

Sistema de Predicción de Oleaje en zonas Costeras de AEMET

Justo Conde Criado⁽¹⁾, Ernesto Barrera Rodríguez⁽²⁾, Ángel Martínez Ferrer⁽³⁾

⁽¹⁾ AEMET, C/ Leonardo Prieto Castro nº8 28071 Madrid, jcondec@aemet.es

⁽²⁾ AEMET, Avda. de San Sebastián nº77 38005 Sta. Cruz de Tenerife, jbarrerar@aemet.es

⁽³⁾ AEMET, C/ Leonardo Prieto Castro nº8 28071 Madrid, amartinezf@aemet.es

1. Introducción

Aunque los pronósticos meteorológicos para la navegación han tenido en todas las épocas una gran importancia, la predicción del tiempo en el mar es un servicio que actualmente ha adquirido una especial trascendencia debido a la gran variedad de actividades que se desarrollan en el medio marino y a la relevancia económica de estas.

El contenido de tales pronósticos ha incluido tradicionalmente información sobre distintas variables atmosféricas en superficie, principalmente viento, pero también visibilidad, temperatura o precipitación. Junto a todas ellas se cuentan las variables en las que se centra el interés del presente trabajo y que son aquellas que describen el oleaje generado por el viento.

Tal y como se establece, tanto en el Convenio Internacional SOLAS (Safety Of Life At Sea) [1], como en el marco regulador de la JCOMM¹, adoptado por todos los países miembros de la OMM, la confección y el suministro de las predicciones del tiempo en el mar y, en particular, de las predicciones de oleaje, son responsabilidad de los servicios meteorológicos nacionales (SMN). En ambos documentos se estipula, así mismo, que la OMM es la encargada de regular y coordinar las actividades mencionadas de elaboración y distribución de pronósticos del tiempo en el mar. Con este propósito, la OMM recoge en su manual sobre Servicios Meteorológicos Marinos [2] el conjunto de directrices y recomendaciones que deben observar los SMN en materia de meteorología aplicada a actividades marítimas.

En resumen, entre las responsabilidades de los SMN se halla la de elaborar los pronósticos de oleaje siguiendo las directrices de la OMM. Y no solo eso, sino que son los únicos organismos autorizados a hacerlo con carácter oficial. Dos de los componentes principales señalados en el Manual sobre Servicios Meteorológicos Marinos de la OMM son los servicios para alta mar y los servicios para las áreas cos-

tera y litoral. La prestación de estos servicios, en su capítulo de predicción, se asegura incluyendo en la rutina diaria de los predictores de AEMET la elaboración de pronósticos del estado del mar tanto para zonas de alta mar, como para zonas costeras.

El pronóstico del estado del mar, o del oleaje, no se abordó de manera directa hasta que lo exigieron las necesidades aparecidas durante las operaciones de desembarco en la Segunda Guerra Mundial. Las primeras predicciones de oleaje operativas se basaron en los resultados del trabajo pionero de Sverdrup y Munk [3], en el que los autores presentaron un sistema de relaciones semiempíricas que ligaban dos parámetros estadísticos del oleaje, como la altura significativa (H_s) y la frecuencia de pico (ν_p), con dos variables de pronóstico mejor conocido, como la velocidad del viento a 10 m (U_{10}) y el fetch (F).

A grandes rasgos, su método consistía en definir el conjunto de parámetros adimensionales siguiente, en el que participaban la velocidad del viento a 10 m y la aceleración de la gravedad (g):

$$\varepsilon_{10} = \frac{g^2 E}{U_{10}^4}, x_{10} = \frac{gF}{U_{10}^2}, \nu_{10} = \frac{c_p}{U_{10}}$$

A partir de estos parámetros adimensionales de energía, fetch y periodo de pico, en los que la altura significativa aparece indirectamente a través de su relación con la energía: $E = H_s^2/16$, un cuidadoso análisis de datos de observación permitió a Sverdrup y Munk relacionar los valores de ε_{10} y ν_{10} con los de x_{10} (Fig. 1).

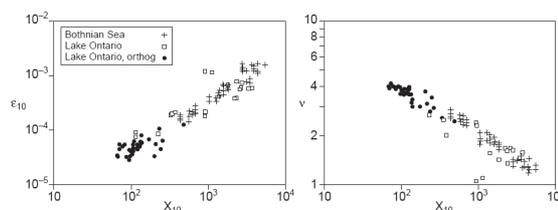


Fig. 1.- Energía (ε_{10}) y periodo de pico (ν_{10}) adimensionales como función del fetch adimensional (x_{10}).

Aunque el procedimiento de Sverdrup y Munk se fue enriqueciendo con el paso de los años mediante las mejoras introducidas por diversos autores, las

¹ JCOMM: Comisión Conjunta OMM/IOC de Oceanografía y Meteorología Marítima. (IOC: Comisión Intergubernamental de Oceanografía de la UNESCO)

herramientas resultantes de esos esfuerzos (los nomogramas tradicionales) no ofrecían más que una estimación poco detallada del oleaje esperado en una zona. A pesar de ello, estos fueron los únicos instrumentos de los que dispusieron los predictores de los SMN para predecir el oleaje hasta los años noventa del siglo XX.

En paralelo a las herramientas semiempíricas que acabamos de mencionar, se fueron desarrollando los modelos matemáticos de base física que reproducen el estado del mar por el procedimiento de resolver la ecuación de conservación de la energía del oleaje. Estos modelos reciben el apelativo de espectrales debido a que el oleaje se representa como superposición de un conjunto de ondas monocromáticas cuyas frecuencias se distribuyen uniformemente a lo largo de un conjunto de valores (espectro). La evolución del oleaje se obtiene como resultado de la combinación de tres contribuciones básicas: el aporte de energía debido a la acción del viento; la disipación de energía debido a la rotura de las crestas de las olas y a procesos de interacción con el lecho marino; y la redistribución de energía entre componentes de diferente frecuencia, conocida comúnmente como interacción no lineal entre componentes. Todo ello subordinado a los factores externos que regulan esas contribuciones: la fuerza del viento, la profundidad y la magnitud de la corriente superficial en cada punto del dominio espacial.

Los modelos espectrales solo alcanzaron un grado de funcionalidad suficiente tras tres décadas de avances en las que la representación del término de interacción no lineal entre componentes señalaba el grado de desarrollo de los modelos [4]. En ese proceso, a los más rudimentarios modelos espectrales de primera generación (en los que cada componente de diferente frecuencia evolucionaba sin interactuar con las demás), los siguieron los de segunda generación (en los que la interacción entre componentes se trataba de manera parcial –haciendo interactuar las componentes del mar de viento al margen de las del mar de fondo– y aproximada –ajustando la magnitud de la interacción de manera semiempírica–).

Por último, durante la última década del siglo XX comenzaron a ponerse en operación los primeros modelos espectrales de oleaje de tercera generación² en los grandes centros de producción de información meteorológica ECMWF y NCEP³. Desde entonces,

² Es decir, modelos de base física en los que las interacciones entre componentes del oleaje de frecuencias diferentes se calculan prescindiendo de parametrizaciones y con un grado de aproximación suficiente.

³ Tanto en ECMWF como en NCEP el primer modelo operativo de oleaje fue el WAM. En ECMWF entró en operación en julio de 1992 y en NCEP en 1994. Posteriormente, WaveWatch III reemplazó a WAM como modelo operativo de NCEP en marzo de 2000.

los predictores de los SMN cuentan con una herramienta fundamental para la elaboración de los pronósticos del estado del mar.

Hasta la fecha, esa herramienta se ha mostrado especialmente útil en el ámbito de la alta mar por dos motivos esenciales. Uno es que, desde sus primeras versiones, los modelos espectrales de tercera generación han representado particularmente bien los tres procesos físicos más relevantes implicados en la evolución del oleaje en aguas profundas: el crecimiento de las olas por efecto del viento, las interacciones no lineales entre grupos de olas diferentes, y la disipación por rotura de la cresta de las olas. El otro es que los campos de viento son, en la gran mayoría de las ocasiones, lo suficientemente homogéneos sobre alta mar como para que, en ausencia de orografía, la calidad de los resultados no dependa de manera crítica de la resolución espacial. Esto hizo viable desde el principio configuraciones de modelos con resoluciones espaciales modestas que cubrían desde cuencas oceánicas completas a todo el globo.

Sin embargo, la deficiente representación de la orografía costera y de la línea litoral limita bastante la aplicación de los resultados de esos modelos al pronóstico del estado del mar en aguas próximas a la costa. Hasta hace unos pocos años, esa circunstancia resultaba intrascendente porque los procesos físicos esenciales típicos de aguas muy poco profundas, o bien no estaban representados en los modelos, o lo estaban muy pobremente, de manera que el aumento de resolución espacial no se hubiera reflejado en una mejora de los resultados en aquellas zonas.

Ahora bien, las técnicas de representación de los procesos físicos de aguas poco profundas han progresado notablemente durante los últimos cinco años. En particular, aunque los mecanismos que intervienen en el balance de energía en la línea de costa donde rompen las olas no acaban de estar bien representados todavía, la refracción del frente de olas y la disipación de energía por rozamiento con el fondo ya se reproducen razonablemente bien. Esto significa que un aumento de la resolución espacial que recoja con más detalle la batimetría costera se traducirá en una mejor representación del oleaje en esa zona.

En la actualidad, los predictores de AEMET utilizan básicamente los resultados de la configuración con mayor resolución espacial (15 minutos de arco) del modelo espectral del ECMWF para elaborar los pronósticos del estado del mar. Es decir, carecen de una herramienta para la predicción en zonas cercanas a la costa equiparable a la que disponen para la predicción en alta mar, y deben recurrir a extrapolaciones semiempíricas y a técnicas manuales para llevar a cabo esa tarea.

Para remediar esta carencia y dotar a sus predictores de un instrumento que les facilite la labor de pronóstico del oleaje en las áreas costeras, AEMET ha preparado un sistema de predicción de oleaje específico para esas áreas cuyas características se presentan en el siguiente punto. Más adelante, en el punto 3, se anticipan los planes de desarrollo del sistema que se abordarán a corto y medio plazo.

2. Descripción del Sistema de Predicción de Oleaje Costero (SPOC).

El SPOC es una combinación de piezas, ordenadas de manera modular, basadas en la versión 3.14 del modelo espectral de tercera generación WAVEWATCH III desarrollado por NOAA-NCEP [5]. Tres han sido las razones por las que se ha elegido este modelo para construir el sistema:

- a) *Ofrece una formulación de los procesos físicos de aguas poco profundas en el estado del arte.*
- b) *Ofrece la posibilidad de usar mallas de resolución variable y de contorno irregular, lo que permite elegir una densidad de nodos elevada solo en aquellos lugares donde resulta provechoso un mayor detalle.*
- c) *Ofrece un código de compilación amigable paralelizado mediante directivas OpenMP que facilita la optimización de los recursos de cálculo disponibles.*

El sistema está compuesto por cuatro piezas o módulos costeros que reproducen el oleaje en las cuatro regiones siguientes: costa cantábrica; costas del levante y del archipiélago balear; costa del sur peninsular; y costas del archipiélago canario (Fig. 2).

En cada uno de esos módulos se han establecido dos regiones con diferente nivel de detalle geográfico. La más próxima a la costa, que es donde los pormenores orográficos van a influir de manera más destacada sobre el oleaje, se ha configurado con una resolución espacial de 1 minuto de arco; mientras que aquella otra que puede catalogarse de aguas profundas para olas de hasta una longitud de entre 200 m y 300 m, se ha configurado con una resolución de 3 minutos de arco.

Los cuatro módulos costeros reciben condiciones de contorno de un módulo regional, basado también en la versión 3.14 de WAVEWATCH III, que cubre las cuencas del Atlántico Norte y del Mediterráneo a una resolución variable que va desde 1 grado hasta los 15 minutos de arco como se detalla en la Fig. 3.

Todos los módulos del sistema, tanto los costeros como el regional, comparten la misma configuración espectral de 25 frecuencias y 24 rumbos. Recordemos que el comportamiento del oleaje generado por el viento está condicionado por los tres factores si-

guientes: la fuerza del viento en superficie, la profundidad y la magnitud y dirección de la corriente en la capa más superficial del agua. Por lo tanto, para que el sistema suministre pronósticos de oleaje, es necesario proporcionarle campos previstos de las tres variables mencionadas desde el instante inicial de la integración hasta el alcance final elegido.



Fig. 2.- Regiones configuradas a una resolución de 1 min y 3 min de arco en los módulos costeros (cantábrico, levante, sur y canario) que forman el SPOC.

Por lo que se refiere al viento, el SPOC recibe los campos previstos a 10 m producidos por las diversas

configuraciones del modelo de atmósfera HIRLAM que se encuentra operativo en AEMET. Es decir, HIRLAM0.16 con una resolución de 0.16 grados de arco (o 9.6 min) y un alcance de 72 horas; y HIRLAM0.05⁴, con una resolución de 0.05 grados (3 min) y un alcance de 36 horas. El alcance de la predicción del SPOC se ha establecido en 72 horas coincidiendo con el alcance de HIRLAM0.016, que es la fuente de los vientos que alimentan al módulo regional Atlántico más Mediterráneo. Los módulos costeros del SPOC se hacen funcionar con los vientos previstos por HIRLAM0.05 hasta el horizonte H+36. Desde ese horizonte, y hasta completar el alcance H+72, se hacen funcionar con los vientos previstos por HIRLAM0.16. La frecuencia con la que se actualizan los campos de viento previsto fuerzan cada módulo del SPOC es de una vez cada hora durante todo el periodo de predicción.

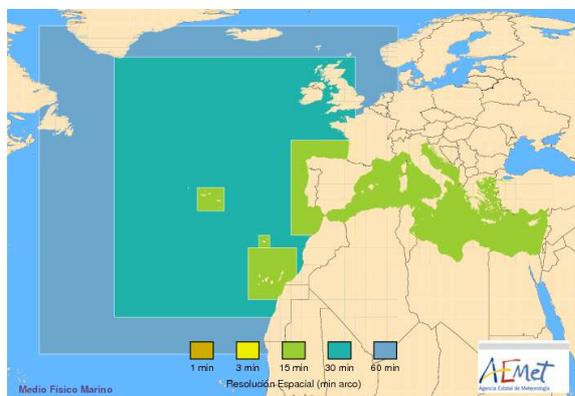


Fig. 3.- Malla de resolución variable del módulo regional del SPOC.

En cuanto a las profundidades, el módulo regional se ha configurado con una batimetría extraída de la base de datos GEBCO (General Bathymetric Chart of Oceans) de 1 minuto de arco de resolución, mientras que, para los módulos costeros, se ha utilizado la base GEBCO-08 de 30 segundos de arco de resolución. En su estado actual, el campo de profundidades se mantiene constante con el tiempo en todos los módulos del SPOC. Esta circunstancia es intrascendente a la hora de obtener el oleaje en alta mar, por lo que el módulo regional del SPOC no experimentará mejoras en ese sentido. Sin embargo, a la hora de reproducir correctamente los procesos físicos de aguas poco profundas (refracción, reactivación, y rotura del oleaje), es necesaria la mejor estimación posible del calado en los nodos próximos a la costa, y el valor de este calado resulta de corregir la profundidad de referencia ofrecida por GEBCO de los efectos de la variación del nivel del mar en cada nodo como consecuencia de la marea astronómica, de la presión

⁴ HIRLAM0.05 consta, en realidad, de dos módulos independientes, uno conocido como HIRLAM-HNR que cubre un área centrada en la Península Ibérica y que no alcanza al archipiélago canario y otro conocido como HIRLAM-CNN que cubre solo un área centrada en el archipiélago canario.

atmosférica en superficie y, cuando corresponda, de la marea de tempestad. Tras lo expuesto, es comprensible que la empresa de proporcionar a los módulos costeros campos de profundidad obtenidos a partir de las predicciones de un modelo del nivel del mar se cuente entre las primeras actualizaciones a realizar sobre el sistema en un futuro cercano.

Por último, en el SPOC se ha optado por ignorar (al menos de momento) la acción sobre el oleaje de las corrientes superficiales del océano por los siguientes motivos: es, en general, una acción de carácter bastante local; se trata de un efecto de segundo orden en comparación con el de la acción del viento; y, por encima de todo, la incertidumbre de los pronósticos de corrientes hace que la mejora en la representación del oleaje al incluirlas no sea todavía significativa.

En resumen, la configuración actual del SPOC incorpora forzamiento con campos previstos de viento a 10 m, incluye un campo de profundidades que se mantiene constante con el tiempo, y prescinde del forzamiento asociado a la presencia de corrientes sobre la superficie del agua.

A día de hoy, las condiciones iniciales que emplea el SPOC como punto de partida de la integración no proceden de un mecanismo de asimilación de datos, sino de un ciclo de reanálisis con inicio en H-12 y finalización en H+00, que se fuerza con campos de viento analizados. Aunque este proceso proporciona un campo de oleaje de partida de suficiente calidad, se prevé agregar entre las próximas evoluciones del sistema un procedimiento de asimilación de altimetrías registradas desde satélite.

El sistema que acabamos de describir se integra dos veces al día en un servidor virtual de AEMET, la primera tomando como instante de partida las 00UTC y, la segunda, las 12UTC. El producto básico del SPOC es el espectro bidireccional de densidad de energía del oleaje en cada nodo del dominio y en cada paso de tiempo de la integración. Eso representa un volumen de información inmanejable y unas magnitudes de interpretación poco intuitiva para un ser humano. Por este motivo, se efectúa un tratamiento de las salidas del SPOC mediante el que se calculan, a partir del espectro, y en horizontes de predicción separados por intervalos de tres horas, los campos de oleaje que emplean usualmente los predictores en la elaboración de sus pronósticos finales. Es decir, los campos de altura significativa y de dirección de propagación de diferentes componentes del oleaje, así como el campo de periodo de la componente primaria del mar de fondo. Todos ellos se representan gráficamente (Figs. 4 a 6) de una manera que facilite al predictor su consulta e interpretación. A su vez, todas las variables mencionadas se obtienen en las posiciones geográficas en las que existe alguna boya de la red de Puertos del Estado y se

comparan con los registros de la boya en cuestión para que el predictor, a la hora de elaborar el pronóstico, tenga una referencia de la manera en la que se está comportando el SPOC, y estime el grado de confianza que puede depositar en los resultados del sistema en un episodio particular de oleaje (Fig. 7).

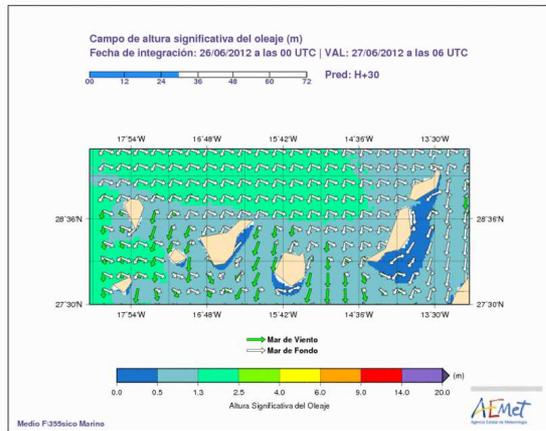


Fig. 4.- Campo de altura significativa del mar total y direcciones de propagación del mar de viento y de las componentes primaria y secundaria del mar de fondo para el módulo de Canarias.

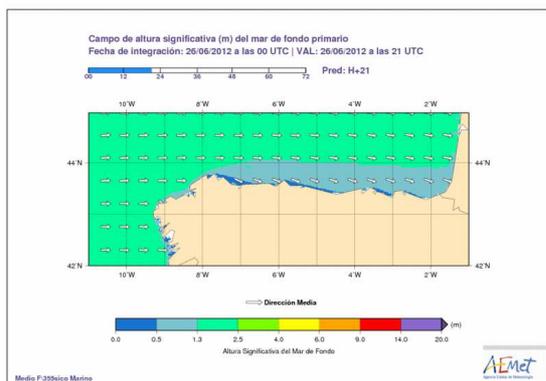


Fig. 5.- Campo de altura significativa y dirección de propagación de la componente primaria del mar de fondo para el módulo del Cantábrico.

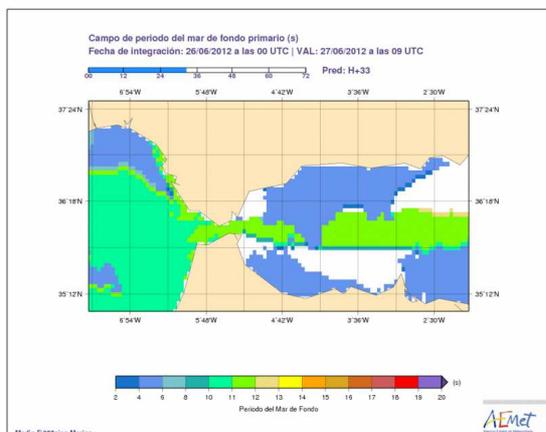


Fig. 6.- Campo de periodo de la componente primaria del mar de fondo para el módulo sur.

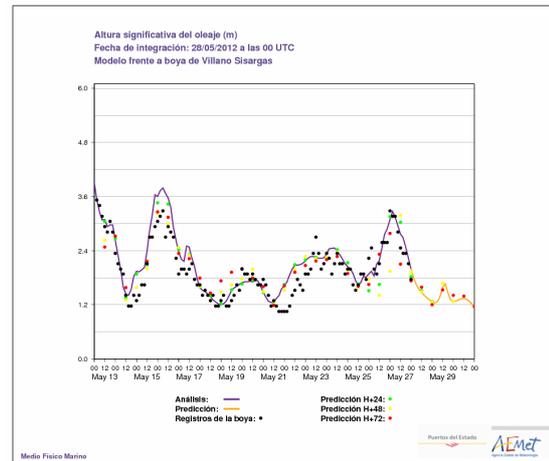


Fig. 7.- Comparación entre la altura significativa registrada por la boya de Villano-Sisargas y la calculada por el modelo en esa misma posición.

3. Planes de desarrollo a corto y medio plazo.

Hasta finales de 2012 los planes de AEMET en este campo se concentran en dos líneas. Con la primera se busca incorporar piezas al sistema para la representación del oleaje a escala local (con un nivel de detalle de unos 500 m) en zonas muy concretas del litoral. Estos módulos locales estarán basados en el modelo espectral de tercera generación SWAN [6] y se configurarán en regiones del litoral que pueden ser seleccionadas en función de la demanda de usuarios institucionales o de su importancia geográfica o económica.

A día de hoy se hallan en fase de integración rutinaria en pruebas dos módulos locales que obtienen condiciones de contorno del sistema costero, uno centrado en las rías de Ferrol, Ares, Betanzos y Coruña, y otro centrado en el Estrecho de Gibraltar (Fig. 8).

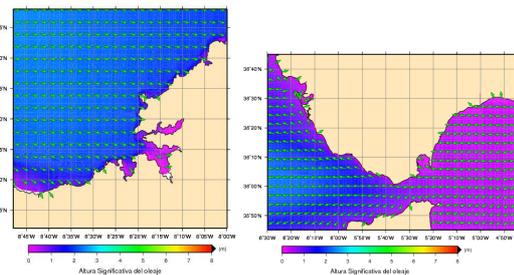


Fig. 8.- Campos de altura significativa y dirección media de propagación obtenidos para los módulos locales de las rías de Coruña y del Estrecho.

Como segunda tarea pendiente de realizar a corto plazo se cuenta la ejecución de un reanálisis del módulo canario que abarque todo el año 2011 con el propósito de evaluar cuantitativamente y en detalle las mejoras aportadas por el sistema costero frente a los sistemas regionales tradicionales de resolución inferior.

Una vez concluidas las dos acciones mencionadas, se proyecta emprender dos actualizaciones del SPOC que ya se adelantaron de pasada cuando se describió el sistema. Si las recordamos, estas eran la preparación de un mecanismo de asimilación de altimetrías registradas desde satélite para la inicialización de las integraciones, y la preparación de un procedimiento para suministrar al sistema campos previstos del nivel del mar con el que tener en cuenta las eventuales variaciones de profundidad en las zonas más próximas al litoral.

Referencias

- [1] IMO (International Maritime Organization), 1992: SOLAS Consolidated Ed. IMO Publication IMO-110E y enmiendas posteriores de los años 1992, 1994,...
- [2] WMO (World Meteorological Organization), 2012: Manual on Marine Meteorological Services, Volume I (Annex VI to WMO Technical Regulations). WMO-No 558.
- [3] Sverdrup, H.U. and W.H. Munk. 1947. Wind, sea, and swell: theory of relations for forecasting. Pub. No. 601. U.S. Navy Hydrographic Office. Washington, DC.
- [4] Mitsuyasu, Hisasi 2002. A Historical Note on the Study of Ocean Surface Waves. Journal of Oceanography, Vol. 58, pp. 109-120.
- [5] Tolman, H.L., 2009: User manual and system documentation of WAVEWATCH IIITM version 3.14. NOAA-NWS-NCEP-MMAB Technical Note 276, 194 pp + Appendices.
- [6] The SWAN Team, 2011: Scientific and Technical Documentation SWAN Cycle III version 40.85. On-line doc. (<http://swanmodel.sourceforge.net>).