0.62	0.62	0.61	0.61	0.62	0.61	0.63	0.63	0.64	0.71	0.79	0.74	0.66	0.48	0.68	0.57	0.52	0.55	0.55	0.53	0.53	0.48	0.48	0.48	0.43	0.44	0.43	0.44	
RMSE	0.84	0.80	0.80	0.82	0.78	0.79	0.81	0.80	0.84	0.84	0.84	0.94	1.05	0.98	0.88	0.62	0.82	0.70	0.65	0.69	0.69	0.67	0.67	0.62	0.62	0.61	0.56	0.58	0.56	0.57	
BIAS	0.16	0.12	0.02	0.09	0.02	0.01	0.08	0.03	0.16	0.16	0.15	0.30	0.46	0.37	0.18	0.26	0.58	0.41	0.33	0.41	0.40	0.35	0.36	0.26	0.26	0.27	0.04	0.11	0.02	0.16	
Skill	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.88	0.87	0.88	0.89	0.94	0.91	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	
R²	0.73	0.74	0.74	0.73	0.75	0.74	0.73	0.73	0.73	0.73	0.72	0.70	0.71	0.73	0.73	0.69	0.67	0.68	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.71	0.76	0.74	0.75	0.76	
Dm	Indicadores Estadísticos Globales [BOYA]														Indicadores Estadísticos > Percentil 95 [BOYA]																
	Test -11	Test -16	Test -17	Test -18	Test -19	Test -20	Test -21	Test -22	Test -23	Test -24	Test-06-B	Test-07_B	Test-08_B	Test-09_B	Test-10_B	Test -11	Test -16	Test -17	Test -18	Test -19	Test -20	Test -21	Test -22	Test -23	Test -24	Test-06-B	Test-07_B	Test-08_B	Test-09_B	Test-10_B	
N° Datos	1685	1685	1685	1685	1685	1685	1685	1685	1685	1685	1685	1685	1685	1685	1685	84	84	84	84	84	84	84	84	84	84	84	84	84	84		
MAE	9.44	9.34	9.38	9.41	9.38	9.39	9.41	9.42	9.44	9.44	9.47	9.58	9.67	9.77	9.48	9.35	9.41	9.38	9.36	9.15	9.27	9.37	9.25	9.35	9.35	9.20	7.91	7.91	7.91	8.23	
RMSE	12.6	12.6	12.6	12.6	12.5	12.5	12.6	12.6	12.6	12.6	12.6	12.65	18.08	17.67	19.40	18.00	12.4	12.6	12.5	12.4	12.2	12.3	12.5	12.3	12.4	12.4	12.4	9.81	9.82	9.81	10.41
BIAS	6	1	1	3	3	8	3	0	6	6	6	6	6	6	6	5	8	6	9	1	8	1	4	5	5	12.21	5.79	5.32	5.34	5.33	5.44
Skill	7.00	7.07	7.03	7.01	7.07	7.05	7.01	7.12	6.99	7.00	7.01	6.10	6.03	6.07	6.15	5.93	5.83	5.89	5.91	5.74	5.83	5.91	5.83	5.93	5.93	5.79	5.32	5.34	5.33	5.44	
R²	0.44	0.44	0.44	0.44	0.45	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.20	0.22	0.14	0.21	0.45	0.44	0.44	0.45	0.46	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.46	0.56	0.56	0.56	0.54	
R²	0.79	0.80	0.80	0.79	0.80	0.80	0.79	0.80	0.79	0.79	0.80	0.79	0.80	0.79	0.81	0.79	0.78	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79	0.80	0.87	0.87	0.87	0.85	