

Calibración del modelo SWaN y validación de reanálisis del oleaje en el Caribe

SWaN Model calibration and wave reanalysis validation in the Caribbean Sea

Fecha de recepción: 2013-09-13 / Fecha de aceptación: 2013-10-28

Claudia Janeth Dagua Paz ¹, Serguei Lonin ², Claudia Patricia Urbano Latorre ¹, Alejandro Orfila Förster ³.

¹Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH). Barrio El Bosque, Isla de Manzanillo, Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", Cartagena, Bolívar, Colombia. Tel: +57(5) 669 44 65 ext. 5132. Correo electrónico: cdagua@dimar.mil.co ¹, curbano@dimar.mil.co ³

² Oceanmet. Castillogrande, Carrera 10 N. 5-68. Móvil: (315)728 34 62. Correo electrónico: slonin@costa.net.co

³ Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados (Imedeia). IC/ Miquel Marqués, 21 - 07190 Esporles, Islas Baleares, España. Tel: +34 971 61 18 34. Correo electrónico: aorfila@imedeia.uib-csic.es.

Dagua, C.J., Lonin, S., Urbano, C.P. y Orfila, A. 2013. Calibración del modelo SWaN y validación de reanálisis del oleaje en el Caribe colombiano. Bol. Cient. CIOH (31): 13-28

RESUMEN

Se ha simulado la propagación de oleaje usando como forzamiento datos de viento NARR (North American Regional Re-analysis) con el objetivo en primer lugar de calibrar el modelo SWaN (Simulating Waves Nearshore, versión 40.51) para el Mar Caribe, así como para validar el reanálisis (hindcast) realizado en el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH). La calibración del modelo se ha realizado mediante la parametrización física de whitecapping, usando el método de inclinación o peralte acumulado. Se han comparado los resultados del modelo con los datos de oleaje registrados por las boyas de la Dirección General Marítima (Dimar) desde 2006 hasta 2010, tanto en el dominio temporal como en el dominio de la probabilidad. Se ha verificado que para los cuatro casos estudiados (Providencia, Turbo, Barranquilla y Puerto Bolívar) el modelo reproduce de manera adecuada los datos observados, reflejando tanto los cambios estacionales como los eventos extremos. El índice de correlación lineal más bajo se obtiene para la boya ubicada en Puerto Bolívar, con un valor de 0,69 y el más alto en la boya de Turbo, con 0,87. En general, los resultados de la validación indican que el modelo reproduce de manera adecuada las condiciones reales resultando dicho reanálisis una buena base de datos para el estudio del clima marítimo en área del Caribe.

PALABRAS CLAVE: clima marítimo, calibración y validación SWaN, boyas de oleaje, Caribe.

ABSTRACT

In order to calibrate the SWaN model (North American Regional Reanalysis, version 40.51) for the Caribbean Sea as well as to validate the hindcast conducted at the Center for Oceanographic and Hydrographic Research, CIOH, a wave propagation was performed using, as forcing the wind reanalysis from the North American Regional Reanalysis, NARR. The model calibration was performed through the physical parameterization of whitecapping using the Accumulative Steepness Method. Afterwards, model results were compared with data recorded at the buoys of the Dirección General Marítima between 2006 to 2010 both in time and in probability domains. For the four studied cases (Providence, Turbo, Barranquilla and Puerto Bolivar), the model adequately reproduced the observed data for the seasonal changes as well as for the extreme events. The lowest linear correlation index was found for Puerto Bolivar's buoy (0.69). By contrast, the highest correlation index was 0.87 at Turbo's buoy. In general, the validation results show that the model reproduces adequately the actual conditions.

KEY WORDS: Wave assessment, SWaN model, wave buoys, Caribbean.

INTRODUCCIÓN

El área de Oceanografía Operacional del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH) de la Dirección General Marítima (Dimar), con el objetivo de ampliar el conocimiento del Mar Caribe para garantizar la seguridad de la navegación y la vida humana en el mar, fortaleciendo la consolidación de Colombia como país marítimo, se ha propuesto desarrollar una base de datos de oleaje lo suficientemente extensa como para estudiar la climatología del oleaje en la región. Debido a la inexistencia de series temporales de oleaje medidas de forma continua durante largos períodos temporales, se ha optado por la implementación del SWaN [1], un modelo de oleaje de tercera generación operando el modelo en el modo de retroanálisis (hindcasting). Este modelo se forzó por los vientos del proyecto North American Regional Reanálisis (NARR, [2]) desde 1979 hasta 2010, generando una base de datos de oleaje para dicho período con frecuencia horaria.

Esta base de datos sintética debe ser validada con datos reales para verificar que el modelo reproduce de forma adecuada los campos de oleaje de la zona. La metodología de validación consiste en la comparación de las salidas del modelo con datos obtenidos en campo a partir de la información de boyas ubicadas en aguas profundas del Caribe colombiano, tanto en el dominio temporal como en el dominio de probabilidad (de aquí en adelante se entiende el término de 'aguas profundas' como una profundidad ilimitada para la transformación de olas de viento).

En el caso de Colombia, Dimar como autoridad marítima del país, cuenta con el Sistema de Medición de Parámetros Oceanográficos y de Meteorología Marina Smpomm, el cual se empezó a implementar desde 2006 y que actualmente se encuentra operativo tanto para las costas del Pacífico colombiano como para la cuenca del Caribe. Para el caso del oleaje, se cuenta con boyas de oleaje direccional *Triaxys* de la empresa canadiense *AXYS Technologies Inc.* [3], con las cuales se lleva a cabo este estudio.

Las series de tiempo registradas por las boyas no siempre son continuas, puesto que por factores como mantenimiento o vandalismo se han visto fuera de funcionamiento. A pesar de estas circunstancias, la informa-

ción de las boyas es de uso para calibración y validación de los modelos implementados en el mismo dominio. La información fraccionada resulta ser de importancia en el momento de ajustes en las fechas exactamente correspondientes a los forzamientos del modelo del oleaje, lo que hace posible alimentar la parte semi-empírica de los modelos con la información de campo.

Los estudios de validación de la información entregada por los modelos numéricos de oleaje a partir de datos in situ e información satelital han sido de gran interés y ampliamente utilizados internacionalmente, tanto para la verificación como para la calibración de los mismos. Estudios como [4, 5, 6, 7] son algunos ejemplos.

Para el caso particular de Colombia y con el ánimo de obtener bases de datos lo suficientemente largas como para llevar a cabo estudios climatológicos, diferentes autores han aplicado metodologías que permiten validar la información disponible [8, 9, 10 11 y 12]. Así, en [8], con el fin de determinar el clima de olas medio y extremal en el Caribe colombiano, se validaron y calibraron observaciones visuales de buques en ruta a partir de datos instrumentales de una boya escalar de oleaje de NOAA, en particular la boya 41018, consiguiendo ajustes lineales de hasta 0,99 para la altura de ola. Por otro lado, durante el estudio de oleaje generado por el huracán Joan, en [9] se compararon los parámetros de oleaje generados por el modelo SWaN y las boyas 42003 de NOAA, usando el índice y la tendencia de Wilmott de acuerdo a [13]. Los resultados de esta metodología entregan un índice del orden de 0,98 y la tendencia el orden del -18 %, indicando que aunque la correlación es casi uno, el modelo SWaN entrega valores por debajo de los medidos en un 18 % de los casos.

En [10] se propuso una metodología para la corrección de las series de oleaje obtenidas mediante modelación numérica en regiones donde la información del oleaje es escasa. En el mismo trabajo se incluyó la corrección de la información obtenida por medio de datos de satélite y barcos en ruta, así como con los datos de las boyas de NOAA que se encuentran disponibles en el Caribe. En este trabajo y con el método de coeficiente de correlación vectorial (CCV) se calculó el grado de asociación lineal entre dos variables y se aplicaron los coeficientes de calibración obtenidos

a partir de datos de buques en ruta y satelitales, con los cuales se corrigieron las series modeladas con el modelo WaveWatch-III [14] y se compararon los datos corregidos con los obtenidos en la boya NOAA 41018.

En [12], con el fin de establecer el potencial de energía del oleaje en el Mar Caribe, se compararon los datos de la boya de Dimar, ubicada cerca de Barranquilla durante 2007, con los resultados de SWaN para el caso de estudio de Isla Fuerte, encontrando ecuaciones de corrección por ajuste lineal de los datos modelados y ajustando los resultados para conseguir salidas confiables con el fin de determinar el potencial de energía del oleaje.

Motivados por los trabajos anteriores, el objetivo principal de este estudio ha sido evaluar la calidad del retroanálisis del CIOH basado en el uso de reanálisis de vientos [2] y el modelo espectral de oleaje [1] en el Mar Caribe. Con los estudios citados arriba, siguiendo las recomendaciones de [15] y con el propósito de verificar la respuesta del retroanálisis (hindcast) que se llevó a cabo en el CIOH, se ha usado el modelo SWaN validando las salidas de reanálisis del oleaje mediante los datos medidos por las boyas de oleaje de Dimar para cuatro regiones del Mar Caribe colombiano, previa calibración del modelo con datos de la boya NOAA (Caribe Occidental).

La posición de las boyas utilizadas se indica en el siguiente apartado, así como el dominio de cálculo del modelo de reanálisis del oleaje. En la sección Metodología se encuentra la información sobre el tratamiento de la señal en la ubicación de las boyas, tan-

to para la calibración del modelo (boya NOAA 42058 y Dimar: Barranquilla y Puerto Bolívar) como para su validación (boyas de Dimar). Los resultados presentan una comparación estadística entre las salidas del modelo y los datos de la boya NOAA (calibración) y las boyas de Providencia, Turbo, Barranquilla y Puerto Bolívar (validación).

ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio cubierta por el modelo abarca la zona comprendida entre las latitudes 8,0922°N y 18,6312°N y las longitudes 84,5219°W y 59,6419°W. De la región señalada, la costa Caribe colombiana cubre un amplio rango latitudinal, entre 8°N hasta 13°N, desde el límite con Panamá en el suroeste (SW) en longitud 79°W, hasta la alta Guajira al noreste (NE) en longitud 71°W [16].

Las boyas de oleaje de NOAA y Dimar en el Caribe se encuentran ubicadas en aguas profundas en las coordenadas de la Tabla I. El modelo SWaN se configuró para que en los mismos puntos donde se encuentran las boyas de Dimar se interpolen las salidas del modelo para hacer una comparación directa de los datos medidos con el modelo.

La Figura 1 muestra la posición de las boyas de oleaje de NOAA (círculos rojos), así como las de las boyas de la Dimar (círculos azules). En el proceso de calibración del modelo se utilizó la boya 42058 de NOAA, debido a que su posición en el Caribe Central registra una mayor variabilidad estacional de los vientos en comparación con el Caribe Oriental, gobernado fundamentalmente por los Alisios.

Tabla I. Posición de las boyas de NOAA y Dimar utilizadas para la calibración y validación de los datos modelados con SWaN.

ID	Estación	Ubicación	Coordenadas	
			Lat. (N)	Long. (W)
1	NOAA 42057	Mar abierto	17°00,12'	81°30,00'
2	NOAA 42058	Mar abierto	14°55,38'	74°55,08'
3	NOAA 42059	Mar abierto	15°03,24'	67°28,20'
a	Boya Dimar Providencia	Mar abierto	13°31,98'	81°19,98'
b	Boya Dimar Urabá	Mar abierto	08°55,44'	77°03,60'
c	Boya Dimar Barranquilla	Mar abierto	11°09,66'	74°45,60'
d	Boya Dimar Puerto Bolívar	Mar abierto	12°21,06'	72°13,08'

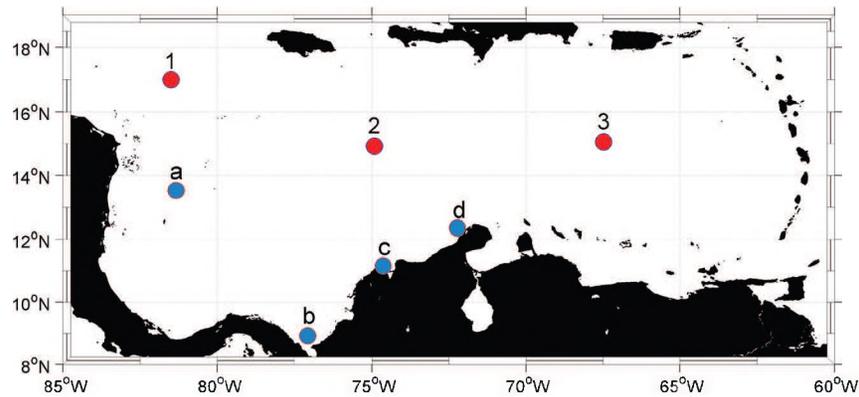


Figura 1. Posición de las boyas Dimar en el Caribe empleadas para la validación de los datos del retroanálisis. El número y/o letra es el identificador de cada boya de acuerdo con la Tabla I (círculos rojos corresponden a las boyas de NOAA y círculos azules a las boyas de DIMAR).

METODOLOGÍA

La primera parte de este apartado corresponde al proceso de calibración del modelo SWaN con los datos de la boya 42058 de NOAA. Una vez calibrado el modelo, se generó el *hindcast* para el período comprendido desde 1979 hasta 2010. En la segunda parte, se trata la validación de los resultados del retroanálisis a partir de los datos de las boyas de Dimar en el Caribe.

Calibración del modelo SWaN

Los procesos de propagación en modelos de tercera generación y específicamente en el modelo SWaN, son la evolución en el espacio (x-y) que describe el desarrollo del espectro de energía del oleaje, teniendo en cuenta las condiciones de viento, corrientes y batimetría, atendiendo a los procesos de generación, disipación e interacciones no lineales.

Como parte de la configuración de los parámetros físicos que emplea el modelo SWaN se encuentra el *whitecapping*. Este proceso que produce la rotura de oleaje en grandes escalas espacio-temporales puede ser modificado en función de los procesos físicos que gobiernan una determinada zona dentro del *script* de ejecución del modelo [17], pudiendo variarse tanto el tipo de la parametrización como sus respectivos coeficientes. Por defecto el *whitecapping* queda formulado con la descripción de [18], el cual a partir de las

investigaciones de [19], desarrolló una formulación *pulse-based whitecapping*.

Para el caso del SWaN Cycle III, versión 40.51, se activó otro método de *whitecapping*: el método de inclinación o peralte acumulado (*cumulative steepness method-CSM*) para el cálculo de la rotura de oleaje, descrita en [20] y como se indica en la ecuación 1:

$$S_{wc}^{st} = -C_{wc}^{st} (S_{st}(\sigma, \theta))^p E(\sigma, \theta), \quad (1)$$

Donde,

S_{wc}^{st} representa el término sumidero de la energía espectral $E(\sigma, \theta)$ en el modelo debido a *whitecapping*.

C_{wc}^{st} es el coeficiente de la variación del espectro.

p es un parámetro de proporcionalidad de la tasa de disipación en la pendiente del espectro de una onda sobre una frecuencia particular.

Los valores por defecto de estos coeficientes son $C_{wc}^{st} = 4,0$ y $p = 2,0$. Las simulaciones previas del modelo demostraron que estos coeficientes, establecidos por defecto, producen la altura de ola subestimada. En este estudio el coeficiente modificado para la calibración del modelo fue, C_{wc}^{st} hasta obtener un valor tal que el ajuste con los datos de la boya fuera óptimo.

Las ejecuciones del modelo se realizaron con una malla de dominio para la región Caribe con la configuración descrita en la Tabla

II. Las salidas del modelo son series de tiempo calculadas en un punto definido por su posición (latitud y longitud) que corresponde geográficamente a la misma ubicación de la boya real, usando los forzamientos de viento NARR para los períodos determinados según la información

en tiempos coincidentes en los registros históricos tanto de la boya de NOAA 42058 (identificada como 2 en la Tabla I y Figura 1), como de las boyas de Dimar de Barranquilla (identificada como c en la Tabla I y Figura 1) y Puerto Bolívar (identificada como d en la Tabla I y Figura 1).

Tabla II. Características usadas en la configuración del modelo SWaN.

Características	Descripción
Detalle de la malla computacional	
– Resolución espacial	12 km (0,109° en x , 0,05° en y)
– Latitud mínima y máxima	8,0922° N – 18,7362° N
– Longitud mínima y máxima	84,5219° W – 59,5329° W
– Periodo de simulación	2007-2010
Parametrizaciones	
– Energía suministrada por el viento S_{in}	[20][18]. $C_{inp}=0,25$
– Interacciones no lineales	Quadruplet interaction, [21] Triad interaction, [22]
– Disipación de energía Whitecapping S_{ds}	[23]
– Fricción con el fondo S_{bot}	[24]
Detalles numéricos	
– Resolución espectral	32 frecuencias y 120 direcciones.
– Pasos de tiempo	Constante para propagación y términos fuente. Tiempo de computo cada 30 min.
– Definición del modelo	Propagación en x-y activadas, refracción activada.
– Otros	No se incluyen corrientes y variaciones del nivel medio.

Los períodos seleccionados para la calibración del modelo fueron: enero 2007, agosto 2008 y noviembre 2010. Particularmente, el período de noviembre de 2010 presentó una anomalía en la zona de convergencia intertropical, un frente frío y el paso del huracán Tomas, eventos atípicos del Caribe que mostraron un cambio en la dirección del oleaje en la costa en un extenso paso del tiempo (entre una y dos semanas). A pesar de que para este período de tiempo la boya 42058 de NOAA no tiene registros, se consideraron los datos de la boya de Dimar para verificar si el modelo representa los patrones de oleaje en casos poco frecuentes.

Validación del modelo

Realizado el ajuste de los parámetros del modelo a partir de datos de boya *in situ*, se realizó la validación del modelo en las salidas de retroanálisis mediante el análisis de los datos en el dominio temporal y en el dominio de probabilidad.

Con el fin de hacer una primera verificación del ajuste del modelo frente a los datos medidos, se presentan las gráficas de la evolución en el tiempo de las alturas de ola significativa de la serie disponible de boya en campo y de los datos correspondientes a las

boyas virtuales del modelo SWaN, ubicadas ambas en la misma posición.

Posteriormente se realiza la comparación de la dirección predominante obtenida como salida del modelo con los datos medidos en la boya, utilizando un diagrama de dispersión para verificar el ajuste entre ambos datos, lo que proporcionará una primera estimación de la precisión del modelo de acuerdo con la metodología utilizada en [25].

En el dominio de la probabilidad se presenta una gráfica cuantil-cuantil, o *Q-Q plot*, para comparar las probabilidades de no excedencia asociadas a las distintas alturas significantes de ambos registros. Si los dos conjuntos de datos tienen la misma distribución el gráfico cuantil-cuantil es lineal.

Finalmente, se calculan los siguientes parámetros estadísticos: el sesgo (BIASS), definido como la diferencia entre la media de los datos observados y la media de los datos sintéticos; el error cuadrático medio (RMSE), con la que se mide la dispersión global de los datos alrededor de la línea de regresión, y el índice de dispersión (o SI, adimensional), que indica la desviación estándar de los datos pronosticados con respecto a la línea de mejor ajuste, dividido entre la media de las observaciones,

para cada una de las regiones estudiadas.

Los datos validados corresponden a series temporales de altura de ola, seleccionándose aquellos correspondientes entre los años 2006 y 2010, ya que en todos los casos estudiados las boyas presentan series temporales más extensas. Cada boya tiene diferentes períodos de tiempo registrados y por tanto es posible comparar el comportamiento del modelo en diferentes épocas del año.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Calibración del modelo

De acuerdo a la metodología descrita se procede a realizar las simulaciones para la calibración del modelo SWaN, de manera que éste pueda representar a través de los datos de las variables de oleaje las condiciones del mar más cercanas a la realidad en cualquier punto del Mar Caribe.

Las salidas del modelo SWaN tiene distintas variables de oleaje que se encuentran descritas en el manual de usuario [1]. Con el fin de hacer la validación del modelo se escogieron las variables de salida común entre las boyas y el modelo (Tabla III).

Tabla III. Variables comparables del modelo SWaN y las boyas.

Variable	Modelo SWAN	Boya
Altura significativa de la ola	HSign	WVHT
Espectro de energía	SPEC2D	DIRSPEC

Para la calibración del coeficiente S_{wc}^{st} se ha simulado el período de enero de 2007. En este experimento numérico se cambió el valor del coeficiente de *White-capping* S_{wc}^{st} a 0,1 y luego a un valor de 0,08. Estos valores se mostraron como los más cercanos al valor óptimo de calibración.

El resultado de la modelación se evaluó en primera instancia con la variable de altura de ola (Hsign) y se comparó con los datos de

la boya NOAA 42058. La serie de tiempo y la correlación de los datos de altura de ola de la boya virtual de SWaN y la boya NOAA 42058 para cada simulación se observa en la Figura 2.

De acuerdo con las correlaciones en cada una de las simulaciones, la ecuación que corresponde a la recta de mejor ajuste (HsScorr) muestra el valor de la pendiente de recta la cual se consignó en la Tabla IV.

Tabla IV. Valores del coeficiente C_{wc}^{st} y su valor asociado de pendiente de la recta de mejor ajuste.

C_{wc}^{st}	Pendiente
0,1	0,9446
0,08	1,0147

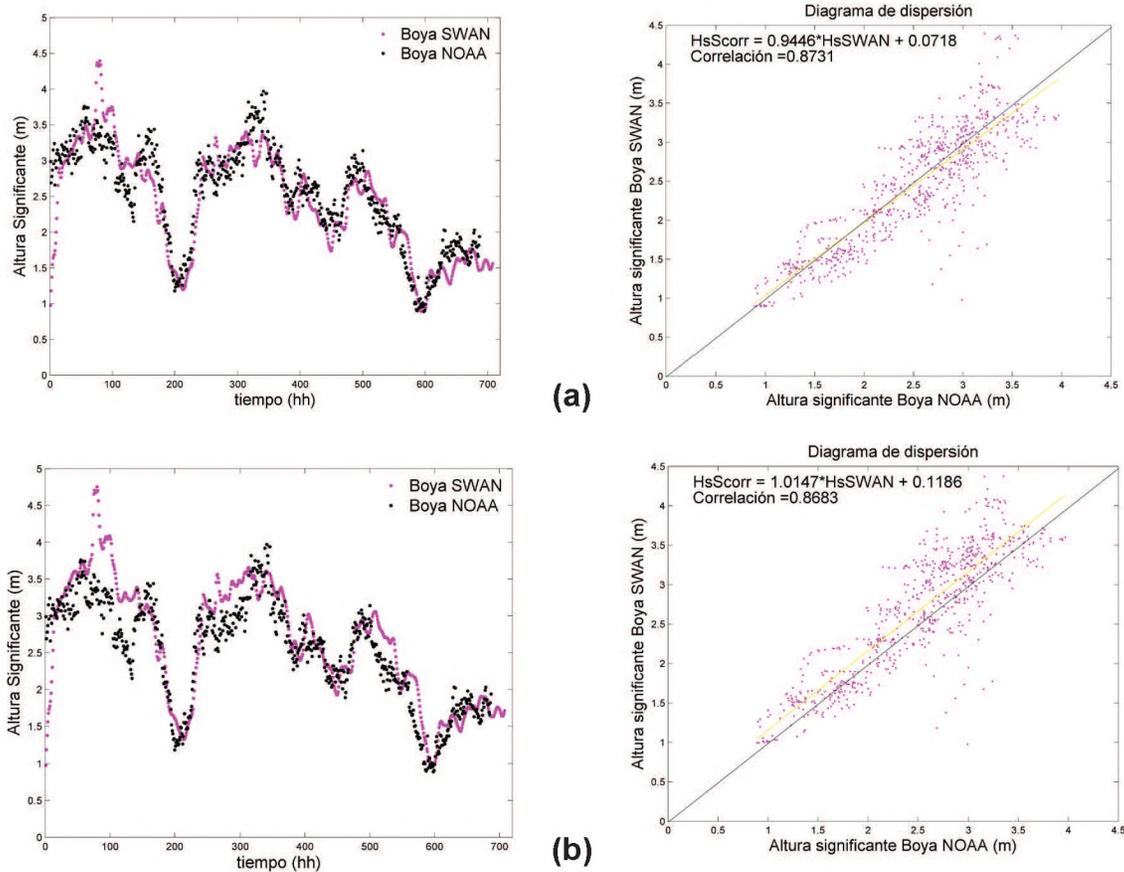


Figura 2. Serie de tiempo y correlación de los datos de altura significativa de ola en la boya NOAA – 42058 (en negro) y la boya SWaN (en magenta). **a)** con $C_w^{st} = 0,1$. **b)** con $C_w^{st} = 0,08$.

Los valores del coeficiente C_w^{st} versus la pendiente se representaron a través de una línea recta en la Figura 3, con una ecuación de esta recta que permita calcular el valor de C_w^{st} que dará el mejor ajuste (pendiente igual a 1,0). La interpolación lineal entre los dos valores

de la constante en la Tabla IV se puede efectuar teniendo en cuenta que la variación de esta constante es linealmente proporcional a la variación del término sumidero S_{wc}^{st} en (1), es decir, proporcional al cambio de la energía espectral del oleaje.

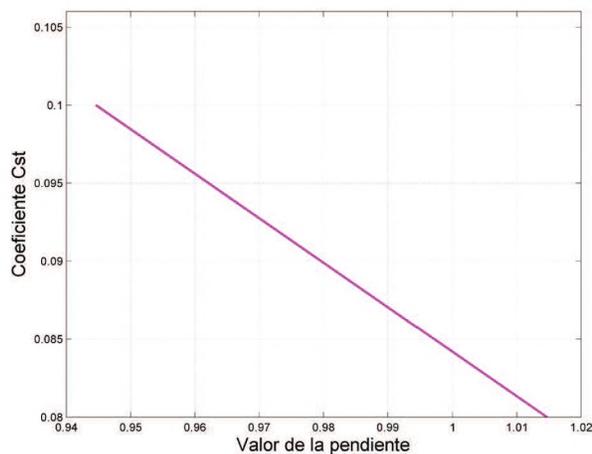


Figura 3. Recta pendiente vs C_w^{st}

La ecuación de la recta encontrada a partir de esta gráfica es:

$$y = - 0,287x + 0,371 \quad (2)$$

En esta ecuación los valores de x representan pendientes de la recta $HsScorr$ y los valores de y son de coeficientes C_{sc}^{st} . El valor óptimo hallado del coeficiente C_{sc}^{st} es 0,084. Con éste se realizó una nueva simulación, encontrando un mejor ajuste de 0,99 (Figura 4).

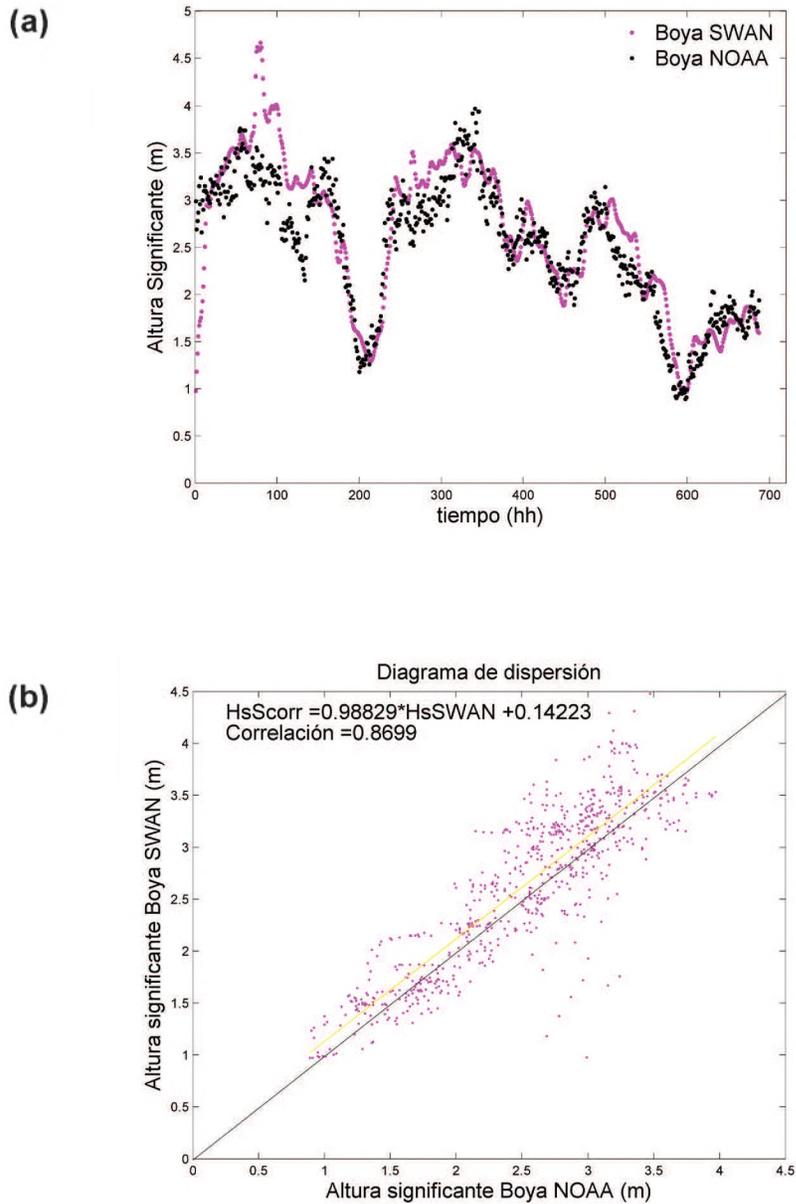


Figura 4. (a) Serie de tiempo de los datos y (b) correlación de altura significativa de ola en la boya NOAA – 42058 (en negro) y la boya SWAN (en magenta). Con ajuste óptimo de C_{sc}^{st} 0,084.

Una segunda variable de salida del modelo que se evaluó fue el espectro de densidad de energía (SPEC2D) con frecuencia absoluta. Es relevante analizar el espectro, ya que representa el estado de mar en un punto.

El comportamiento del espectro (Figura 5) con respecto a la boya NOAA 42058 presenta un buen ajuste en la forma del espectro con disminución en la intensidad.

Para continuar con la comparación de las series de tiempo de altura de ola, se analizaron los datos de la boya NOAA para el periodo de agosto 2008 y los datos de la boya de Dimar, ubicada en Barranquilla, para el periodo de noviembre con el mismo periodo para la boya NOAA, aunque para noviembre de 2010 se tomaron los datos de la boya de Dimar, ubicada en Puerto Bolívar, debido a que para este periodo no se cuenta con datos de espectros en la boya de Barranquilla.

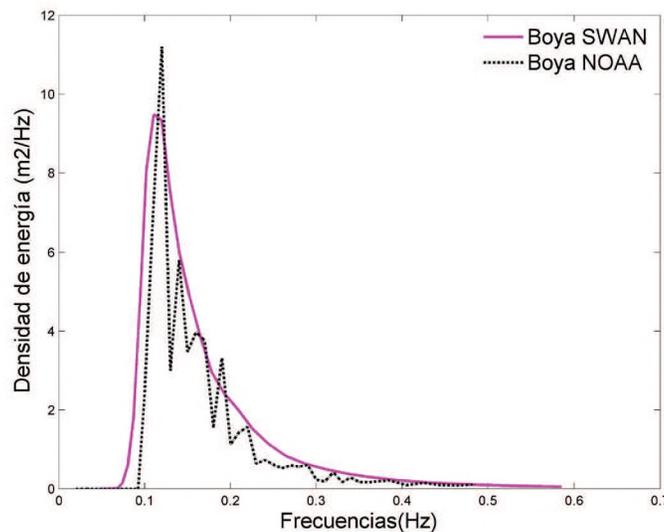


Figura 5. Espectro de energía de la boya NOAA – 42058 (en negro) y la boya SWaN (en magenta), correspondiente al 14 de enero de 2007 a las 1900R.

Los resultados del espectro (figuras 6b y 6d) muestran que el ajuste dado al modelo conserva la forma del espectro procesado por la boya. Para la época de noviembre de 2010, que presenta eventos atípicos, el modelo subestima más la intensidad en comparación con el período de agosto de 2008.

En las series de tiempo de altura de la ola (figura 6a y 6c) se observa como el oleaje modelado subestima el valor de la altura de la ola, siendo más pronunciado para el período de noviembre de 2010 que para los períodos de enero de 2007 y agosto de 2008.

Validación del retroanálisis

Para determinar si las salidas del modelo están ajustadas a los datos medidos, se presenta el análisis en el dominio temporal y

en el dominio de la probabilidad, tal como se describió anteriormente, para cada región.

En la Figura 7 se aprecia la comparación de los datos en series de tiempo. Puede observarse como, para todos los casos, el modelo SWaN reproduce de forma adecuada los datos registrados por las boyas, incluso durante cambios estacionales entre época seca (diciembre-marzo) y húmeda (abril-noviembre).

Por otro lado, se evidencia cómo, aunque el modelo reproduce los datos medidos en campo de forma adecuada, para los años anteriores a 2010 el modelo sobreestimó los datos medidos por las boyas mientras que durante ese año el modelo subestimó los datos registrados por las boyas de oleaje de Dimar. Este efecto puede verse más claramente en la Tabla V, donde se muestra el promedio de la altura de la ola para cada año y para cada boya.

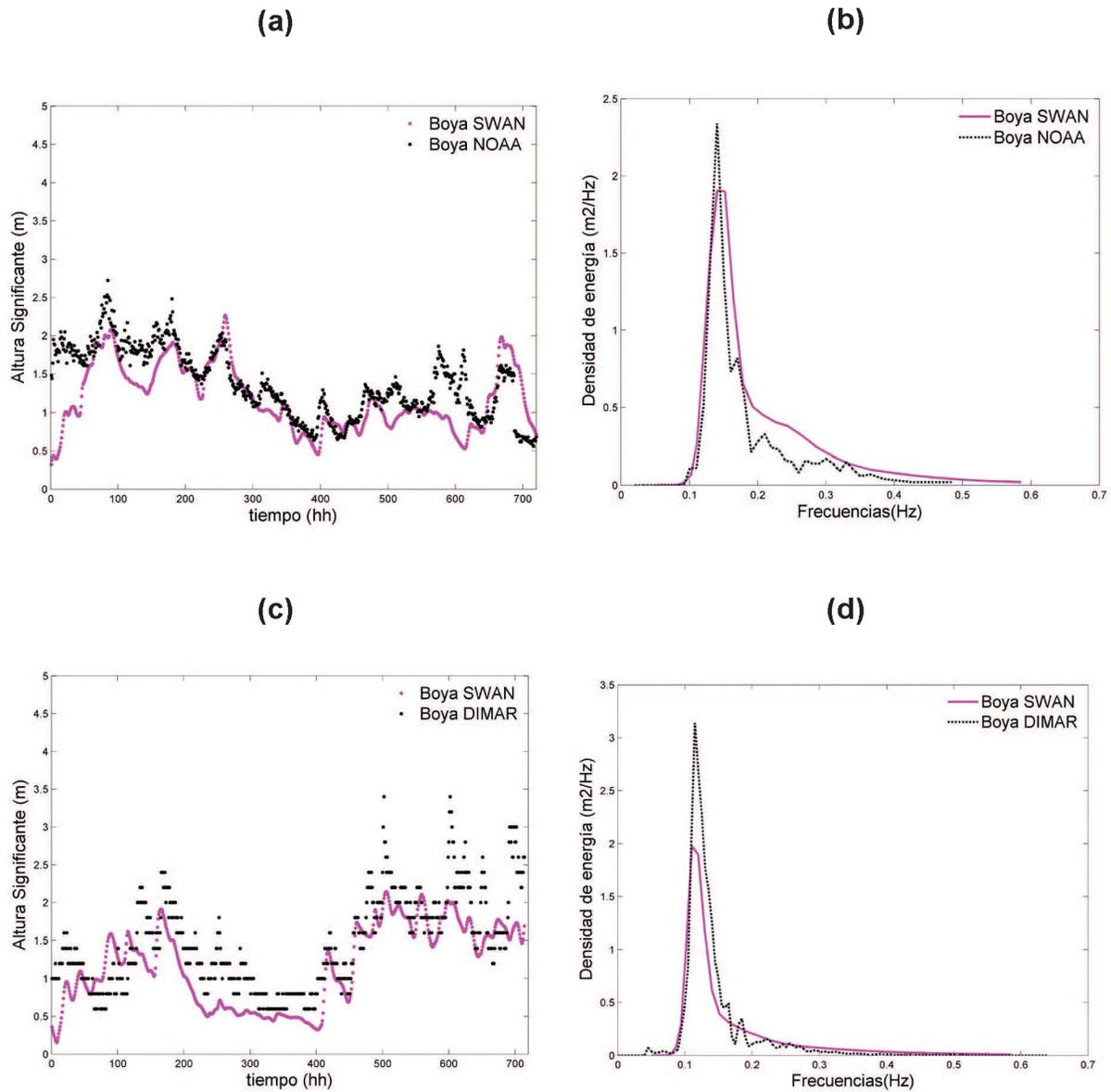


Figura 6. (a) Serie de tiempo de los datos de altura significativa de ola en la boya NOAA – 42058 (en negro) y la boya SWaN (en magenta) para agosto 2008; **(b)** Espectro de energía de la boya NOAA y la boya SWaN, para el 29 de agosto de 2008 a las 2100R; **(c)** Serie de tiempo de los datos de altura significativa de ola en la boya de Barranquilla y la boya SWaN para noviembre 2010; **(d)** Espectro de energía de la boya de Puerto Bolívar y la boya SWaN para el 7 de noviembre de 2010 a las 1200R.

En la Tabla V se ve claramente que para todas las regiones estudiadas, los promedios de la altura de ola entregados por el modelo son mayores que los promedios de la altura de ola registrados

por las boyas, entre los años 2006 y 2009. Sin embargo, durante 2010 los datos promediados de altura de ola del modelo son menores que los promedios registrados por las boyas.

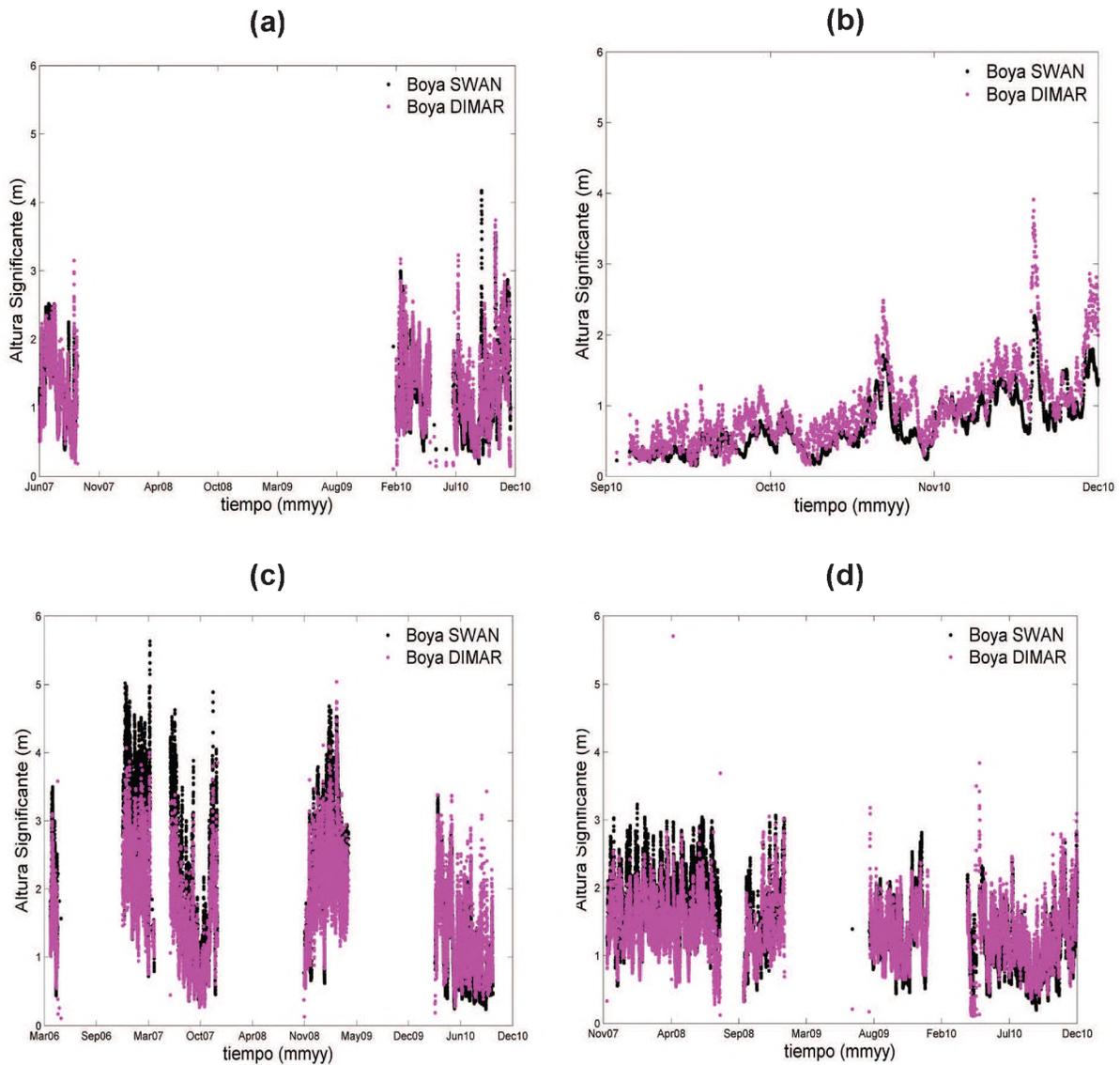


Figura 7. Series de tiempo de los datos de altura de ola de la boya SWaN (en negro) y de la boya DIMAR (en magenta) para los sectores evaluados. **(a)** Providencia, **(b)** Turbo, **(c)** Barranquilla y **(d)** Puerto Bolívar.

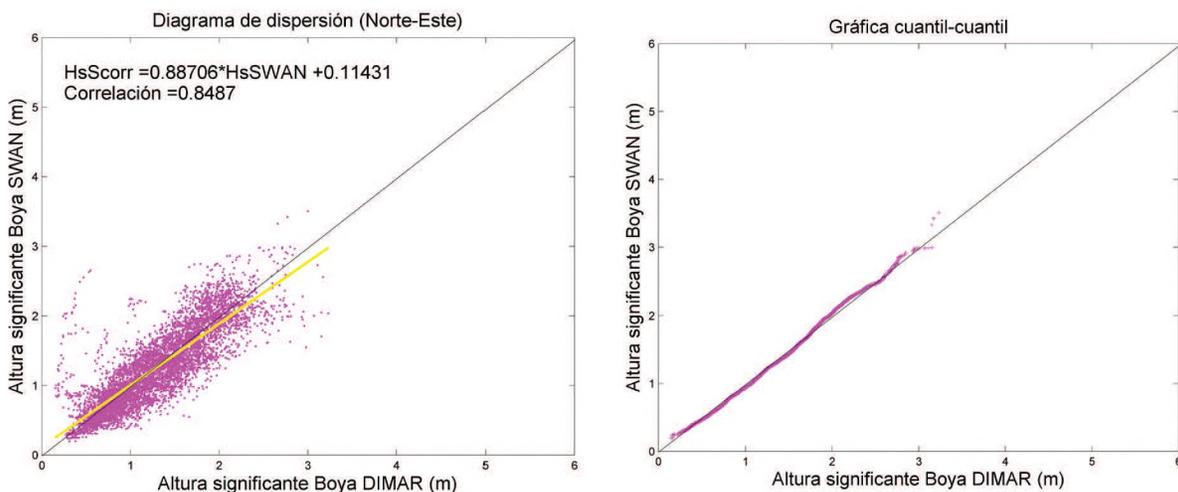
Tabla V. Valores promedio de altura de ola (en metros) para cada año. N indica el número de datos por año, PD el valor promedio de la altura de ola de la boya Dimar y PS el valor promedio de la altura de ola de la boya SWaN.

Año	(a) Providencia			(b) Urabá			(c) Barranquilla			(d) Puerto Bolívar		
	N	PD	PS	N	PD	PS	N	PD	PS	N	PD	PS
2006	0	0	0	0	0	0	824	1,78	2,28	0	0	0
2007	2586	1,26	1,33	0	0	0	5142	1,74	2,45	822	1,52	1,76
2008	0	0	0	0	0	0	895	1,79	1,92	6300	1,46	1,83
2009	0	0	0	0	0	0	2560	2,29	2,66	3687	1,35	1,43
2010	4759	1,27	1,21	2791	0,96	0,71	4152	1,36	1,15	5160	1,26	1,15

Debido a que es una circunstancia común que se presentó en todas las regiones, y no en un caso particular, es necesario analizar si este efecto es debido a las mejoras que se han producido en los datos de viento durante 2010, ya que éstos son los forzamientos del modelo de oleaje. Estas mejoras pueden ser debidas a la inclusión de nueva información de redes de observación que haya sido incluida en el reanálisis NARR.

Después de tener una primera aproximación cualitativa sobre la concordancia de lo modelado y los datos en campo, se representan los diagramas de dispersión y sus respectivas gráficas cuantil-cuantil para la dirección predominante de cada región. Además, se calculó el grado de correlación lineal de los datos en cada caso. En las Figura 8 y Figura 9 se observan los resultados obtenidos para cada región, evidenciando de manera cuantitativa la alta correspondencia entre los datos modelados y los datos medidos en campo.

(a)Providencia



(b)Turbo

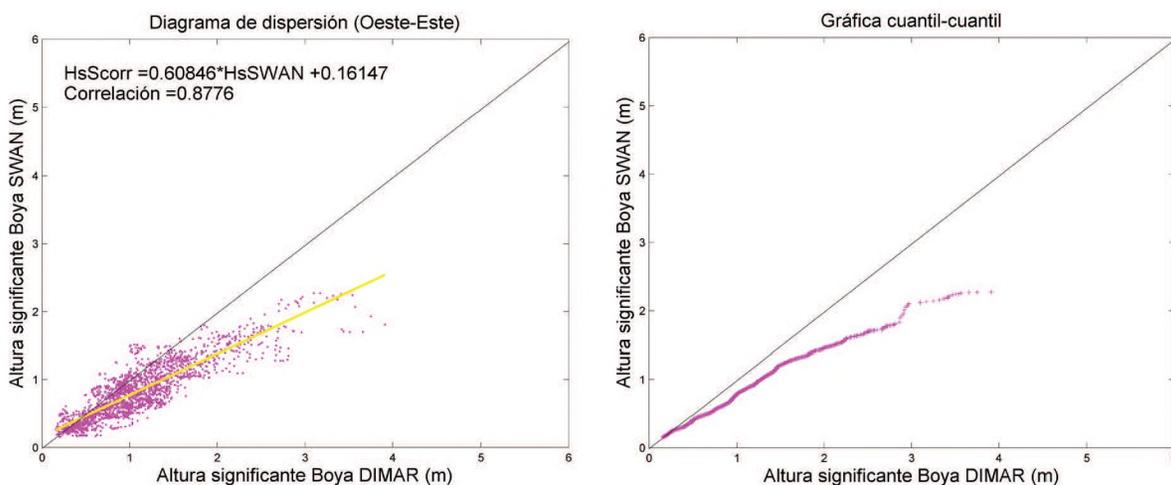
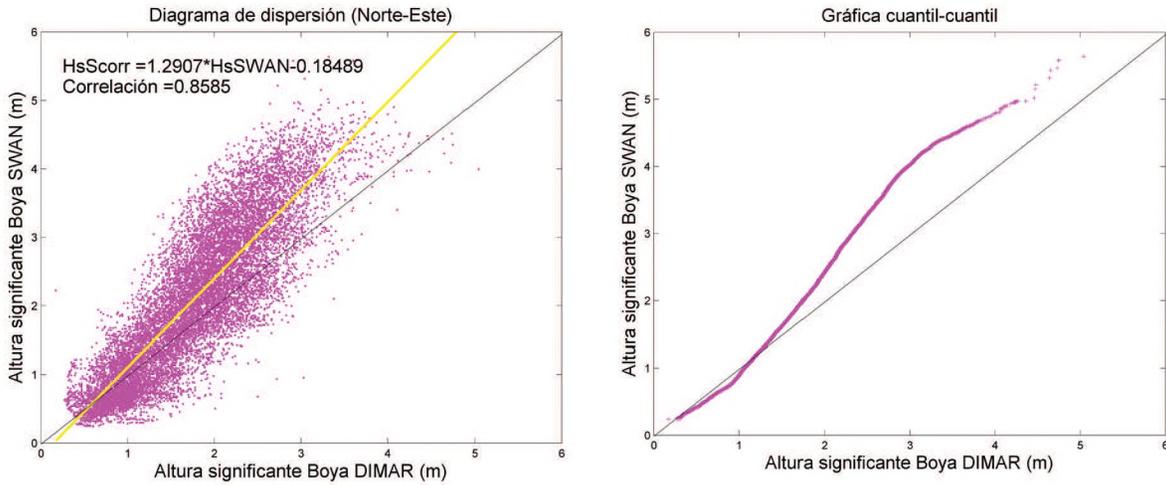


Figura 8. Diagramas de dispersión (derecha) y gráfica cuantil-cuantil (izquierda) para cada región analizada.

(a) Barranquilla



(b) Puerto Bolívar

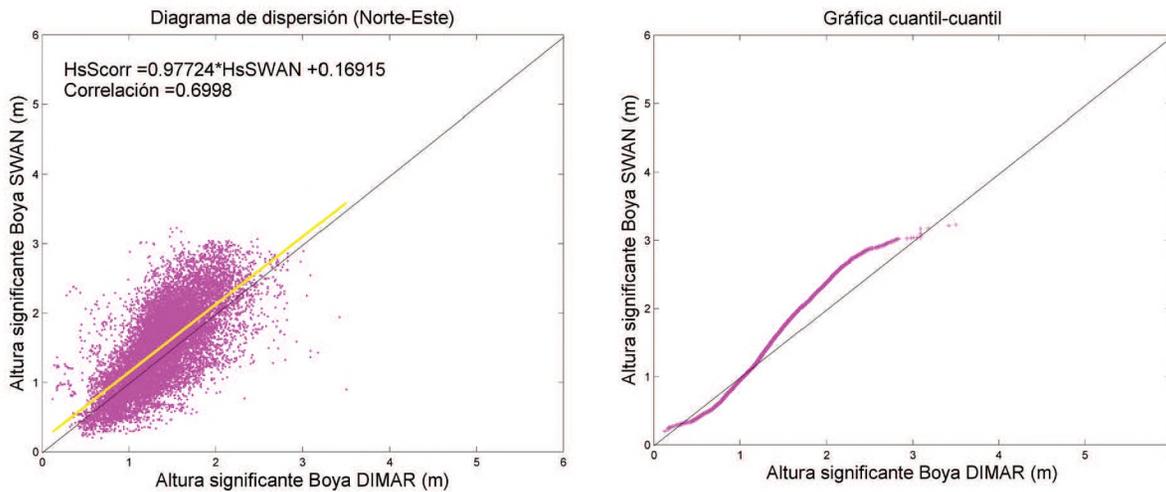


Figura 9. Diagramas de dispersión (derecha) y gráfica cuantil-cuantil (izquierda) para cada región analizada.

Los resultados del espectro (figuras 6b y 6d) muestran que el ajuste dado al modelo conserva la forma del espectro procesado por la boya. Para la época de

noviembre de 2010, que presenta eventos atípicos, el modelo subestima más la intensidad en comparación con el período de agosto de 2008.

Tabla VI. Índice de correlación entre los datos medidos en campo y los datos modelados para los cuatro casos evaluados. Las siglas Corr. Dp. indican la correlación en la dirección predominante.

ID	Estación	BIASS (m)	RMSE (m)	SI	Corr. Dp.
A	Boya Providencia	-0,03	0,30	0,11	0,84
B	Boya Turbo	-0,26	0,39	0,21	0,87
C	Boya Barranquilla	-0,32	0,68	0,17	0,85
D	Boya Puerto Bolívar	0,13	0,43	0,14	0,69

En las series de tiempo de altura de la ola (figura 6a y 6c) se observa como el oleaje modelado subestima el valor de la altura de la ola, siendo más pronunciado para el período de noviembre de 2010 que para los períodos de enero de 2007 y agosto de 2008.

Validación del retroanálisis

Para determinar si las salidas del modelo están ajustadas a los datos medidos, se presenta el análisis en el dominio temporal y en el dominio de la probabilidad, tal como se describió anteriormente, para cada región.

En la Figura 7 se aprecia la comparación de los datos en series de tiempo. Puede observarse como, para todos los casos, el modelo SWaN reproduce de forma adecuada los datos registrados por las boyas, incluso durante cambios estacionales entre época seca (diciembre-marzo) y húmeda (abril-noviembre).

Por otro lado, se evidencia cómo, aunque el modelo reproduce los datos medidos en campo de forma adecuada, para los años anteriores a 2010 el modelo sobreestimó los datos medidos por las boyas mientras que durante ese año el modelo subestimó los datos registrados por las boyas de oleaje de Dimar. Este efecto puede verse más claramente en la Tabla V, donde se muestra el promedio de la altura de la ola para cada año y para cada boya.

En la Tabla V se ve claramente que para todas las regiones estudiadas, los promedios de la altura de ola entregados por el modelo son mayores que los promedios de la altura de ola registrados por las boyas, entre los años 2006 y 2009. Sin embargo, durante 2010 los datos promediados de altura de ola del modelo son menores que los promedios registrados por las boyas

En la Tabla VI se presenta en forma resumida la estadística obtenida para cada boya, en donde, para todos los casos, se encuentra una relación lineal de los datos por encima de 0,69, en el caso más bajo, indicando el alto grado de correspondencia entre los datos modelados y los datos reales.

En la misma tabla se evidencia, a partir del cálculo del sesgo (BIASS), que los datos modelados están por debajo de los valores medidos por las boyas, excepto en el caso de la boya de Puerto Bolívar. Los valores de error cuadrático medio indican que la boya que presenta una mayor dispersión es la de Barranquilla. Por otra parte, los datos del modelo que mejor se ajustan a los datos registrados por las boyas (índice de dispersión o SI) son los de Providencia. Aun cuando los datos modelados y los datos registrados por las boyas de Dimar tienen un buen ajuste lineal, el caso de Puerto Bolívar es el que presenta menor ajuste respecto a las demás regiones.

Las gráficas cuantil-cuantil de la Figura 8 permiten verificar la proximidad de los datos a la bisectriz (en rojo), lo cual indica el alto grado de ajuste entre las probabilidades de no excedencia de la boya y los datos modelados con SWaN.

A partir de las gráficas y cálculos presentados, se validó tanto en el dominio temporal como en el dominio de la probabilidad los datos del modelo respecto a las observaciones.

En las series de tiempo, correspondientes a los años analizados, se evidencia que aunque el modelo está representando de forma satisfactoria el comportamiento del oleaje, en años previos a 2010 el modelo sobreestima ligeramente la altura de olas, mientras que en el último subestima las alturas de ola. Esta primera apreciación se comprueba en las series de tiempo en la Figura 7.

Después del análisis efectuado tanto en el dominio temporal como en el de la probabilidad del comportamiento del modelo respecto a los datos de las boyas de oleaje en campo, puede afirmarse que el modelo reproduce de manera apropiada los datos registrados por las boyas de Dimar (en el ejemplo de datos del año 2010), incluso reproduciendo satisfactoriamente los cambios de estaciones del año y los datos de altura de ola mayores al valor medio, que podrían estar asociados con tormentas o frentes fríos.

Una vez validadas las series de tiempo y verificado que los datos modelados producen resultados satisfactorios, se confirma que las series de tiempo generadas por el modelo SWaN son adecuadas para estudiar el clima de oleaje para el Caribe.

CONCLUSIONES

El análisis previo de los factores que podrían afectar la precisión del modelo SWAN demostró que el Mar Caribe es una cuenca donde las olas de mar de fondo (*swell*) se evidencian únicamente cuando pasan los frentes fríos y ciclones tropicales, mientras que la configuración original del modelo mostró la necesidad de calibrarlo con el fin de mejorar las respuestas para las situaciones típicas del oleaje. Esto implica que posibles mejoras no se presentan en los esquemas de transporte, sino en los términos de las fuentes y sumideros de la energía espectral. Por otro lado, la Figura 5 ilustra una buena coincidencia de la forma del espectro simulado *versus* el obtenido instrumentalmente. Esto significa que los mecanismos no lineales de resonancia de modos reproduce la evolución del espectro en el tiempo sin intervenir esta parte del modelo.

Sumando a este análisis, el hecho de que todas las boyas de oleaje se ubican en aguas profundas, los mecanismos de transformación de olas por el efecto del fondo no se consideran en este estudio, resultando en la importancia de la parametrización del proceso de *white-capping*, como prácticamente el único sumidero importante de la energía de olas en las profundidades indefinidas. El ajuste hecho al parámetro de *white-capping* en la configuración del modelo permitió una representación apropiada de la altura de la ola y la forma del espectro de energía.

El modelo de oleaje SWaN reprodujo de manera adecuada los datos registrados por las boyas de oleaje de Dimar para el período analizado, aunque se requiere una investigación adicional sobre los sesgos del signo variable en distintos períodos analizados, probablemente relacionados con la calidad de reanálisis NARR de los vientos en la entrada del modelo del oleaje. Se hizo una suposición que en el transcurso de años analizados las mejoras en la red de observaciones (densidad de cobertura, calidad y nuevas plataformas) pudo afectar las tendencias de la respuesta del modelo.

El grado de correlación lineal entre el modelo y los datos varía entre 0,69 y 0,87, lo que indica un grado satisfactorio de correspondencia entre ellos. En el dominio de la probabilidad los datos presentan un buen ajuste entre las probabilidades de no excedencia, lo que indica que el modelo simuló de manera adecuada los datos en campo. Por ello, se considera que los campos de oleaje obtenidos forzando el modelo SWaN con los reanálisis NARR en el Caribe colombiano proporcionan una base de datos con una elevada resolución espacio-temporal, que puede ser utilizada para la realización de actuaciones en el litoral y para el estudio del clima marítimo en la zona.

LITERATURA CITADA

- [1] Booij, N., Haagsma, I.J., Holthuijsen, L., Kieftenburg, A., Ris, R., van der Westhuysen, A. & Zijlema, M. (2004). SWAN User Manual, Cycle III Version 40.51. Delft University of Technology, Netherlands, 115 pp.
- [2] North American Regional Reanalysis. National Centers for Environmental Prediction: North American Regional Reanalysis. [Actualizada: julio 12 de 2007; citada: agosto 2 de 2013]. [Disponible en: <http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/rreanal/>].
- [3] AXYS Technologies Inc. Canada: AXYS Technologies Inc. (AXYS). [Visitado el primero de agosto de 2013]. [Disponible en: <http://www.axystechnologies.com/>].
- [4] Ris, R.C., Holthuijsen, L.H., Booij, N. (1999). A third-generation wave model for coastal regions. 2. Verification. Delft University of Technology. Netherlands, 1999. Journal of geophysical research, Vol. 104, NO.C4, Abril de 1999. Pp. 7667-7681.
- [5] Solvsteen, C. & Hansen, C. (2006). Validation of the operational wave models WAVEWATCH-III and Mike21-OSW against satellite altimetry and coastal buoys. Royal Danish administration of navigation and hydrography. Dinamarca, 2006. [Visitado el 15 de agosto de 2013]. [Disponible en: http://frv.dk/SiteCollectionDocuments/pdf/K4_Validation_wavemodels_WAVEWATCH-III_Mike21-OSW_satellite_altimetry_coastal_buoys.pdf].
- [6] Mulligan, R.P., Bowen, A.J., Hay, A.E., van der Westhuysen, A.J. & Battjes J.A. (2008). Whitecapping and wave field evolution in a coastal bay. Journal of Geophy-

- sical Research, Vol. 113, C03008, doi: 10.1029/2007JC004382.
- [7] Instituto de Hidráulica Ambiental IH Cantabria. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2011). Evaluación del potencial de la energía de las olas. Estudio técnico PER 2011-2020. Madrid.
- [8] Agudelo, P., Restrepo, A., Molares, R., Torres, R. y Osorio, A. (2005). Determinación del clima de oleaje medio y extremal en el Caribe colombiano, Bol. Cient. CIOH No. 23. ISSN 0120-0542. Pp. 33-45.
- [9] Ortiz, J., Martínez, F., Díaz, E., Bacca, L. (2008). Estudio del oleaje generado por el huracán Joan en la costa Caribe colombiana en 1988, incluyendo a la Isla de San Andrés. Revista Colombiana de Física, Vol. 40, No. 2, julio 2008.
- [10] Osorio, A., Mesa, J., Bernal, G., Montoya, R. (2009). Reconstrucción de cuarenta años de datos de oleaje en el mar Caribe Colombiano empleando el modelo WWIII™ y diferentes fuentes de datos. Boletín científico CIOH No. 27, ISSN 0120-0542. Pp. 37-56.
- [11] Thomas, Y., Nicolae, A., Durand, P., Posada, B., García, C. y Andrade, A. (2011). Altura Significativa del oleaje en la Cuenca colombiana del Caribe, datos de altimetría radar. Boletín científico CIOH No. 29, ISSN 0120-0542, 27-45. Pp. 27-45.
- [12] Ortega, S., Osorio, A., Agudelo, P. (2013). Estimation of the wave power resource in the Caribbean Sea in areas with scarce instrumentation. Case study: Isla Fuerte, Colombia. Renewable Energy 57 (2013).
- [13] Willoughby, H.E. (2004). Parametric representation of the primary vortex. Part I: observations and evaluation of the Holland (1980) model. Monthly Weather Review. Pp. 3033-3048.
- [14] Tolman, H.L. (1989). The numerical model for hindcasting of wind waves on tides in shelf seas. Technical Report 89-2. Faculty of civil engineering. Delft university of technology. ISSN 0169-6548.
- [15] World Meteorological Organization. (1998). Guide to wave analysis and forecasting. Secretariat of the World Meteorological Organization-Geneva-Switzerland. ISBN 92-63-12702-6. Pp. 70-75.
- [16] Bernal, G., Poveda, G., Roldán, P. y Andrade, C. (2006). Patrones de variabilidad de las temperaturas superficiales del mar en la costa Caribe colombiana. Rev. Acad. Colomb. Cienc., 30 (115): 195-208.
- [17] Booij, N., Haagsma, I.J., Kieftenburg, A., Holthuijsen, L. (2000): SWAN Cycle III version 40.11 Implementation Manual. Delft University of Technology. Chapter 6, 85.
- [18] Komen, G., Hasselmann, S. & Hasselmann, K. (1984). On the existence of a fully developed wind-sea spectrum. J. Phys. Oceanogr., 14 (8), 1271-1285.
- [19] Hasselmann, K., Barnett, T.P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D.E., Enke, K., Ewing, J.A., Gienapp, H., Hasselmann, D.E., Kruseman, P., Meerburg, A., Muller, P., Olbers, D.J., Richter, K., Sell, W. & Walden, H. (1973). Measurements of wind - wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), Dtsch. Hydrogr. Z. Suppl., 12, A8.
- [20] Snyder, R.L., Dobson, F.W., Elliot, J.A. & Long, R.B. (1981). Array measurement of atmospheric, pressure fluctuations above surface gravity wave, J. Fluid Mech., 102, 1-59.
- [21] Hasselmann, S., Hasselmann, K., Allender, J.H. & Barnett, T.P. (1985). Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum. Part II: Parameterizations of the nonlinear energy transfer for applications in wave models, Jnl. Physical Oceanography, 15, pp. 1378-1391.
- [22] Eldeberky, Y. (1996). Nonlinear transformation of wave spectra in the nearshore zone, Ph.D. thesis, Delft University of Technology, Department of Civil Engineering, The Netherlands.
- [23] Hurdle, D.P. & van Vledder, G. Ph. (2004). Improved spectral wave modelling of white-capping dissipation in swell sea systems. Proc. 23rd Int. Conf. on Offshore Mech. and Artic Eng.
- [24] Collins, J.I. (1972). Predictions of shallow water spectra, J. Geophys. Res., 77, No. 15, 2693-2707.
- [25] Méndez, F., Orfila A., Cañellas, T. (2007). Análisis y caracterización del clima marítimo en las Islas Baleares. Informe Final. Universidad de las Islas Baleares, Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados, Consejo Superior de Investigaciones científicas. Islas Baleares. Pp. 8-11.