

ETAPA PRE-OPERACIONAL DE UN SISTEMA DE PRONÓSTICO DE OLAS PARA EL ATLANTICO SUDOCCIDENTAL Y MAR ARGENTINO

María Paula Etala, Stella Maris Alonso y Karen López Cristaldo
Servicio de Hidrografía Naval
Comodoro Py 2055 piso 15 - 1104 Buenos Aires Argentina
etala@ara.mil.ar

Abstract

A comprehensive system for wave forecasting is presented. From third generation high-resolution wave modeling to text bulletins, through practical tools for forecasters, the wave prediction problem has been addressed with an integral vision for sustained operation. Hindcasts are produced on a continuous basis, as well as twice daily 48-hour forecasts. Significant wave heights from numerical products are validated against near real-time altimeter data. The 48-hour forecast is not significantly biased, except in the Drake Passage area. There, the mean fields show a systematic deficit of wave height, due to the misrepresentation of incoming swells from the Pacific. On the other hand, the text warnings verify correctly in more than 90% of the cases. The pre-operational stage presented here demonstrated the feasibility of the system and showed results in daily practice that are suitable for operational use.

Resumen

Se presenta un sistema integral de pronóstico de olas. Desde modelación de tercera generación en alta resolución hasta boletines de texto, mediante herramientas prácticas para los pronosticadores, el problema de la predicción de olas ha sido encarado con una visión integradora y para su operación sostenida. Se producen retroanálisis en forma continua, así como pronósticos a 48 hs. dos veces por día. La altura de la ola significativa obtenida de los productos numéricos es validada mediante datos de altímetro de radar de tiempo casi real. El pronóstico a 48 hs. no presenta un desvío significativo, excepto en la zona del Pasaje Drake. Allí, los campos medios muestran un déficit sistemático de altura de olas, que se debe a la insuficiente representación del mar de fondo proveniente del Pacífico. Por otra parte, los avisos en texto claro presentan un porcentaje de aciertos superior al 90%. La etapa pre-operacional que aquí se presenta demostró la factibilidad del sistema y arrojó resultados en la práctica diaria que son apropiados para el uso operacional.

1. Introducción

Los desequilibrios resultantes de las perturbaciones sinópticas y de mediana escala generan ondas de gravedad externas en el agua, que se asocian a los efectos del tiempo en mares y costas. Las olas y ondas de tormenta son fenómenos con importante incidencia en el ambiente y actividades marítimas y costeras. Ambos tipos de ondas son considerados por el sistema de pronóstico numérico del Servicio Meteorológico de la Armada (SMARA) mediante modelos específicos. A su vez, estos modelos han sido experimentalmente acoplados y la evidencia observacional sobre el nivel del agua cerca de la cabecera del Río de la Plata ha mostrado un beneficio del acoplamiento a través de la fricción (Etala, 2001).

En este trabajo nos referiremos al pronóstico de olas producidas por el viento y a su propagación fuera de la zona de generación en diferentes condiciones de profundidad, pero lo suficientemente alejadas de la costa para excluir rompientes y resaca. Se hace referencia a Etala y Alonso (1996) para el resumen de antecedentes de pronóstico de olas en el SMARA y del proceso de transición entre el anterior sistema y el presente.

Las validaciones que se presentan aquí están basadas en datos de altímetro de radar de tiempo casi-real de la misión Jason 1, con un control de calidad previo. Los parámetros de verificación utilizados forman parte de la estadística clásica que se aplica a modelos de olas (por ej., Caires y Sterl, 2001). Se muestran también comparaciones realizadas a lo largo de la traza del satélite. Todo los retroanálisis son conducidos por el viento a 10 m de los análisis operativos de

National Centers for Environmental Prediction (NCEP). El pronóstico en el área oceánica se realiza a partir de los pronósticos de viento operativos del NCEP, mientras que el modelo de olas de alta resolución sobre la plataforma es conducido por los pronósticos del modelo de alta resolución del Servicio Meteorológico Nacional, Eta SMN. Gran parte de los resultados de los modelos utilizados han surgido del procesamiento realizado en tiempo real en el Servicio Meteorológico Nacional, en el marco de acuerdos de cooperación.

2. Descripción local y evolución del campo de olas

El campo de olas esta conformado por una superposición de ondas de distinta frecuencia y, como tal, está representado instantáneamente por su espectro bidimensional de energía $F_{(x,y,\omega,\theta)}$, en donde $\omega = \Omega_{(\vec{k},\vec{x},t)} = \sigma + \vec{k} \cdot \vec{U}$ es la frecuencia absoluta y θ , la dirección. Dicho espectro se describe a través de ciertos parámetros integrales que permiten caracterizar el estado del mar, como la *altura significativa de ola* (H_s), *periodo medio* (T_m) y *dirección media* (θ_m). La altura significativa representa la altura media del tercio de olas más altas del espectro. En la práctica, es habitual utilizar el *periodo y dirección del pico de energía espectral* (T_p y θ_p) como parámetros representativos del campo, en vez de los valores medios.

Por razones de conservación de la energía, la ecuación de evolución de la energía se expresa en términos de la acción de las olas $N_{(\varphi,\lambda,\omega,\theta,t)} = F_{(x,y,\omega,\theta)}/\sigma$. La ecuación de balance en coordenadas geográficas (φ,λ) para la acción de las olas, en el caso de profundidad y corrientes estacionarias, es:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + (\cos \varphi)^{-1} \frac{\partial}{\partial \varphi} (\dot{\varphi} \cos \varphi N) + \frac{\partial}{\partial \lambda} (\dot{\lambda} N) + \frac{\partial}{\partial \theta} (\dot{\theta} N) = S_{in} + S_{nl} + S_{dis}$$

en donde los términos de la derecha son los llamados *términos fuente*, de ingreso de energía por el viento, de intercambio no lineal entre componentes del espectro y de disipación, respectivamente.

3. El modelo SMARA / WAM

El modelo de pronóstico de olas **SMARA/WAM** está basado en el ciclo 4 del modelo de tercera generación del Wave Modelling Group (**WAM**). WAM 4 integra en el tiempo la ecuación de evolución del espectro de acción de las olas, teniendo en cuenta los factores cinemáticos y dinámicos que modifican la energía espectral, sin ninguna restricción sobre la forma del espectro (tercera generación). Su descripción completa se puede encontrar en “Dynamics and Modelling of Ocean Waves” (Komen et al., 1994), mientras que los detalles de su implementación operativa en el Centro Europeo de Pronóstico a Mediano Plazo (ECMWF) se encuentran en Janssen y Bidlot (2003).

SMARA/WAM para el Atlántico Sudoccidental está implementado sobre un retículo de 1° lat./lon. que abarca la Metarea VIⁱ. Esta versión incluye el cálculo de efectos de agua poco profunda, sin refracción por profundidad o corrientes. Se realizan dos pronósticos diarios a 48 horas a las horas 00 GMT y 12 GMT. Estos pronósticos son conducidos por campos de viento a 10 m sobre el mar, de igual resolución, producidos por National Centers for Environmental Prediction (NCEP) y que son facilitados al SMARA por el Servicio Meteorológico Nacional en tiempo operativo.

La versión de alta resolución (0.25° x 0.25°) aplicada al mar epicontinental argentino está conducida por el viento a 10 metros producido por el modelo Eta del Servicio Meteorológico Nacional. El modelo de la zona oceánica provee el espectro de olas en los bordes, de manera que los

ⁱ Océano Atlántico Sur al sur de 35°50S y desde 20°W a la longitud del Cabo de Hornos, 67°16W, incluyendo la franja costera a la frontera Brasil/Uruguay en 33°45S.

pronósticos se realizan en concordancia con éste, a 48 horas dos veces por día, a las 00 Z y 12 Z. Se contempla en este caso la refracción de las olas por profundidad.

Los retroanálisis que permiten conocer el estado del campo de olas al inicio de cada pronóstico se realizan en ambos casos, Atlántico y plataforma, con campos de viento a 10 m producidos por el NCEP en una resolución aproximada de 0.47° en una grilla geográfica y que son actualizados cada 6 horas en los modelos de olas, a 00 Z, 06 Z, 12 Z y 18 Z.

4. Boletines del estado del mar

La Central Meteorológica Buenos Aires del SMARA confecciona diariamente pronósticos del estado de mar para la Metárea VI y para el área costa afuera, siguiendo normas que establece la Organización Meteorológica Mundial para pronósticos marinos. Los dos tipos de boletines consideran olas mayores o iguales a 2,5 m como fenómeno significativo y el umbral de 5 m (aproximadamente equivalente a temporal) para destacar como aviso. En la Figura 1 se muestran las áreas de pronóstico, con una división en zonas costa afuera.

En esta sección se muestra la performance de los avisos y pronósticos emitidos en esta etapa pre-operacional, durante la cual los productos fueron exclusivamente de uso interno. Los pronósticos se verifican contra el diagnóstico del día, considerando tanto SMARA/WAM como WW3 del NCEP. El criterio de verificación contempla una precisión $\pm 0,5$ cm en general y aproximadamente un 20 % para alturas mayores a 5 m. Tiene en cuenta también la evolución en el periodo de pronóstico y la omisión de información.

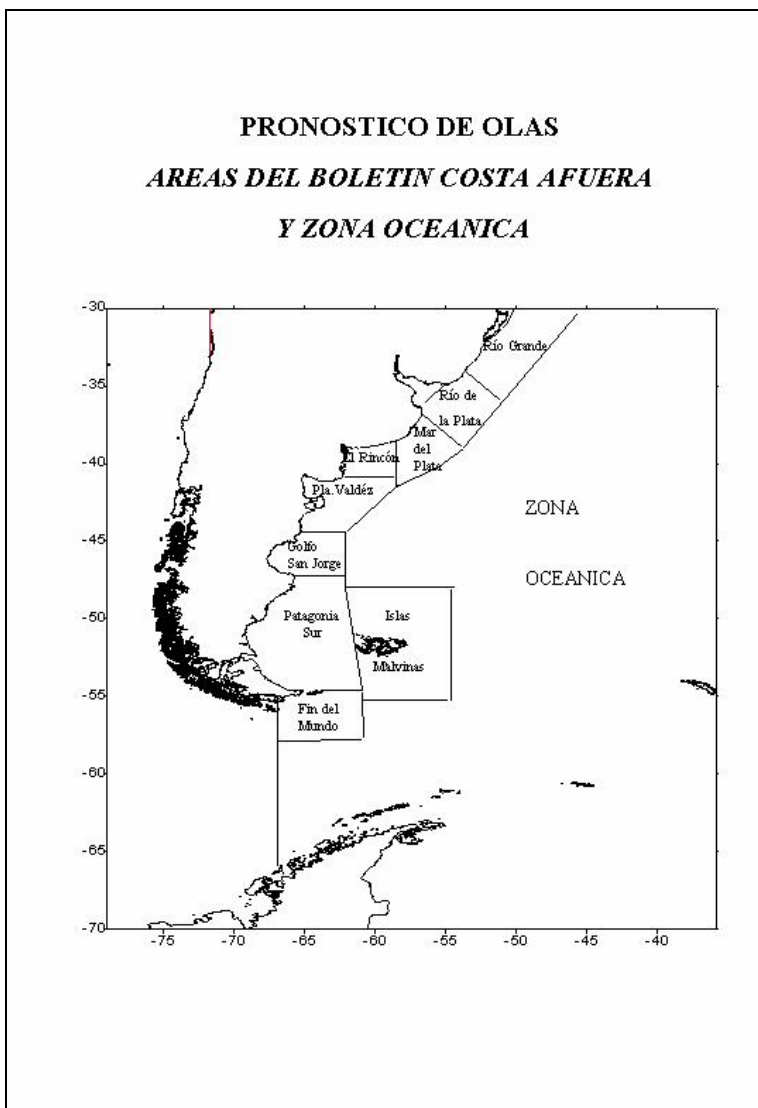


Figura 1. Zonas de pronóstico de olas.

4.1 Boletín de olas de zona oceánica

Abarca desde los 30° S hasta la costa antártica o borde de hielo y desde 20° W hasta la longitud del Cabo de Hornos. Incluye la zona del Boletín Costa Afuera, aunque en forma menos detallada. Se destacan los sistemas que contienen campos de olas por encima de los umbrales definidos. Consta de dos partes: Parte I de avisos, en la cual se informa olas mayores o iguales a 5 m para todo el periodo de pronóstico y la Parte II, con sinopsis y pronósticos para olas mayores o iguales a 2,5 m. Este boletín se realiza dos veces por día, en español e inglésⁱⁱ. El resultado de la verificación mensual de los avisos emitidos en el segundo semestre de 2004 (Figura 2) arroja un porcentaje de aciertos siempre cercano o por encima del 90 %.

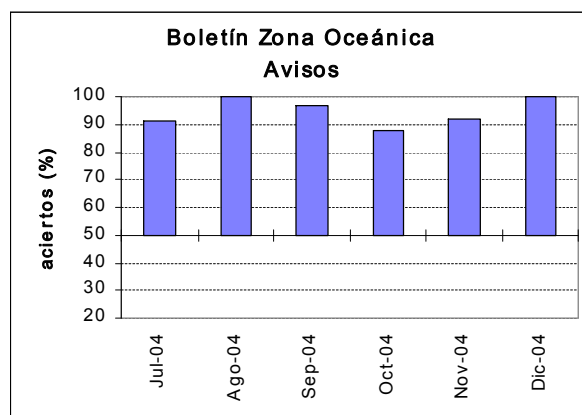


Figura 2. Porcentaje de aciertos en los avisos ($H_s \geq 5$ m) emitidos en el boletín zona oceánica.

4.2 Boletín de olas costa afuera

Abarca el área señalada en la Figura 1, desde una distancia de 10 ó 20 mn de la costa, según la zona, hasta aproximadamente 200 millas de la costa. Está dividido en zonas de pronóstico que se muestran en la misma figura. Consta de dos partes: en la Parte 1, avisos, se destaca las olas mayores o iguales a 5 m en todo el periodo de pronóstico y en la Parte 2, Rasgos significativos y pronóstico, se informa, por zonas, las olas iguales o mayores que 2,5 m., excepto para las zonas de El Rincón y Río de la Plata, para las que el umbral es de 1,5 m. El porcentaje de aciertos en los avisos para el año 2004 (Figura 3) está, para todas las zonas, por encima del 90 %. El porcentaje de aciertos en los pronósticos de la Parte 2 para olas de menos altura (Figura 4) es más variable según la zona, aunque se mantiene en todos los casos por encima del 80 %.

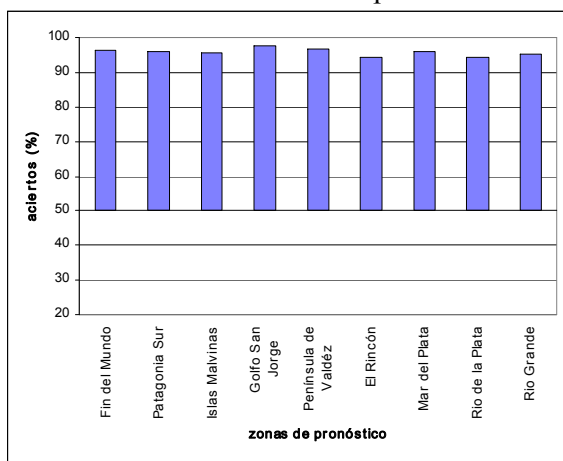


Figura 3. Porcentaje de aciertos por zona en los avisos ($H_s \geq 5$ m) dados en el boletín costa afuera.

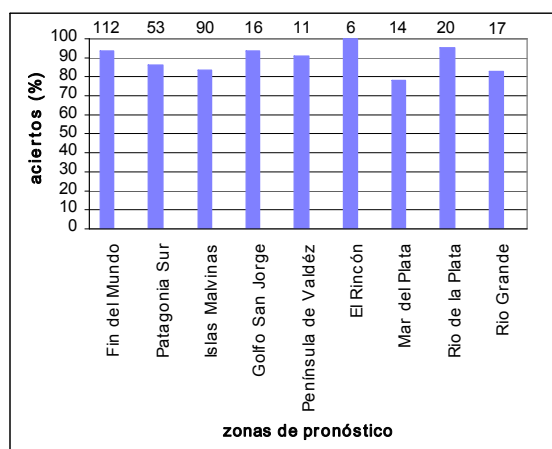


Figura 4. Porcentaje de aciertos por zona en los pronósticos de olas ($H_s \geq 2,5$ m). El número en la parte superior indica la cantidad de casos.

ⁱⁱ Programa de automatización por E. Gonzalez Menta.

5. Validación del pronóstico numérico con datos de altímetro de radar

Los valores retroanalizados y pronosticados de altura de ola son validados mediante los datos del altímetro de radar Poseidon-2 de la misión Jason-1. Estos datos brindan una cobertura global entre 66°N y 66° S, aproximadamente al 95% cada 10 días. El producto de tiempo casi real NRT (Near Real Time) contenido en el registro OSDR (*Operational Sensor Data Record*) está orientado específicamente a usuarios de la comunidad meteorológica, de olas y onda de tormenta. Este nivel tiene controles de calidad mínimos (Zanife et al., 2001) y requiere de un control de calidad previo más extensivo para su utilización. En la siguiente sección se describen brevemente los controles aplicados.

La verificación se realiza principalmente en cuatro modos. El primero es una utilización del dato de altímetro en tiempo casi real como ajuste de las primeras horas del pronóstico a los datos observados. Es una herramienta de pronóstico utilizada principalmente para casos dudosos, aunque tiene la limitación de cobertura espacial dependiente del paso del satélite. La segunda es la verificación completa del retroanálisis y pronósticos con validez en el día previo. Se visualiza la validación como en la Figura 5 para cada órbita y se archivan los resultados para el análisis estadístico de performance. Por otra parte, en el caso de eventos importantes se grafican las series temporales como en la sección 5.2 y gráficos de dispersión (no mostrados). Por último, en forma periódica se integra la información en los parámetros estadísticos que se muestran en la sección 5.3.

5.1 Control de calidad de los datos NRT de altímetro de radar

Los datos señalizados en su origen son desechados sin otro control. En un primer control de errores groseros, se descartan las alturas $H_s < 0$ ó $H_s > 50$ m. Además del control específicos de altura de olas, se adopta un criterio general compatible con el producto NRT SSHA (Desai et al., 2003), ampliamente utilizado para análisis de la anomalía del nivel del mar. Los datos OSDR no están señalizados por hielo. Debido a que la finalidad del procedimiento es la validación del modelo de olas, se impone como máscara el campo de hielo que sirve de contorno al modelo de olas del Atlántico. De esta manera, los datos que se encuentran en área de hielo (tierra) para el modelo de olas, son rechazados. La fuente utilizada es el análisis de hielo del NCEP.

Una vez realizado el control grosero, por límites físicos y hielo, se realiza una verificación de consistencia horizontal de los datos a lo largo de la traza del satélite. En el conjunto de datos OSDR los puntos son aproximadamente equidistantes (~5,8 km entre 30° y 60° de latitud). Un grupo de 10 datos abarca aproximadamente 0,5° x 0,5°. El control consiste en comparar cada dato con el promedio de dicho grupo de datos, pesado cada uno en forma inversamente proporcional al error cuadrático medio (rms) informado. Esto es:

$$E_j = \left| swh(j) - \frac{\sum_{i=j-10}^{j+10} \frac{swh_i}{rms_i^2}}{\sum_{i=j-10}^{j+10} \frac{1}{rms_i^2}} \right|$$

en donde swh es la altura significativa de ola y rms es el error cuadrático medio de la medición. Se destaca que no se considera ninguna medida de la distancia en el peso, porque se privilegia la influencia del rms sobre la validez del dato. El dato cuya diferencia E sea mayor que el 15 % del valor del promedio, es señalado. Una vez completada la órbita, se repite el procedimiento, como en Etala y Burgers (1994), suprimiendo los datos marcados. De esta manera puede ser sospechado un dato anteriormente aceptado o, por el contrario, rehabilitado un dato marcado. Se repite una vez más el control, suprimiendo el nuevo conjunto de datos sospechados y con el resultado de esta tercera y última iteración se asigna el “flag” definitivo a cada dato. Esto es, $0 = \text{aceptado}$, $1 = \text{rechazado}$, $9 = \text{no se pudo aplicar el control}$. En promedio, aproximadamente un 13 % de los datos son

rechazados, mientras que a un 6 % no se le puede aplicar el control según lo señalado anteriormente. Para la verificación del modelo de olas sólo se utilizan los datos con $flag = 0$.

5.2 Verificación en eventos particulares

En esta etapa pre-operativa, se realizó la validación del sistema de pronóstico de olas en eventos extremos. Los casos más significativos, ya sea por la altura de ola alcanzada o por su localización, han sido analizados para evaluar la performance del sistema. Por el momento, se dispone de salidas de los modelos cada tres horas, de manera que, las comparaciones se realizan dentro de una ventana $H \pm 1,5$ hs.. La verificación del retroanálisis se realiza de manera continua, mientras que se agrupan las últimas 12 horas de cada día dentro del plazo de pronóstico, cuyas validaciones se muestran como *pronóstico día 1* y *día 2*, respectivamente. A continuación se presenta un ejemplo reciente de la comparación de resultados de los modelos con la altura de ola e intensidad del viento medidos por el satélite a lo largo de su traza.

El día 8 de abril de 2005 un sistema de baja presión sobre el Atlántico generó olas de nivel de aviso sobre la plataforma argentina. Se seleccionaron tres órbitas del satélite cuyas trazas se localizan sobre la zona relevante al evento (Figura 5). La etapa inicial del evento sobre la plataforma está capturada por la traza A (descendente), aproximadamente a las 5.30 Z. Seis horas más tarde, la traza B (descendente) registra otro sector de la tormenta, por delante de la vaguada en el Atlántico. La traza C, alrededor de las 13.30 Z, se encuentra en el límite de la ventana temporal de la comparación.

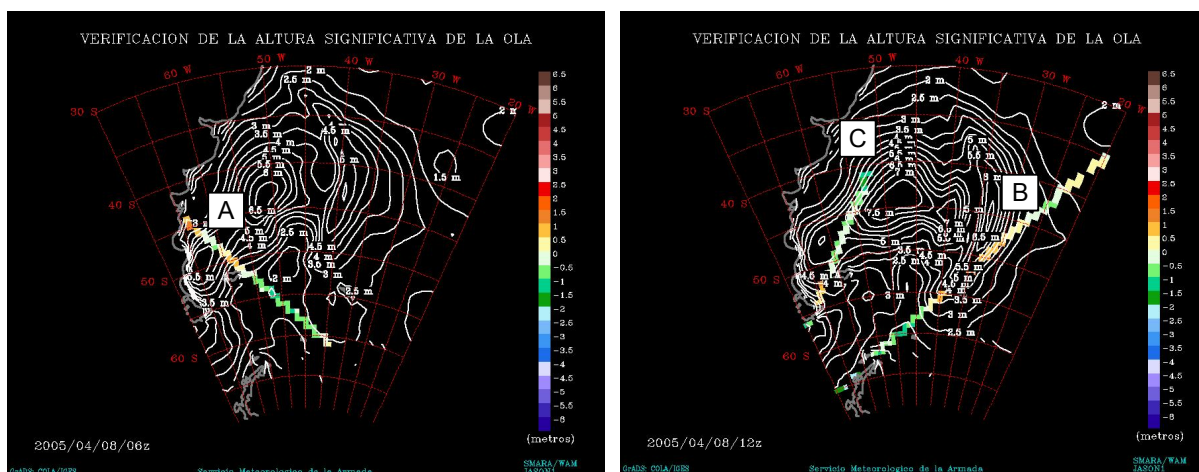


Figura 5. Trazas del satélite Jason 1, señaladas como A, B y C, sobre campos de olas del 8/4/05 6 Z. Izq.: órbita de 5.30 Z sobre campo de 6 Z; der.: órbitas de 11.30 y 13.30 Z sobre campo de 12 Z. Los colores indican la diferencia de altura del diagnóstico vs. altímetro, promediada en la resolución del modelo Atlántico.

En la Figura 6 se muestran los resultados del diagnóstico y de los pronósticos para el día 1 y día 2, según fueron definidos más arriba. En la parte superior se presenta el modelo del Atlántico y en la inferior, el modelo de alta resolución. En los cuadros de la derecha, en ambos casos, se muestra la verificación del viento a 10 m utilizado como conductor y que corresponden al NCEP y Eta SMN, respectivamente. En la etapa inicial (traza A) se observa una muy buena correspondencia de ambos modelos en el diagnóstico y el pronóstico del primer día, ligeramente mejor el de alta resolución. A dos días, si bien el fenómeno es representado por ambos modelos, el de alta resolución presenta un error por defecto, en concordancia con el error del viento en superficie (cuadros de la derecha). Está claramente expuesto en este caso, cómo un error que no parece importante en la determinación del viento en superficie, tiene consecuencias más notorias sobre el campo de olas. La traza B, en la zona oceánica, presenta una buena comparación para todo el rango de pronóstico. Sobre la traza C, en una etapa más avanzada del evento, se observa una ligera sobreestimación de la intensidad del viento

en ambos pronósticos. Se destaca la buena comparación en alta resolución, con la mención de que en este caso de mar en crecimiento con viento aproximadamente constante (cuadro inferior derecho) se evitó realizar la comparación del dato de 13.30 Z con el campo de 12 Z. El último tramo de la traza en el cuadro inferior izquierdo ya se compara sobre el campo de 15 Z.

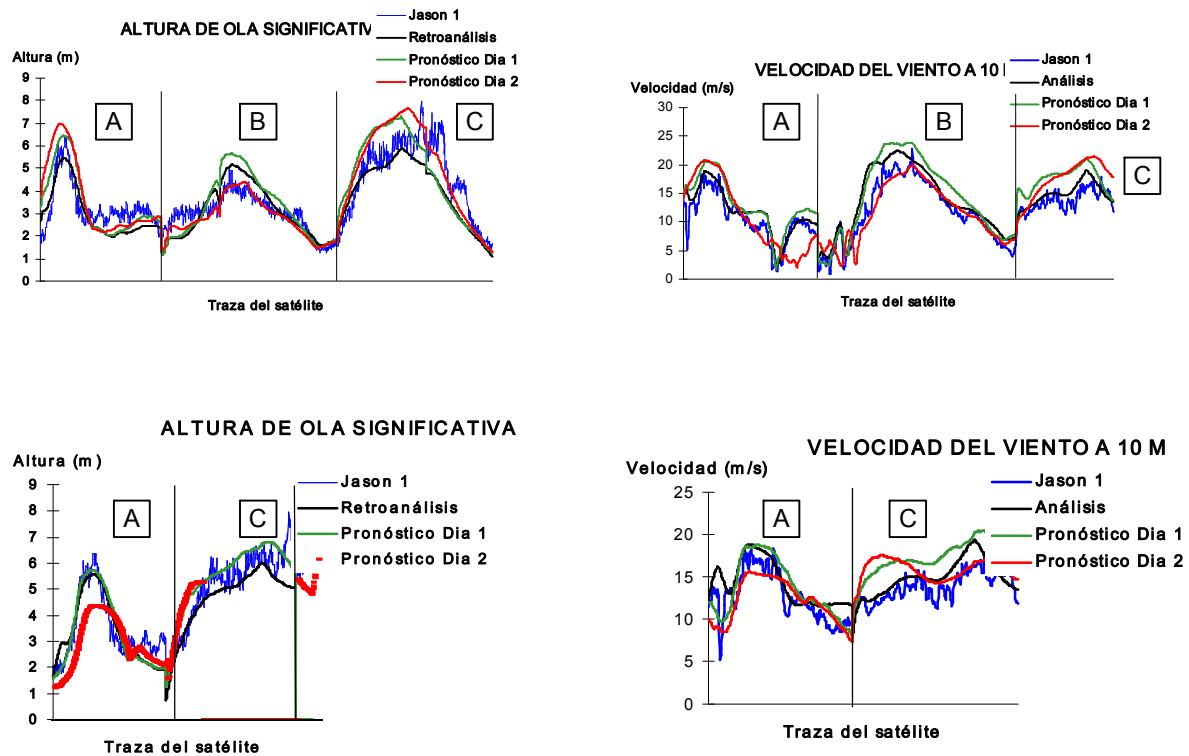


Figura 6. Altura de ola e intensidad del viento modelados vs. altímetro de radar. Las letras identifican las trazas de la Figura 5. Cuadros superiores: modelo del Atlántico (baja resolución); cuadros inferiores: modelo de plataforma (alta resolución).

5.3 Resultados generales de la validación del modelo

El periodo completo de evaluación del modelo del Atlántico que se presenta en esta sección es de julio de 2004 a abril de 2005. La altura media observada por el altímetro en este periodo se muestra en la Figura 7. La gran cantidad de energía que ingresa al Atlántico por el pasaje de Drake está compuesta por olas generadas localmente sobre el mar de fondo que se propaga desde el Pacífico. Si bien el modelo del Atlántico se extiende hasta los 90° W y 50° S en el Pacífico para considerar el mar generado por los intensos vientos en esta región, se observa en la Figura 8 un significativo déficit en la zona. El mismo se debe principalmente a la energía generada en zonas distantes del Pacífico no representadas en el modelo. Con esta excepción, el pronóstico a 48 hs. presenta desvíos inferiores a 0,5 m, en exceso sobre la plataforma y en defecto en el resto del dominio. El desvío del viento pronosticado, que no se muestra, es positivo y homogéneo en toda el área.

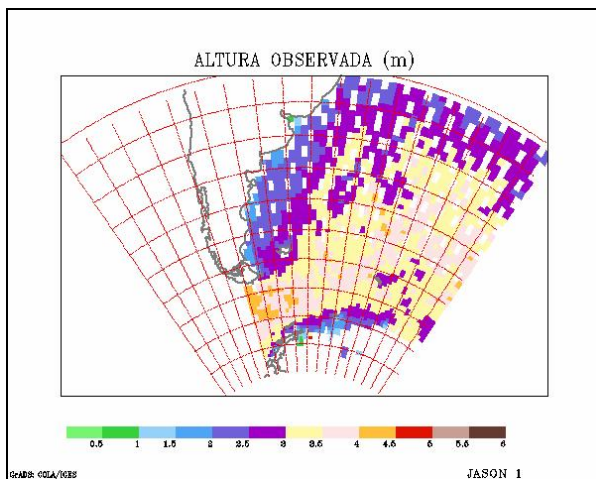


Figura 7. Altura media observada por el altímetro en el conjunto de datos utilizados en esta evaluación.

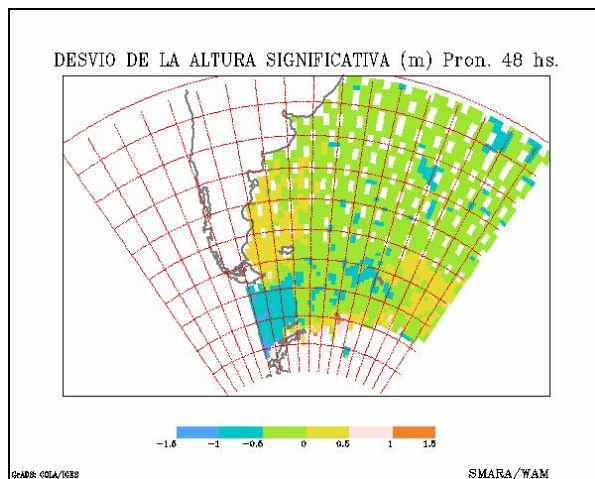


Figura 8. Desvío de la altura de ola significativa pronosticada a 48 horas.

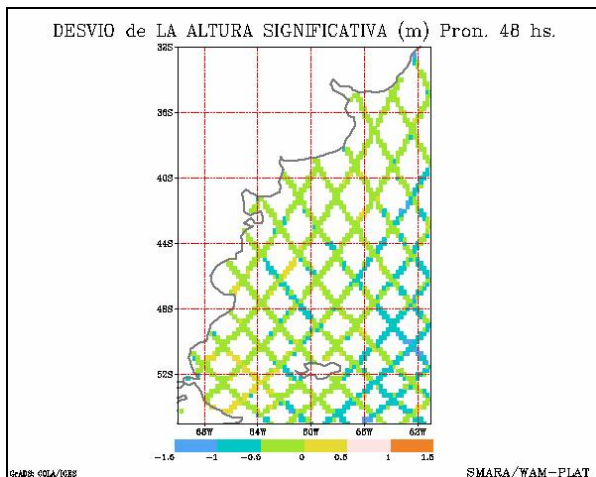


Figura 9. Desvío de la altura de ola significativa pronosticada a 48 horas por el modelo de alta resolución.

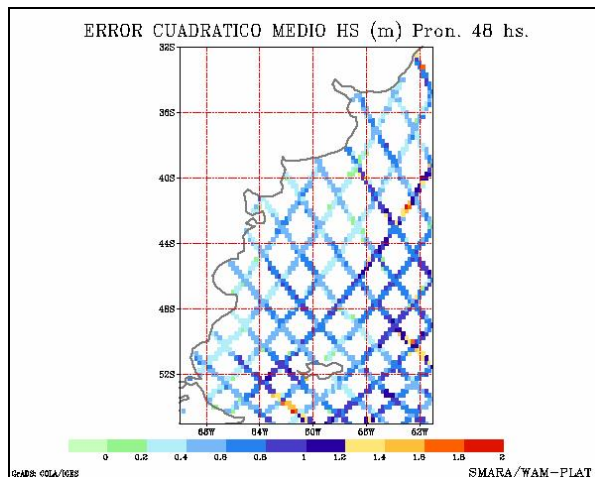


Figura 10. Error cuadrático medio de la altura de ola significativa pronosticada a 48 horas por el modelo de alta resolución.

El periodo considerado para la validación del modelo de alta resolución es de noviembre 2004 a abril 2005. El déficit en el pronóstico a 48 hs., que se observa en general, sólo excede los 0,50 m en los bordes de mar abierto (Figura 9). El error cuadrático medio a 48 hs. se muestra en la Figura 10 en la cual, debido a la poca extensión del periodo considerado, aún se nota la influencia de tormentas individuales. El viento en superficie (no se muestra) presenta una tendencia al déficit en el pronóstico a 48 hs, contrariamente al modelo global.

6. Conclusiones

Se presenta un sistema integral de pronóstico de olas, que consiste de productos de pronóstico en forma de texto, así como de modelación. La componente numérica se encuentra actualizada en el estado del arte, abarca diferentes escalas y utiliza pronósticos meteorológicos globales y nacionales. Este ha sido un logro del esfuerzo de cooperación entre organismos.

El sistema ha sido evaluado en una etapa pre-operacional y se encuentra ya iniciando su etapa operativa. Se han identificado algunos aspectos de potenciales mejoras en la calidad de los

productos. El más importante es la cuantificación del ingreso de energía al dominio desde el Pacífico. La técnica de anidado en un modelo global es una posible solución que está siendo encarada.

Agradecimientos

Se adquieren campos de viento en superficie del servidor de ftp de National Centers for Environmental Prediction (NCEP) y del sitio alternativo en el National Weather Service (NWS). Se adquieren también a tiempo real los campos de olas pronosticados por NCEP de su sitio ftp.

Los datos NRT de altura de ola de la misión Jason 1 fueron obtenidos del Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PO.DAAC) en el NASA Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA. .

Los procedimientos operativos se realizan en centros de procesamiento del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE). El programa de automatización para la confección del boletín de pronóstico de olas en zona oceánica fue realizado por Estela Gonzalez Menta. Las autoras quieren agradecer especialmente el apoyo recibido de Andrea Vázquez (CONAE).

Referencias

- Caires, S. y Sterl, A. "Comparative assessment of ERA-40 ocean wave product". *Proc. of the ECMWF workshop on re-analysis, ERA-40 Project Report Series, No.3*, pp. 353-368, Reading, 5-9 Noviembre 2001.
- Desai, S. D., B. J. Haines y K. Case, 2003. "Near Real Time Sea Surface Height Anomaly Products for Jason 1 and Topex / Poseidon: User Manual". JPL D-26281.
- Etala, M. P., 2001. "Una investigación del papel de la tensión inducida por las olas en el acoplamiento de modelos atmosféricos y oceánicos". *Preprints IX Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología CLIMET IX y VIII Congreso Argentino de Meteorología CONGREMET VIII*, N° 165.
- Etala, M. P. y S. M. Alonso, 1996. "Pronóstico numérico de olas 1992-1994", *Boletín del Servicio de Hidrografía Naval*, H-106, Año 1, N° 1, 8-15.
- Etala, M. P. y G. Burgers, 1994. "Real-Time quality control of wave observations in the North Sea". *Journal of Oceanic and Atmospheric Technology* Vol.11, N°6, 1611-1624.
- Janssen, P. A. E. M. y J. R. Bidlot, 2003. "IFS Documentation - Part VII - ECMWF Wave Model (CY25R1)", *IFS Documentation Cycle CY25r1, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*.
- Komen, G. J., L. Cavalieri, M. Donelan, K. Hasselmann, S. Hasselmann, P. A. E. M. Janssen, 1994. "Dynamics and Modelling of Ocean Waves", *Cambridge University Press*, 532 págs.
- Zanife, O. Z., J. P. Dumont, J. Stum y T. Guinle, 2001. "SSALTO Products Specifications - Volume 1: Jason-1 User Products", *referencia SMM-ST-M-EA-10879-CN, Centre National d'Etudes Spatiales, CNES*.