

Guisado Pintado, E., Málvarez García, G., Navas Concha, F. (2010): Los modelos de propagación de oleaje, simulación morfodinámica y las TIG. En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. Pp. 861-872. ISBN: 978-84-472-1294-1

LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN DE OLAJE, SIMULACIÓN MORFODINÁMICA Y LAS TIG

Emilia Guisado Pintado¹, Gonzalo Malvárez García ¹ y Fátima Navas Concha¹

(1) Área de Geografía Física. Universidad Pablo de Olavide. Ctra. Utrera, km 1, 41013 Sevilla. (esguipin@upo.es)

RESUMEN

La complejidad de la zona litoral y la diversidad de actividades socio-económicas y de procesos que soporta requieren de información detallada sobre las condiciones de los motores y receptores del medio morfodinámico, siendo las condiciones energéticas de los motores dinámicos (oleaje, deriva, etc.) los parámetros con más peso en el modelado y evolución de la costa.

De las distintas teorías de generación y propagación de olas se pueden obtener modelos analíticos y descripciones de las características para la mayoría de tipo de olas. Además, los extraordinarios avances tecnológicos han revolucionado no solo el desarrollo computacional de soluciones numéricas para las ecuaciones que gobiernan las teorías de propagación del oleaje sino de instrumentos (software y modelos de generación y manejo de datos de input, output y propagación) para su integración en sistemas físicos complejos.

Con este artículo se lleva a cabo una revisión de los diferentes modelos que se han desarrollado para explicar el fenómeno de generación y propagación de oleaje. Los modelos de propagación del oleaje se pueden dividir en dos grandes grupos; por un lado a) los modelos simples (modelos analíticos, y empíricos) y b) los modelos complejos que necesitan del uso de modelos numéricos computacionales. Estos últimos, se clasifican a su vez, en función de cómo resuelven las distintas ecuaciones implicadas en la generación y propagación del oleaje en: modelos espectrales, modelos de conservación del momento y modelos basados de ecuación de Boussinesq.

Finalmente se introduce la problemática de la compatibilidad y capacidad de integración en los diferentes sistemas de información geográfica y herramientas TIG, siendo esta una de las asignaturas pendientes de cara a la explotación interoperable de los modelos y sus resultados.

Palabras Clave: Modelos computacionales de procesos naturales, morfodinámica litoral y Tecnologías de la Información Geográfica.

Abstract

The complexity of the coastal zone and the diversity of socioeconomic activities and processes that support and maintain requires of detail information about the dynamic factors and the morphodynamic receptors that are acting.

From the wave theories, analytical models and characteristic can be obtained for almost any type of wave

generated in the ocean. Additionally, the latest technological advances have transformed, not only the computational development of numerical solutions for the equations that govern the generation and propagation of waves, but also the instruments (numerical models for generation, management of input/output and propagation) for its integration in complex systems.

In this communication, a review of different existing models of wave generation and wave propagation has been carried out. Wave models could be divided into two groups: a) Simple models (analytical and empirical models) and b) complex models that depend on numerical and computational models. These latter models, which deal with wave generation and propagation can be classified in spectral models, mild slope equation models and Boussinesq formulation's based models. Finally the problem related to the compatibility and integration between the existing geographical information systems and TIGs tools and the wave propagation models, is approached, being this issue one of the matters pending for the interoperable exploitation of these models and their results.

Key words: Computational models for natural processes, coastal morphodynamic's and Geographical Information Technologies.

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

La batería de actividades y procesos que se desarrollan en las zonas costeras tales como la pesca, la navegación y el turismo hacen de este tramo de transición entre el mar y la tierra un espacio de gran complejidad que requiere de un análisis detallado de sus componentes que permita una gestión integrada del mismo. De los procesos naturales que tienen un papel determinante en la evolución bio-física del medio costero el oleaje y la marea (y los demás motores asociados como el viento, por ejemplo) no solo son los más condicionantes sino que su caracterización es extremadamente compleja. El oleaje, por ejemplo, es el resultado de una gran cantidad de interacciones espaciales de parámetros físicos que se acoplan en el océano y que afectan determinadamente la geomorfología y biología de las costas en una serie de procesos que se sitúan entre los grandes retos de las ciencias físicas. Además de la generación del oleaje superficial del oleaje en el océano, el fenómeno de la propagación a través de la interacción de los diferentes fluidos (aire y agua) encuentran en la zona de asomeramiento otro elemento espacial de especial importancia en la generación de procesos bio físicos: la topografía sumergida de la plataforma que, a partir de un umbral, controla la dirección y los modos de transferencia de la energía y la inercia generada por las olas y que es transmitida al fondo y a la masa de agua en forma de corrientes. Este es un escenario donde la aproximación analítica ha desarrollado numerosas avenidas en la investigación científica y que, generalmente, ha resultado en mediciones o en modelización.

Las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG) han tenido un desarrollo exponencial y sus aplicaciones son innumerables. Si bien las TIG pueden establecerse como un soporte para aplicaciones extremadamente amplias, en el ámbito de la modelización de los procesos costeros el uso de las TIG y la evolución de la filosofía que ha dado pie a los modelos actuales de propagación y asomeramiento de las olas y de morfodinámica costera se han mantenido en vías paralelas que rara vez alimentan unas a otras. Sin embargo, la fuerte especialidad de los conceptos de la modelización morfodinámica presentan numerosas oportunidades para la explotación de las TIG como herramienta de soporte para la agilización o incluso computo de procesos a través de la integración de input, output o de modelos completos.

En los últimos años, la evolución y uso de los modelos de simulación de procesos en los estudios de procesos costeros es sin duda uno de los campos donde el desarrollo ha sido más significativo. El alto dinamismo de la costa, unido a las limitaciones que presentan los análisis empíricos, tanto por las dimensiones de la escala de trabajo como por el nivel de detalle requerido, ha sido clave en el desarrollo de modelos de simulación que permitan conocer los procesos y transformaciones que tienen lugar en la costa. La gran aportación, por tanto, de la modelización en este contexto es la capacidad de abstraer los componentes que participan en los complejos procesos morfodinámicos y adecuar, no solo la calidad de la información y datos que se utilizan para los cálculos, sino también los propios procesos físicos (Malvárez y Cooper, 2000). Por todo esto, la modelización permite entender los procesos naturales de las costas, los cuales se plantean en la mayoría de los casos en escalas espaciales donde el cálculo experimental queda fuera del alcance, convirtiéndose en una herramienta muy potente y extendida.

A grandes rasgos existen dos tipos de modelos, cualitativos y cuantitativos, la diferencia entre ambos radica en la naturaleza de las preguntas que pretenden responder (Thieller et. al., 2000). Los modelos

cualitativos responden preguntas del tipo: Cómo, Por qué, que pasaría sí, (¿Qué pasaría si se construye un espigón?), mientras que el objetivo de los modelos cuantitativos es responder preguntas del tipo: Cuánto, Cuándo y Dónde (¿Cuándo desaparecerá la playa?).

El objetivo de este artículo es llevar a cabo una revisión de los modelos cualitativos de propagación de oleaje más utilizados, caracterizarlos y reflexionar sobre su uso, analizar sus fortalezas y debilidades en la modelización de procesos costeros, y por último discutir las limitaciones que presentan en la modelización y en su integración con herramientas TIG.

ANÁLISIS DE LAS TEORÍAS DE PROPAGACIÓN DE OLAJE

A lo largo de todas las costas, las olas representan la mayor fuente de energía en la zona litoral (nearshore), parte de la energía que llega a la costa es reflejada y devuelta hacia el mar abierto, y el resto (la mayoría) se transforma para generar corrientes costeras y transporte de sedimentos y es, en última instancia, la fuerza que dirige y domina los cambios morfológicos a lo largo de este espacio de transición entre el mar y la tierra. Este es uno de los motivos por lo que el conocimiento de las fuerzas que generan las olas y su dinámica es fundamental para entender la morfología costera y gestionar las actividades y procesos que sobre ella se asientan.

Las teorías de olas, formulaciones matemáticas que determinan los cambios en las propiedades de las olas (altura, periodo, velocidad de las partículas, etc.) cuando estas abandonan las áreas de generación y comienzan a llegar a la costa, y que permiten estimar las características de las olas en aguas someras a partir de datos de aguas profundas, se remontan al siglo XIX. De esta forma comenzando con los trabajos clásicos de Gerstener (1802), Airy (1844), Stokes (1847), Kelvin (1887) y Helmholtz (1888), muchos científicos, ingenieros y matemáticos han postulado las diferentes formas de movimientos de las olas sobre el océano y sus interacciones con el viento, con variaciones en la complejidad y exactitud, poniéndose de manifiesto que en aguas someras la complejidad de las teorías aplicables es mayor que en aguas profundas.

Teoría lineal de ondas y teorías no lineales

Las teorías sobre generación y propagación de ondas pueden clasificarse en dos grandes grupos: las teorías sobre ondas de pequeña amplitud que es ampliamente usada para describir ondas gravitatorias, sobre todo en aguas profundas; y en segundo lugar las teorías de ondas largas, más adecuadas para su aplicación en aguas someras.

La teoría más simple sobre generación de oleaje es la Teoría de Airy o teoría lineal de olas, la cual describe el movimiento de las ondas en aguas profundas, no siendo aplicable a aguas someras. Por su parte, en el régimen de Stokes, y sus soluciones de II, III y IV orden, los procesos que sufren las olas en las proximidades de la costa, donde dominan las interacciones no lineales, son tenidos en cuenta. Sin embargo, a pesar de que la teoría de Stokes es aplicable a olas de amplitud finita a todas las profundidades y proporciona una buena descripción de los movimientos de las olas, a veces es necesario recurrir a las teorías de onda larga aplicables a aguas someras.

Las ecuaciones de Boussinesq, aproximación para ondas largas débilmente no lineales, son válidas para modelar la propagación de ondas desde profundidades indefinidas hasta reducidas (Peregrine, 1967), por su parte la Onda Cnoidal (Korteweg-de Vries, 1895), teoría aplicable a ondas de amplitud finita en profundidades reducidas, considera tanto los efectos dispersivos como los no lineales y destaca por su buena aplicación a olas de crestas escarpadas separadas por grandes surcos (valles), típicas de aguas someras. Finalmente, la onda solitaria (Russell, 1844) se caracteriza por no ser una onda oscilatoria sino de translación; este tipo de ondas largas se asocian a maremotos o deslizamientos.

De las distintas teorías del oleaje que se han ido desarrollando se pueden obtener modelos analíticos y descripciones de las características para la mayoría de tipo de olas (oleaje tipo sea, oleaje tipo swell, etc.) lo que permite su análisis y estudio; sin embargo aun existen aspectos teóricos relacionados con las ecuaciones de gobierno del movimiento ondulatorio y las ecuaciones de contorno, sobre todo en condiciones no lineales dominantes, que dificulta obtener soluciones analíticas completas. A este respecto, en los últimos años se ha producido un avance, lográndose importantes avances en el desarrollo computacional de soluciones numéricas para las ecuaciones diferenciales que gobiernan las teorías del oleaje, lo cual se traduce en la

aparición de modelos de simulación más complejos y precisos capaces de resolver las ecuaciones de gobierno y dar una aproximación más real al problema de la propagación de oleaje en las proximidades de la costa.

ANÁLISIS DE LOS MODELOS TEÓRICOS DE PREDICCIÓN DEL OLAJE

En los últimos 20 años los avances en el conocimiento de los procesos del intercambio de momento de inercia en la interface aire-agua en los océanos ha generado un continuo desarrollo de modelos que describen la física de dichos procesos (Massel, 1996). Los procesos y transformaciones que sufren las olas (somerización, refracción, difracción y reflexión y rotura) al separarse del campo de generación y en su viaje y aproximación a la costa son diferentes a los que se producen en aguas profundas. El conocimiento preciso de estos procesos es tarea difícil y gracias a los modelos de simulación, se puede simular y conocer estas transformaciones cuya importancia en el modelaje costero, en la dinámica de corrientes y sedimentos, así como en la morfodinámica los hace imprescindibles en cualquier proceso de caracterización morfodinámica. De esta forma los modelos numéricos de previsión de oleaje se han convertido en una herramienta ampliamente utilizada por ingenieros marítimos, oceanógrafos e investigadores.

Las primeras técnicas de pronóstico de oleaje se desarrollaron después de la Segunda Guerra Mundial, en las que se usaban relaciones empíricas entre la velocidad del viento y la altura de la ola para obtener características del oleaje (Sverdrup y Munk, 1947), surgiendo después numerosos estudios basados en los principios que explican las características y el comportamiento de las olas. El estudio de Pierson et al. (1955) distinguió tres zonas en el análisis del oleaje: el área de generación, de propagación y de extinción en la costa, utilizando por primera vez el concepto de espectro en la expresión de oleaje. Más tarde, Pierson y Moskowitz (1964) desarrollaron el espectro P-M que supuso un avance sobre la técnica de predicción de oleaje.

A diferencia de la descripción estadística del oleaje, la descripción espectral se basa en que debido a que las olas superficiales se forman como resultado de los campos de vientos, el cual a su vez fluctúa entre valores medios, las olas superficiales en lugar de ser olas monocromáticas simples, presentan un espectro de alturas, frecuencias y longitudes de onda. El estudio del espectro de olas, por tanto, proporciona una descripción más amplia y detallada de un campo de olas que una única medida de altura de ola y periodo, proporcionando una información más real que el análisis estadístico.

Los modelos de propagación y pronóstico de oleaje se pueden clasificar, siguiendo el ejemplo de Andrew (1999), en dos grandes grupos; por un lado a) los modelos simples que pueden ser usado de forma rápida y la mayoría de las veces en el mismo sitio de estudio; y b) los modelos complejos siendo estos los que necesitan del uso de un ordenador debido a la incorporación de complejos cálculos matemáticos.

Modelos simples, empíricos o paramétricos

El principio básico del método empírico de predicción es que las relaciones entre los parámetros de las olas son gobernadas por leyes universales, siendo, quizás, la más fundamental la ley de alcance (*fetch*)-crecimiento. Los modelos empíricos predicen parámetros como la altura significativa de ola a partir de valores como la velocidad del viento, el *fetch*, la duración y la profundidad a través de análisis dimensionales. Son modelos básicos que permiten realizar cálculos rápidos durante el trabajo de campo, por ejemplo.

Fórmulas simples desarrolladas empíricamente desde observaciones de viento y olas fueron postuladas desde 1947 (Sverdrup y Munk, 1947), el cual fue el primer método de pronóstico ampliamente usado. Este método fue revisado por Bretschneider (1952) y se conoció como el Método SMB. Datos más recientes permitieron revisar este método para que Hasselman et al. (1973) generara los nomogramas que fueron, y son, usados para el pronóstico de oleaje en casos de alcance (*fetch*) y tiempo limitado.

Ejemplos de estos modelos son el denominado Revised Shore protection Manual Model (RSPM) desarrollado por Hurdle y Strive (1989), el modelo conocido como Krylov, Strelkov y Tsyplukhin (1976) que permite mediante la aplicación de varias ecuaciones, como el anterior, calcular la altura media de ola y el periodo usando el *fetch*, la velocidad del viento y la profundidad, el método Donelan, o las tablas y nomogramas presentadas por el Coastal Engineering Manual (CEM), ampliamente usadas.

Modelos complejos: modelos computacionales

Existen varias clasificaciones de los modelos de base física que simulan las condiciones de oleaje en la costa, atendiendo a las ecuaciones que utilizan en la propagación de oleaje: modelos basados en la ecuación de pendiente suave, basados en la ecuación de la conservación de la masa; en función del fenómeno que describen: los modelos monocromáticos que calculan refracción y difracción o los modelos que calculan el espectro direccional, también se pueden clasificar según la teoría de ondas en los que se basan los cálculos matemáticos: teoría lineal de Airy, Stokes o las teorías de ondas largas basadas en las ecuaciones de Boussinesq. Por último, la clasificación más aceptada de los modelos para simular la evolución del oleaje es la que los considera en dos grandes grupos: de resolución de fase (phase resolving) y los promedio de fase (phase averaged) (Battjes, 1994).

Los modelos que resuelven la fase, basados en las ecuaciones no estacionarias de conservación de la masa y cantidad de movimiento integradas en vertical, son usados para condiciones de oleaje muy variables en dominios pequeños y generalmente no consideran generación ni disipación de energía (Ris, 1997; Massel, 1996; Monbaliu et al., 2000), siendo una de las principales ventajas su buena simulación de los procesos de difracción y refracción. Por su parte, los modelos promediados en la fase, se basan en la conservación de la energía espectral, y asumen que las propiedades de las olas varían lentamente a escala de longitud de onda. A diferencia de los modelos que resuelve la fase, consideran los fenómenos de generación, disipación de energía y las interacciones no lineales en los que la superficie del mar es descrita por un espectro de energía (Bolaños, 2004).

La aplicación de los modelos que resuelven la fase se limita a áreas relativamente pequeñas (órdenes de kilómetros) mientras que los modelos promediados en la fase, no precisan una resolución tan pequeña pudiendo ser aplicados en áreas mayores. Además, los diferentes procesos involucrados en la propagación del oleaje (disipación, refracción, difracción, interacciones no lineales, etc.) no son tratados de igual forma en ambos, por lo que será necesario, y en algunos casos crítico, aplicar uno u otro en función de las condiciones predominantes en cada caso, de la zona de estudio y del interés en conocer unas u otras variables.

a) *Modelos de resolución de fase*: se encuentran los modelos basados en la ecuación de la pendiente suave (Berkhoff, 1972) y su versión parabólica de Radder (1979), y los basados en las aproximaciones de Boussinesq (Peregrine, 1967, Madsen y Sørensen, 1992).

El modelo REF/DIF, desarrollado por Kirby y Dalrymple (1983) a partir de la transformación del modelo lineal parabólico de refracción y difracción de Radder (1979). Está basado en la ecuación de la pendiente suave (Mild Slope equation) que es una ecuación para el estudio de ondas propagándose por fondo suavemente variable, basada a su vez en la teoría lineal de ondas, y que simula conjuntamente los efectos de la refracción y la difracción sobre una batimetría variable. Los datos de entrada del modelo son un grid con datos batimétricos, y las condiciones del oleaje (altura y dirección de las olas en las condiciones de contorno, el periodo de ola en segundos, las mareas (opcional) y la amplitud de las olas). La principal desventaja es que se necesitan 5 datos de longitud de onda para resolver una ola, y por tanto, dada la densidad de datos REF/DIF normalmente se aplica a regiones pequeñas (del orden de kilómetros). Otra desventaja es que no modela campos de olas crecientes (Andrew, 1999).

El Modelo REFRACT basado en la conservación del momento y que fue desarrollado en la década de los 80 a partir de la aproximación hiperbólica de la ecuación de la pendiente suave; se trata de un modelo numérico explícito que permite estimar la refracción y peraltamiento de oleaje lineal sobre batimetría regular e irregular, incluyendo el efecto de la interacción ola-corriente. Puede ser usado en grandes áreas de más de 100 km porque requiere muy pocos datos de entrada, siendo la principal desventaja su incapacidad para simular efectos de difracción, reflexión e interacción no lineales ola-ola.

Los modelos basados en las ecuaciones y aproximación de Boussinesq, se basan en la ecuación de continuidad y conservación del momento de inercia para ondas de superficie libre en aguas poco profundas, modelando la propagación de ondas desde profundidades indefinidas hasta reducidas. Son muchas las aproximaciones que se ha llevado a cabo a partir de las ecuaciones de Boussinesq lo que ha dado lugar a un número de modelos que simulan los procesos más representativos que sufren las olas en las proximidades de la costa: BOUSS 2D (Nwogu y Demirbilek, 2001) y FUNWAVE 2D (Wei et al., 1995) y COULWAVE (Lynett y Liu, 2004).

El modelo MIKE 21 (BW), desarrollado por Madsen y Sørensen (1992), es uno de los modelos tipo Boussinesq más utilizados y es capaz de simular flujos no estacionarios en dos dimensiones. A diferencia de

otros modelos basados en las ecuaciones de Boussinesq, modela la propagación de olas por la acción del viento desde aguas profundas a aguas someras sobre una batimetría variable teniendo en cuenta los fenómenos de refracción, difracción, reflexión y las interacciones no lineales entre olas. Los datos de entrada del modelo son la batimetría, tipo de modelo y ecuaciones, parámetros numéricos, tipo de contorno, ciclos de tiempo y longitud de la simulación. Los datos de calibración son las condiciones iniciales y de contorno, los datos sobre generación de oleaje, rotura de ola, fricción de fondo, movimiento de la línea de costa, datos sobre reflexión y transmisión parcial de oleaje, y absorción de oleaje. La principal desventaja es que requiere varios datos de entrada para resolver la ecuación de olas y por esto solo son aplicables en pequeñas regiones costeras, además no simula la disipación de energía.

b) *Los modelos de promediado de fase o modelos espectrales* describen el espectro de energía de la ola, y por tanto la superficie irregular del mar se describe mediante una función espectral de energía. Los modelos espectrales tuvieron su desarrollo entre los años 50 y 60, con los importantes avances introducidos por el concepto de espectro de ola de Pierson y Moskowitz (1964), siendo el trabajo de Gelci et al. (1956) los primeros en introducir el concepto de la ecuación de transporte espectral. Los modelos espectrales resuelven la ecuación de balance de energía teniendo en cuenta durante la evolución del espectro de ola en aguas someras, el efecto de profundidad, refracción, fricción con corrientes y fondo, el crecimiento y decaimiento de la energía de ola y las interacciones no lineales entre ellas.

Dependiendo de como se resuelva numéricamente esta ecuación, y la evolución teórica y experimental en la estimación de los términos que componen las fuentes o los sumideros de energía, los modelos espectrales se clasifican en primera, segunda o tercera generación, en función de las mejoras impuestas con respecto a las limitaciones del anterior.

Los modelos de primera generación no incluyen el efecto de las interacciones no lineales entre olas, sobreestiman la acción del viento y subestiman la fuerza de transferencia no lineal casi en un orden de magnitud (WAMDI Group, 1988), siendo un ejemplo de este tipo de modelos el VENICE (Cavaleri y Rizzoli, 1981) para aguas someras. Los modelos de segunda generación, a pesar de incorporar las interacciones no lineales mediante la parametrización y mediante la utilización del espectro de JONSWAP, sufren limitaciones en la transferencia no lineal de energía y no se comportan bien en condiciones extremas de vientos rápidamente variables. Esto dio lugar a la aparición de los modelos de oleaje de tercera generación, el principal avance hasta la fecha para la predicción de oleaje generada por viento.

En los modelos de tercera generación no se impone una forma definida del espectro y, tanto la ecuación de transporte de energía, como los términos no lineales se calculan completamente. Algunas de las ventajas que presentan estos modelos son que permiten observar la evolución en el espacio y el tiempo del espectro de frecuencias y la altura de la ola significativa (H_s), lo cual los hace más precisos, además mejoran, con respecto a los predecesores, la simulación en la transferencia de energía de mar de viento a mar de fondo. El primer modelo, WAM (Wave Model) fue desarrollado y publicada por el grupo WAMDI (Wave Model Development and Implementation) en 1988, siendo actualmente uno de los más utilizados ya que ha sido extensivamente testado a escala global y mares confinados y acoplado a los modelos meteorológicos. Entre los modelos de tercera generación más utilizados por la comunidad científica se encuentran, además del WAM, el WAVEWATCH III (Tolman, 1991) y el TOMAWAC (Benoit et al., 1996) para aguas profundas y SWAN (Booij et al., 1999; Ris et al., 1999), STWAVE (Simth et al., 2001) y MIKE21 Spectral Wave (SW) (DHI, 2005) para aguas someras.

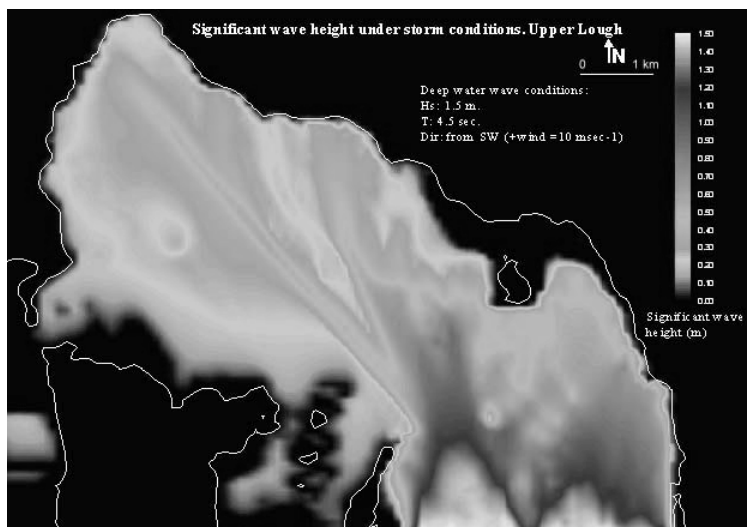


Figura 1. Output del modelo SWAN elaborado en Surfer surface mapping system (Golden Software).

SWAN (Simulating WAVes Nearshore) modelo espectral de tercera generación, euleriano, no estacionario y promediado en la fase, desarrollado por la Universidad de Delft para la predicción de olas de viento bajo condiciones de limitación de *fetch* y profundidad bajo condiciones estacionario. Describe la evolución del espectro de energía del oleaje teniendo en cuenta las condiciones del viento, el oleaje, corrientes y batimetrías, calculando procesos de generación, disipación e interacciones no lineales. Las principales ventajas son que modela la geometría, propagación y los procesos que sufren las olas en el viaje desde el área de generación hasta la costa, se puede acoplar con modelos meteorológicos y ha sido ampliamente validado tanto empíricamente como en laboratorio. Los datos de entrada del modelo necesarios son el grid de batimetría de la zona y los datos climáticos de oleaje, que pueden ser datos paramétricos de ola (altura, periodo y dirección) y de viento (dirección y velocidad), y datos espectrales de viento y campos de vientos y de olas en grids. (otros datos de entrada adicionales son el tipo y forma del espectro, valores de difracción, vegetación del fondo, tipo de whitecapping, etc.) Como el viento es la componente más importante en los modelos espectrales, datos precisos y con buena resolución sobre los campos de viento incidentes son un aspecto clave en la predicción del oleaje.

DISCUSION: EL USO DE MODELOS

La evolución en el uso y desarrollo de modelos destinados al conocimiento y modelización de la propagación de oleaje y las transformaciones que sufren las olas en las proximidades de la costa ha experimentado un notable avance en los últimos 50 años, conviviendo en la actualidad con modelos basados en nomogramas que aparecieron a principios del siglo pasado. Teniendo en cuenta las limitaciones evidentes de los modelos simples, cuya utilización ha caído en desuso y esta limitada a situaciones muy concretas, tanto por la incapacidad de simular los procesos mas importantes que intervienen en la propagación del oleaje, como por los crecientes avances y evolución de los modelos complejos, de aquí en adelante la discusión se centrará en éstos últimos.

Aspectos a considerar para el uso de los modelos: input y output

La gran variedad de modelos existentes pone de manifiesto por un lado, la complejidad de los procesos involucrados en la generación y propagación del oleaje generado por viento, los cuales se acentúan en dificultad en las proximidades de la costa, así como la variedad de formas existentes de aproximación al problema y de simulación de las condiciones de oleaje: diferentes teorías y formulaciones matemáticas que explican los procesos y transformaciones que sufre el oleaje en su viaje desde el área de generación hasta su llegada a las costas.

Este hecho a su vez permite llevar a cabo un análisis de cuál es el modelo más conveniente basado en las necesidades de usuario, pero a la vez dificulta el trabajo de elección, convirtiéndolo en uno de los aspectos más importantes en un estudio de modelaje costero, ya que de ello dependerá la calidad no solo de las simulaciones sino de los resultados y por tanto la validez y precisión del estudio. Son muchos los factores que influyen en la elección, entre los que destacan: el ámbito costero de aplicación, la tipología, calidad y disponibilidad de datos de entrada del modelo, los procesos que se pretenden simular y conocer, el grado de conocimiento y experiencia del usuario, la disponibilidad de modelo (software libre o con licencia, existencia de manuales de usuario).

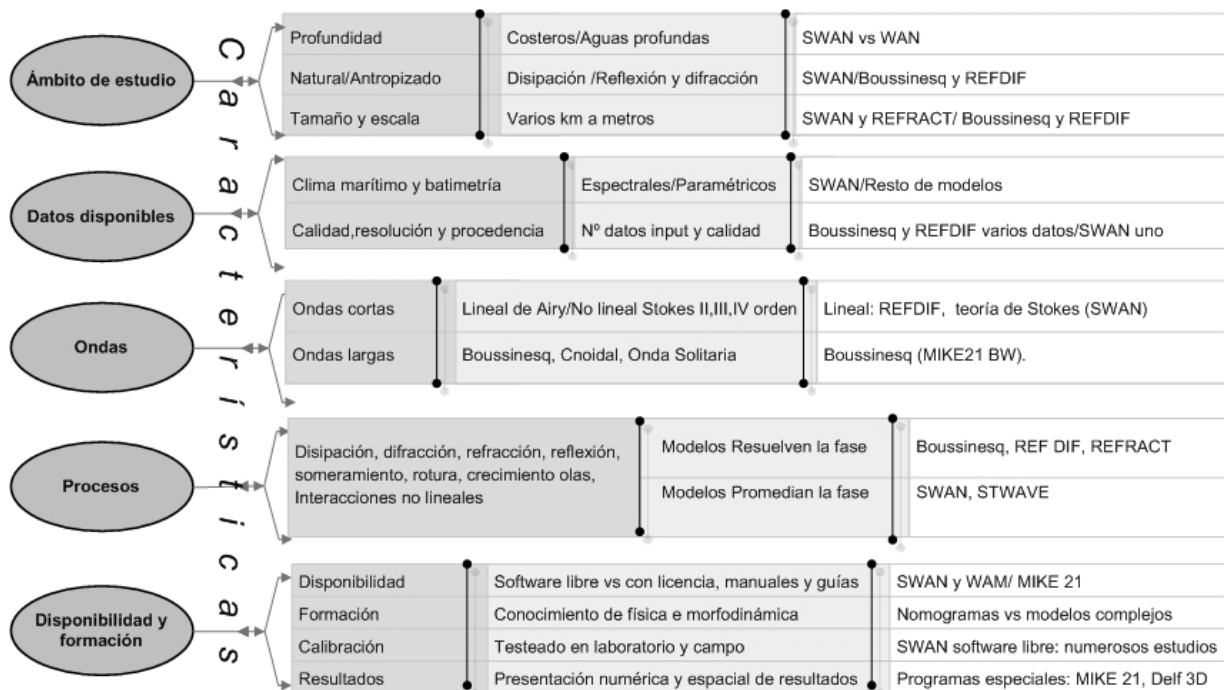


Figura 2. Aspectos a considerar en la elección del modelo de propagación de oleaje

Limitaciones en el uso de los modelos

El empleo de los modelos de propagación de oleaje en el estudio de los procesos costeros y morfodinámicos, a pesar de ser una herramienta de gran utilidad y ampliamente utilizada no solo en ingeniería sino cada vez más en el ámbito académico relacionado con la gestión costera, no está exento de polémica debido a la existencia de conocidas limitaciones. Estas limitaciones se derivan de los aspectos señalados anteriormente (figura 2), unido a la importancia del conocimiento del ámbito de análisis, y por último, y más importante, la validación de los resultados con trabajo de campo y/o estudios e investigaciones existentes desarrolladas en el ámbito de estudio o en lugares similares, lo que se conoce como calibración empírica del modelo.

La calibración empírica de los modelos de simulación de oleaje es sin duda uno de los aspectos más importantes a considerar en la interpretación y validez de los resultados obtenidos mediante las simulaciones numéricas. Ésta nos permite testear, comparar y contrastar los resultados obtenidos con la realidad, extrapolar las deducciones del modelo al escenario en cuestión, y por tanto localizar espacialmente los resultados numéricos. Sin embargo, esto no es factible en la mayoría de los casos, debido tanto a la imposibilidad de llevar a cabo un extenso e intenso trabajo de campo que permita tener una batería de datos comparable con las simulaciones del modelo, como por la escala a la que se estudian éstos procesos (áreas de varios kilómetros).

Relacionado con la utilización de modelos cuantitativos para el estudio del comportamiento de las playas, Cooper y Pilkey (2004) desarrollaron una metodología denominada "Enfoque Integrado" que basada en la combinación de las simulaciones del modelo, con trabajo de campo y conocimiento basado en la experiencia pasada, proporciona soluciones cualitativas que ayudan a comprender e interpretar las

respuestas del tipo porque, como, y que pasaría sí. En el caso de los modelos cualitativos, objeto del análisis de este artículo, parece recomendable la aplicación del “Enfoque Integrado”, con una serie de modificaciones específicas para ajustarla a los estudios morfodinámicos e hidrodinámicos para los aquí se discute su aplicabilidad.

El conocimiento previo de la zona costera de estudio, y las áreas adyacentes, la existencia previa de gestión costera de la zona, estudios de investigación específicos y el conocimiento de los locales proporcionan un amplio campo de conocimiento que facilita la interpretación de los resultados. Así mismo, el conocimiento y análisis de las zonas costeras similares en cuanto a morfología, orientación y régimen marino proporcionan una buena base predictiva y de apoyo. De forma adicional, el conocimiento del clima oceanográfico general, la anchura de la plataforma continental, el *fetch*, la amplitud mareal, la orientación de la costa, el clima marino (olas y viento), así como los modelos de clasificación morfodinámica de playas (Wright y Short, 1983) proporcionan unos criterios de gran utilidad. Otro elemento a considerar es la existencia de geoindicadores locales: presencia de obras de ingeniería (espigones, muelles, diques, etc) y estudios de campo que informen sobre el comportamiento de la playa bajo tormentas y temporales (trazadores, desarrollo de perfiles, muestras de sedimentos). Por último, es muy aconsejable que el modelo de simulación elegido cuente con una calibración previa extensa, tanto en laboratorio como en trabajo de campo, y que esta sea avalada científicamente, que el análisis de los resultados se puede comparar con registros antiguos de la zona de estudio o con estudios de campo realizados con otras técnicas (empíricas o no), y de forma complementaria se valide el modelo en sitios pilotos escogidos por su representatividad, y cuya escala y conocimiento previo (existencia de estudios morfodinámicos), permita una validación, comprobación y calibración del modelo para el resto del ámbito de estudio.

Otra de las limitaciones de la modelización costera se relaciona con el análisis y la representación de los resultados obtenidos. Esto se debe a dos motivos fundamentales, por un lado la necesidad por parte del usuario de cierto conocimiento para la interpretación de los resultados, así como su contextualización en el ámbito para el que se están analizando y por otro, la necesidad de herramientas específicas para llevar a cabo el procesamiento y representación espacial de dichos resultados.

Los resultados de las simulaciones requieren en todos los casos una interpretación de las variables, al tratarse de indicadores de procesos y fenómenos como son la disipación de energía, la velocidad orbital o la reflexión de las olas, para lo cual la destreza del usuario es fundamental. En cuanto a la representación de los resultados, en la mayoría de los casos, los procedentes de los modelos se corresponden con datos numéricos, que se pueden representar en forma de tablas, gráficas, mapas o series temporales. Sin embargo, tanto el postprocesamiento de los datos como la representación requiere de programas especiales de base matemática (Matlab y los derivados de Fortran), en algunos casos específicamente desarrollados para ese modelo o ejecutables en Windows como Surfer, tratándose en todos los casos de software complejos y que requieren la adquisición de la pertinente licencia.

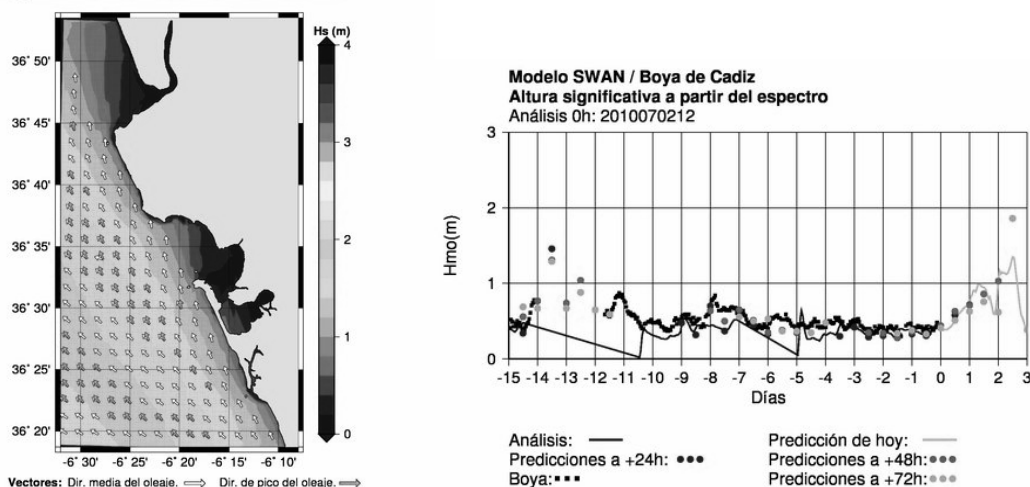


Figura 3. Ejemplo de resultados gráficos de SWAN explotados con Matlab (Puertos del Estado, 2010).

Este hecho dificulta el uso e integración con los sistemas de información geográfica más comunes, para los cuales se requiere el desarrollo en el mejor de los casos de scripts específicos, ya que requiere llevar a cabo toda una serie de procesamiento previo para poder exportar los datos, o en muchos casos la imagen, y así representar los resultados. La importancia, y en última instancia la necesidad, de ofrecer el acceso libre a los datos generados basado en los principios de la Directiva Inspire, así como la integración y la adecuación con las nuevas formas de intercambio de información basados en los servicios interoperables y en las infraestructuras de datos espaciales es una de las asignaturas pendientes en la modelización costera.

CONCLUSIÓN

Los modelos de simulación de la propagación de oleaje en las proximidades de la costa son unas de las herramientas más utilizadas hoy en día en la toma de decisiones ingenieriles, pero también cada vez más en los estudios morfodinámicos y costeros relacionados con la gestión integral del litoral y el manejo de las costas. Proporcionan, gracias a los avances que han experimentado, una información muy ajustada de los procesos e interacciones de las olas, causantes de los cambios en la morfología costera, permitiendo una aproximación física y real de procesos complejos que existen a escalas de varios kilómetros en las costas.

La gran variedad de modelos desarrollados ponen de manifiesto la complejidad de los procesos e interacciones que sufre el oleaje en su viaje hacia las costas, dificultando a su vez el proceso de selección del modelo, y haciendo de este una pieza clave de cualquier modelización. La variedad de modelos, teorías y aproximaciones, la tipología del estudio y las características de la franja costera, la disponibilidad de datos de entrada (olas, viento y batimetría); así como el conocimiento del usuario y la calibración del modelo son algunos de los aspectos claves que garantizan el éxito en la utilización de este tipo de técnicas de análisis.

Por último, la difícil integración de los resultados del modelo en los sistemas de información geográfica y su análisis mediante estas técnicas se debe fundamentalmente a que tradicionalmente han sido técnicas exclusivas de ingenieros y matemáticos, diseñadas y usadas por ellos; pero que debido al creciente uso en las ciencias ambientales y marinas, y al demostrado potencial que presentan como herramienta en la toma de decisiones relacionadas con las actuaciones en la costa, las mejoras en dicha integración y su uso mediante sistemas interoperables deberían ser objeto de futuras investigaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrew, C.J.F. (1999): Bibliographic review of Nearshore Wave Models. *DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory*, Australia. DSTO-GD-0214.

Battjes, J. A. (1994): Shallow water wave modelling. *Proceedings of the International Symposium on Waves-Physical and Numerical Modelling*, Vol.I, pp. 1-23.

Benoit, M., Marcos, E. y Becq, E. (1996): Development of a third-generation wave shallow-water wave model with unstructured spatial meshing. *Proceedings of the 25th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, pp. 465-478.

Bretschneider, C.L. (1952): Revised wave forecasting relationships. *Proceedings 2nd Conference in Coastal Engineering*.1:1-5.

Bretschneider, C.L. (1958): Revision in wave forecasting, deep and shallow water. *Proceedings 6th Conference in Coastal Engineering*. 1: 30-67.

Bolaños, R. (2004). *Tormentas de oleaje en el Mediterráneo: Física y Predicción*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.

Booij, N., Ris, R.C. y Holthuijsen, L.H. (1999): A third generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation, *Journal of Geophysical Research*, 104, C4, pp.7649-7666.

Cavaleri, L. y Rizzoli, P.M. (1981): Wind wave prediction in Shallow water theory and applications. *Journal of Geophysical Research*, 8b, CII, pp.10961-10973.

Cooper, J.A.G. y Pilkey, O.H. (2004): Alternatives to the Mathematical Modeling of Beaches. *Journal of Coastal Research*, 20 (3), pp. 641-666.

DHI (2005): Mike21 spectral wave module, Scientific documentation. Danish Hydraulic Institute (DHI). <http://www.mikebydhi.com/>

Gelci, R. Cazale, H., y Vassal, J. (1956): Prediction of waves. The method of frequency-directional spectral densities. *Bulletin d'Information. Comite Central d'Océanographie d'Etude des Cotes*, 9, 416-435 pp

Hasselmann K., Barnett, T.P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D.E., Enke, K., Ewing, J.A., Gienapp, H., Hasselmann, D.E., Kruseman, P., Meerburg, A., Muller, P., Olbers, D.J., Richter, K., Sell, W. y Walden, H. (1973): *Measurements of wind-wave growth and swell decay during the joint North Sea Wave Project (JONSWAP)*. Deutsche Hydrographische Zeitschrift Suppl. Institute of Hamburg.

Hurdle, D.P. y Stive, M.J.F (1989): Revision of SPM 1984 wave hindcast model to avoid inconsistencies in engineering applications. *Coastal Engineering*, 12, pp. 339-357.

Kirby, J.T. y Dalrymple, R.A. (1983): A parabolic equation for the combined refraction-diffraction of stokes waves by mildly varying topography. *Journal of Fluid Mechanics*, 136, pp.453-466.

Krylov, Y.M., Strekalov, S.S. y Tsyplukhin, W.F. (1976): *Vetrovyye Volny I ikh Vozdeystviye na Sooruzheniya (Wind Waves and Their Interaction with Structures)*, Gidrometeoizdat, Leningrad, 255 pp.

Lynett, P. y Liu, PL-F. (2004): *Modelling wave generation, evolution and interaction with Depth-Integrated, Dispersive wave equations. COULWAVE Code Manual*. Cornell University. Long International Wave Modelling Package.

Madsen, P.A. y Sørensen, O.R. (1992): A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part 2: A slowly varying bathymetry. *Journal of Coastal Engineering*, 18, pp. 183-204

Malvárez G.C. y Cooper, J.A.G. (2000): A whole surf zone numerical modelling approach to the characterisation of nearshore environments and beaches. *Journal of Coastal Research*, 16 (3), 808-823 pp.

Massel, S.R. (1996): *Ocean Surface Waves: Their physics and Predictions. Advanced Series On Ocean Engineering*, Volume 11 Edit. World Scientific, 491 pp.

Monbaliu, J., Padilla-Hernández, R., Hargreaves, J., Carretero, J.C., Weimin, L., Sclavo, M. y Gunther, H. (2000): The spectral wave model, WAM adapted for applications with high spatial resolution. *Coastal Engineering*, 41, pp. 41-62

Nwogu, O. y Demirebilek, Z. (2001): *BOUSS-2D: A Boussinesq Wave Model for Coastal Regions and Harbors Report*. ERDC/CHL TR-01-25. U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC.

Peregrine, D. H. (1967): Long waves on a beach. *Journal of Fluid Mechanics*, 27, pp. 815-882.

Pierson, W. J., Neumann, E. y James, R.W. (1955): *Practical methods of observing and forecasting ocean waves by means of wave spectra and statistics*. U.S. Navy Hydrographic Office Publication. No. 603.

Pierson, W.J. y Moskowitz, L. (1964): A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S.A. Kitaigorodskii. *Journal Geophysical Research*, 69, pp.5181-5190.

Puertos del Estado. (2010). <http://www.puertos.es>

Radder, A.C. (1979): On the parabolic equation method for water-wave propagation. *Journal of Fluid Mechanics*, 95, pp.159-176.

Ris, R.C. (1997): *Spectral modelling of wind waves in coastal areas*, (Ph.D. Dissertation Delft University of Technology, Department of Civil Engineering), Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, Report No. 97-4, Delft University of Technology, The Netherlands. 160 p.

Ris, R.C., Holthuijsen, L.H., y Booij, N. (1999): A third-generation wave model for coastal regions. 2. Verification. *Journal of Geophysical Research*, 104 (C4), pp.7667-7681.

Smith, J. M., Sherlock, A. R. y Resio, D. T. (2001): *STWAVE: Steady State wave model user's manual for STWAVE V3.0*. ERDC/CHL SR-01-1, US. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg.

Sverdrup, H.V. y Munk, W.H. (1947): *Wind, sea and swell: Theory of relation to forecasting*. H.O. Publication 601, U.S. Naval Oceanographic Office. Washington, D.C.

Thieller, E.R.; Pilkey, O.H.; Young, R.S.; Bush, D.M.; y Chai, F. (2000): The use of mathematical models to predict beach behaviour for U.S. Coastal engineering: a critical review. *Journal of Coastal Research*, 16, pp. 48-70.

Tolman, H. L. (1991): A third generation model for wind waves on slowly varying, unsteady and inhomogeneous depths and currents. *Journal of Physical Oceanography*, 21, pp. 782-797.

WAMDI Group (13 authors) (1988): The WAM model. A third generation ocean wave prediction model. *Journal of Physical Oceanography*, 18, pp.1775-1810.

Wei, G., Kirby, J.T. Grilli, S.T. y Subramanya, R. (1995): A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. Part 1: Highly nonlinear, unsteady waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 294, pp.71-92.

Wright, L.D. y Short, A.D. (1983): Morphodynamics of beaches and surf zones in Australia. En P.D. Komar (ed): *Handbook of Coastal processes and erosion*. Boca Raton, FL. CRC Press, pp. 35-64.