



## ARTÍCULO

# Asimilación de datos satelitales en un modelo operacional de oleaje en el Caribe

## Satellite Data Assimilation in an operative wave model of the Caribbean

Fecha recepción: 2009-08-29 / Fecha aceptación: 2009-10-28

**Ricardo Torres**, rrtorres@yahoo.com

Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas - CIOH, Isla Manzanillo, Cartagena de Indias, D.T. y C., Colombia.

**Serguei Lonin**, oceanmet.ltda@yahoo.com

Grupo de Investigación en Oceanología, Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla"; Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, DIMAR Cartagena de Indias, D. T. y C., Colombia.

## Resumen

En el mar Caribe se desarrollaron, implementaron y evaluaron dos técnicas de asimilación de datos satelitales en un modelo espectral de oleaje. Uno fue un método secuencial, donde por interpolación óptima se construyó un campo analizado de altura del oleaje, corrigiendo además los espectros de frecuencias del modelo en una distancia de correlación usando el espectro JONSWAP con los parámetros propuestos para el Caribe. Al comparar el campo analizado no se encontró cuantitativamente una mejora con respecto del campo pronosticado, sin embargo, fue evidente con otras pruebas la mejora en los campos de altura del oleaje, la cual permaneció por aproximadamente 24 horas. El otro fue un método variacional de asimilación, basado en la teoría de perturbaciones pequeñas para un funcional que minimiza el error, modificando unas constantes de corrección introducidas a las ecuaciones del modelo. Al no emplearse una distancia de correlación, los resultados desconocieron la heterogeneidad en los campos de oleaje en el Caribe. El desarrollo de estos experimentos permitió calibrar el modelo CaribWAM-III hasta alcanzar niveles adecuados de pronóstico operacional.

**Palabras claves:** Espectro de oleaje, altura significativa de la ola, asimilación de datos, JASON-1, modelo espectral de oleaje.

## Abstract

Two techniques for satellite data assimilation in a spectral wave model are developed, implemented and evaluated in the Caribbean Sea. One of them is a sequential method that created an analyzed wave height field by optimal interpolation, also correcting the frequency spectra of the model within a correlation distance, using the JONSWAP spectra with parameters proposed for the Caribbean. A quantitative improvement was not found when comparing the analyzed to the first-guess fields; however an improvement of the wave height field was evident as result of other tests, which remained about 24 hours. The other technique is a variational assimilation method, based on the small disturbances theory to create a functional that minimizes the error, used to modify some correction constants introduced on the model equations. The results did not consider of the heterogeneity of

the wave fields in the Caribbean, as a correlation distance was not used. Carrying out these experiments allowed the calibration of the CarbWAM-III model to achieve adequate levels for operational forecasts.

**Key words:** Wave spectra, significant wave height, data assimilation, JASON-1, spectral wave model.

## Introducción

Uno de los aspectos más importante de la dinámica del océano que se ha tratado de entender es el comportamiento del oleaje por dos razones. La primera para elaborar pronósticos del estado del mar con el fin de alertar las condiciones esperadas para la navegación y de amenaza a la población costera, salvaguardando la vida humana en el mar; y la segunda, para optimizar el manejo integrado de la zona costera, pues el conocimiento del oleaje es indispensable para la caracterización hidrodinámica del litoral.

Para comprender el comportamiento del oleaje en un lugar, se hacen mediciones *in situ*, las cuales tienen limitaciones en cobertura espacial y temporal. Para generar pronósticos, se han desarrollado modelos numéricos determinísticos, los cuales, si bien permiten numéricamente resolver el comportamiento del espectro de oleaje, siempre habrá incertidumbre en cuanto a la exactitud de los resultados, debido al planteamiento físico no perfecto, el empleo de métodos numéricos con diferentes órdenes de aproximación, la calidad de datos de entrada, restricciones computacionales, entre otros.

Para superar este problema es necesario disminuir al máximo la brecha entre la realidad y las salidas de los modelos numéricos, para lo cual se utilizan técnicas que permiten la asimilación de datos, en las cuales se combinan los diferentes métodos de medición de oleaje con las herramientas de modelación numérica. En este artículo se presenta el desarrollo y evaluación de dos esquemas de asimilación de datos de altimetría satelital, el método secuencial de interpolación óptima y un método alternativo basado en la variación del funcional, ambos implementados en el modelo CarbWAM III, un modelo de tercera generación desarrollado en el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas – CIOH, el cual funciona de manera operacional en el Caribe.

El método secuencial, ha sido utilizado asimilando datos satelitales en modelos de oleaje por Janssen *et al.* [1], Francis & Stratton [2], Bauer *et al.* [3] y Lionello et al [4] Otra propuesta fue presentada por Thomas [5] asimilando datos de boyas y usando el espectro JONSWAP [6] para actualizar el oleaje local en el modelo. El método variacional para la asimilación de datos en un modelo de oleaje fue estudiado por Valk & Calkoen [7], Hasselmann *et al.* [8] y Bauer *et al.* [9]. De acuerdo con Skandrani & Queffeuilou [10], está demostrado que la asimilación de datos de altimetría en modelos de oleaje pueden mejorar los resultados de análisis y en menor medida, mejora los pronósticos de altura significativa ( $H_s$ ) de la ola.

El presente trabajo se realizó como parte del proyecto “Sistema de Predicción Oceanográfica y Atmosférica a Escala Local – SPOA” [11], desarrollado por el CIOH de la Dirección General Marítima – DIMAR entre el 2007 y el 2010.

## Materiales y métodos

### Medición de oleaje

Para este estudio se usaron mediciones de oleaje *in situ* por boyas y con sensores remotos del satélite JASON-1.

Las boyas TRIAXYS de oleaje direccional instaladas por DIMAR como parte del proyecto “Sistema de Medición de Parámetros Oceanográficos y de Meteorología Marina – SMPOM” [12], se emplearon para tres tareas. Primero con el fin de estudiar las constantes del espectro JONSWAP que mejor representaran el comportamiento del espectro de frecuencias del oleaje  $S(f)$  en el Caribe, tal como se describe en el trabajo de Torres & Lonin [13], en el cual se incluye la descripción de las boyas. Segundo, para construir  $S(f)$  a partir de información de  $H_s$  del Satélite JASON-1, con el fin de ser empleados en la asimilación de datos en el modelo de oleaje, como fue propuesto por Torres & Lonin [14]. Tercero, para evaluar los resultados de los métodos de asimilación de oleaje como se describe más adelante en el caso de estudio.

Para este último propósito también se empleó la boya No. 42059 del Centro Nacional de Datos de Boyas – N D B C de los Estados Unidos

([http://www.ndbc.noaa.gov/station\\_page.php?station=42059](http://www.ndbc.noaa.gov/station_page.php?station=42059)), la cual incluye sensores meteorológicos e información de  $H_s$  (WVHT). Igualmente es posible acceder a los datos del  $S(f)$  con 46 frecuencias, iniciando en 0.033 Hz y finalizando en 0.485 Hz, con una separación de frecuencias no constantes que van desde 0.004 hasta 0.02 Hz. Para cada frecuencia se presenta un valor de energía. No se cuenta con información direccional del oleaje. Para todos los casos se empleó como altura significativa el valor de  $H_{mo}$  ( $H_s$  calculado a partir del espectro de olas), el período pico  $T_p$  (la frecuencia en la cual el espectro posee el valor máximo) y el período medio (promedio del período calculado del tren de olas – cruces por el cero). Los datos de las boyas TRIAXYS utilizados tenían una discretización del período medio de 0.5 segundos y de  $H_s$  de 0.2 metros, en tanto que la boya del Caribe Este cuenta con valores con resolución de 0.1 metros.

De manera similar, los datos de oleaje medidos por el satélite JASON-1, fueron empleados con dos propósitos. El primero en la construcción del  $S(f)$  a partir de información de  $H_s$  utilizando información del producto operacional OSDR (Compendio de Datos Operacionales del Sensor), disponibles con un retraso de 3 a 5 horas, lo que permite utilizarlo en la asimilación de datos al modelo. Como fue propuesto en [14], a estos datos se les aplicó una corrección para eliminar errores sistemáticos y el control de calidad necesario para alcanzar la exactitud del producto IGDR (Compendio Intermedio de Datos Geofísicos), el cual cuenta con mayor nivel de procesamiento y exactitud, por lo cual está disponible con un retraso de 2 a 3 días. El segundo propósito fue para emplear los datos del satélite en la asimilación en el modelo de oleaje como se describe en el caso de estudio. Estos datos se prefirieron sobre los de las boyas para la asimilación por la cobertura espacial de los datos y la continuidad de las series de tiempo [15].

### Descripción del modelo

El CIOH desde 1996 inició una serie de experimentos que le permitieron poner en funcionamiento un modelo de oleaje de tercera generación [16] para el dominio del mar Caribe [17]. Este modelo se basa en el NedWAM (Netherlands Wave Model), pero el desarrollo e implementación de sus códigos de programación como parte del proyecto SPOA [11] llevaron a que, a finales del 2007, la versión se

denominara CaribWAM-III [18]. El modelo no tiene en cuenta los efectos de la variación de la densidad de la energía como consecuencia de los procesos en aguas someras ni por las corrientes, en una simplificación para procesos de oleaje en aguas profundas.

Tiene una resolución de 25 frecuencias y 12 direcciones, y utiliza una malla de coordenadas esféricas de 125 x 55 nodos de cálculo con una resolución aproximada de 18 kilómetros. Los límites del dominio son en latitud: 8.547°N, 18.392°N, y en longitud: 60.985°W, 83.824°W. El esquema de transporte es no central de tercer orden  $O(x^3, y^3)$ , al ofrecer mayor exactitud en la conservación integral del espectro [18]. Se cuenta con un flujo continuo de entrada incluyendo la historia de los procesos, para lo cual lee una lista de archivos de viento a usar en la modelación provenientes del modelo atmosférico global de la UKMO (Oficina Meteorológica del Reino Unido) con información cada 6 horas, lo que permite el flujo continuo de entrada. Para la historia de los procesos se tiene un espectro de cinco dimensiones  $S(x, y, t, \dots)$ , que permite el “arranque en caliente” (hot start) con la información de salida que fue guardada de la corrida anterior del modelo. El paso del tiempo para los pronósticos es de 10 minutos en el CaribWAM-III, por lo que los campos de viento se interpolan linealmente del pronóstico (disponible cada 6 horas) para cada paso discreto. La intensidad del viento se sobreestimó un 30%, de acuerdo con la evaluación de los campos de viento pronosticados realizada por Lonin & López [19], así como pruebas comparando las salidas del modelo con respecto a las mediciones de las boyas de oleaje. CaribWAM-III operacionalmente en el CIOH corre a diario, utilizando el campo de vientos analizado de las 00:00 UTC y sus cinco días de pronósticos.

### Métodos de asimilación de datos de oleaje en el modelo

#### Método secuencial de interpolación óptima.

Lionello *et al.* [4] realizaron la asimilación de datos de altimetría satelital en un modelo de oleaje de tercera generación empleando un método secuencial basado en interpolación óptima por ser esta técnica ampliamente utilizada en meteorología, en el cual se basó la primera propuesta del presente estudio,

empleando información de  $H_s$  del satélite JASON-1, realizándose la asimilación en dos pasos: el primero, los datos de  $H_s$  del satélite se usaron para construir un campo analizado de  $H_s$  por interpolación óptima. En el segundo, se reconstruye el espectro de cinco dimensiones  $S(x,y,t, \dots)$  a partir del campo analizado de  $H_s$ , empleando la construcción del espectro JONSWAP [14]. Con este campo de oleaje analizado, se reemplaza el campo de oleaje pronosticado (first guess) del momento de la asimilación en adelante, tal que en los pasos sucesivos siguientes del CaribWAM-III (cada 10 minutos), se logre la corrección que mejore el pronóstico del estado del mar.

En el primer paso, el campo analizado de altura significativa de la ola ( $H_A^i$ ) para cada nodo de la grilla  $x_i$ , se expresa como una combinación lineal del pronóstico inicial (first guess o background) resultante del modelo  $H_P^j$  ( $j=1, \dots, N_{Obs}$ ), y las observaciones  $H_O^j$ :

$$H_A^i = H_P^i + \sum_{j=1}^{N_{Obs}} W_{ij} (H_O^j - H_P^j), \quad (1)$$

donde  $N_{Obs}$  es el número disponible de observaciones;  $W_{ij}$  es la matriz de pesos escogidos de manera que minimice la desviación estándar del error en el campo analizado  $H_A^j$ . Asumiendo que los errores en el modelo no están correlacionados con los errores en las observaciones, la solución será:

$$W_{ij} = \frac{P_{ik}}{P_{kj} + O_{kj}}, \quad (2)$$

$P_{ik}$  es la función de covarianza entre el modelo y las observaciones;  $P_{kj}$  es la matriz de correlación del error de predicción;  $O_{kj}$  es la matriz de correlación del error de las observaciones.

Para resolver (1) y (2) se planteó la siguiente metodología: del modelo CaribWAM-III se toma  $H_P^i$  para el paso de tiempo más cercano al instante en que el satélite toma los datos  $H_O^j$ . Se efectúa un pre-procesamiento de los datos observados. Se aplica el operador de las observaciones para calcular  $H_P^j$ . Se solucionan las matrices de las ecuaciones (1) y (2). Se calcula  $H_A^i$ .

Para el pre-procesamiento de los datos satelitales disponibles en el archivo OSDR se sigue el procedimiento propuesto por Torres & Lonin [14], incluyéndole un filtro de promedio corrido (boxcar) de 7 datos con el fin de eliminar el ruido causado por el poco número de observaciones en distancias cortas [15]. Se utiliza un operador de las observaciones para calcular los valores de  $H_s$  del modelo, sea del campo pronosticado o del campo analizado (que se encuentran en los nodos de la grilla) en la posición donde se realizaron las observaciones del satélite [15].

Para solucionar las matrices de (2) se utilizó la fórmula (3) [10] para la solución de  $P_{ik}$ , donde  $d_{ik}$  es la distancia entre las posiciones de los nodos  $i$  y las observaciones  $k$ ;  $c$  es la distancia de correlación para la predicción del error de  $H_s$ . Analizando el comportamiento de los datos del modelo, se consiguieron los mejores valores de  $c$  ( $10.7^\circ$ ) y de la potencia (2.25) [15]. Para la solución de  $P_{kj}$  se utilizó la misma fórmula anterior, con el empleo de una matriz de distancias  $d_{kj}$ , en la cual se estimaron las distancias entre sí de las observaciones satelitales.

$$P_{ik} = \exp \left[ - \left( \frac{d_{ik}}{c} \right)^{1.5} \right] \quad (3)$$

Para la matriz  $O_{kj}$ , se asumió que los errores de las observaciones eran aleatorios y no correlacionados [4], por lo que se propuso la solución de la ecuación (4), la cual es una matriz de identidad multiplicada por la relación entre la desviación estándar del error en las observaciones y en el pronóstico inicial del modelo. Usando un valor de  $R=1$  se da igual importancia en la interpolación óptima a las observaciones como al pronóstico inicial del modelo (first guess). corresponde al símbolo de Kroneker.

$$O_{kj} = \delta_{kj} \left( \frac{O}{P} \right) = \delta_{kj} R \quad (4)$$

Con estas matrices se calculó la matriz de asignación de pesos  $W_{ij}$ , a la cual se le aplicó un filtro de acuerdo con la distancia de covarianza de 95 km ( $0.9^\circ$  de latitud) encontrada para el dominio del Caribe [15], de manera que todas aquellas distancias  $d_{ij}$  mayores a la distancia de covarianza se le asignó en la matriz de

pesos un valor de cero, con lo que se limitó espacialmente el efecto de la interpolación óptima. De esta manera usando la ecuación (1) se calcula el campo analizado ( $H_A^i$ ), terminando con el primer paso del método de asimilación de datos.

En el segundo paso se construyó el campo analizado del espectro  $S(x,y,t, \theta)$ . Para esto se modifica el espectro en cada uno de los nodos  $i$  que cumplan la condición:  $H_p^i - H_A^i > 0$ , puesto que implica una modificación en la altura de la ola en este nodo después de la interpolación óptima. A cada uno de estos nodos, en el archivo de salida del CaribWAM-III se tienen 300 valores del espectro del pronóstico  $S_p(f, \theta)_i$ , dada la resolución en frecuencia y dirección. Se calcula en cada frecuencia una matriz de pesos por direcciones. Se calcula el espectro de frecuencias del pronóstico  $S_p(f)$ , así como el área bajo esta curva. Teniendo en cuenta los resultados en [13], el espectro JONSWAP emplea en la reconstrucción del espectro los valores de  $H_A^i$ , limitándose al oleaje local (wind sea), manteniendo el oleaje de fondo (swell) del campo pronosticado, usando para el Caribe como límite la frecuencia de 0.08 Hz. Se calcula el porcentaje de  $S_p(f)$  que corresponde a oleaje local. Con el valor de  $H_A^i$  se calcula el área bajo la curva del espectro analizado empleando (5) [15], donde  $mo_A$  es el momento cero estadístico del espectro:

$$mo_A = \left( \frac{H_A^i}{4} \right)^2 \quad (5)$$

Se calcula el porcentaje de esta área que corresponde al espectro del oleaje local de acuerdo con el porcentaje encontrado del pronóstico. Como se propuso en [14], se calcula el espectro JONSWAP que mejor represente el área bajo la curva de frecuencia de oleaje local, reconstruyendo el espectro analizado del oleaje local para las frecuencias  $f \in [0, 0.08]$  Hz. Se reconstruye el espectro analizado  $S_A(f, \theta)_i$ , manteniendo el mismo espectro para el mar de fondo, y utilizando para el oleaje local la matriz de pesos por direcciones calculada con los datos de pronóstico, de esta manera se mantienen los mismos porcentajes con que la energía de cada frecuencia se encontraba distribuida en las 12 direcciones del pronóstico inicial realizado por el modelo CaribWAM-III. Finalmente

se introducen los valores del  $S_A(f, \theta)_i$  del oleaje local en el modelo, el cual se utilizó como campo inicial del paso de tiempo del modelo siguiente a la hora en que se dio el paso del satélite (hora de asimilación de datos). Este procedimiento se encuentra detallado en [15].

**Método alternativo basado en variación del funcional.** Esta metodología fue propuesta por Lonin *et al.* [18]. El concepto se basa en que existen errores en la información de entrada (campos de viento) y el mismo modelo genera otros errores, normalmente relacionados con la física de procesos y la forma de su descripción. Sin dividir la naturaleza de los errores entre los de entrada (externos) y los producidos por el núcleo del modelo (internos), se introducen unas constantes en las ecuaciones del modelo ante los términos principales de generación, disipación y las interacciones no-lineales y se aplica el método de perturbaciones pequeñas [20] para un funcional  $J$ , que minimiza el error cuadrático entre las observaciones y el pronóstico (first guess) del modelo, corrigiendo las mencionadas constantes:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + C_x \frac{\partial S}{\partial x} + C_y \frac{\partial S}{\partial y} = G_m - D \pm NL, \quad (6)$$

$$F = c_1 G_m - c_2 D \pm c_3 NL \quad (7)$$

donde  $S(x,y,t, \theta)$  es el espectro,  $C_x$  y  $C_y$  son las respectivas velocidades de grupo en proyección a los ejes de coordenadas;  $G_m$  corresponde a la entrada de energía por acción del viento;  $D$  es la disipación de energía y  $NL$  es el término de interacciones no-lineales en el espectro.  $c_1, c_2, c_3$  son las constantes o factores de proporcionalidad. Se asume que la diferencia entre el estado verdadero y el pronóstico se puede corregir mediante la variación de estas constantes, corrigiendo así todas las inexactitudes del espectro de oleaje pronosticado.

El procedimiento para completar la tarea de asimilación de datos con esta metodología requiere seguir tres pasos: 1) correr un problema directo no perturbado (asumiendo  $c_1=c_2=c_3=1$ ) encontrando  $H_s$  del pronóstico. 2) correr el problema inverso en el

tiempo hacia atrás para hallar el campo de la función conjugada, y 3) definir las perturbaciones de las constantes ( $c$ ) y emplear por segunda vez el modelo directo. Los métodos variacionales minimizan las diferencias entre la salida del modelo (pronóstico) y las observaciones durante un periodo completo de análisis, restringido por las ecuaciones que gobiernan el modelo de oleaje. Al encontrar las constantes que minimizan el funcional  $J$ , se puede encontrar el nuevo espectro  $S$  que mejor se ajusta a las observaciones  $H_o$ . Esta corrección del espectro inducida por las pequeñas perturbaciones de las constantes se da por igual en todo el dominio del modelo. En este experimento, se utilizó el caso  $c_1 = c_2 = c_3$ , el cual es el más simple posible.

### Caso de estudio

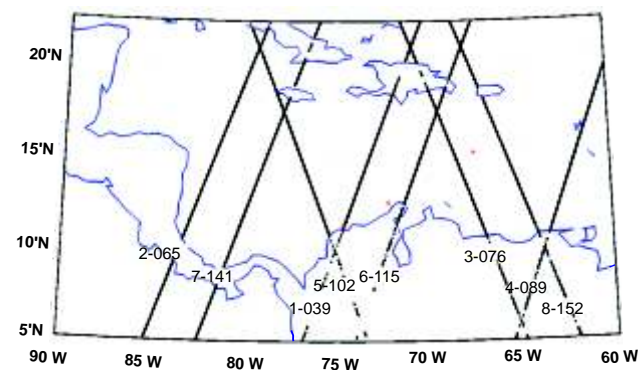
Los experimentos se realizaron en un período de 15 días, de tal manera que los cinco primeros días no se efectuó ningún tipo de asimilación de datos. Durante los siguientes cinco días se realizó la asimilación de datos por los dos métodos a evaluar en ejercicios diferentes. Durante este período se evaluó la mejora en los campos de oleaje del modelo durante el período de análisis. En los últimos cinco días se corrió el modelo sin asimilación de datos, con el fin de evaluar el impacto de los métodos de asimilación en el pronóstico, es decir, evaluando el tiempo durante el cual la mejora se mantenía. Se determinó usar cinco días para cada una de las fases del experimento teniendo en cuenta la distancia zonal del mar Caribe y las características del oleaje local [13].

Para evaluar los resultados se utilizó la información medida *in situ* en tres boyas de oleaje disponibles para la fecha del experimento. Dos boyas TRIAXYS de DIMAR ubicadas en Barranquilla (Lat. 11.533°N – Lon. 74.666°W) y Puerto Bolívar (Lat. 12.35°N – Lon. 72.216°W) y la boya No. 42059 del NDBC en el Caribe Este (Lat. 15°N – Lon. 67.5°W). La ubicación de las boyas se presenta en la figura 1.

**Corrida de referencia.** El modelo CaribWAM-III se empezó a correr desde el día 200000Z abril/08 (la Z indica hora UTC) hasta el día 050000Z mayo/08 (15 días). Se usaron los datos de viento de la UKMO del análisis (+00) y los pronósticos a +06, +12 y +18 horas. Durante este período se guardó cada hora de

salida de CaribWAM-III, con el contenido del  $S(\cdot, f)$ . En total se guardaron 360 salidas correspondientes a 15 días por 24 horas.

**Corrida con asimilación de datos.** La asimilación de datos se realizó entre el día 250000Z abril/08 hasta el día 300000Z abril/08. En este período de tiempo el satélite JASON-1 realizó ocho pases espaciados en el tiempo entre 12.18 y 24.36 horas [15], los cuales se muestran en la figura 1. Los números en negro indican: antes del guión de 1 a 8 la secuencia de pases asimilados. El número después del guión indica el número del pase de la órbita del satélite JASON-1. Las boyas usadas como referencia por tomar datos *in situ*, se presentan en asteriscos rojos.



**Figura 1.** Pases del satélite JASON-1 y con asteriscos rojos boyas usadas en el experimento de asimilación, de suroeste a noreste: Barranquilla, Puerto Bolívar y Caribe Este.

Para la asimilación por el método de interpolación óptima, se corrió el modelo CaribWAM-III hasta el momento del primer pase del satélite (250530Z abril/08). En ese instante se tomó la salida del modelo de oleaje y se transformó aplicándole el método de asimilación, incluyendo la modificación a los espectros. Este resultado se utilizó como campo de entrada para continuar corriendo “en caliente” el modelo CaribWAM hasta el siguiente pase del satélite a ser asimilado, donde se repitió el proceso. La última asimilación se realizó el 291520Z abril/08. A partir del 250600Z abril/08 se guardaron las salidas de CaribWAM-III cada hora hasta el término del experimento el 050000Z mayo/08.

Para este método se utilizó en la matriz de correlación una relación entre la desviación estándar del error en

las observaciones y la desviación estándar del error en el pronóstico inicial de 1:10, con lo cual se dio más importancia a las observaciones ( $R=0.1$  en la ecuación (4)).

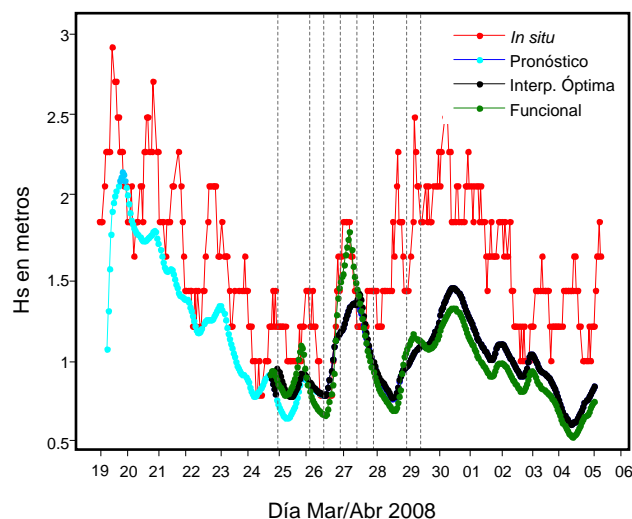
Para la asimilación por el método de variación del funcional fue necesario resolver el problema “directo-inverso-directo”. Para esto se corrió el primer modo directo hasta el momento del primer pase del satélite, corriendo el modelo inverso o hacia atrás cuatro horas, antes de ejecutar el segundo problema directo hasta el momento de asimilación, con la corrección del campo del oleaje. Esto se realiza en los ocho pases del satélite utilizados en los días de asimilación. Las cuatro horas se seleccionaron teniendo en cuenta las características del oleaje en el Caribe así como por la cercanía de las fronteras a varios pases del satélite JASON-1.

## Resultados

### Evaluado en las boyas

Esta evaluación se hizo en cada caso usando una figura, en la cual se presentan cuatro series de tiempo con la altura de la ola (o período) para la posición de cada boya, para lo cual se utilizó el operador de las observaciones a las salidas del modelo. Como referencia se utilizó la serie medida *in situ* con la boya (línea roja). Se incluyen series de la corrida del pronóstico (o background en línea azul), asimilación por interpolación óptima (línea negra) y por variación del funcional (línea verde). Las líneas verticales punteadas en gris indican los ocho instantes en que se realizó la asimilación de datos del satélite. En la figura 2 como ejemplo se presentan los 15 días de la serie de tiempo de  $H_s$  de la boya de Barranquilla. Nótese el limitante de la discretización de los datos de las boyas TRIAXYS con la resolución de 0.2 metros.

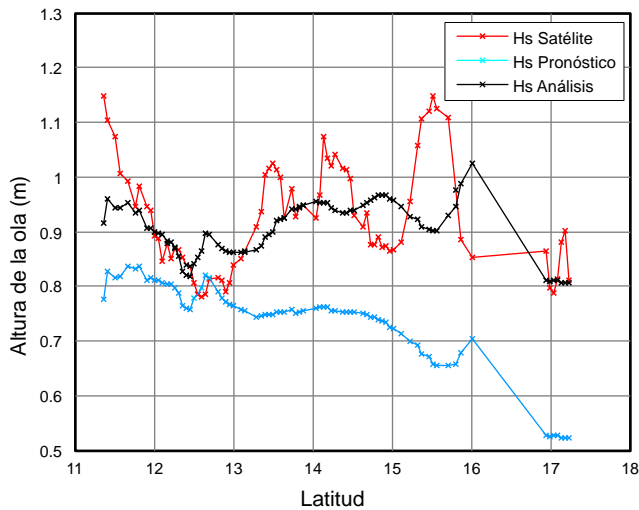
En términos generales se encontró como el pronóstico o corrida de referencia subestimó el oleaje de la boya en Barranquilla, mostrando un buen ajuste en las otras dos boyas, especialmente en la del Caribe Este. Este comportamiento se debe a la subestimación del modelo atmosférico a los valores de velocidad del viento cerca de la costa, como fue presentado en [18], lo que será analizado en la discusión.



**Figura 2.** Altura de la ola en la ubicación de la boya de Barranquilla.

En cuanto al método de asimilación por interpolación óptima, se observó en las boyas como éste corrige el oleaje pronosticado, cuando éstas se ubicaban dentro del límite de la distancia de covarianza, o al oeste del paso del satélite, dada la advección predominante del oleaje en esta dirección como sucedió en el caso del pase 8 y la boya del “Caribe Este”. En esta boya también se observó que este método no corrigió el campo de oleaje significativamente durante la asimilación, debido en parte a la alta correlación de la corrida de pronóstico (background) con respecto a las mediciones de la boyas.

En la figura 3 se presenta el resultado de la interpolación óptima a lo largo del pase 039 por el Caribe, mostrando una mejora en el análisis con respecto al pronóstico en casi todo el transecto medido por el satélite, lo cual fue evidente en todos los pases asimilados. Este método para mares cerrados como el Caribe presenta dos dificultades. La primera por las mediciones de altimetría cerca de tierra, las cuales no superan las banderas de calidad aplicadas a los datos del satélite. La segunda, el método de interpolación propuesto presenta dificultades para corregir el oleaje cerca de tierra.

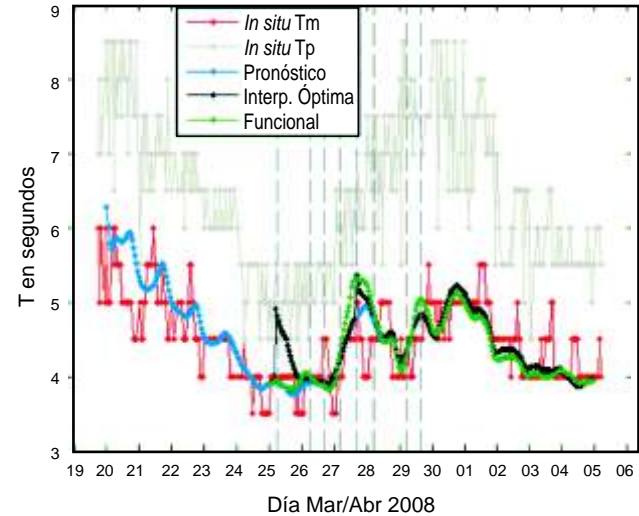


**Figura 3.** Interpolación óptima pase 039 satélite JASON-1.

En la figura 4 se presentan los resultados de la asimilación con respecto al período en la boya de Barranquilla, lo cual es de especial interés para el método de interpolación óptima, teniendo en cuenta que en la metodología propuesta se está asimilando el espectro del oleaje reconstruido. En esta figura en rojo se muestra el período promedio de la ola, en tanto que en gris el  $T_p$ , ambos medidos por la boya. Se observan claramente las diferencias entre los dos valores. En general, el modelo representa de buena manera el período promedio, y sigue el comportamiento general del  $T_p$ . Se resalta cómo el método de interpolación óptima en los pases primero y quinto, aumenta significativamente el valor del período, por ser estos pases los más cercanos a esta boya.

Con esta gráfica es difícil evaluar los resultados en términos del período en la asimilación de datos, por cuanto en el primer momento de asimilación lo modifica acercándolo al valor de  $T_p$ , pero lo aleja del período promedio. Nótese el limitante de la discretización de los datos de la boya de 0.5 segundos al medir el período. Esta diferencia entre el comportamiento de los dos periodos calculados por las boyas también se presentó en el estudio de Skandrani & Queffeuilou [10], por cuanto el modelo sobreestimaba el período promedio de la ola, en tanto que subestimaba el  $T_p$ . Ortiz & Mercado [21] encontraron que el modelo también subestimaba el  $T_p$  calculado por boyas *in situ*, lo cual es un comportamiento común en la mayoría de los modelos

numéricos de oleaje [22]. Teniendo en cuenta lo anterior, más adelante se analizaron los resultados de la asimilación del período verificando el comportamiento del  $S(f)$ , y la permanencia de los efectos de la asimilación en el tiempo.



**Figura 4.** Período de la ola en la ubicación de la boya de Barranquilla.

El método de asimilación de datos por variación del funcional mostró cómo, en cada pase, podía mejorar la altura del oleaje pronosticado al compararlo con una boya, pero empeorarlo con respecto a otra. Esto se debe a que el método de variación del funcional que se está evaluando no cuenta con una distancia de correlación, sino por el contrario, al asimilar un pase del satélite, corrige por completo el campo del oleaje del dominio del modelo, lo cual no siempre produce mejoras, dada la heterogeneidad del campo de oleaje en el Caribe.

Después del período de asimilación no se encontró ninguna modificación con respecto a la corrida de referencia.

### Descripción cuantitativa

Para realizar una valoración cuantitativa de los resultados, se utilizaron los siguientes índices, que además permiten comparar los resultados con estudios similares previos. En el trabajo de Ortiz & Mercado [21] se evaluaron los resultados de modelación



numérica de oleaje con respecto a boyas utilizando el índice de Willmott (D), y el índice del promedio de desviación (bias) [23], teniendo en cuenta que Wornom & Welsh [24] encontraron que este índice es más sensitivo a los errores de modelación que la desviación estándar de la diferencia entre la predicción y los datos observados. Los índices están definidos de la siguiente manera:

$$D = 1 - \frac{\sum_{n=1}^N (P_n - O_n)^2}{\sum_{n=1}^N (|P_n - O| + |O_n - O|)^2} \quad (8)$$

$$bias(P) = \frac{\sum_{n=1}^N (P_n - O_n)}{\sum_{n=1}^N O_n} \quad (9)$$

donde  $N$  es el número de valores evaluados,  $P_n$  son los valores de predicción del modelo,  $O_n$  es el dato observado por la boya y  $O$  es el promedio de las observaciones. El tercer índice utilizado fue el coeficiente de correlación, el cual permitirá comparar los resultados con otros trabajos por ser un índice altamente empleado. El índice de Willmott va de cero a uno, a mayor valor indica mayor concordancia entre

las series. El índice *bias* indica en promedio el porcentaje en que el modelo sobre o subestima los datos. Por ejemplo, en Barranquilla al comparar la corrida de referencia con la boya durante los 15 días del experimento (tabla 1, fila 1), se obtuvo un valor de -0.280, esto indica que el modelo subestimó en un 28% la altura de la ola medida por la boya. El coeficiente de correlación tendrá valores de -1 a 1, donde el cero indica que no hay relación entre las series, valores positivos entre más altos, indican una relación directa más fuerte.

En la tabla 1 se presentan los valores de los índices encontrados para las tres boyas, en los casos de pronóstico, interpolación óptima y variación del funcional, durante el ejercicio de asimilación (5 días), después de la asimilación (5 días), y además, en el caso de la corrida de referencia para toda la serie de tiempo (15 días).

El mejor ajuste de la corrida de referencia a los datos de la boya fue en el Caribe Este, donde el índice de Willmott muestra una concordancia del 93.4% con una sobreestimación promedio (*bias*) del 0.3%. Le sigue Puerto Bolívar con una concordancia del 90.7%

**Tabla 1.** Resumen de resultados experimentos de asimilación.

Fila	Boya	Compara Boya Vs:	Parte de la Serie	Corr.	Bias	Willmott	
1	Barranquilla	Pronóstico	Toda	0.707	-0.280	0.65740	
2		Pronóstico	Durante la Asimilación	0.426	-0.304	0.50812	
3		Inter. Óptima		0.362	-0.285	0.50035	
5		Var. Funcional	0.403	-0.272	0.54495		
7		Pronóstico	Después de la Asimilación	0.764	-0.351	0.55802	
8		Inter. Óptima		0.764	-0.351	0.55810	
10		Var. Funcional		0.773	-0.410	0.52122	
12		Puerto Bolívar	Pronóstico	Toda	0.889	-0.086	0.90797
13			Pronóstico	Durante la Asimilación	0.900	-0.084	0.91912
14			Inter. Óptima		0.894	-0.088	0.91524
16	Var. Funcional		0.832		-0.074	0.88958	
18	Pronóstico		Después de la Asimilación	0.869	-0.080	0.89680	
19	Inter. Óptima			0.869	-0.080	0.89683	
21	Var. Funcional			0.866	-0.167	0.86004	
23	Pronóstico		Toda	0.874	0.003	0.93407	
24	Caribe Este		Pronóstico	Durante la Asimilación	0.836	-0.026	0.90930
25		Inter. Óptima	0.836		-0.025	0.90931	
27		Var. Funcional	0.751	-0.016	0.85965		
29		Pronóstico	Después de la Asimilación	0.935	0.082	0.94870	
30		Inter. Óptima		0.940	0.093	0.94675	
32		Var. Funcional		0.944	-0.006	0.97053	

y subestimación promedio 8.6%. La de menor concordancia fue Barranquilla con el 65.7% y una subestimación del 28% en promedio. En la discusión se analiza la razón de este comportamiento en Barranquilla, el cual es causado por subestimaciones del modelo atmosférico utilizado.

Durante la etapa de asimilación, como después de esta, en ninguna de las boyas se logró cuantificar una diferencia significativa entre el pronóstico y alguno de los métodos de asimilación.

#### Asimilación del espectro por interpolación óptima

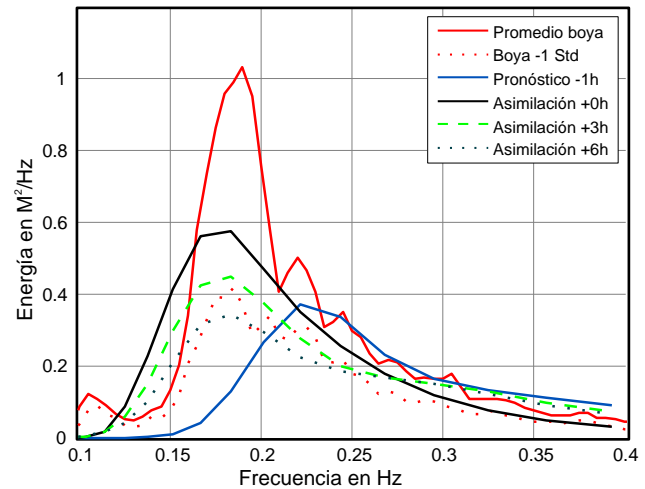
En la figura 4 se observó un aumento en el período al momento de la asimilación del pase 039, pero no fue claro si mejoraba o no los resultados por la diferencia entre el período de los modelos y el período medido por la boya, sea el pico o el medio. En esta sección se observa en la boya de Barranquilla el comportamiento del  $S(f)$  durante este momento de asimilación de datos.

El primer pase asimilado del satélite JASON-1 fue el 039, el cual pasó por el Caribe el 25 de abril/08 a las 0531 UTC. En la Figura 5 se presentan los siguientes  $S(f)$ . En rojo el promedio de 12 horas de la boya, con el fin de evitar el ruido aleatorio que se encuentra en las mediciones horarias. La línea roja punteada indica el límite inferior de 1 desviación estándar. Los otros  $S(f)$  corresponden al nodo más cercano a la boya del modelo CaribWAM-III (aproximadamente 6 km al NW). En azul, el espectro del pronóstico (antes de la asimilación). En negro sólido, el espectro al momento de la asimilación. En negro, línea rayada, 3 horas después de la asimilación. En negro línea punteada, 6 horas después de la asimilación.

Es evidente al comparar las líneas azul y negro sólido que la construcción del espectro con mediciones satelitales como fue propuesto en [14], logró mejorar el  $S(f)$  del modelo en el nodo evaluado.

Nótese en la figura 3 cómo en la asimilación por interpolación óptima de este pase, en el nodo más cercano a tierra (aproximadamente latitud 11.2° N) logró mejorar el valor de  $H_s$  aumentándolo unos 11 cm, faltándole aún aproximadamente 20 cm para ajustarse a la medida de  $H_s$  del satélite, por lo cual, en

la figura 5, el espectro reconstruido mejora el resultado sin alcanzar a reproducir por completo el espectro de la boya. Como se comentó anteriormente, esta falta de ajuste del método de interpolación óptima en las mediciones cerca de tierra, hace que su comprobación con respecto a boyas en la zona costera no sea ideal.



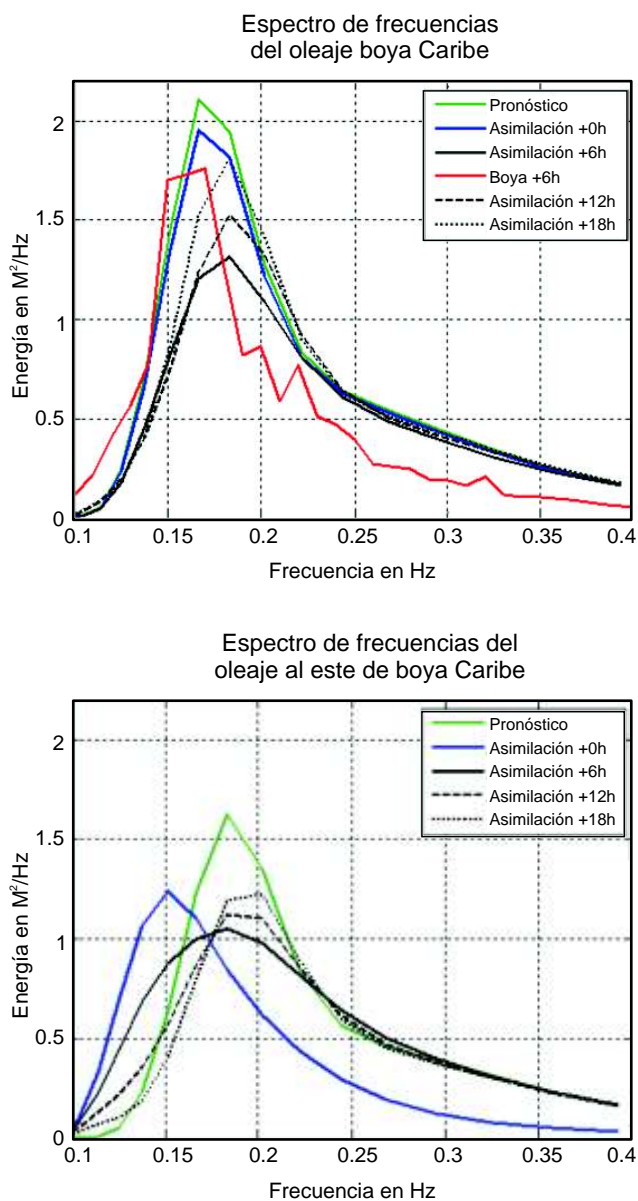
**Figura 5.**  $S(f)$  en la boya de Barranquilla durante el primer pase asimilado. Ver la explicación de las líneas en el texto.

#### Tiempo de duración de la asimilación

**Primer ejercicio.** Se realiza para el método de interpolación óptima, verificando el  $S(f)$  en los nodos del modelo. Se utilizó el octavo pase asimilado, por cuanto no se observó una modificación de  $H_s$  en la boya del Caribe Este, al momento de la asimilación de este pase (por no estar la boya dentro de la distancia de correlación empleada), pero un tiempo después se observó una ligera variación, en lo que se consideró fue causado por el transporte del espectro asimilado.

En la figura 6 se presentan los  $S(f)$  de dos nodos del modelo CaribWAM-III. A la izquierda, el nodo más cercano a la boya del Caribe Este. A la derecha el nodo a la misma latitud de la boya, pero en la longitud sobre la cual pasó la huella en tierra del satélite (Lat. 14.93° N, Lon. 65.71° W), esto es aproximadamente a 188 kilómetros al este de la boya a la misma latitud, donde por efecto de la asimilación  $H_s$  aumentó en 20 cm. El transporte del oleaje en el Caribe es principalmente en sentido oeste de acuerdo con la dirección de los vientos predominantes.

Se presenta en verde la salida del pronóstico; en azul el instante de asimilación. En negro sólido, seis horas después de la asimilación. En negro rayado, 12 horas después y en negro punteado, 18 horas después de la asimilación. En el nodo de la boya del Caribe Este se incluye en rojo el  $S(f)$  del promedio de seis horas de datos alrededor del momento de asimilación.



**Figura 6.**  $S(f)$  en nodos del modelo cerca de la boya del Caribe Este durante el octavo pase asimilado.

En la figura 6 se observa en el nodo al este de la boya (derecha), como se disminuyó el  $S(f)$  del pronóstico al momento de la asimilación, el cual disminuye un poco más 6 horas después, y en las 12 y 18 horas siguientes va aumentando “regresando” al  $S(f)$  del pronóstico (línea verde). Esto se debe a que en el método de interpolación óptima evaluado, no se modifica el viento como lo propuso Lionello *et al.* [4]. Esto hace que al parecer el tiempo en que dura la asimilación en un nodo puede durar más de 18 horas, mientras tiende a recuperar el  $S(f)$  correspondiente al campo de viento que esté forzando el modelo.

En el nodo cercano de la boya del Caribe (figura 6, arriba), se observa que al momento de la asimilación el  $S(f)$  no se modifica, lo cual se debe a que está fuera de la distancia de correlación empleada. Sin embargo, se observa como seis horas después el espectro se reduce. Esto debido al transporte de los  $S(f)$  del área de asimilación, en este caso, hacia el oeste. En el nodo más cercano a la boya del Caribe, se observa como 12 y 18 horas después de la asimilación, el viento igualmente regresa el  $S(f)$  a su aspecto inicial.

**Segundo ejercicio.** Este se hizo con el fin de evaluar los tiempos de permanencia de los dos métodos de asimilación, verificando su comportamiento en planta en el dominio del modelo. Se hizo con el primer pase asimilado, por cuanto facilitaba la comparación con la corrida de pronóstico (sin asimilación).

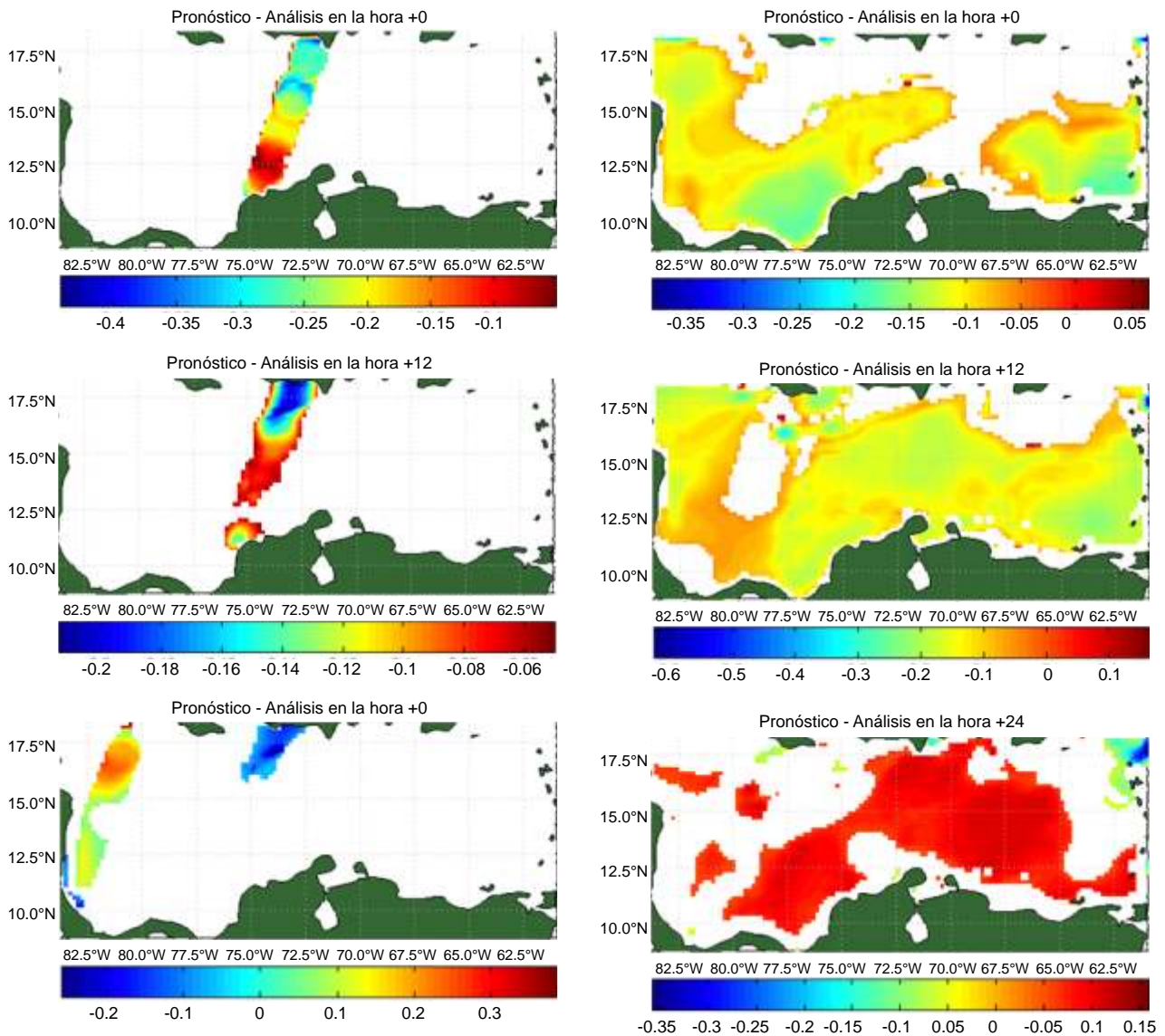
En la figura 7 se presenta la diferencia entre el campo asimilado y el del pronóstico para el método de interpolación óptima (izquierda) y el de variación del funcional (derecha). Arriba en el momento de la asimilación del pase 039, al centro 12 horas después, y abajo 24 horas después. Los valores negativos indican que el campo analizado aumentó la altura de la ola. Para graficar las diferencias se aplicó un filtro eliminando los valores mayores a  $-0.05$  m y menores a  $0.05$  m.

En la figura 7 a la izquierda, arriba, se observa claramente la corrección de acuerdo con la distancia de correlación empleada (95 kilómetros), aumentando el campo analizado hasta 40 centímetros. Obsérvese el meridiano  $75^\circ$  W. En el centro, doce horas después se aprecia como el área modificada se advectó en dirección oeste. La diferencia entre el campo de

referencia y el asimilado disminuyó, esta vez manteniendo valores corregidos hasta de 20 centímetros. Abajo, 24 horas después continuó la advección en dirección oeste (obsérvese el campo del oleaje transportándose al sur de la isla de la Española), casi eliminando por completo el efecto de la asimilación. Igualmente en el recuadro de abajo se observa al oeste, la modificación causada por el segundo pase asimilado (065), en esta ocasión reduciendo los valores de  $H_s$  del campo de referencia hasta casi 40 centímetros.

El método de interpolación óptima evaluado se mantiene aproximadamente por 24 horas pero va disminuyendo con el paso del tiempo la corrección de los campos de oleaje por cuanto no modifica los campos de viento (la causa). Entre mayor haya sido la corrección, mayor es el tiempo de permanencia de ésta.

En la figura 7, a la derecha, se observa como en el momento de la asimilación (arriba) aumentó  $H_s$  en casi todo el dominio del modelo hasta en unos 25



**Figura 7.** Diferencia en planta campos de pronóstico y analizado del pase 039 del satélite JASON-1. Izquierda por interpolación óptima. Derecha por variación del funcional.

centímetros. 12 horas después (centro) se mantuvo la corrección en el mismo orden de magnitud pero en una mayor área. 24 horas después se observa un cambio, al pasar de un campo aumentado a uno disminuido entre 5 y 10 centímetros. Esto se debió a la asimilación del pase 065, el cual disminuyó el campo de  $H_s$  analizado contrario a lo sucedido en el pase 039, el cual había aumentado todo el dominio del modelo.

En este ejercicio se observó el limitante del método de variación del funcional empleado en este trabajo, por cuanto al no tener una distancia de correlación corrige todo el campo, sin tener en cuenta la heterogeneidad del campo del viento en el Caribe.

## Discusión

### Modelo CaribWAM-III sin asimilación

Se utilizaron dos trabajos como referencia para comparar cuantitativamente el comportamiento del modelo de oleaje en su corrida de pronóstico. El primero de ellos fue el de Ortiz & Mercado [21], quienes efectuaron una comparación entre el modelo WAVEWATCH-III (WW3) operacional en la NOAA (a escala global), y el modelo SWAN a escala oceánica, por lo cual la evaluación de los modelos fue con respecto a tres boyas del NDBC en la costa este de los Estados Unidos lejos de la costa (profundidades entre 3164 y 4389 metros).

La evaluación del ajuste del modelo a los datos de las boyas fue realizada usando el índice de Willmott [23], el cual para el WW3 arrojó los mejores valores: 0.82, 0.93 y 0.94, en tanto que utilizando el SWAN los resultados fueron: 0.82, 0.86 y 0.89 respectivamente.

Comparando los valores anteriores con los obtenidos en el presente estudio: 0.65 en Barranquilla, 0.90 en Puerto Bolívar y 0.93 en el Caribe Este (tabla 1), se encontró que el modelo CaribWAM-III sin asimilación de datos ofrece buenos pronósticos, salvo en Barranquilla, por la subestimación del viento que se analiza más adelante.

El segundo trabajo de referencia, es el de Emmanouil et al. [25], quienes estudiaron los impactos de asimilar datos de altimetría satelital en un modelo de oleaje en dos regiones diferentes, el Mediterráneo y el océano Índico. Es especialmente importante la comparación

con los resultados hallados en el Mediterráneo, pues al igual que el Caribe es un mar semi-cerrado, en el cual predomina el oleaje local (*wind sea*) sobre el mar de fondo (*swell*).

En el Mediterráneo, utilizaron el modelo WAM [16] ciclo 4, con una resolución espacial de  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ , con datos de viento horarios en la misma resolución espacial. La evaluación del pronóstico del modelo se hizo con respecto a datos satelitales y a siete boyas. El coeficiente de correlación entre el modelo (sin asimilación) y los datos del satélite fue de 0.88. Lamentablemente no se incluyó el coeficiente de correlación entre el modelo y las boyas en el Mediterráneo en el artículo.

En los 15 días del experimento, durante la corrida de referencia se encontraron valores del coeficiente de correlación de 0.70 en Barranquilla, 0.88 en Puerto Bolívar y 0.87 en el Caribe Este (tabla 1). Los resultados son muy similares a los encontrados en el modelo del Mediterráneo, lo cual es muy bueno si se tiene en cuenta que la resolución espacial del modelo atmosférico empleado en el experimento en el Caribe es aproximadamente siete veces menor con respecto al usado en el Mediterráneo, y con pronósticos cada seis horas.

### Subestimación del viento en la boya de Barranquilla

En los resultados se evidenció que el modelo CaribWAM-III en su corrida de referencia (sin asimilación) se ajustó satisfactoriamente al oleaje medido en la boya del Caribe Este y a la de Puerto Bolívar, subestimando en un 28.0% el de Barranquilla, al parecer por cuanto el modelo atmosférico de la UKMO que se utilizó para forzar el modelo subestimaba el viento en la frontera tierra-mar.

Para correr el modelo CaribWAM-III, a partir de la grilla de viento en superficie del modelo de la UKMO (baja resolución), se interpolan valores a los nodos del modelo de oleaje, el cual tiene mejor resolución, por lo que hay nodos del modelo de oleaje que estando ubicados en el mar, utilizan valores de velocidad del viento en superficie, como si estuvieran ubicados en tierra, subestimando la intensidad real por la diferencia del coeficiente de rugosidad, entre otros aspectos que disminuyen estos valores sobre tierra.

En el experimento se quitaron los valores de todos los nodos en tierra (marcados con base en la línea de costa), extrapolando de los nodos en el mar de UKMO los valores a los nodos de CaribWAM, quitando de esta manera (en cierta medida), el efecto que hace que el viento en el mar cerca de tierra sea subestimado. Esto forzó el aumento en la intensidad del viento en aproximadamente  $1 \text{ ms}^{-1}$  en el área de la boya de Barranquilla, en tanto que no generó prácticamente ningún cambio en las boyas de Puerto Bolívar y del Caribe Este.

En este caso se encontró una mejora en los pronósticos en la boya de Barranquilla, pues el modelo subestimó el oleaje en un 16.719 %, reduciendo el *bias* a casi la mitad. En la boya de Puerto Bolívar el *bias* tuvo una leve mejora pasando de subestimar el oleaje un 8.6% a un 5.6%. En la boya del Caribe Este la variación fue insignificativa. Teniendo en cuenta que el método de blanqueo de la costa aun dejó sobre el mar ciertos nodos ubicados en el modelo UKMO sobre la tierra (debido a la baja resolución de la grilla) y que la influencia terrestre numéricamente afecta más de tres nodos vecinos con una resolución de  $0.56^\circ / 0.83^\circ$ , es evidente que el aumento de la resolución del modelo atmosférico hasta unos seis kilómetros [11] podría resolver el problema de subestimación del oleaje por completo.

### Métodos de asimilación

En el trabajo de Emmanouil *et al.* [25], se concluyó que en el caso del mar Mediterráneo, el impacto de la asimilación de datos fue mínimo, puesto que no encontraron mejoras en el coeficiente de correlación (índice utilizado para cuantitativamente evaluar los resultados), debido (i) al poco número de observaciones, principalmente por la baja calidad de las mediciones satelitales cerca de las costas que no superaban los filtros de control de calidad, (ii) el esquema de asimilación evaluado por ellos, no corregía las entradas del viento del modelo atmosférico, lo cual fue una desventaja del método por ser el mar Mediterráneo dominado por el oleaje local, (iii) debido a las características de la cuenca, en esta se forman áreas separadas donde el impacto de la asimilación sólo es limitado a cada una de ellas, y (iv) a la alta correlación entre los datos del satélite con respecto a la corrida de pronóstico del modelo de oleaje.

La evaluación cuantitativa de los dos métodos de asimilación presentada en la tabla 1 (índice Willmott), no evidenció al igual que el trabajo realizado en el mar Mediterráneo, un impacto significativo en los resultados durante o después de la asimilación. Llamó la atención como en el mar Caribe, el coeficiente de correlación entre el modelo y las boyas (Puerto Bolívar y Caribe Este) fue casi el mismo al encontrado en el trabajo citado (0.88). En general, se encontró como las causas enunciadas en [25] fueron igualmente válidas en los experimentos de asimilación en el mar Caribe.

En Torres & Lonin [13] se encontró como el mar Caribe es dominado por el oleaje local (*wind sea*), siendo el mar de fondo un evento inusual. Para este tipo de mares, es deseable durante la asimilación de datos no solamente corregir la consecuencia (campo de oleaje) sino la causa (campo de viento), siguiendo métodos como los propuestos por [4] y [9]. El método de interpolación óptima evaluado, sigue la propuesta de [4], hasta la construcción de los campos analizados de  $H_s$  y la modificación del  $S(f)$ , lo cual se hace con una aproximación diferente, la cual funcionó satisfactoriamente.

No se implementó la corrección de los campos de viento a partir de las diferencias entre los campos de pronóstico y analizado del oleaje. Se encontró como al no actualizar el viento, el espectro modificado intenta regresar a su estado inicial. Sin embargo, debido al método empleado para reemplazar los  $S(f)$  del modelo de oleaje, las variaciones persistieron hasta 24 horas, dependiendo directamente de la diferencia entre el dato de pronóstico y el analizado. Fue también evidente como estos espectros reemplazados en la distancia de correlación de la asimilación, se transportaban en el dominio del modelo durante aproximadamente 24 horas.

Se encontró cómo los filtros propuestos por Torres & Lonin [14] funcionaron adecuadamente, por cuanto en todas las correcciones del campo de pronóstico a lo largo de la huella en tierra del satélite, se filtraron los datos de tierra sin limitar el número de datos disponibles. Sin embargo, debido a las características de la costa y presencia de islas en la cuenca del Caribe, filtró datos a lo largo del pase del satélite en tierra, lo cual en algunas oportunidades no fue bien resuelto por el método de interpolación óptima.

Se encontró una buena correlación entre los datos del satélite con respecto a la corrida de pronóstico del modelo de oleaje sobre la huella en tierra del satélite, estando las diferencias siempre por debajo de los 60 centímetros, sin embargo, es fácilmente apreciable el impacto positivo de la asimilación de datos, dando valores más ajustados a los datos del satélite. Esto muestra cómo a pesar de que el método de interpolación óptima en los índices de evaluación cuantitativa (tabla 1) no mostró una mejora sustancial (posiblemente por el espaciamiento entre los pases del satélite y la ubicación de las boyas cerca de tierra), si mejoró los resultados a lo largo del pase del satélite. Se propone continuar los estudios para determinar la mejor distancia de correlación para aplicar estas modificaciones, implementar la corrección al campo de vientos y emplear en la asimilación información de varios altímetros satelitales como fue propuesto por Skandrani & Queffeuou [10].

En cuanto al método de variación del funcional, se resalta el haberse logrado implementar el método propuesto por Lonin *et al.* [18], el cual numéricamente funcionó satisfactoriamente durante los experimentos realizados. La principal limitación consistió en no utilizar una distancia de correlación, por lo cual se corrigió todo el dominio del modelo con base en un pase del satélite, desconociendo la variabilidad de los campos de viento y oleaje presentes en el Caribe. Este método cuenta con mucho potencial que podrá ser explotado en el futuro, si se combina como fue propuesto en [18], la modificación de constantes de corrección con las ventajas del método de interpolación óptima, aplicado no a la corrección de la energía (altura) de la ola, sino a dichas constantes.

## Agradecimientos

A la Dirección General Marítima que financió el proyecto SPOA y SMPOM. A PO.DACC-NASA y AVISO-CNES, quienes mantienen la base de datos generada por el satélite JASON, y a NDBC por la información disponible de las boyas de oleaje.

## Referencias bibliográficas

[1] Janssen P., Lionello P., Reistad M. & Hollingsworth A. Hindcast and data assimilation studies with the WAM model during the SEASAT period. *J. Geophys. Res.*, 1989. (94): 973-993.

[2] Francis P. & Stratton R., 1990: Some experiments to investigate the assimilation of SEASAT altimeter wave height data into a global wave model. *Q.J.R. Meteorol.Soc.*, 116, pp. 1225-1251.

[3] Bauer E., Hasselmann S., Hasselmann K. & Graber H., 1992: Validation and assimilation of SEASAT altimeter wave heights using the WAM wave model, *J. Geophys. Res.*, 97, 12, 671-628.

[4] Lionello, P., H. Günther & P.A.E.M. Janssen. 1992: Assimilation of altimeter data in a global third generation wave model. *J. Geophys. Res.* C97, 14453-14474.

[5] Thomas J., 1988: Retrieval of energy spectra from measured data for assimilation into a wave model. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, (114): 781-800.

[6] Hasselmann K., T. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, D. Cartwright, K. Enke, J. Ewing, H. Gienapp, D. Hasselmann, P. Kruseman, A. Meerburg, P. Muller, D. Olbers, K. Richter, W. Sell & H. Walden, 1973: Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), *Dtsch. Hydrogr. Z. Suppl.* A 8(12), 95p.

[7] De Valk C. & Calkoen C., 1989: Wave data assimilation in a third generation wave prediction model for the North sea. Delft Hydraulics Report.

[8] Hasselmann K., Hasselmann S., Bauer E., Bruning C., Lehner S., Graber H. & Lionello P., 1988: Development of a satellite SAR image spectra and altimeter wave height data assimilation system for ERS-1. Max Planck Institut fur Meteorologie, Hamburg, Germany. Report 19, 155 pp.

[9] Bauer E., Hasselmann K., Young I. & Hasselmann S., 1996: Assimilation of wave data into the wave model WAM using an impulse response function method. *J. Geophys. Res.* 101, (C2): 3801-3816.

[10] Skandrani Ch. & Queffeuou P., 2004: Impact of multisatellite altimeter data assimilation on wave analysis and forecast. *Marine Geodesy*, 27: 511 -533.

[11] Torres R. 2006: Ficha anteproyecto "Sistema de Pronósticos Oceánicos y Atmosféricos a escala local – SPOA", DIMAR – CIOH.

[12] Moreno L. & Muñoz A. Desarrollo de un sistema de medición de parámetros oceanográficos y de meteorología marina para el litoral Caribe y Pacífico colombianos. *Boletín Científico CIOH*. 2006. (24): 148-157.

[13] Torres R. & Lonin S. Estudio del espectro de oleaje en el Caribe observado con boyas y su representación en el espectro JONSWAP. *Boletín Científico CIOH*. 2007. (25): 8-18.

[14] Torres R. & Lonin S. Construcción de espectros de oleaje en el mar Caribe a partir de mediciones satelitales. *Boletín Científico CIOH*. 2007. (25): 19-31.

[15] Torres R. 2008: Asimilación de mediciones satelitales en un modelo operacional de oleaje en el Caribe. Tesis de Maestría. Escuela Naval Almirante Padilla, Colombia. 166 pp.

[16] Komen G., Cavaleri L., Donelan M., Hasselmann K., Hasselmann S. & P. Janssen, 1994: Dynamics and modelling of ocean waves. Cambridge Univ. Press, New York. 532 pp.

[17] Lonin S., I. Lonina & J. Tuchkovenko. Utilización del modelo NedWAM para el cálculo y pronóstico del oleaje en el mar Caribe. Boletín Científico CIOH. 1996. (17): 37-45.

[18] Lonin, S., Torres R. & Lonina I. Propagación del oleaje y asimilación de datos satelitales en un modelo espectral de tercera generación. Boletín Científico CIOH. 2007. (25): 32-44.

[19] Lonin, S. & L. López. Comparación de los pronósticos de UKMO y MM5 para su utilización en el sistema de pronóstico oceanográfico del Caribe. Boletín Científico CIOH, 2003. (21): 51-65.

[20] Marchuk, G.I., 1974: Solución numérica de los problemas de dinámica de la atmósfera y el océano. Leningrado, Hidrometeoizdat, 303 p. (en ruso).

[21] Ortiz-Royero, J. & A. Mercado-Irizarry. An intercomparison of SWAN and WAVEWATCH III models with data from NDBC-NOAA buoys at oceanic scales. Coastal Engineering Journal, 2008. 50(1): 47-73.

[22] Wittmann, P.A. 2001: Implementation of WAVEWATCH III at Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center". Oceans 2001 MTS/IEEE Conference Proceedings (available from The Marine Technology society, 1828 L. Street, N.W., Suite 906 Washington, DC 20035).

[23] Willmott, C. J. 1981: On the validation of models. Phys. Geograp. J. (2): 184-194.

[24] Wornom, S. & Welsh, D. 2002: An MPI quasi time-accurate approach for nearshore wave prediction using SWAN code. Part I. Coastal Engineering Journal 44 (3): 247-256; Part II., Coastal Engineering Journal; 44 (3): 257-280.

[25] Emmanouil G., Galanis G., Kallos G., Breivik L., Heiberg H. & Reistad M., 2007: Assimilation of radar altimeter data in numerical wave models: an impact study in two different wave climate regions. Annales Geophysicae; (25): 581-595.