

# Inundación costera originada por la dinámica marina

Raúl Medina y Fernando J. Méndez



**DESCRIPTORES**  
 INUNDACIÓN COSTERA  
 NIVEL DEL MAR  
 MAREA METEOROLÓGICA  
 ATLAS DE INUNDACIÓN PENINSULAR ESPAÑOL  
 CAMBIO CLIMÁTICO

## Introducción

Las excepcionales condiciones del litoral para el desarrollo de múltiples actividades humanas han propiciado una continua migración de habitantes, industrias y servicios a las zonas costeras. Los motivos de dicha migración han evolucionado en el tiempo, siendo históricamente el comercio, la actividad portuaria y los asentamientos agrícolas en los fértiles deltas y llanuras aluviales las causas de dicha migración, mientras que en la actualidad lo son el turismo asociado al ocio y el disfrute del litoral.

De acuerdo con el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC), cerca de un 50 % de la población mundial vive en la zona costera. Solo en Europa más de 70 millones de habitantes residen en municipios costeros, siendo el valor total de los bienes situados en una banda de 500 metros de la costa europea, incluidas las viviendas, los terrenos agrícolas y las instalaciones industriales, cercano a un billón de euros (Proyecto EuroErosion: <http://www.euroErosion.org>).

Todos estos habitantes y bienes materiales se encuentran amenazados por la inundación costera debida a la dinámica marina. Según las predicciones del IPCC, el riesgo de inundación aumenta cada año para infraestructuras urbanas, turísticas e industriales, tierras de cultivo, áreas de recreo y hábitats naturales. Dicho Panel Intergubernamental estima que el número anual de víctimas debido a la inundación costera alcanzará las 158.000 en 2020 y que más de la mitad de los humedales desaparecerán como consecuencia de dicha inundación.

El coste económico de las acciones de mitigación de los efectos frente a la inundación costera, íntimamente relacionados con la erosión litoral, va en aumento. De acuerdo con los resultados del proyecto EuroErosion, en 2001 los fondos dedicados a la protección de las costas en Europa ascendieron a 3.200 millones de euros, un 30 % más que en 1986. Es im-

portante señalar que dicho coste solo refleja las inversiones realizadas para proteger los bienes expuestos a un riesgo inminente, pero no los costes inducidos en las actividades humanas. Según estudios previos del IPCC dichos gastos tienen una media anual de unos 5.400 millones de euros.

## Oscilaciones del nivel del mar

El nivel del mar sufre continuas variaciones en respuesta a los diferentes forzamientos atmosféricos, marinos, tectónicos y planetarios, siendo habitual clasificar dichas oscilaciones por la escala temporal de la oscilación. Al margen de los tsunamis, objeto de un artículo específico de esta edición de la revista, las oscilaciones más relevantes en términos de inundación costera son: el oleaje, las ondas infragravitatorias, la marea meteorológica, la marea astronómica y la variación del nivel del mar de largo período.

El oleaje es, sin lugar a dudas, la oscilación del mar más comúnmente conocida y también la más relevante en términos de erosión litoral e inundación costera. El oleaje, generado por la acción del viento sobre la superficie del mar, es una oscilación del nivel del mar con períodos entre 3 y 30 segundos cuya magnitud, en un período de retorno de 50 años, supera los nueve metros de altura de ola significativa en las costas atlánticas españolas y los seis metros en las costas mediterráneas.

En la figura 1 se muestra un ejemplo de los efectos de los temporales de oleaje en las infraestructuras portuarias. La figura muestra el puerto pesquero-deportivo de Llançá (Gerona), el cual estuvo sometido a un temporal de dirección Este-Nordeste *-llevantada-* en octubre de 1997. La virulencia del temporal (altura de ola significativa de 5,4 m en la boya de Rosas) se aprecia en la fotografía A, donde se muestra el rebase de la

ola por encima del espaldón del puerto afectando a la lonja. Por otro lado, como puede apreciarse en la fotografía B, la playa de la Gola fue completamente inundada por la lámina de agua. En este caso particular la sobreelevación por marea meteorológica no fue de gran importancia, debiéndose la inundación casi en exclusiva a la magnitud del oleaje (la sobreelevación por marea meteorológica fue inferior a los 10 cm).

Las ondas infragravitatorias son oscilaciones del nivel del mar con períodos entre 50 y 500 segundos. El origen de esta oscilación es la modulación del oleaje de viento en paquetes de olas grandes olas pequeñas producida por la propagación del mismo en la plataforma continental. Esta modulación del tren de oleaje incidente origina perturbaciones en el equilibrio de fuerzas dinámicas de la masa de agua, generándose variaciones en el nivel del mar que tienden a equilibrar el sistema. Estas oscilaciones, conocidas como ondas infragravitatorias o como ondas largas asociadas a los grupos de olas, tienen una magnitud de centímetros o escasos decímetros en aguas profundas pero, como los tsunamis, se amplifican a medida que alcanzan la costa. Este tipo de oscilación muestra su relevancia en los puertos, donde puede acoplarse con los modos propios de oscilación de las dársenas dando lugar a fenómenos de resonancia portuaria, y en las playas, donde la rotura del oleaje libera las ondas largas atrapadas en los grupos y la suave pendiente del talud de las playas amplifica la magnitud de las mismas, llegando a superar el metro en condiciones de temporal.

La marea meteorológica es una oscilación del nivel del mar debida a la acción conjunta de la presión atmosférica y el arrastre del viento, y su período puede ser desde varios minutos a días. Las bajas presiones atmosféricas asociadas al paso de las borrascas generan un ascenso del nivel del mar asociado a la depresión barométrica de las mismas. Las grandes borrascas extra-tropicales que afectan al litoral español generan, de modo habitual, sobreelevaciones del orden de 30-40 centímetros y pueden llegar a generar sobreelevaciones del orden del metro. El viento, por su capacidad de arrastrar agua, es otro factor que puede dar lugar a la sobreelevación del nivel del mar en la costa. Para que la acción del viento genere una elevación del nivel del mar de entidad es necesario que la magnitud del viento sea importante, por encima de los 20 m/s, y, fundamentalmente, que se den determinadas condiciones de geometría de la costa y de poco calado. En algunos lugares del mundo, bien por la magnitud de las borrascas (huracanes) bien por las características geométricas de la costa (Países Bajos, Venecia...), los efectos de la marea meteorológica pueden llegar a ser, combinados con la presencia de oleaje, devastadores.

En España, y particularmente en el Mediterráneo, se producen eventos de marea meteorológica importantes, con la consiguiente inundación costera.

Este es el caso del conocido temporal de noviembre de 2001 que afectó a las costas catalana, balear y valenciana principalmente. Con objeto de ilustrar las características de la

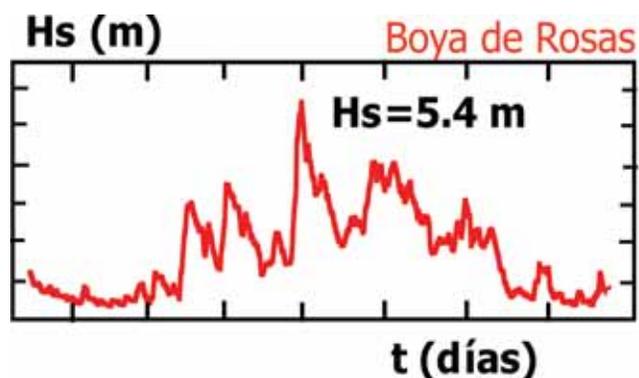


Fig. 1. Imágenes del temporal de 28 de octubre de 1997 afectando al puerto y playa de Llançà, Gerona (Fotos cortesía de J. Hugas).



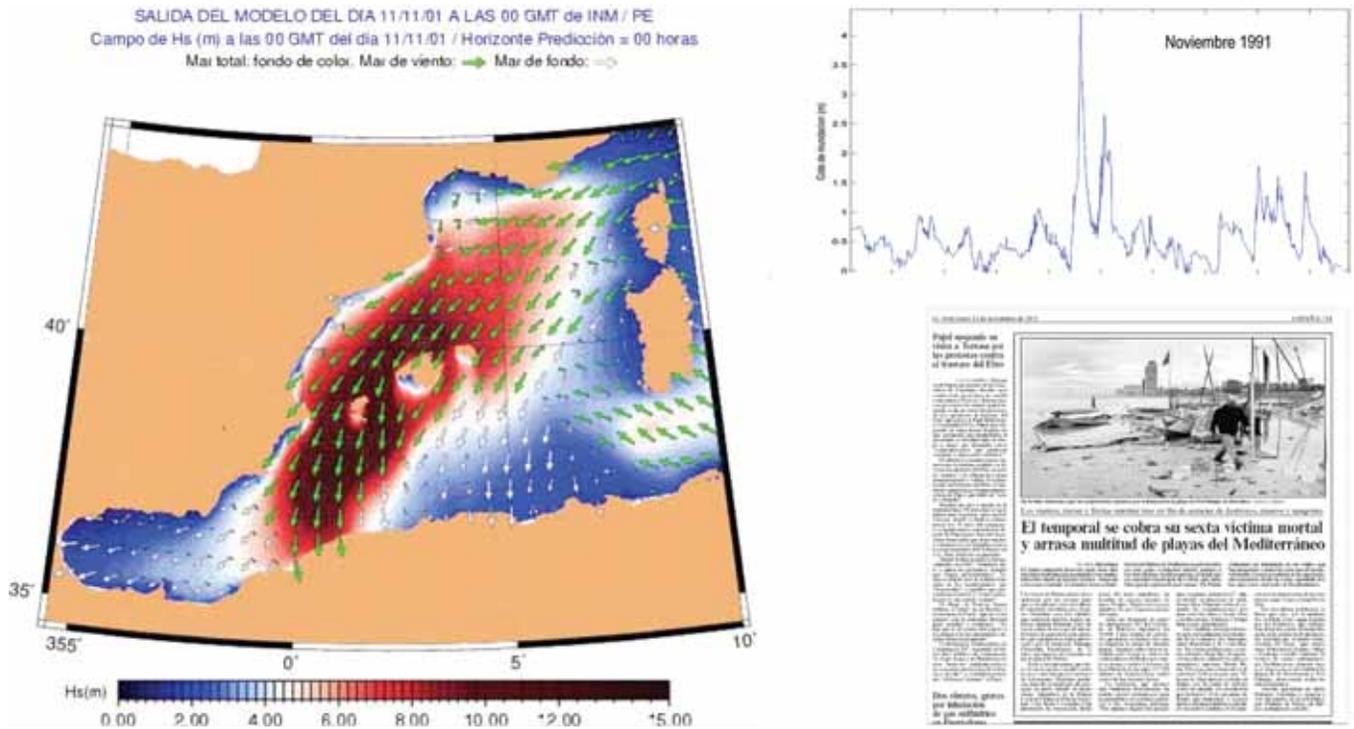


Fig. 2. Temporal de 11 de noviembre de 2001. A la izquierda, simulación realizada con el modelo WAM (Fuente: Puertos del Estado). A la derecha, arriba, simulación de eventos de inundación horarios en noviembre de 2001 en la playa de Chilches (Castellón). A la derecha, abajo, noticia recogida de la hemeroteca del diario "El País".

inundación asociadas a este evento, se presenta en la figura 2 una simulación de los sucesos de inundación a lo largo del mes de noviembre de 2001 en la playa de Chilches (Castellón). Como puede verse en dicha figura, la cota de inundación media (oleaje + marea meteorológica) se sitúa alrededor de 0,5 a 1 m. Sin embargo, a lo largo del día 11 de noviembre se produjo la llegada del temporal (con alturas de ola significativa propagadas a pie de playa de entre 3 y 4 m y una sobre elevación por marea meteorológica de 1 m). La cota de inundación en la simulación realizada alcanzó los 4,5 m. Una imagen de lo acontecido en la playa de Lloret durante el mismo temporal puede ser observada en la figura 3.

A la vista de estos resultados se concluye que el fenómeno de inundación costera es un fenómeno en el cual es necesario tener en cuenta no solo el oleaje y la marea meteorológica de manera independiente sino que hay que modelar la correlación entre ambos.

La marea astronómica es una oscilación del nivel del mar de carácter determinista cuyo período de oscilación varía entre las 12 horas y los 19 años. La magnitud de la misma a lo largo del litoral español es muy variable, con un máximo de carrera de marea en Santander, donde se superan los cinco metros, y un mínimo en Gerona, donde apenas si se alcanzan los 40 centímetros en las mareas vivas equinocciales. Contrariamente a lo que pudiera parecer, la marea astronómica juega un papel de "laminación" de los eventos extraordinarios de inundación costera, puesto que la coincidencia de un evento de oleaje y marea meteorológica extremos coincidiendo con una marea viva equinoccial tiene un período de ocurrencia mayor. Lo habitual es que dichos eventos extremos sucedan con mareas medias y, por tanto, se atenúen los efectos de la sobre elevación meteorológica.



Fig. 3. Imagen del temporal de 11 de noviembre de 2001 en la playa de Lloret de Mar en la que se observa cómo el ascenso del oleaje en la playa rebasa el paseo marítimo y penetra por las calles de la ciudad (Foto cortesía de J. Jiménez).

### Régimen de cota de inundación

De todo lo anterior se deduce que la inundación costera es un fenómeno aleatorio fruto de la combinación de diferentes procesos de la dinámica marina. De una manera simplificada el fenómeno de inundación costera puede ser representado de acuerdo al esquema de la figura 4. En un instante determinado, un punto del litoral está caracterizado por un nivel de marea (NM) compuesto por la marea astronómica y la marea meteorológica (MA+MM) y una batimetría. Sobre dicho nivel de marea se encuentra el oleaje que, en función de sus características y de la batimetría de la playa, se propaga hacia la costa. Al alcanzar la costa, el oleaje rompe (en la playa, dique de escollera, paseo marítimo...), produciéndose un movimiento de ascenso de la masa de agua a lo largo del perfil de la costa, *run-up* (RU). Todos estos factores están relacionados entre sí.

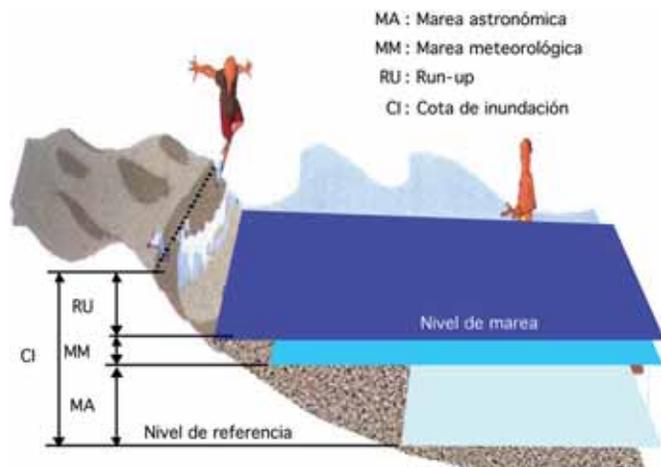


Fig. 4. Esquema de la cota de inundación en un punto del litoral.

Además de la interacción entre los elementos (oleaje-batimetría-nivel de marea-ascenso), el fenómeno de la inundación presenta la complicación añadida de que algunos de los factores (oleaje, viento...) son variables aleatorias y, por tanto, su presentación está sujeta a una determinada probabilidad.

Por consiguiente, la determinación de la cota de inundación es un problema estocástico de extremos. Una de las consecuencias de que sea un problema estocástico es que no existe un "límite determinista al que llegan las olas durante el peor temporal", sino que cada nivel tendrá "una probabilidad de ser sobrepasado en un temporal determinado".

Los métodos existentes para estimar la distribución de la cota de inundación en una determinada localización, usando datos de campo, pueden dividirse en: (1) *métodos directos*, en los que se analizan los extremos de los niveles de agua observados, y (2) *métodos indirectos*, en los que los factores (marea astronómica, marea meteorológica y oleaje) se analizan por separado y el nivel extremo se deduce a partir de ellos. Dentro de estos últimos, a su vez, puede distinguirse entre métodos indirectos teóricos, en los que los factores son combinados de manera teórica a través de sus funciones de distribución, y métodos indirectos de simulación. Dado que la disponibilidad de datos medidos se circunscribe a un número limitado de ubicaciones, son los métodos indirectos los únicos realmente viables para estimar la cota de inundación a lo largo del litoral español.

### Atlas de cota de inundación peninsular español: metodología de cálculo

Debido a la importancia que tiene el conocimiento de la inundación del litoral, en 1999 la Dirección General de Costas, adelantándose a lo que hoy en día es la propuesta de Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo relativa a la evaluación y gestión de las inundaciones (SEC 2006-66) que establece la necesidad de que los países miembros realicen una evaluación preliminar del riesgo de inundación en sus costas, consideró necesario disponer de una herramienta que predijera, desde una óptica estadística, el nivel de marea (marea astronómica + marea meteorológica) y la cota de inundación en playas (nivel de marea + *run-up*).

El método estadístico utilizado se basó en una simulación temporal de las variables que intervienen en el proceso de inundación. Dicho método tiene la ventaja de que se modela temporalmente los procesos físicos tal y como ocurren en la naturaleza. Las funciones de distribución de las variables aleatorias, la correlación entre las mismas y su distribución temporal se obtuvieron a partir de datos instrumentales disponibles en la Península (Datos de REDMAR y de REMRO del Departamento de Clima Marítimo de Puertos del Estado y datos del Instituto Español de Oceanografía). El desarrollo detallado del método de simulación, así como el tratamiento estadístico de los datos utilizados, se presentan en los "Documentos Temático y Complementario de Cota de Inundación" (GIOC, 1998). Se indican, a continuación, las líneas básicas de la metodología aplicada.

#### Proceso de cálculo

El proceso general del cálculo del régimen de cota de inundación en un punto del litoral fue el siguiente:

1. Estudio de la dependencia estadística entre las variables involucradas.
2. Estudio de la dependencia temporal entre datos sucesivos de una variable.
3. Obtención de las funciones de distribución de las diferentes variables.
4. Establecimiento de formulaciones para factores de los que no hay información directa (por ejemplo, oleaje a pie de playa en función de oleaje en boya, *run-up* en función de oleaje a pie de playa).
5. Simulación temporal por medio de Monte Carlo.
6. Determinación de los regímenes de cota de inundación.

Para todas las zonas analizadas se determinó la cota de inundación en dos supuestos diferentes, que se denominaron: *mar abierto* (en el que se consideraba que los únicos factores que generan variación del nivel del mar son la marea astronómica y la marea meteorológica; al nivel del mar obtenido como suma de estos dos factores se le denomina *nivel de marea*), y *playas* (en el que se consideraba que el nivel del mar está gobernado por la marea astronómica y meteorológica, así como por el *run-up* del oleaje; al nivel del mar obtenido como suma de estos tres factores se le denomina *cota de inundación*).

#### Simulación del nivel del mar en mar abierto (nivel de marea)

Para la realización de la simulación se consideró que la marea astronómica es un fenómeno determinista que en un instante dado viene dada por una suma de componentes armónicas conocidas. Los datos de marea meteorológica, obtenidos a partir de los residuos de las series medidas por los mareógrafos, fueron analizados estadísticamente. Para cada serie de datos se analizó su dependencia con la serie de marea astronómica y la distribución teórica de mejor ajuste. En todos los casos analizados los datos de marea astronómica y marea meteorológica mostraron ser independientes desde el punto de vista estadístico, encontrándose como mejor ajuste de las series de marea meteorológica la función de Gumbel de máximos. En concreto, todas las series fueron ajustadas con dos funciones de Gumbel, una para los valores medios y otra para los extremos, GIOC (1998).



### Simulación del nivel del mar en playas (cota de inundación)

La determinación del régimen de niveles de mar en una playa requiere el conocimiento de la distribución del *run-up* debido al oleaje. Dado que, en general, no existen datos medidos de dicha variable, la estima de dicho fenómeno se realizó a partir de la formulación de Nielsen y Hanslow (1991). Esta formulación exige el conocimiento de la altura de ola significativa y el período de pico del oleaje a pie de playa, así como el talud medio de la zona de ascenso descenso de la misma.

Con objeto de confeccionar un Atlas de Inundación válido para todas las playas abiertas, se procedió a realizar varias simplificaciones en la determinación del oleaje a pie de playa en cualquier punto del litoral peninsular (batimetría recta y paralela para distintas orientaciones significativas de las playas).

Al igual que en el caso de mar abierto, el método de simulación se inició con la realización de un test de independencia de las variables involucradas: marea astronómica, marea meteorológica, altura de ola significativa, período de pico. Los resultados obtenidos señalan que:

- La marea astronómica es independiente del resto de las variables. En algunos casos se ha encontrado una cierta correlación con la altura de ola significativa, si bien dicha correlación no es significativa estadísticamente.
- Existe una dependencia, en la mayor parte de las series analizadas, entre la marea meteorológica y el estado de mar ( $H_s$ ).
- Existe una dependencia entre las series de alturas de ola significativa y las series de período de pico.
- Existe una dependencia entre datos consecutivos de marea meteorológica y datos consecutivos de oleaje.

El proceso de simulación consistió en la generación numérica de niveles de mar en la playa (cota de inundación) como suma del nivel de la marea astronómica más el nivel producido por la marea meteorológica más el nivel generado por el *run-up* del oleaje (Fig. 5):  $S_{Ci}(t) = S_{MA}(t) + S_{MM}(t) + R_U(t)$ .

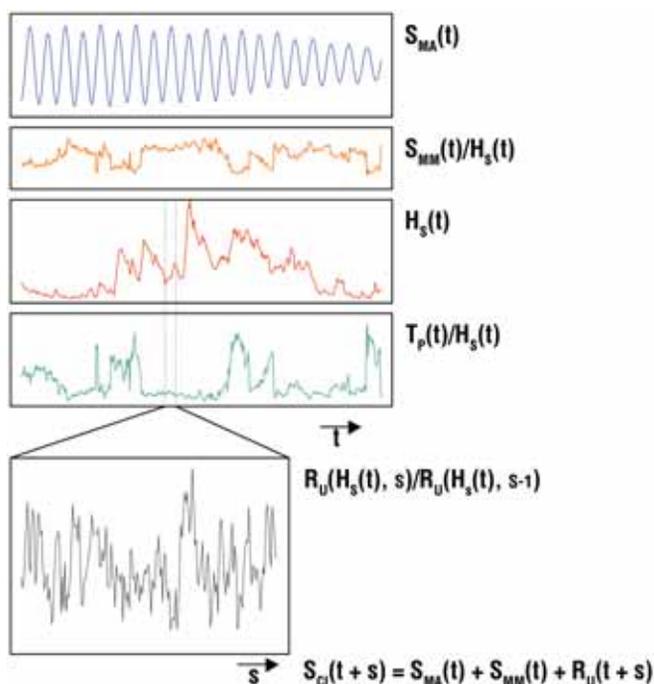


Fig. 5. Esquema del proceso de simulación.

### Atlas de cota de inundación peninsular español: resultados

Con base en la metodología anteriormente descrita se confeccionaron una serie de gráficos en los que se presentan los regímenes de niveles en mar abierto y playas del litoral peninsular español. Esta información, que en la presente sección se presenta de modo resumido, se encuentra disponible en la dirección: [http://www.smc.unican.es/ES/doc\\_tem\\_atlas.htm](http://www.smc.unican.es/ES/doc_tem_atlas.htm)

#### Zonificación del litoral

A efectos de caracterización del régimen de niveles del litoral se estableció una zonificación del mismo en "áreas homogéneas" de acuerdo con sus características de oleaje, marea astronómica y marea meteorológica, configuración de la costa y emplazamiento de las fuentes de información disponible. En el análisis efectuado se asume que el régimen de inundación dentro de un "área homogénea" es idéntico en todos los puntos del litoral de dicha zona. Esta zonificación, necesaria por las limitaciones de información disponible, puede dar lugar a saltos bruscos del régimen de inundación entre zonas limítrofes, por lo que se llama la atención al lector a ese respecto.

- *Zonificación debido al oleaje*: en lo que se refiere a la zonificación del litoral debido al oleaje se ha aceptado la zonificación establecida en la ROM 03.91, que se detalla en la figura 6.
- *Zonificación debido a la marea astronómica*: en función de la información existente y de la configuración de la costa se ha establecido la zonificación por efecto de la marea astronómica recogida en la figura 7.
- *Zonificación debido a la marea meteorológica*: en función de la información existente se ha establecido la zonificación de la marea meteorológica recogida en la figura 8.
- *Zonificación del litoral*: como resultado de la zonificación de las diferentes variables involucradas en el litoral peninsular, queda dividido en doce zonas homogéneas. Dado que el oleaje es, en general, el fenómeno más relevante en la generación del nivel de inundación de una playa, la nomenclatura elegida en la zonificación del litoral del presente documento ha sido la siguiente:

Se utiliza la nomenclatura de "Área", para designar las zonas de oleaje homogéneo. Estas Áreas coinciden con las utilizadas en la ROM 03-91.

Dentro de cada Área, se establecen unas "sub-zonas" que recogen franjas del litoral con características de marea diferenciadas. La nomenclatura de las sub-zonas queda definida por una letra: (a, b, c...).

En la figura 9 se detallan las diferentes Áreas y sub-zonas consideradas.

#### Características de los resultados

##### Nivel de referencia

Con objeto de utilizar una única referencia para todas las zonas, todos los resultados de nivel de mar se han referenciado al nivel medio del mar en Alicante, NMMA. No obstante, y dado que en los trabajos de ingeniería marítima suele ser usual utilizar otras referencias, como el cero del puerto, en el Atlas

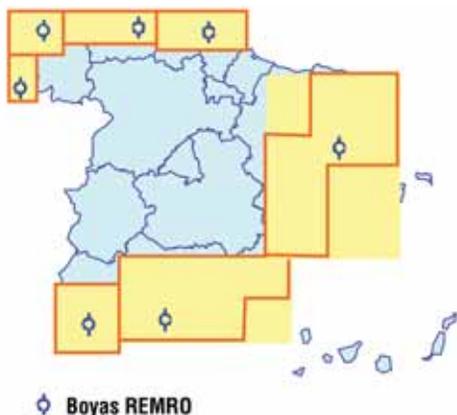


Fig. 6. Zonificación del litoral español por consideraciones de oleaje.

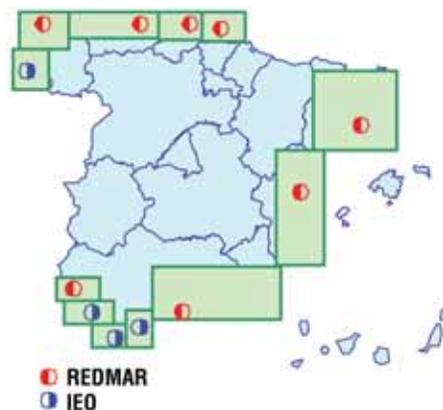


Fig. 7. Zonificación del litoral español por consideraciones de marea astronómica.

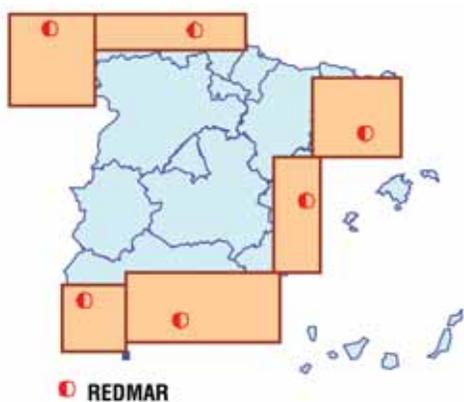


Fig. 8. Zonificación del litoral español por consideraciones de marea meteorológica.

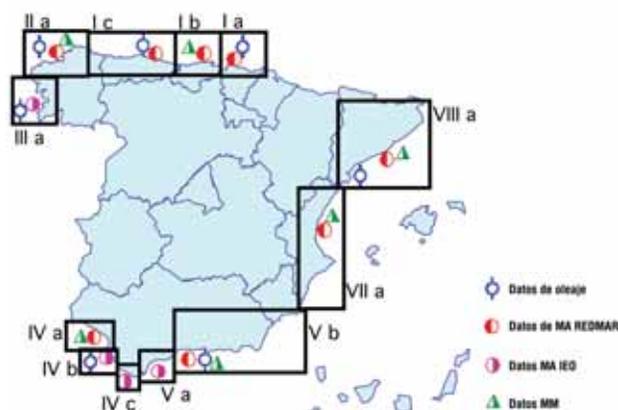


Fig. 9. Zonificación del litoral español a efectos de inundación costera.

de cota de inundación se presenta un pequeño croquis, tomado de la información facilitada por Puertos del Estado, en el que se señala la posición relativa de las diferentes referencias.

#### Nivel del mar en mar abierto (nivel de marea)

- *Régimen medio de nivel de marea.* Se ha elegido presentar los resultados en doble formato: función de distribución (probabilidad acumulada) y número de horas al año que se supera una cota dada. La relación entre ambos se establece de la siguiente manera  $N = 8760 (1-F)$ , donde  $N$  es el número de horas al año que se supera la cota dada y  $F$  es la probabilidad acumulada.
- *Régimen extremal de nivel de marea.* Se ha elegido presentar los resultados en papel probabilístico Gumbel de máximos y en una doble escala: probabilidad acumulada y período de retorno. La relación entre ambas escalas es  $R = 1/(1-F)$ , donde  $R$  es el período de retorno (años) y  $F$  es la probabilidad acumulada. Igualmente, se han obtenido las bandas de confianza del 90%.

#### Nivel del mar en playas (cota de inundación)

Para cada Área del Atlas se han establecido las diferentes "direcciones significativas", con intervalos de  $22,5^\circ$ , que son posibles en dicha área. Cada dirección u orientación significativa refleja la normal a las curvas batimétricas de una playa. De este modo, en cada área del Atlas es posible evaluar la cota de inundación en playas con diferente orientación.

En la figura 10 (página siguiente) se muestra la hoja 1 c del Atlas, correspondiente a la zona de Asturias. Como puede observarse, la información de marea astronómica se obtuvo del mareógrafo de Gijón, la marea meteorológica del mareógrafo de Santander y el régimen de oleaje de la boya de Gijón.

### Tendencias a largo plazo del régimen de cota de inundación

Como ya se ha comentado con anterioridad, la inundación costera presenta ciclos de variabilidad de muy largo plazo asociados a los ciclos climáticos de variación de las diferentes variables que dan lugar a dicha inundación. Es importante señalar que no solo la variación del nivel medio del mar es relevante a efectos de tendencias en el régimen de inundación, sino también la variación que el cambio climático está teniendo en el número de temporales, la intensidad de los temporales y características de los mismos (trayectoria de las borrascas, velocidad de movimiento de las borrascas...).

Recientemente, la Oficina Española de Cambio Climático ha llevado a cabo un conjunto de trabajos destinados a evaluar los impactos en la costa por efecto del cambio climático. En dicho trabajo, y con base en los datos medidos en los diferentes bancos de datos oceanográficos y atmosféricos existentes en España, se analizaron las tendencias de los diferentes forzamientos que dan lugar a la inundación costera. A partir de dichos resultados se pueden extraer las siguientes conclusiones:



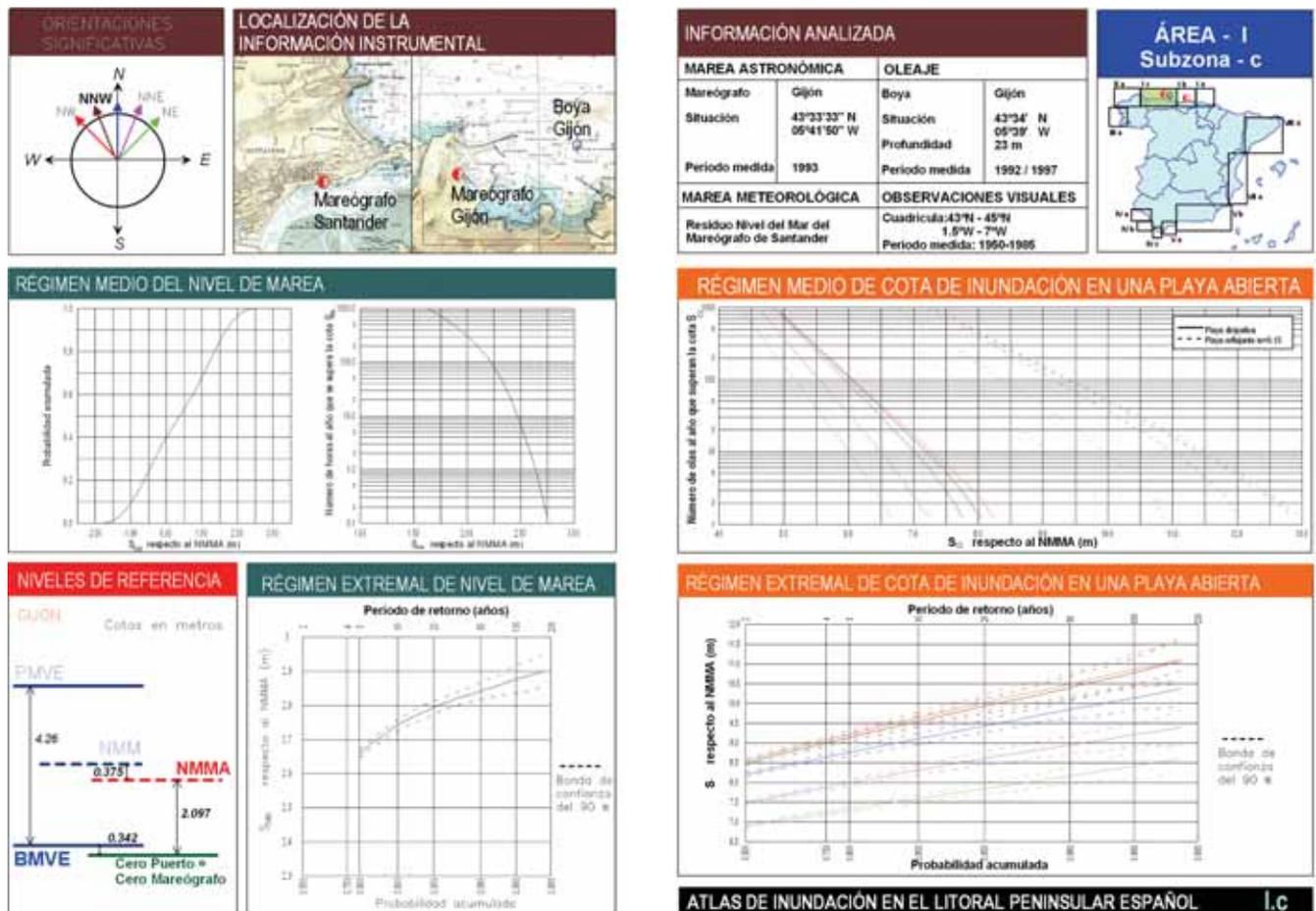


Fig. 10. Hoja 1c del Atlas de cota de inundación del litoral peninsular español, correspondiente a la zona de Asturias.

### Nivel medio del mar en el litoral español

A nivel global se puede estimar que la tendencia actual de variación del nivel medio del mar en el litoral español es de 2,5 mm/año, por lo que extrapolando al año 2050 se tendría un ascenso del nivel medio de +0,125 metros. Esta información ha sido complementada con los modelos globales contemplados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) en su tercer informe, que establecen una variación del nivel del mar comprendida entre 9 y 88 centímetros en el intervalo correspondiente a 1990-2100. En el trabajo realizado por la Oficina Española de Cambio Climático, el valor medio de los escenarios presentados oscila en torno de +0,15 metros, con una banda de confianza entre +0,1 y +0,25 metros. Con base en estos resultados, se asume en el año horizonte 2050 un ascenso del nivel del mar de +0,2 metros en el litoral español.

### Costa Cantábrica

Se observa un aumento de la energía del oleaje que llega a la Costa Cantábrica. Este aumento es mayor para la rama alta de régimen medio ( $H_{S12}$ ); sin embargo, la magnitud del incremento es menor para los sucesos más extremos ( $H_{T50}$ ). Este comportamiento produce una leve tendencia positiva en las duraciones de excedencia de alturas de ola. La dirección predominante del oleaje tiende a ser más del Oeste, con mayor intensidad en la costa occidental. Las tendencias que se obtienen para las variables de viento y marea meteorológica, tanto de régimen medio como extremal, son negativas (re-

ducción), exceptuando el viento extremal en la costa Oeste de Asturias, donde se produce un incremento. Aun así, estas últimas variaciones son mínimas.

### Galicia

En la costa Gallega se observa una zonación importante en la magnitud de las variables de estudio y sus tendencias marcadas por el cabo Finisterre, lo que genera un clima marítimo más suave en las Rías Bajas. La energía del oleaje tiende a aumentar, especialmente para los eventos extremos, entre Estaca de Bares y Finisterre.

### Costa Mediterránea

No se aprecian cambios relevantes en la magnitud de la energía del oleaje, aunque sí destacables peculiaridades en cabo de la Nao, debidas a su situación geográfica, y en la Costa Brava, dada su cercanía al golfo de León. Las duraciones de excedencia de altura de ola estimadas tienden a aumentar ligeramente a lo largo de la costa, lo que implica un aumento en la duración de las inundaciones costeras. En la Costa Brava, donde se detectan tendencias con un comportamiento similar al noreste balear, se observa una disminución energética del oleaje medio. Respecto a la dirección predominante del oleaje, se han producido variaciones en las islas Baleares y en la Costa Brava se ha detectado una tendencia de giro horario en los oleajes, de forma que la dirección predominante tiende a ser más oriental.

El régimen medio del viento y marea meteorológica presenta una tendencia negativa (reducción), pero de muy pequeña escala. Es importante destacar la gran significancia estadística que aportan los resultados de tendencia negativa de marea meteorológica en el Mediterráneo, Baleares y costa noroeste gallega, a pesar de ser sus variaciones muy pequeñas.

#### Golfo de Cádiz

El golfo de Cádiz presenta una tendencia negativa muy clara en energía del oleaje para todas las variables de oleaje estudiadas, lo que confirma la tendencia a un clima marítimo más suave.

#### Canarias

Se detecta una zonación Norte-Sur clara en la tendencia de cambio de los temporales. Este hecho se explica dada la distinta naturaleza de generación de oleaje en el norte (oleajes generados en el Atlántico Norte con un "fetch" de generación muy extenso), respecto al sur (oleajes generados en un área más próxima al archipiélago). Los resultados de variación a largo plazo indican que se ha producido un incremento de los temporales en el norte y una tendencia a la disminución energética y giro horario de las direcciones del oleaje en el sur.

### Efectos de las tendencias a largo plazo del régimen de cota de inundación

Las variaciones en el régimen de oleaje, marea meteorológica y nivel medio del mar descritas en el estudio realizado por la Oficina Española de Cambio Climático conllevarán importantes efectos en la inundación costera, tanto en lo que se refiere a las playas como en lo que se refiere a las estructuras de defensa portuarias. En concreto:

#### Efectos en playas

Los efectos más importantes que el cambio climático puede suponer en las playas se manifestarán básicamente en la variación en la cota de inundación y en el retroceso, o en su caso avance, de la línea de costa.

En el caso de la cota de inundación, este parámetro viene determinado por la probabilidad conjunta de la marea astronómica, de la marea meteorológica, del *run-up* en la playa y del aumento del nivel medio del mar. De los valores obtenidos para todas estas variables se obtiene un aumento total de la cota de inundación, que es inducida principalmente por el aumento del nivel medio del mar. No obstante, en la cornisa gallega y en la zona norte de las islas Canarias, el aumento es mayor que en el resto del litoral, ya que en estas zonas se produce un aumento significativo de la altura de ola significativa con un período de retorno de 50 años. Por otro lado, la variación de la marea meteorológica a lo largo de todo el litoral contrarresta parcialmente el aumento de la cota de inundación producido por variación del nivel medio y de la altura de ola significativa. Como dato representativo, y con un horizonte de 50 años, en el Mediterráneo se obtiene un aumento de aproximadamente 20 centímetros, mientras que en la costa gallega y en las islas Canarias puede alcanzar valores de 35 centímetros.

Otro efecto que tendrá lugar en las playas es el retroceso de la línea de costa, que traerá parejo un aumento de la inundación costera. Este retroceso estará inducido por un aumento en el nivel medio, que hace que el perfil activo de la playa tenga que ascender para llegar al equilibrio dinámico con esta nueva condición de nivel medio. Para ello, es necesario cubrir el déficit de arena que se produce en el perfil activo y esto se hará a expensas de la arena de la playa seca y de la berma, produciendo un retroceso de la línea de pleamar. Las playas más susceptibles al aumento del nivel medio del mar son las que se sitúan en la cornisa atlántica del litoral español, así como las situadas en las islas Baleares, obteniéndose en estas zonas retrocesos del orden de 16 metros. En la zona del Mediterráneo el retroceso será menor, ya que la extensión del perfil activo de las playas es menor.

Otro parámetro que puede contribuir a un retroceso adicional de las playas es la variación en la dirección del flujo medio de energía. Dicho retroceso es altamente dependiente del tipo de playa que se considere, así como de la propagación que el oleaje sufra desde profundidades indefinidas hasta la playa en concreto. Las playas más susceptibles a este tipo de retroceso corresponden a la zona norte del Mediterráneo, sobre todo las de la Costa Brava, siendo de especial relevancia el efecto en las islas Baleares y también en sur de las islas Canarias. En estas zonas el retroceso puede alcanzar hasta 40-50 metros, ya que la variación de la dirección flujo medio de energía supera en ocasiones los 8°. En el resto del litoral este hecho tampoco puede ser depreciado, observándose valores del retroceso del orden de 20 metros.

#### Efectos en las obras marítimas

Con respecto a los posibles efectos en obras marítimas, los cambios de largo plazo debidos al cambio climático pueden suponer importantes cambios en el rebase de las obras, tanto en estructuras en talud como en estructuras verticales. Si, por ejemplo, se considera una estructura vertical impermeable sin botaolas tipo, caracterizado por un francobordo de un metro, suponiendo el escenario de cambio climático estimado en el apartado anterior, se puede comprobar que el rebase en este tipo de estructuras sufrirá importantes modificaciones con respecto a los valores actuales y que estas variaciones adimensionales serán más notables en la zona del Mediterráneo, sobre todo en la zona comprendida entre Málaga y Algeciras, donde se pueden alcanzar variaciones hasta del 250% con respecto a los rebases actuales (en este tipo de estructuras). □

Raúl Medina y Fernando J. Méndez

Doctores Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos  
Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas

E.T.S. de Ingenieros de Caminos, C. y P., Universidad de Cantabria

#### Bibliografía

- G.I.O.C., Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas (1998), *Documentos Temático y Complementario de cota de inundación*, Universidad de Cantabria. [http://www.smc.unican.es/ES/doc\\_tem\\_atlas.htm](http://www.smc.unican.es/ES/doc_tem_atlas.htm)
- Nielsen, P. and D. J. Hanslow (1991), "Wave run-up distributions on natural beaches", *Journal of Coastal Research*, Vol. 7, N° 4, pp. 1139-1152.

