

NOTAS Y CORRESPONDENCIA

PROGRESO EN EL MODELO DE PRONOSTICO DE OLAS HASTA UN MOSAICO GLOBAL MULTIESCALA

Paula Etala¹, Stella Maris Alonso¹, Débora Souto¹, Claudia Romero¹, Pablo Echevarría²¹Servicio de Hidrografía Naval, Buenos Aires, Argentina²Servicio Meteorológico Nacional, Buenos Aires, Argentina

(Manuscrito recibido el 5 de marzo de 2013, en su versión final el 20 de agosto de 2013)

RESUMEN

Este artículo describe la reciente actualización del sistema operacional de pronóstico numérico de olas en SHN/SMN. El modelo de olas SMARA/WAM, basado en una versión casi estándar de WAM 4.0 fue reemplazado por el nuevo modelo WAVEWATCH III® 3.14 multigrilla de NOAA/NCEP. Una versión autónoma para el Atlántico Sur y los océanos australes produjo pronósticos de olas a 4 días 4 veces por día durante algo más de un año. La partición del espectro permite presentar productos más realistas, con superposición de mares en campos pronosticados y múltiples trenes de olas en puntos fijos. Actualmente, un mosaico multiescala provee cobertura global con aumento de resolución espacial y calibración específica sobre la plataforma. En esta última versión se implementó una nueva física basada en WAM 4 para el crecimiento y disipación de las olas, que incluye explícitamente el mar de fondo y mostró un comportamiento más apropiado en los océanos australes. Se muestra la distribución espacial de los parámetros estadísticos de error para ambas implementaciones obtenidos a partir del monitoreo del modelo con observaciones de altura significativa de olas de tres altímetros satelitales. Más recientemente se incorporaron observaciones de altura significativa y periodo del pico en boyas fijas, que permiten una visión más profunda de la dinámica del modelo para su futuro mejoramiento.

Palabras clave: pronóstico numérico de olas, olas oceánicas, meteorología marina

PROGRESS IN THE WAVE FORECAST MODEL UP TO A GLOBAL MULTISCALE MOSAIC

ABSTRACT

This article describes the recent improvements to the operational wave numerical prediction system at SHN/SMN. The SMARA/WAM wave model, based on a quasi-standard version of WAM 4.0 was replaced by the new NOAA/NCEP WAVEWATCH III® 3.14. A stand-alone version for the South Atlantic and Southern Oceans produced 4-day wave forecasts four times daily for over one year. Spectral partitioning allows more realistic products including superposed seas in

forecasted fields and multiple wave trains at fixed points. Currently, a multi-scale mosaic provides global coverage with grid refinement and ad-hoc calibration of parameters over the shelf. In the latter version, new physics based on WAM 4 have been implemented for wave growth and dissipation, which explicitly includes the swell and showed a more adequate behavior at the southern oceans. The spatial distribution of error statistical parameters for both implementations is shown as the result of model monitoring with significant wave height observations from three satellite altimeters. More recent is the incorporation of the significant wave height and peak period time series from fixed buoys, which provide further insight of model dynamics for future improvement.

Keywords: numerical wave modeling, ocean waves, marine meteorology

1. INTRODUCCIÓN

El Sistema Global para el Riesgo y Seguridad Marítimos (GMDSS, por sus siglas en inglés), regulado por la Convención Internacional para la Salvaguarda de la Vida en el Mar, asegura la provisión global de Información de Seguridad Náutica y complementa la Convención Internacional para Búsqueda y Rescate Marítimo. También el Sistema de Apoyo para la Respuesta ante Emergencias de Contaminación Marina para alta Mar cubre áreas con la misma distribución geográfica que el GMDSS y sus mismos Coordinadores Meteorológicos. A su vez, la Comisión Mixta Organización Meteorológica Mundial / Comisión Oceanográfica Intergubernamental para la Oceanografía y Meteorología Marina (JCOMM, por sus siglas en inglés) coordina la diseminación de los avisos y boletines del tiempo y del mar para el sistema GMDSS. En el marco de estos compromisos, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) realiza y difunde pronósticos del tiempo y alertas meteorológicas para las áreas oceánicas adyacentes a nuestro país y el Servicio de Hidrografía Naval (SHN) contribuye al servicio público marino con el desarrollo del sistema de pronóstico numérico de olas. La modelación numérica de los efectos de los fenómenos del tiempo sobre el estado del mar provee guías para el pronóstico y aporta a la prevención de eventos que constituyan una amenaza originada en el mar por factores meteorológicos.

El modelo de olas utilizado operacionalmente para el pronóstico desde 2005 (Etala y otros, 2009) estaba basado en la distribución de WAM 4.0 realizada por el Wave Modelling (WAM) Group (Komen y otros, 1994), que fuera adoptada por el Centro Europeo de Pronóstico a Mediano Plazo (ECMWF). Desde entonces, existieron actualizaciones no distribuidas, tanto en la física y métodos numéricos, como en las nuevas técnicas de cómputo (Janssen, 2007). El esfuerzo de colaboración del SHN y SMN para el desarrollo y aplicación de sistemas de modelación y pronóstico marino se había iniciado con SMARA/WAM (por el entonces denominado Servicio Meteorológico de la Armada) y resultó en la significativa mejora al sistema operacional de pronóstico de olas que es motivo de esta nota.

La iniciativa de desarrollo cooperativo de los National Centers for Environmental Prediction (NCEP) sobre el modelo WAVEWATCH III® incluye importantes actualizaciones de acuerdo con el corriente estado del arte, incorporando diversas ramas de desarrollo (Tolman, 2011). En base a la versión WAVEWATCH III® 3.14 de NOAA/NCEP (Tolman, 2009), el modelo Austral-WWIII para los Océanos Australes y Atlántico Sur produjo el pronóstico numérico de olas operacional en el SMN entre diciembre de 2010 y octubre de 2011, cuando se actualizó a un mosaico global multiescala y un nuevo conjunto de parametrizaciones físicas.

A partir de la iniciativa de verificación e

intercomparación sistemática de sistemas de pronóstico de olas en Bidlot y otros (2002), el Proyecto de Verificación de Pronóstico de Olas (WFVP, por sus siglas en inglés) de JCOMM reúne los pronósticos operacionales de 16 centros y observaciones en boyas fijas y plataformas. SHN/SMN reporta los pronósticos a 4 días del mosaico global Austral-WWIII desde agosto de 2011, en aproximadamente veinte estaciones activas fijas que integran el WFVP en los océanos subtropicales del Hemisferio Sur. El ECMWF colecta y procesa la información para el proyecto y publica mensualmente estadísticas trimestrales de validación por región.

El principal objeto de esta nota es exponer la experiencia en la implementación del modelo WAVEWATCH III® 3.14 de NOAA/NCEP y presentar la aplicación actual del mosaico global multigrilla Austral-WWIII de SHN/SMN. El sistema de pronóstico se presenta brevemente en la sección 2, incluyendo las principales diferencias entre las implementaciones y las parametrizaciones físicas utilizadas en cada caso. Los datos y metodología de validación utilizados se describen en 3. De acuerdo con la práctica habitual en la intercomparación de modelos de olas dentro de un mismo sistema de pronóstico, en la sección 4 se muestran los resultados de validación en la hora 0 de pronóstico o retroanálisis para ambas versiones. A continuación, en la misma sección, se muestra un año de estadísticas mensuales de verificación del pronóstico operacional de Austral-WWIII multigrilla en una boya fija. En la sección 5, se analizan los resultados y las mejoras introducidas con la nueva versión. Finalmente, se resumen las conclusiones en 6.

2. EL MODELO AUSTRAL-WWIII

Austral-WWIII es la implementación de SHN/SMN para los Océanos Australes y el Atlántico Sur del modelo de olas de tercera generación WAVEWATCH III® 3.14 de NOAA/NCEP (Tolman, 2009). La versión inicial (sección 2.3) consistió en un único dominio que abarcaba los Océanos Australes

y el Atlántico Sur hasta los 15° S con una resolución espacial de 0.5° en latitud y longitud. Se denomina “autónoma” a partir de aquí a esta versión, ya que no requiere información de ningún otro modelo de malla más gruesa en sus bordes. En la elección del borde norte, se intentó minimizar en promedio la componente meridional del viento y se asumió perder la información del mar de fondo que se propaga desde el Hemisferio Norte a través de la franja ecuatorial. Esta versión autónoma se mantuvo operativa hasta octubre de 2011, cuando fue reemplazada por el mosaico global. Las islas y accidentes costeros de menor dimensión, que constituyen obstáculos para la propagación de las olas, están representados como obstrucciones de sub-escala, según Chawla y Tolman (2007).

La implementación Austral-WWIII del mosaico global multiescala WAVEWATCH III® (sección 2.4) está enfocada al pronóstico para el Hemisferio Sur y océano adyacente al SE de Sudamérica. La aproximación de este modelo es diferente del clásico anidado sucesivo de modelos de distintas resoluciones en un solo sentido. Este es un único modelo que incluye diferentes componentes en forma de mosaico, con doble sentido de interacción entre ellas. Una componente global de baja resolución es la encargada de generar y propagar las olas desde el Hemisferio Norte en nuestra implementación, con la finalidad de solucionar el problema de la versión autónoma que se menciona en el párrafo anterior.

Los campos de viento en superficie, temperatura de agua de mar, temperatura del aire en superficie y el campo de concentración de hielo marino se obtienen de los pronósticos del Global Forecast System (GFS) del NCEP en su retículo gaussiano T574. El espaciamiento del mismo es constante en longitudes pero irregular en las latitudes. Para esta aplicación particular, el origen de los campos meteorológicos y de hielo se establece en una latitud fija en el extremo sur del retículo del modelo. A los 80° S, el intervalo de latitudes es de 0.2043° y su variación ya es despreciable en este

contexto, de manera que se considera una grilla regular de espaciamiento 0.2045° en longitud y 0.2043° en latitud. En términos espaciales, este espaciamiento representa unos 22 km en latitudes medias.

2.1. Ecuación de balance de la densidad de acción de las olas

En las escalas regionales y oceánicas, que exceden la longitud de onda individual de las olas, los modelos de olas de fase promediada representan el espectro bidimensional de la densidad de energía por unidad de superficie, sin discriminar ondas individuales. La denominada acción de las olas (N) es la densidad de energía dividida la frecuencia intrínseca de cada componente espectral (σ). Localmente, N está definida en un espacio de 4 dimensiones: el espacio geográfico $X = (x, y)$ y el espacio espectral bidimensional $\Delta = (k, \theta)$. Por conveniencia, en este modelo se prefiere en este caso el número de onda k y dirección θ , al más clásico espacio de frecuencia y dirección. La ecuación de balance para la densidad de la acción de las olas en una forma general y referida a un sistema de coordenadas fijo al lecho marino, es:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_{(X,\Delta,t)}}{\partial t} + \nabla_X \left[(Cg + U) N_{(X,\Delta,t)} \right] \\ + \nabla_\Delta \left[c_\Delta N_{(X,\Delta,t)} \right] \\ = S_{in} + S_{ds} + S_{nl} + S_{extra} \end{aligned} \quad (1)$$

en donde el segundo término de la izquierda representa la propagación en el espacio físico o geográfico, con Cg la velocidad de grupo de las olas y U , la de la corriente marina. Similarmente, el tercer término introduce la propagación de la acción de las olas en el espacio espectral, esto es, la transferencia de energía o redistribución entre distintas componentes del espectro. Las velocidades de cambio de los parámetros espectrales de las componentes individuales, dk/dt y $d\theta/dt$, se indican con c_Δ y se originan en las variaciones espaciales de profundidad y corrientes. La primera, forma parte de los efectos de agua poco profunda y del tipo Doppler. La segunda, representa el efecto

de refracción por variaciones de la profundidad y corrientes. Finalmente, con S se simboliza los distintos términos de fuentes y sumideros locales para la acción espectral.

El término de interacción no lineal entre componentes S_{nl} distingue a los modelos de tercera generación y permite obtener la forma del espectro sin recurrir a prescripciones. Con S_{extra} se resume otros términos adicionales que no se explicitan aquí, como crecimiento lineal para inicio desde el reposo, interacciones con el fondo y otros efectos en agua poco profunda. Los términos de crecimiento exponencial por interacción con el viento S_{in} y de disipación S_{ds} se describen más adelante en esta sección, según los paquetes implementados en las respectivas versiones, a partir de Tolman (2009).

La resolución espacial varía con la aplicación y se detalla más adelante en cada caso, mientras que se mantiene la misma discretización del espectro 2-D en las distintas aplicaciones. Se representan periodos entre 2.5 y 24 s, aproximadamente, en 25 frecuencias incrementadas logarítmicamente y se discrimina la dirección en intervalos de 15° . Las corrientes marinas no han sido consideradas en ninguna versión operativa.

2.2. Particiones del espectro de olas

La distribución 3.14 de WAVEWATCH III® incorpora la partición del espectro bidimensional en mar de viento y distintos trenes de mar de fondo para todos los puntos del dominio. La superficie del espectro bidimensional de las olas es tratada en forma similar a una superficie topográfica en la identificación de divisorias de aguas, para determinar sub-picos de energía. Este algoritmo implementado por Tracy y col. (a partir de Tolman, 2009) permite obtener de manera eficiente productos que se acercan más a la experiencia real sobre el océano, que es en general, encontrarse con mares cruzados o distintos trenes de olas. Cada uno queda caracterizado por su altura significativa, periodo y longitud de onda del máximo de

energía o pico (ajustados parabólicamente de los intervalos de frecuencia) y dirección media. La porción del espectro que puede estar siendo afectada por el viento en cada partición se calcula a partir de la velocidad de propagación de cada componente según la frecuencia y la proyección de la velocidad del viento según la dirección. La capacidad de partición del espectro se refleja en dos tipos de productos del Austral-WWIII. Por un lado, boletines de texto con los principales trenes de olas para un punto. Por otro lado, se publican gráficos horarios del campo de mar de viento superpuesto al mar de fondo principal. El mar de viento es la porción del campo de olas que está siendo afectada localmente por el viento. El mar de fondo está formado por aquellas olas que han abandonado su zona de generación y se propagan sin ser afectadas por el viento. Otros detalles sobre estos productos se encuentran en línea en <http://www.smn.gov.ar/>.

2.3. Versión autónoma para los Océanos Australes

El modelo para los Océanos Australes fue calibrado con la altura de ola significativa de los altímetros durante el periodo Enero - Mayo 2010, considerando la física de crecimiento y disipación de Tolman y Chalikov (1996). El término fuente de ingreso exponencial de energía en esta parametrización es

$$S_{in}(k, \theta) = \sigma \beta N(k, \theta) \quad (2)$$

En donde β es un parámetro de interacción olas-viento que depende de la velocidad del viento a una altura igual a la proyección de la longitud de onda de la componente (k, θ) en la dirección del viento. Además de la parametrización del crecimiento, β incluye alguna disipación del mar de fondo por vientos opuestos y el efecto de la estabilidad atmosférica sobre el viento por el contraste de temperatura agua-aire. Se fija una cota máxima al coeficiente de arrastre para viento muy intenso.

Este término fuente de crecimiento está balanceado por la disipación S_{ds} . Una relación

análoga a la disipación turbulenta para las bajas frecuencias,

$$S_{ds}(k, \theta) = -2u_* h k^2 \Psi N(k, \theta) \quad (3)$$

es el efecto dominante, en donde u_* es la velocidad de fricción, h es una medida de la energía en altas frecuencias y Ψ es una función empírica que introduce el efecto del estado de desarrollo de las olas. El valor mínimo de Ψ permitido en el modelo establece una restricción al crecimiento para mares desarrollados. A partir de la puesta a punto se aumentó esta restricción con respecto al valor sugerido, por razones que se discuten en la sección 5. Por otra parte, la disipación para altas frecuencias (no se muestra) es una relación altamente parametrizada, dada una forma exponencial fija de la porción más alta del espectro.

2.4. El modelo Austral-WWIII mosaico global multigrilla

Este modelo global tiene una resolución relativamente baja a partir de los 65° N (1° lat/lon, GLOB) que aumenta a 0,5° lat /lon al sur de los 15° S en el Océano Atlántico y a partir de los 30° S en los Océanos Índico y Pacífico (AUS). Contiene una componente de mayor resolución en el Atlántico Sur desde los 56° S a 25° S y desde la costa hasta los 40° W (PLAT). Con esta última, de 0,20° lat/lon se toma ventaja de la resolución completa actual del modelo atmosférico GFS/NCEP.

En esta etapa también se cambió la selección de la física de crecimiento y disipación al conjunto de parametrizaciones ACC, una de cuyas versiones se evalúa en Ardhuin y otros (2010), y adaptado partir de Ardhuin (comunicación personal). Al término de crecimiento original del modelo WAM4 y sus mejoras (referidos en la introducción), agrega un término específico de disipación según sea el número de Reynolds de la interfase con la atmósfera (Sout). Este decrecimiento se basa entonces en fuerzas viscosas o en la turbulencia producida por la velocidad orbital de las olas y puede aplicarse al mar de fondo solamente como a

todo el espectro completo. También incluye un control sobre el coeficiente de arrastre en viento fuerte. Ajustando convenientemente algunos parámetros de calibración, el término completo es

$$S_{in}(k, \theta) = S_{out}(k, \theta) + \frac{\rho_a}{\rho_w} \frac{\beta_{max}}{\kappa^2} e^z Z^4 \left(\frac{u_*}{C} \right)^2 \cos^{1.7}(\theta - \theta_u) \sigma N(k, \theta) \quad (4)$$

en donde ρ_a y ρ_w son la densidad del aire y del agua, respectivamente, β_{max} es un parámetro constante de interacción olas-viento, x es la constante de von Kármán, u^*/C es una medida del estado de desarrollo de las olas (edad), θ_u es la dirección del viento y Z es la relación en la que Janssen (1991) introduce la retroalimentación de la tensión inducida para las olas en el crecimiento y en el coeficiente de arrastre del viento (acoplamiento). Finalmente, la disipación S_{ds} (no se muestra) es una combinación de un límite por saturación y de la interacción de las olas con la turbulencia atmosférica.

3. OBSERVACIONES Y MÉTODO DE VALIDACIÓN

Las boyas fijas y plataformas son tradicionalmente la fuente primaria de validación de los modelos de olas y del viento en superficie, si bien en general se encuentran bastante cercanas a la costa. Proveen series temporales de viento, altura significativa y periodo del pico o medio, del campo de olas en puntos fijos. En el marco del WFVP, que se menciona en la introducción, el ECMWF realiza el control de calidad y selección de las observaciones de olas y viento en boyas fijas y plataformas según Bidlot y Holt (2006). El conjunto de datos consistido por ECMWF considera datos cada 6 horas para la hora 0 de pronóstico o retroanálisis y cada 12 horas para el resto de los plazos a intervalos de 12 horas. En la sección 4.2 se muestra valores mensuales para cada plazo de pronóstico de la validación local del actual sistema operacional, en una boya y a lo largo de un año. Sin embargo, únicamente las observaciones satelitales permiten obtener

la distribución espacial de los errores del modelo. La validación y calibración inicial de los modelos de olas se basó exclusivamente en la altura significativa e intensidad del viento de los altímetros de radar satelital.

Se destaca el error medio como parámetro estadístico para detectar posibles errores sistemáticos y el índice de dispersión (SI), como medida adimensional de la variabilidad del error. Este último es el desvío estándar de los errores, normalizado por la media de la observación o, lo que es lo mismo, el error cuadrático medio normalizado, previa corrección del error sistemático. El error cuadrático medio (RMSE) es otro elemento considerado en la evaluación. Por otro lado, la evaluación del desempeño del modelo en los casos individuales es una práctica rutinaria, mediante el seguimiento con los datos satelitales disponibles a tiempo casi real.

Las validaciones que se presentan en este artículo se efectúan en base a las mencionadas estadísticas clásicas de error sobre los parámetros integrales del espectro de olas que produce el modelo (sección 3.1). Estos últimos representan al campo de olas y se corresponden con los parámetros extraídos de los registros de boyas fijas y de observaciones de altímetros de radares satelitales (sección 3.2).

3.1 Parámetros integrales del campo de olas a partir del espectro bidimensional

La altura significativa de olas (H_s), definida como la altura media del tercio más alto del campo de olas, se aproxima en el modelo a partir de la integral del espectro local bidimensional de energía en las frecuencias y direcciones (E) como

$$H_s = 4\sqrt{E} \quad (5)$$

El llamado período del máximo o pico (T_p) es el periodo que corresponde al máximo del espectro unidimensional de energía. Este modelo ajusta este parámetro parabólicamente desde los intervalos discretos de frecuencia. En general, corresponde a un tren de olas dominante. Se volverá sobre este concepto en la discusión de

la sección 5.

Los parámetros de altura y periodo producidos por un modelo de olas en cada punto de su retícula son representativos del campo de olas en un área determinada por su resolución espacial. A su vez, la velocidad de grupo de las olas determina la escala temporal que corresponde a la escala espacial de cada modelo. En este sentido, el intervalo de tiempo entre campos sucesivos que produce un modelo debería, idealmente, ser acorde al problema y a su resolución espacial, para lograr una completa cobertura de información. Por ejemplo, para olas en agua profunda con un periodo medio de 12 s, una salida horaria brinda una representatividad espacial de aproximadamente 33 km y para olas de 8 s, esta representatividad disminuye a unos 22 km. Una frecuencia horaria de los campos se ajustaría, por lo tanto, a los casos del área hemisférica y mar adyacente al litoral argentino, respectivamente, para el muestreo en la validación de las aplicaciones descriptas en la sección 2.4.

3.1. Validación con datos de altímetro satelital

Los productos de altimetría en tiempo casi real de la misión Jason-1 (NASA/CNES) se han utilizado en forma continua desde 2004 y anteriormente, los de su misión predecesora TOPEX/Poseidon (NASA/CNES). En los últimos años se sumaron las observaciones del satélite Envisat, de la Agencia Espacial Europea (ESA), fuera de servicio desde abril de 2012, y de la misión para la topografía de la superficie del mar OSTM/Jason-2, que continúa a las anteriores incorporando la participación de NOAA y EUMETSAT. Los datos de Jason-2 se obtuvieron del producto OGDR (Operational Geophysical Data Record) en formato BUFR desde el Sistema Global de Telecomunicaciones (GTS) de la OMM y alternativamente, del servidor operacional del National Weather Service (NWS) de NOAA hasta noviembre de 2011. Por razones técnicas, actualmente el mismo producto se obtiene del NOCD (National

Oceanographic Data Center) de NOAA.

El criterio de control de calidad de los datos de altímetro está definido en función de la validación, considerando la escala de los modelos. Se aplica un criterio de homogeneidad entre observaciones a lo largo de la traza, que tiene en cuenta el error cuadrático medio informado para cada observación por el algoritmo de obtención del proveedor (Etala y otros, 2005). Los rechazos por inconsistencia puede deberse tanto a que el dato sea erróneo, por ejemplo por una cobertura parcial de hielo en el área o por representar rasgos de sub-escala. El espaciamiento de las observaciones de los altímetros a lo largo de la traza (en general, unos 6 km) es mucho menor que el de cualquiera de estos modelos, aunque por el contrario, la cobertura está lejos de lo deseable en dirección transversal a la trayectoria.

El algoritmo que genera los campos espaciales de error agrupa los datos satelitales en ventanas horarias y calcula los valores correspondientes al modelo en cada punto (colocaciones), considerando también salidas horarias del modelo. Las diferencias se agrupan en cajas de $1^\circ \times 1^\circ$, en donde se calculan los distintos parámetros de validación. La cantidad de colocaciones de observaciones y modelo que intervienen en el cálculo de las estadísticas de error depende de la cantidad de satélites, del periodo de revisita de cada uno y del tamaño de las cajas. Considerando que algo más del 10% de las observaciones han sido rechazadas por el control de calidad, la cantidad de colocaciones por caja y por mes en este estudio es del orden de 100, dependiendo de la latitud y no homogéneamente distribuidas.

4. RESULTADOS

4.1. La versión autónoma y parametrización física TC

Los resultados de validación para la versión autónoma incluidos en esta sección corresponden solamente al periodo coincidente

con la etapa pre-operacional de la nueva versión global multiescala, para permitir la comparación entre ambas. En la Figura 1 se muestra el error medio de la altura significativa de olas con respecto a los altímetros mencionados en 3.2, para el periodo agosto-septiembre de 2011. Las zonas de déficit que se observan a sotavento de Australia y Nueva Zelanda se deben en parte a la anulación de la contribución del mar de fondo del Pacífico tropical y Norte por el borde cerrado. A pesar de esto, todavía permanece algún exceso de energía en los mares desarrollados en el Océano Indico austral. La definida distribución espacial de los errores en la altura significativa de olas en los océanos australes no tienen correlato en los errores de la intensidad de viento (no se muestran). Por el contrario, el SI (Figura 2) presenta una distribución homogénea. Este parámetro normalizado con la altura significativa media se mantiene por debajo del 15 % prácticamente en todo el dominio, excepto por el efecto de tormentas aisladas y zonas particulares, como el borde de hielo, en donde presenta valores de hasta 20

4.2. El mosaico global multigrilla y parametrización física ACC

En esta sección se presentan los resultados del periodo pre-operacional del modelo multiescala conjuntamente con la nueva parametrización. Se ajustó el parámetro de acoplamiento olas-viento de acuerdo al campo de viento que se utiliza en esta aplicación. El error medio de la Figura 3 corresponde al mismo periodo de la Figura 1 y se observa que desaparecen las zonas de déficit y exceso más destacadas. Además, la aproximación multiescala permite una calibración más específica para cada subdominio. Se ve en la misma figura que en el área adyacente a la costa argentina hasta los 40° W (PLAT) prácticamente no hay desvío. El SI (Figura 4) arroja valores homogéneamente distribuidos y similares a la versión anterior. El RMSE (no se muestra) también presenta una distribución homogénea, mejorando el de su contraparte en la versión autónoma.

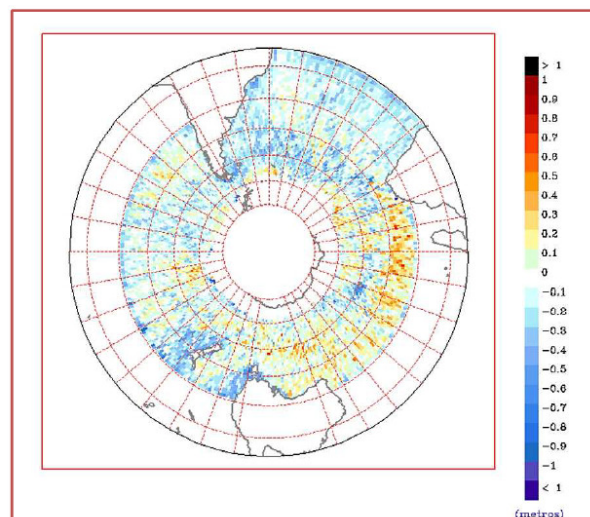


Figura 1: Error medio en metros de la altura significativa de ola del modelo Austral-WWIII en versión autónoma vs. altímetros para el periodo agosto-septiembre de 2011. Versión operacional en ese momento.

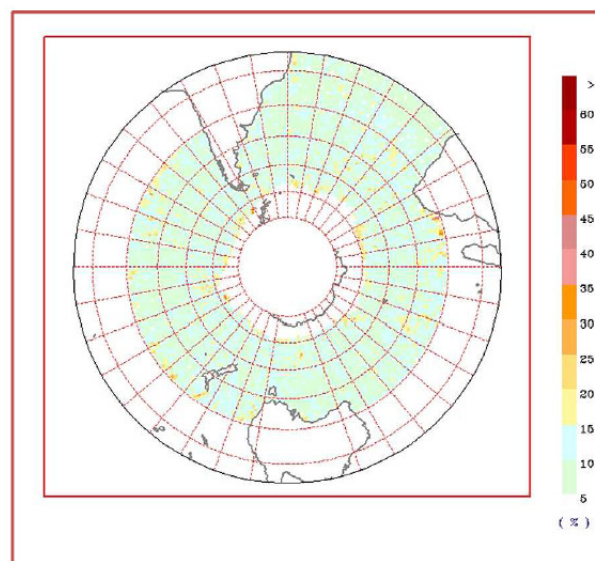


Figura 2: Como la Figura 1, índice de dispersión SI (%).

En la Figura 5 se muestra el desvío y el índice de dispersión SI mensual entre noviembre de 2011 y octubre de 2012 del pronóstico operacional de altura significativa de olas contra la boya fija situada costa afuera de Florianópolis, Brasil.

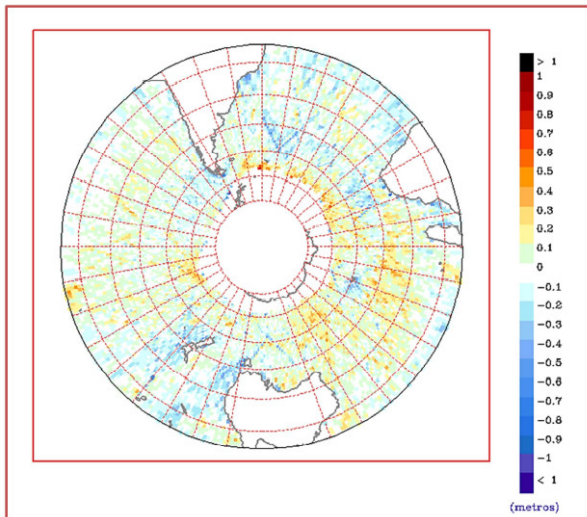


Figura 3: Error medio de la altura significativa de ola del modelo Austral-WWIII multigrilla para el periodo agosto-septiembre de 2011. La versión operacional actual.

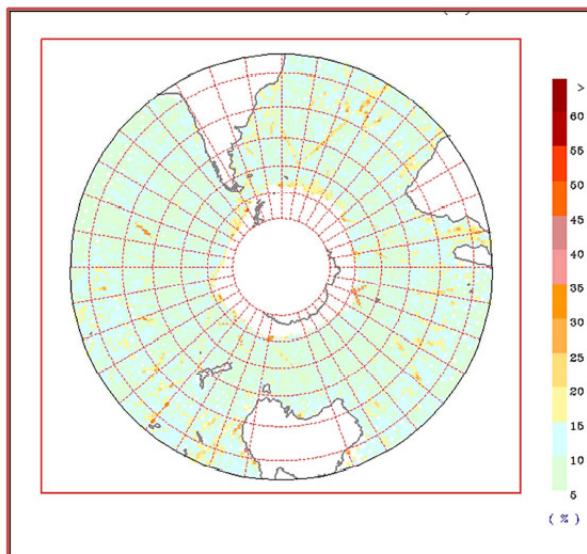


Figura 4: Como la Figura 3, índice de dispersión SI (%).

Las líneas representan los distintos plazos de pronóstico, con el retroanálisis en línea negra más gruesa y el plazo de 96 horas en línea punteada. La Figura 6 presenta los mismos parámetros de error mensual para el periodo del pico máximo, definido en 3.1. Dado el carácter mensual de la estadística de estas

últimas figuras, tanto la estacionalidad como los casos individuales se pueden reflejar en algunas variaciones de los parámetros de error entre plazos o mes a mes.

5. DISCUSIÓN

La distribución espacial de los errores que se muestra en 4.1 sugiere que la parametrización estándar TC en el modelo estaría exagerando el desarrollo en los Océanos Australes. Estos resultados son válidos también para otros periodos de verificación y no están justificados por un desvío del viento. La intervención sobre algunos parámetros, como la contribución negativa al crecimiento del mar de fondo encontrado, produjo efectos generales (no se muestra) y no sólo en aquellas áreas de mares más desarrollados. La limitación extra al crecimiento introducida aquí mediante el aumento de la disipación de ondas largas (sección 2.3), reduce estas asimetrías en los errores, pero produce alguna subestimación en el crecimiento a sotavento de los continentes (Figura 1).

Se aprecia en la Figura 3 que la parametrización ACC (sección 2.4) resuelve el problema de la distribución desigual de los errores. Esta mejora se debe, principalmente, a la consideración de la disipación del mar de fondo en esta nueva parametrización. La versión que se utiliza corresponde a estudios en curso y está sujeta a mejoras en próximas versiones públicas. El análisis de los resultados de validación del periodo del pico todavía sugiere la necesidad de revisar algunos parámetros en esta aplicación, según se detalla en el último párrafo de esta sección. El efecto de la recalibración para vientos GFS/NCEP del parámetro de interacción mar-atmósfera se pueden apreciar especialmente en las áreas de generación a sotavento de los continentes en la Figura 3. El aumento del acoplamiento mar-atmósfera en la componente de mayor resolución disminuye aún más el desvío costa afuera del SE de Sudamérica. Adicionalmente, los resultados del WFVP (<http://www.ecmwf.int/products/>

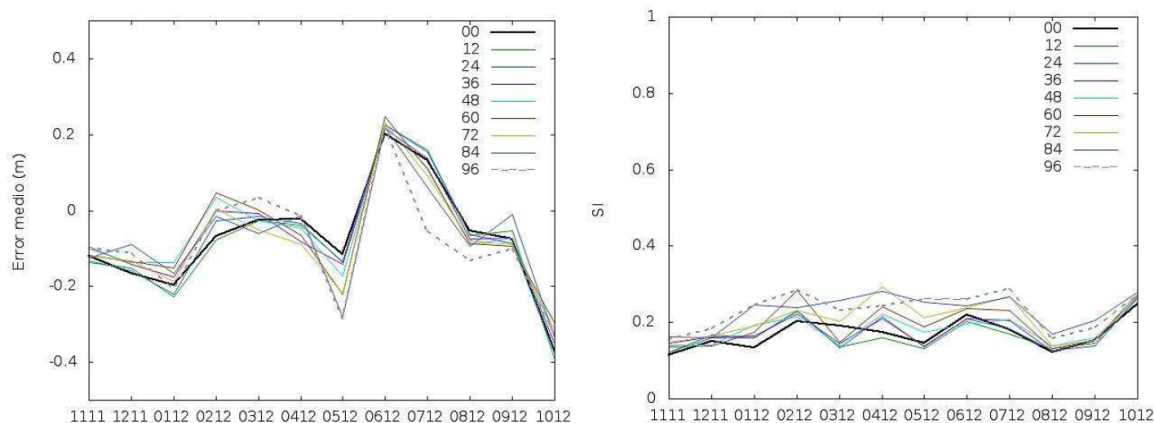


Figura 5: Desvío mensual de la altura significativa de ola (panel izquierdo, en metros) e índice de dispersión normalizado (panel derecho, adimensional) en la boya 31374 (Florianópolis) entre noviembre 2011 y octubre 2012. Las distintas líneas representan plazos de pronóstico. La hora 0 (retroanálisis) en línea negra gruesa y el plazo más extendido (96 hs) en línea punteada.

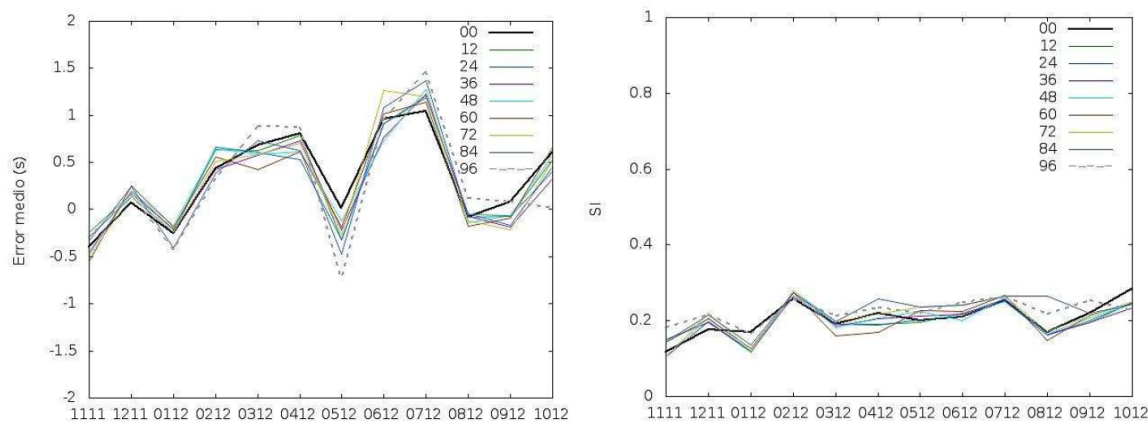


Figura 6: Como la Figura 5, para el periodo del pico de energía. Desvío en segundos.

forecasts/d/charts/medium/verification/wave/intercomparison y sus informes completos en <http://www.jcomm.info/SFSPA>) muestran mes a mes la precisión de este modelo en las costas Este de Australia y Nueva Zelanda. El grupo de boyas del SW de Australia confirma los resultados expresados más arriba en este párrafo acerca de la conveniencia de esta parametrización mejorada del mar de fondo. Cabe señalar que desde mayo de 2012, NCEP también cambió su versión operacional global a este tipo de física de los procesos de crecimiento y disipación.

parametrizaciones TC y ACC se utilizó la misma versión autónoma en ambas y no solamente en el modelo multigrilla, como se muestra en este artículo. De todas maneras, se deduce de la comparación de la Figura 1 y 3 que la versión autónoma no presenta deficiencias significativas en la altura significativa de olas debidas a la restricción del dominio. Únicamente en la variabilidad de los errores de la Figura 2 se detecta una débil señal en los bordes, ya que en ese caso, el error depende de la dirección de las olas. Esta desaparece en la Figura 4, con el dominio global.

Para comparar directamente las

La calibración de los modelos se llevó a

cabo a partir de la información brindada por los altímetros satelitales, esto es, la altura significativa de olas y adicionalmente, la intensidad del viento para la hora 0 de pronóstico. El error en los distintos plazos de pronóstico no se muestra aquí por brevedad, y está relacionado a los errores en el viento pronosticado. Es más importante en las zonas en donde predomina la generación del mar de viento y se suaviza en mares combinados con mar de fondo o de generación remota. A partir de las series mensuales de error de las Figuras 5 y 6, se observa que la diferencia de performance entre distintos plazos de pronóstico es inferior a la variación mensual del error.

La información sobre periodo se incluyó desde la incorporación al WFVP. El análisis de los resultados en el caso del periodo del pico es más delicado que el de la altura, ya que la naturaleza misma del parámetro hace que algún desbalance entre mar de fondo (ondas largas) y el mar de viento (ondas más cortas) puede resultar en una selección incorrecta del mar dominante, lo que implica grandes errores en el periodo del pico. Esto ocurre con más frecuencia en mares leves, en particular en Brasil en donde predominan los mares combinados, sugiriendo que hay más trabajo por hacer todavía en cuanto al balance del acoplamiento mar-atmósfera y la disipación del mar de fondo de la ecuación (4). También existe alguna parte espuria en estos errores, dada por la selección de un dato cada 6 horas en el conjunto utilizado por WFVP. En las curvas horarias se observan trenes de olas que se adelantan o se atrasan pocas horas, de manera que el modelo en algunos casos puede dar un resultado correcto a cabo de ese lapso, pero es filtrado por el método de validación. Todas estas consideraciones han sido comprobadas en el estudio caso por caso.

6. CONCLUSIONES

La migración de la base del sistema operacional de pronóstico de olas al modelo WAVEWATCH III® es un paso mayor que ubica este sistema en el estado del arte actual. Aun para la

aplicación regional, sólo un dominio global o hemisférico representa suficientemente el campo de olas, incluyendo aquellas de generación remota. Los métodos computacionales en este modelo hacen esto posible, por estar adaptados a la nueva tecnología disponible, incluso con medios limitados. La iniciativa liderada por NOAA/NCEP pone a disposición de la comunidad los más recientes avances científicos en cuanto a procesos físicos y métodos numéricos adecuados a sistemas operacionales. Se discuten en esta nota los resultados propios y no propios que avalan el desempeño del sistema operacional dentro de ciertas medidas de consenso internacional. En este sentido, el Proyecto de Verificación de Pronósticos de olas de JCOMM provee una referencia permanente de calidad del sistema de pronóstico.

La identificación de la física de crecimiento y disipación más adecuada a este sistema de pronóstico, enfocado sobre los océanos extratropicales del Hemisferio Sur, permitió lograr por primera vez un modelo con validez homogénea para toda la región, evitando los errores sistemáticos más significativos. Posteriormente, el nuevo modelo global multiescala permite implementaciones locales más específicas, a la vez que el mejoramiento progresivo es más sustentable en el marco de una iniciativa de desarrollo cooperativo. Por otro lado, los nuevos productos de partición del espectro permiten utilizar mejor el potencial de información del modelo como guía para el pronóstico.

Los datos satelitales son los únicos que permiten conocer la distribución espacial de los errores y son una base fundamental para la validación y mejoramiento de los modelos de olas. La calibración que se llevó a cabo con la altura significativa provista por los altímetros resultó consistente con la información de boyas fijas que se obtuvo más tarde a partir del WFVP. La incorporación de la nueva información de período de las olas a partir de boyas resultó fundamental para analizar mejor la dinámica de las olas en el modelo y permite evaluar ajustes

más finos en los mares combinados.

Agradecimientos: El trabajo que se presenta en este artículo fue financiado por los subsidios PIDDEF 0001/08 y 046/10 del Ministerio de Defensa. Los datos de la misión Jason-1 son obtenidos del Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PO.DAAC) en el NASA Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA. Los datos de Envisat se obtienen mediante el ESA Category-1 Project 7256. La licencia de código abierto del modelo WAVEWATCH III® 3.14 fue otorgada por NOAA/NCEP.

REFERENCIAS

- Ardhuin, F., W. E. Rogers, A. V. Babanin, J. Filipot, R. Magne, A. Roland, A. van der Westhuysen, P. Queffelec, J. Lefevre, L. Aouf y F. Collard, 2010. Semiempirical dissipation source functions for ocean waves. Part I: Definition, calibration, and validation. *J. Phys. Oceanogr.*, 40, 1,917–1,941.
- Chawla, A. y H. L. Tolman, 2007. Automated grid generation for WAVEWATCH III. Tech. Note 254, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, 71 págs.
- Bidlot, J. R., D. J. Holmes, P. A. Wittmann, R. Lalbeharry, H. S. Chen, 2002. Intercomparison of the Performance of Operational Ocean Wave Forecasting Systems with Buoy Data. *Wea. Forecasting*, 17, 287–310.
- Bidlot, J. R. y Holt, M. W., 2006. Verification of Operational Global and Regional Wave Forecasting Systems against Measurements from Moored Buoys. WMO/TD-No. 1333, JCOMM Technical Report No. 30, 11 pags.
- Etala M. P., S. M. Alonso y K. López Cristaldo, 2005. Etapa preoperacional de un sistema de pronóstico de olas para el Atlántico sudoccidental y mar argentino, *Anales del CONGREMET IX*.
- Etala, P., S. M. Alonso, D. Souto, C. Romero y M. Suaya, 2009. Pronóstico Numérico Marino en el SHN / SMN, *Anales del CLIMET XIII* / CONGREMET X.
- Janssen, P.A.E.M., 1991. Quasi-linear Theory of Wind-Wave Generation Applied to Wave Forecasting. *J. Phys. Oceanogr.*, 21, 1631–1642.
- Janssen, P.A.E.M., 2007. Progress in ocean wave forecasting. ECMWF Technical Memorandum N° 529, 27 págs.
- Komen, G. J., L. Cavaleri, M. Donelan, K. Hasselmann, S. Hasselmann, y P.A.E.M. Janssen, 1994. *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*, Cambridge University Press, Cambridge, 532 págs..
- Tolman, H. L., 2009. User manual and system documentation of WAVEWATCH III™ version 3.14. NOAA / NWS / NCEP / MMAB Technical Note 276, 194 págs. y apéndices.
- Tolman, H. L. y D. Chalikov, 1996. Source terms in a third-generation wind-wave model. *J. Phys. Oceanogr.*, 26, 2497–2518.
- Tolman H. L., M. L. Banner y J. M. Kaihatu, 2011. The NOPP operational wave model improvement project, 12th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Kohala Coast, Hawaii.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo la licencia Creative Commons, que permite el uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.