



SOBREELEVACIÓN DEBIDA A TEMPORALES Y CAMBIOS PRODUCIDOS EN LAS PLAYAS DEL LITORAL NE MARROQUÍ

Beach changes related to storm surge effects in the NE littoral of Morocco

Cambios producidos por la sobreelevación de tormenta

J. Benavente¹, E. Bello², G. Anfuso¹, D. Nachite³ y A. Macias²

(1) *Dpto. de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, Universidad de Cádiz, Polígono Río San Pedro, s/n. 11510 Puerto Real (Cádiz), España.*

javier.benavente@uca.es Fax: 956016040

(2) *Área de Análisis Geográfico Regional, Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, Universidad de Cádiz, Polígono Río San Pedro, s/n. 11510 Puerto Real (Cádiz), España.*

(3) *UFR "Sciences de la Mer", Laboratoire d'Océanographie Appliquée, Fac. Sciences, 93000 - Tétouan, Marruecos*

Resumen: En el presente trabajo se analiza el riesgo debido a la sobreelevación provocada por un temporal en un tramo de costa mediterránea del Norte de Marruecos. Se ha calculado la sobreelevación del nivel del mar debida a tormentas, analizando los principales factores y procesos involucrados en la misma: descenso barométrico, apilamiento de agua por el viento y aumento de la altura del oleaje. Los resultados obtenidos a partir de las previsiones se han comparado con los registrados en el campo. Para ello se ha asumido que la sobreelevación real queda reflejada en las cotas a las cuales se registraron cambios topográficos generados por el temporal en las playas objeto del presente estudio. Se ha mostrado el distinto grado de vulnerabilidad de la costa dependiendo de diferentes variables de tipo geomorfológico y antrópico que la caracterizan: pendiente del frente de playa, grado de exposición del tramo costero, existencia de cordón dunar, presencia de estructuras antrópicas y batimetría de la zona infralitoral.

Palabras clave: riesgos litorales, modelo de sobreelevación, temporales marítimos, erosión costera, Marruecos.

Abstract: The present work deals with the beach erosion risk related to storm surge effects in a coastal sector located in the northern coast of Morocco. The different factors involved in the storm surge generation, i.e. the decrease of the atmospheric pressure and the set up produced by wind and waves, have been analysed. In a second stage, predicted results have been compared with the data collected in the field, being the latter the beach elevation at which storm induced topographic changes were recorded. The vulnerability of the studied littoral depends on several morphological and human factors, being the most important beach slope and orientation, the presence of human structures and dune ridges and the bathymetric characteristics of the nearshore.

Keywords: littoral risk, surge model, marine storms, coastal erosion, Morocco



J. Benavente, E. Bello, G. Anfuso, D. Nachite & A. Macias (2007). Sobreelevación debida a temporales y cambios producidos en las playas del litoral NE Marroquí. *Rev. C. & G.*, 21 (1-1), 13-25.

1. Introducción

En el conjunto del planeta se estima que el 60% de la población vive a menos de 100 Km. del mar y las previsiones de futuro manifiestan una intensificación en el crecimiento de dicha población. Según las Naciones Unidas (Barragán, 2004) la población mundial que habita en dicha franja podría suponer 3/4 de la población mundial hacia el 2020 (unos 4.500 millones de habitantes). Esta concentración de la población en las áreas costeras está produciendo un incremento en los riesgos asociados con los procesos naturales que en estas áreas tienen lugar, todo ello sin sumar el posible escenario de ascenso del nivel del mar o de incremento del número de tormentas o de la energía asociada a ellas.

El área de estudio muestra un porcentaje medio de crecimiento entre 1994 y 2004 de las ciudades litorales de la provincia de Tetuán que alcanzó el 5,9% anual. Concretamente, M'Diq y Fnideq superaron en tres puntos dicha tasa (6,2%). En lo que respecta al futuro, entre 2004 y 2025 las previsiones son del 7% para el conjunto urbano litoral y del 5,24% para los dos municipios de la zona de estudio. Todo ello indica que en poco más de 30 años la población costera de la zona de estudio se habrá triplicado. Naturalmente, debido a la dedicación turística de este territorio esta población se incrementa extraordinariamente en los meses de verano, particularmente en agosto. Las ciudades urbanas litorales son las más afectadas, en particular M'Diq, Fnideq y Martil, que duplican en verano su población habitual (alcanzando casi los 200.000 habitantes entre ambas). Es indudable la responsabilidad del uso "residencial turístico" en los desarrollos que han ido surgiendo entre ambas. El indicio territorial más evidente es la tendencia longitudinal, paralela a la costa y la escasa penetración hacia el interior de los mismos: urbanizaciones, apartamentos, hoteles, clubes náuticos, puertos deportivos, marinas, etc. Este tipo de ocupación ha ido usurpando el territorio a las formaciones dunares que se desarrollaban en la zona, las cuales servirían como último bastión contra los procesos de inundación marina.

Entre estos procesos naturales cobran especial incidencia los eventos de baja frecuencia o catastróficos, como pueden ser los tsunamis o la llegada

de temporales de alto periodo de retorno. Básicamente en ambos eventos se produce un aumento del nivel del mar, cuyas consecuencias fundamentales son inundación y cambios sustanciales en la morfología de las costas, fundamentalmente de las de tipo bajo, como es el caso que nos ocupa. Los mayores y más drásticos cambios de la configuración de este tipo de costas se producen durante los temporales (Birkemeier, 1979), por ello es necesario predecir el posible impacto de un temporal para una correcta planificación de los usos y de los posibles planes de contingencia (Morton, 2002)

Los procesos generados por las denominadas "mareas meteorológicas" o sobreelevaciones del nivel del mar debidas a temporales (*storm surges*) cobran especial incidencia en las costas de tipo micromareal, debido a que las variaciones que producen son mayores que las generadas por las mareas de tipo astronómico. Esto último, unido a la característica de baja frecuencia, dan una falsa sensación de seguridad a las poblaciones que viven en las inmediaciones de la franja litoral, lo que a su vez permite el desarrollo urbanístico de tales zonas.

La formación de esta sobreelevación está controlada por la conjunción de varios factores durante los temporales:

- Los vientos fuertes soplan hacia tierra sobre la superficie del mar apilando agua en la costa ("*wind setup*").
- La baja presión atmosférica actúa como barómetro invertido y tiende a bombear agua ("*barometric setup*").
- El aumento de la altura de ola provoca una elevación del nivel del agua en la zona de traslación de la ola ("*wave setup*"), el cual va acompañado de un aumento en el recorrido de la ola ("*wave runup*").

La combinación de estos procesos puede llevar esporádicamente al desbordamiento de cordones dunares y defensas costeras, especialmente cuando las tormentas coinciden con las pleamares astronómicas, causando inundación costera severa (Cheung et al., 2003). Por otro lado, el *storm surge* es uno de los principales agentes controladores de la evolución del perfil en playas de baja energía (Dally y Dean, 1984 y Ciavola y Corbau, 2002) dado que se producen grandes modificaciones en

áreas de la costa consideradas estables para condiciones normales.

La predicción detallada de la sobreelevación requiere la simulación de diversos procesos físicos como presión atmosférica, viento y oleaje, transformaciones de las olas en la costa, procesos de asomeramiento del oleaje y penetración en la zona emergida (“wave runup”), etc., que actúan a diferentes escalas temporales y espaciales.

La modelización del riesgo de inundación por tormentas en áreas vulnerables constituye una componente importante de la gestión de áreas costeras y resulta básica para la planificación de vías de evacuación, el desarrollo de áreas urbanizables, o el diseño de medidas de mitigación adecuadas como la elaboración de normas específicas de edificación (Zerger et al., 2002).

El presente trabajo compara los datos de sobreelevación calculados mediante la utilización de modelos empíricos con los datos de máxima inundación y cambios topográficos obtenidos mediante mediciones *in situ* a lo largo de toda la zona de estudio, intentando identificar las posibles zonas con mayor riesgo.

2. Zona de estudio

La zona de estudio (Fig. 1) está constituida por el tramo costero entre las ciudades marroquíes de Fnideq y M'diq, abarcando una longitud de unos 24 Km. La franja litoral estudiada presenta dos grandes llanuras costeras, de elevación inferior a los 10 m., limitadas por relieves de altura moderada. Los relieves rocosos presentes en el tramo de estudio forman acantilados inactivos en la zona norte, pasando, localmente, a ser activos durante las tormentas más importantes. En la zona norte y central del área de estudio (Club Med) aparecen pequeños afloramientos rocosos, cobrando especial importancia el de la zona central al formar un pequeño saliente.

Los dos ríos principales de la zona de estudio son el río Negro y el río Smir (El Gharbaoui, 1981; Bakkali, 1987). En la parte norte del área se observa un curso fluvial (Fnideq), de menor importancia y de carácter marcadamente estacional (Fig.1). La presencia de las desembocaduras de al menos dos ríos de cierta entidad en una costa de tipo micro-

mareal ha tenido como consecuencia lógica la formación de dos pequeñas albuferas, a partir del desarrollo de sendas barreras arenosas. A través de estas desembocaduras se canalizan las inundaciones tanto mareales como derivadas de las sobreelevaciones de temporal, si bien el problema más grave se produce cuando dichas sobreelevaciones coinciden con fuertes lluvias, impidiendo el drenaje de la cuenca a través de las bocanas, e inundando las zonas de menor cota (Fig. 2).

La costa, orientada N-S, es abierta hacia el Este y limitada al Norte por el promontorio de Ceuta y al Sur por Cabo Negro. El hecho de que la zona esté delimitada por estos dos importantes promontorios indica que es un sistema cerrado (Fig. 1). Los sedimentos que allí se transportan no proceden de otras áreas costeras limítrofes, sino de la misma ensenada, ya sean de depósitos offshore o transportados por los ríos que allí desembocan (Nachite et al., 2005). Por otro lado, existe un cierto control

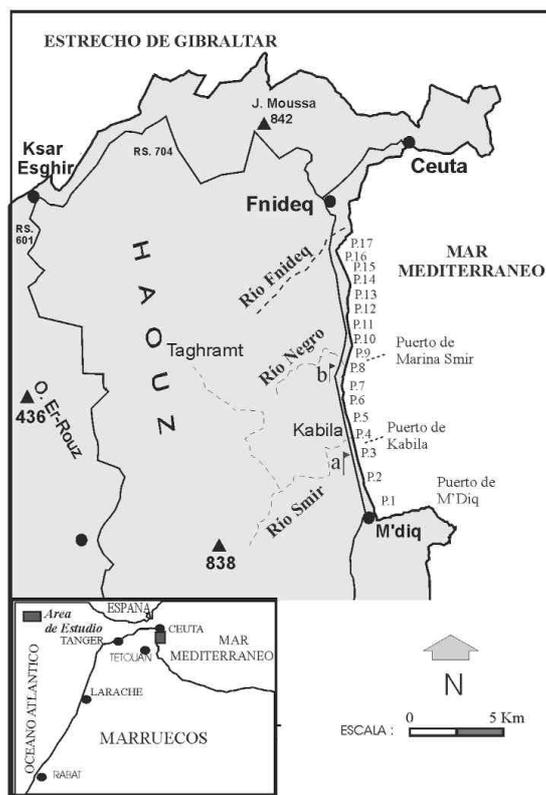


Figura 1. Mapa de localización de la zona de estudio. Las banderas señalan la posición de las fotos de la figura 2.

Figure 1. Location map of the studied area. Flags mark the position of photos shown in figure 2.



Figura 2. Inundación de las albuferas del área de estudio tras un periodo de fuertes lluvias.
Figure 2. Flooding after heavy rainfall period in the lagoons located in the study area.

antrópico debido a la presencia de tres puertos principales (Fig. 1): Marina Smir, Kabila y M'diq, si bien hay que indicar que no se observa una excesiva influencia de la construcción de estos puertos sobre la dinámica costera.

Las dunas, en general estabilizadas por la vegetación, forman cordones paralelos a la línea de costa de diferentes alturas (de 2 a 3 m), sobre todo en la parte meridional de la zona estudiada. Sin embargo es de destacar que no se observan dunas embrionarias, circunstancia que podemos atribuir a varios factores: vientos procedentes del mar cargados de humedad, escasa anchura de la playa (tanto emergida como intermareal) con una pendiente alta y tamaño de grano predominante excesivamente grueso (Jennings, 1964; Trenhaile, 1997). Por otro lado, en algunos puntos del tramo costero las zonas que posiblemente pudieran ocupar dichas formaciones han sido utilizadas para la construcción de diversos asentamientos residenciales de tipo turístico. Esta característica adquiere especial relevancia si tenemos en cuenta que tales formaciones son las responsables de contener los efectos de los mayores temporales (FEMA, 1988, Bellomo et al., 1999).

En cuanto a la tendencia de la línea de costa a largo plazo, presenta un comportamiento erosivo con tasas de erosión cercanas a los 100 m. en 57 años, es decir una tasa media de unos 2 m/año (El Moutchou 1995; Lakhdaret et al., 2001; Nachite et al., 2004).

2.1. Clima Marítimo

La zona de estudio presenta un clima marcadamente mediterráneo, con una estación húmeda que abarca los meses de octubre a mayo y otra extremadamente seca durante el periodo de junio a septiembre (Bekkali, 1987).

La orientación y la predominancia de los vientos en el norte de Marruecos se deben a la fisiografía del Estrecho de Gibraltar. Los vientos, bastante violentos, soplan principalmente del sector Este, "Chergui", de mayo a octubre, y del sector Oeste, "Gharbi", de octubre a febrero. Finalmente, en el período marzo-abril se observa un cierto equilibrio entre los vientos del ENE y OSO (L.P.E.E., 1987; El Moutchou, 1995).

En cuanto a la marea, presenta rango micromareal y periodicidad semidiurna. La onda de marea, procedente del Atlántico, entra en el Mediterráneo propagándose progresivamente hacia el este. El rango mareal varía desde unos centímetros, durante las mareas muertas, hasta 0.8-1.0 m. durante las mareas vivas (Jaaidi et al., 1992), lo que define a este tramo costero como micromareal (Davies, 1964). En cuanto a la clasificación de Hayes (1979), que compara la acción relativa de la marea y el oleaje, ésta sería una costa dominada por el oleaje.

Debido a la orientación del litoral, el oleaje se aproxima a la costa del primer y segundo cuadrante al igual que las asociadas a los temporales que provienen del E y ENE. Las corrientes principales fluyen de S a N y, durante el período estival, hacia el SSE, con una velocidad máxima de 0,68 m/s (Lakhdar et al, 2001). Esta orientación hace que los temporales más energéticos originados por la acción de las borrascas atlánticas y los vientos del SO en el Estrecho, no actúen sobre estas playas.

3. Metodología

Se realizaron tres levantamientos topográficos del litoral estudiado mediante un teodolito NESTLE BC-8. Se llevó a cabo un seguimiento estacional del litoral, mediante dos campañas, Julio de 2003 y Enero de 2004, que demostraron la escasa estacionalidad de los perfiles de playa de esta zona (Anfuso et al., 2004). La tercera campaña fue realizada en Febrero de 2004, destinada a estudiar los cambios morfológicos debidos a la tormenta asociada a vientos y oleajes provenientes del segundo cuadrante, con objeto de identificar la importancia de cambios puntuales en la evolución de las playas. En cada campaña se realizaron 17 perfiles topográficos normales a la línea de costa, medidos a partir de puntos fijos ubicados en el *backshore* y prolongados hasta una profundidad aproximada de 1 m respecto al nivel medio del mar. El tratamiento de los datos topográficos permitió reconstruir la morfología de las playas, identificando las zonas donde se producían cambios topográficos significativos. Por otro lado, estos datos permitieron estimar la posición del nivel medio del mar para cada uno de los perfiles.

Con el objeto de calcular la sobreelevación del nivel del mar por encima del nivel medio se consideraron los tres factores principales anteriormente mencionados:

- *Sobreelevación por descenso barométrico:* se considera que la subida del nivel del mar por descenso de la presión atmosférica es de 1 cm por cada milibar. De manera más precisa, esta sobreelevación puede calcularse mediante la expresión:

$$\Delta z = \frac{\Delta P_a}{\rho g} \quad (1)$$

donde ΔP_a es la variación de la presión atmosférica y ρ es la densidad del agua del mar.

- *Apilamiento de agua por acción del viento:* El efecto de apilamiento de agua por vientos normales a la costa se ha calculado utilizando la expresión de Bowden (1983):

$$\Delta z = \frac{C_D}{g} W^2 h \quad (2)$$

donde h representa la profundidad del nivel de base del oleaje ($h/L > 1/2$) y dx representa el recorrido de incidencia o "fetch" desde la zona donde se alcanza dicho nivel, y C_D es la fuerza tangencial ejercida por el viento.

$$C_D = a C_D W^2 \quad (3)$$

En esta expresión, W es la velocidad del viento, ρ_a es la densidad del aire y C_D es una constante tabulada cuyo valor depende de la velocidad del viento (Bowden, 1983).

- *Sobreelevación por acción del oleaje:* El incremento de altura de agua por acción del oleaje de temporal se ha calculado mediante la fórmula de Holman (1986):

$$R = 0.36 g^{0.5} H_0^{0.5} T \tan \alpha \quad (4)$$

donde H_0 y T representan la altura de ola en aguas profundas y el periodo del oleaje, respectivamente, y $\tan \alpha$ es una medida de la pendiente que presentaba el *beachface* de la playa con anterioridad a la llegada del temporal, en este caso, durante el mes de enero.

Esta expresión incluye tanto los fenómenos de *set-up* como el de *run-up*.

Por último a todos ellos habría que sumarles la marea astronómica, ya que a pesar de ser una costa de tipo micromareal, se registran variaciones cercanas al metro.

Los datos utilizados para el cálculo de la sobreelevación teórica correspondieron al 10 de febrero de 2004. La información meteorológica (presión atmosférica, velocidad del viento) fue suministrada por la *Direction de la Meteorologie Nationale* del Reino de Marruecos. Por otro lado, la información oceanográfica (altura de ola y periodo) fue suministrada por el Servicio de Clima Marítimo de Puertos del Estado, procedente de la boya escalar de Ceuta correspondiente a la red costera.

4. Resultados y discusión

El oleaje que se registra en la zona es de escasa energía como demuestra los informes tanto medios como extremales de la boya de Ceuta (Pertenece a Puertos del Estado). El análisis medio muestra como más del 60% del oleaje es inferior a 0,5 m (Fig. 3).

En cuanto a la llegada de temporales, estos se concentran entre los meses de diciembre y febrero. La energía asociada que muestran también es baja, siendo la altura máxima registrada de 5,5 m con un período de 5 s en M'diq (LPEE 1987). Calculamos el periodo de retorno para esta altura a partir del análisis extremal, análisis que realiza la sección de Clima Marítimo que describe la probabilidad con la que se puede presentar un temporal de una cierta altura de riesgo). El periodo obtenido es de más de 20 años, lo que corrobora la idea de la escasa energía incidente de la zona. En la tabla 1 se resumen los principales datos de las variables dinámicas del temporal analizado.

Utilizando el análisis extremal, el temporal analizado mostraría una probabilidad de excedencia en torno a 0,5, lo que nos indica un periodo de recurrencia cercano al medio año, es decir, uno de los dos temporales de mayor entidad que se registran al año.

En cuanto a los cambios morfológicos, las playas estudiadas presentaron una muy escasa variabilidad a lo largo de dos años de seguimiento, mos-

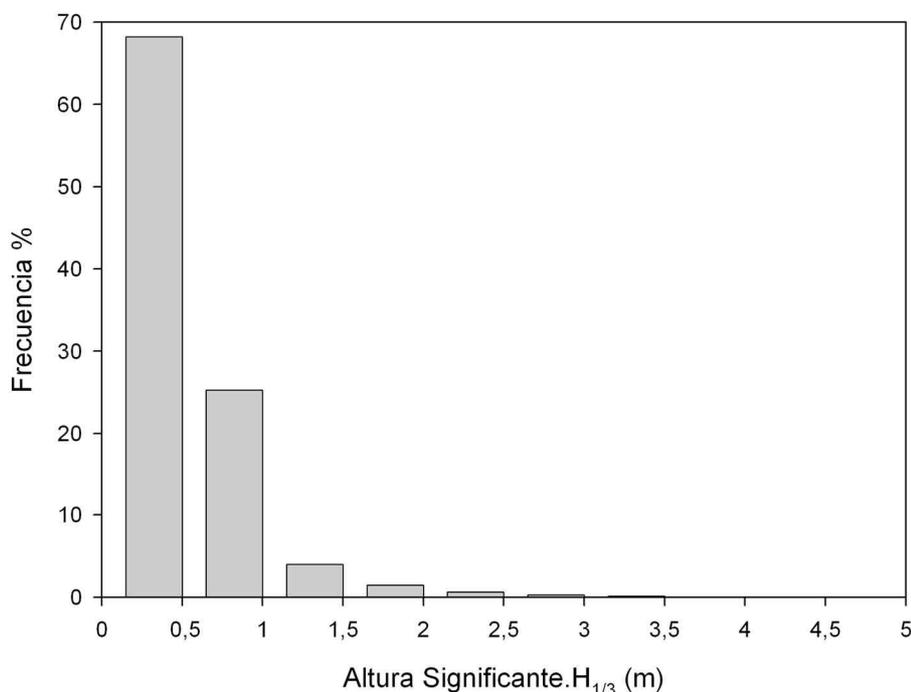


Figura 3. Distribución de alturas del oleaje obtenidas a partir del análisis medio de los datos de la Boya de Ceuta (REMRO)
 Figure 3. Wave height distribution averaged from data recorded by Ceuta offshore buoy (REMRO).

trando un nulo comportamiento estacional (Anfuso et al., 2004). Los cambios producidos por el temporal estudiado de forma puntual tuvieron mucha mayor importancia (Fig. 4), siendo de mucha mayor entidad que los registrados a escala estacional durante los dos últimos años. Estos resultados irían en la línea de lo apuntado por autores como Birkemeier (1979) y Morton et al. (1995) sobre la importancia de los temporales. Sin embargo, a parte de esas consideraciones es importante resaltar la cota a la que se produjeron dichos cambios, ya que se detectaron en zonas de la playa que en condiciones normales no son afectadas por los procesos hidrodinámicos.

El cálculo de los distintos factores que contribuyeron a la sobreelevación puso de manifiesto que el único realmente importante fue el efecto provocado por el oleaje. La contribución realizada por el apilamiento de agua debida al viento perpendicular a la costa es inferior al centímetro como consecuencia del escaso *fetch* de la zona. Esto se contrapone con lo apuntado por Wakelin y Proctor

(2002) que apuntan como factor más importante al viento en condiciones de escaso *fetch*. Si tomamos el *fetch* como la distancia desde donde comienza a soplar el viento, tanto en el caso de Wakelin y Proctor (2002), realizado en el Mar Adriático, como en el nuestro, ambos serían de escaso *fetch*.

Sin embargo, si tomamos el *fetch* como la distancia donde comienza el apilamiento y como tal la distancia de la zona de aguas someras ($h < 1/L$), en la zona litoral de Tetuan sería mucho menor que en el caso del Adriático. Esto se debe a que en nuestra zona de estudio el desarrollo de la plataforma continental es muy escaso, mientras que el Adriático es un mar muy somero. Así, teniendo en cuenta que el nivel de base para este temporal se situaría a una profundidad en torno a los 60 metros (64,59) el *fetch* sería inferior a 2 Km, lo que hace que la zona de apilamiento de agua fuera excesivamente escasa. Por otro lado, este escaso desarrollo de la plataforma propiciaría una mínima disipación de la energía del oleaje.

En cuanto a la sobreelevación producida por el descenso barométrico también sería despreciable

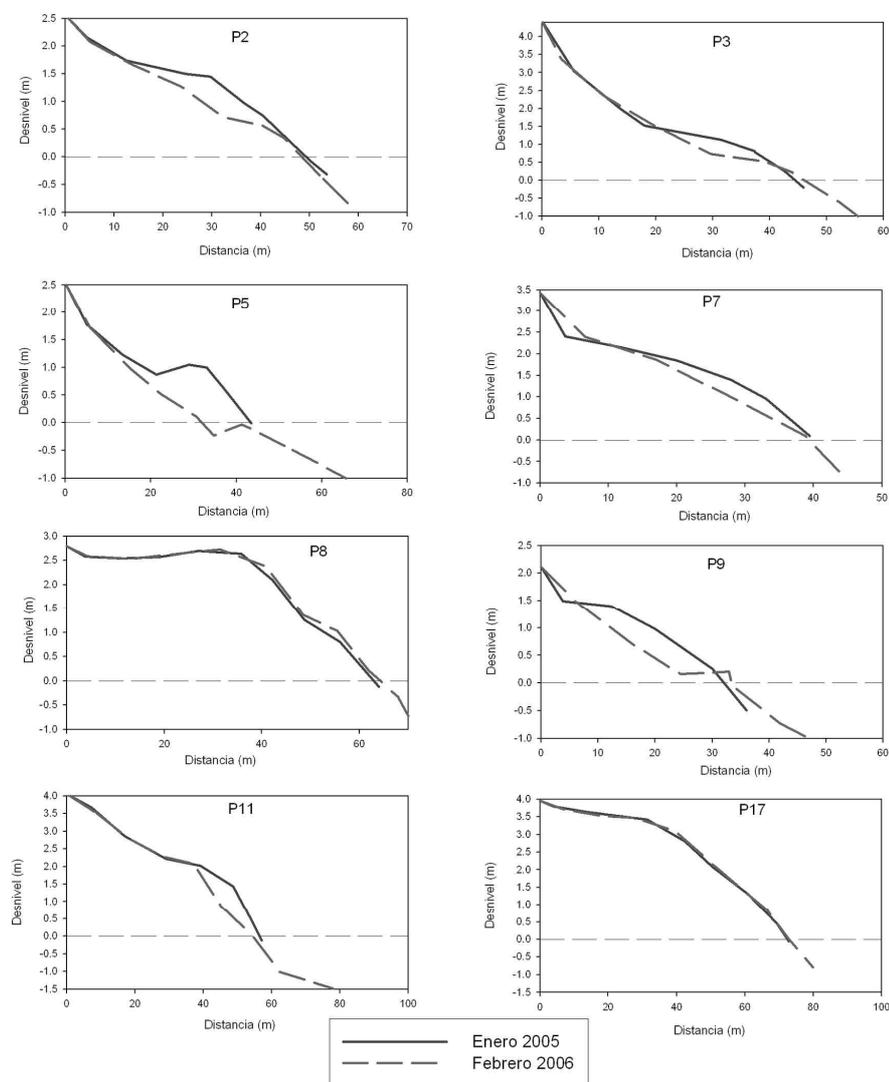


Figura 4. Perfiles topográficos más significativos de las playas estudiadas. Campañas de Enero y Febrero 2004. La cota cero se corresponde con el cero hidrográfico.

Figure 4. Representative topographic profiles of the studied beaches corresponding to field surveys performed on January and February 2004. Zero level is located at hydrographic zero.

dada la escasa variación en los valores de presión que fueron registrados para este temporal. El descenso de 6 milibares produciría una elevación algo inferior a los 6 cm.

Por tanto, el único componente que produciría un efecto importante sobre la variación del nivel del mar sería la sobre elevación debida al oleaje (Tabla 2). Por otro lado, es el único factor que incluye variables morfológicas que varían local-

mente, como es la pendiente del frente de playa. A través de los cálculos realizados se observa claramente la importancia de dicha pendiente como agente disipador de la energía incidente (Benavente et al., 2000) y por tanto su papel como mitigador de la sobre elevación por temporales (Benavente et al., 2004).

Los perfiles con mayores valores de pendientes muestran mayores valores de sobre elevación teóri-

Tabla 1. Condiciones meteorológicas del temporal analizado. DP: incremento de presión; W máxima: velocidad máxima del viento; H0 máxima: altura máxima en aguas profundas; T: periodo del oleaje.

Table 1. Meteorological data from the studied storm. DP: increase in atmospheric pressure; W maxima: maximum wind velocity; H0 máxima: maximum deep-water wave height; T: wave period.

Febrero 2004	
P	1026-1020 milibares
W máxima	21.9 m/s
H ₀ máxima	2.6 m
T	9.1 s
Rango de marea astronómica	0.84 m

ca. Esto a su vez, traería asociado un aumento de la erosión en esas zonas, al verse afectada mayor extensión de playa, e incluso aumentaría la posibilidad de que se registraran daños de construcciones situadas en la trasplaya.

Con objeto de comprobar dicho comportamiento se compararon los datos teóricos con las observaciones y medidas realizadas en el campo. Mediante un análisis de los perfiles (Fig. 4) se obtuvo la cota a partir de la cual se registraban los cambios topográficos significativos. Se tomó esta

cota al considerar que dichos cambios se habrían de producir en la zona donde la acción del oleaje actuara un mayor periodo de tiempo, lo que correspondería con una cota media de la sobreelevación provocada por el temporal. Tenemos que tener en cuenta que las variables meteorológicas, oceanográficas e incluso astronómicas no son constantes en el tiempo lo que hace que la predicción teórica, realizada a partir de los datos extremos, va a mostrar valores superiores.

Teniendo en cuenta esta diferencia en los resultados obtenidos se trato de encontrar una relación entre la altura de la sobreelevación teórica y las cotas de las variaciones topográficas más significativas, para lo que se realizó una correlación entre ambas variables (Fig. 5). Para dicha correlación no fueron utilizados aquellos perfiles que no presentaron cambios topográficos (Fig. 4).

La causa de este comportamiento se debió fundamentalmente al mayor grado de protección que presentan dichas áreas frente a la llegada de un temporal de dirección NE. Esta protección se debe a dos causas fundamentales:

- El cabo que forma la ciudad autónoma de Ceuta, protege a todo el extremo N de la ensenada objeto de estudio. Este es el caso de

Tabla 2. Sobreelevación estimada provocada por el oleaje, sobreelevación total estimada añadiendo los valores de wind set-up y marea astronómica, y sobreelevación real tomada a partir de las cotas de los cambios registrados.

Table 2. Estimated wave set-up, estimated increase in sea level including wind set-up and astronomical tide, and real increase in sea level inferred from changes recorded on the beach.

Perfil	Pendiente Frente de Playa	Wave Set-up (m)	Sobreelevación Total (m)	Cota de Cambio Topográfico (m)
P1	0.1000	1.7281	2.5681	1.74
P2	0.0626	1.1080	1.9480	1.66
P3	0.0615	1.0897	1.9297	1.52
P4	0.1129	1.9420	2.7820	2.73
P5	0.0731	1.2821	2.1221	1.50
P6	0.0765	1.3384	2.1784	1.65
P7	0.1133	1.9486	2.7886	2.40
P8	0.0902	1.5656	2.4056	-
P9	0.0644	1.1378	1.9778	2.11
P10	0.0925	1.6037	2.4437	-
P11	0.1193	2.0481	2.8881	2.08
P12	0.0938	1.6253	2.4653	2.27
P13	0.0808	1.4097	2.2497	2.24
P14	0.0667	1.1759	2.0159	-
P15	0.1098	1.8906	2.7306	-
P16	0.0747	1.3086	2.1486	-
P17	0.0939	1.6269	2.4669	-

los perfiles situados más al norte del perfil 13.

- Las zonas situadas al sur de los puertos presentes en la zona: Kabila, Marina Smir y Restinga Smir; coincidente con los perfiles 3, 8 y 10.

Estos perfiles se encontrarían protegidos del apilamiento de agua producido por el aumento de la altura del oleaje, principal agente formador de la sobreelevación por tormenta, lo que permitiría su mayor estabilidad.

Por el contrario, los perfiles expuestos mostraban una relación entre la sobreelevación teórica y el aumento en la altura de los cambios topográficos registrados, relación controlada, fundamentalmente, por las variaciones de la pendiente (Fig. 4). A pesar de ello, la correlación no era excesivamente buena ($r^2=0.6$), lo que nos indica que hay otra serie de factores de ámbito local que controlaran dicha sobreelevación. Estos factores podrían resumirse en: grado de exposición, no existencia de cordón

dunar, presencia de estructuras antrópicas y fundamentalmente batimetría de la zona infralitoral.

En función de todas estas consideraciones se ha realizado un mapa de vulnerabilidad de la costa tetuaní frente al embate de los temporales de NE (Fig. 6). El mapa clasifica la costa en función de la cota a la que se producen los cambios morfológicos registrados durante el temporal, siendo las zonas más vulnerables aquellas que registre los valores a cotas más altas, lo que indicaría una mayor altura de la sobreelevación. Se observa el alto grado de protección de la zona septentrional, así como la protección que puede generar la presencia de los puertos deportivos en las áreas situadas al sur de los mismos. En contraposición se muestra como las zonas más vulnerables estarían situadas en las áreas centrales y septentrionales de los tramos comprendidos entre dichos puertos.

Por último, hay que tener en cuenta que los temporales de NE son los más frecuentes y los que mayores intensidades pueden alcanzar, dada la orientación de esta costa.

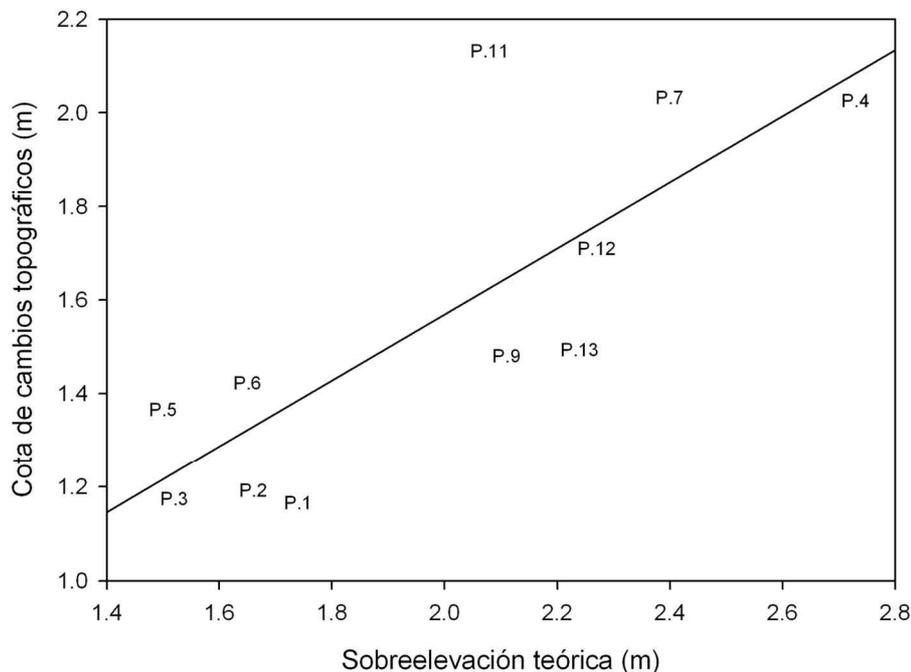


Figura 5. Relación entre la cota a la que se producen los cambios topográficos y la sobreelevación prevista.
 Figure 5. Relationship between the predicted and observed elevation at which topographic changes take place.

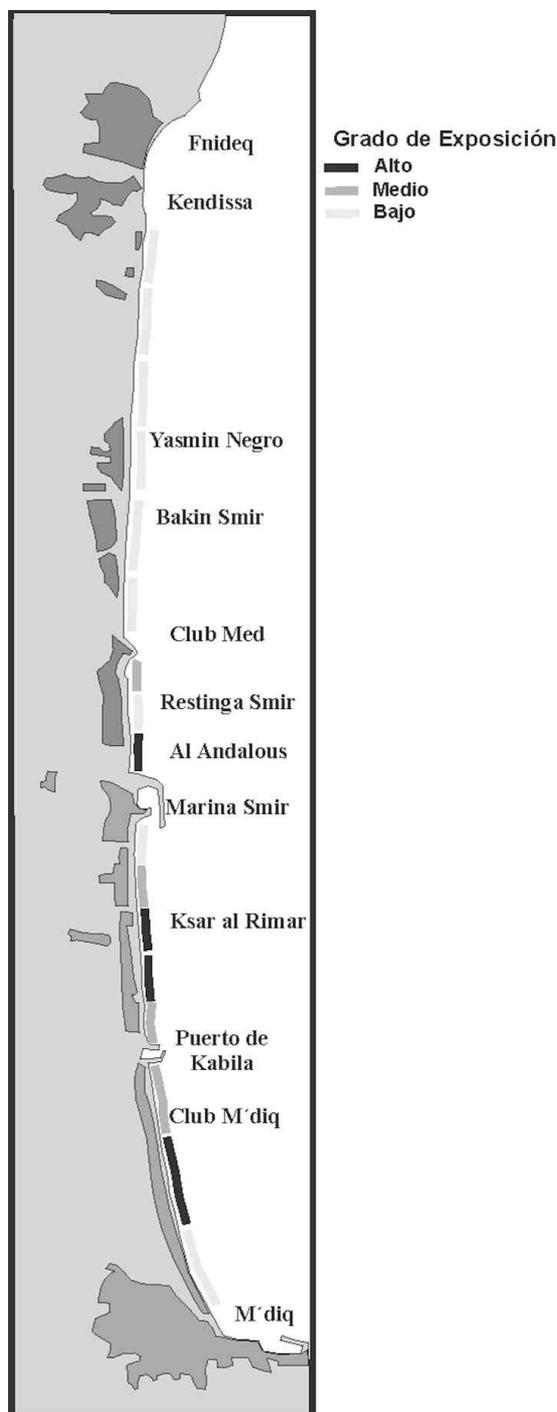


Figura 6. Mapa de vulnerabilidad de la costa tetuani frente al embate de los temporales de NE.

Figure 6. Map of the vulnerability of Tetuan coast to NE storms.

5. Conclusiones

Se ha realizado un estudio del efecto producido por un temporal a lo largo de las playas del tramo costero entre las ciudades marroquíes de Fnideq y M'diq. Conjuntamente se ha analizado la acción que ejercen las condiciones meteorológicas de dicho temporal sobre el nivel del mar en la zona.

A la luz de los datos obtenidos se deduce que la sobreelevación producida por un temporal adquiere una gran importancia en este tipo de costas micromareales, donde la escasa variación del nivel del mar y los bajos niveles de energía incidente propician morfologías de playa escasamente cambiantes.

Por otro lado se muestra que debido al escaso desarrollo de la plataforma continental cobra especial relevancia la sobreelevación generada por el oleaje frente al papel desempeñado por el viento, al presentar un menor *fetch* efectivo.

Los cambios topográficos registrados en las playas mostraron una clara relación con las cotas previstas por la sobreelevación teórica. Teniendo en cuenta que en la predicción de dicha sobreelevación la única variable morfológica cambiante es la pendiente del frente de playa, estos resultados muestran la gran relevancia de la misma. Así, los perfiles con un frente más tendido presentarán una mayor disipación de la energía del temporal, reduciendo de esta manera los riesgos de erosión, así como los posibles daños que se puedan producir en las construcciones situadas en la trasplaya. Sin embargo, en la zona estudiada los perfiles no presentaron modificaciones sustanciales en las pendientes ni en su estado morfodinámico tanto a nivel estacional como puntual (Anfuso et al., 2004).

Esta nula capacidad de cambio implicaría una menor resistencia a los embates de los temporales al tener una menor capacidad de disipar la energía (Benavente et al. 2002, Benavente et al, 2000).

A largo plazo habremos de tener en cuenta varios factores que actúan íntimamente imbricados y controlaran la evolución del riesgo: la tendencia erosiva de la zona, el incremento de la presión antrópica, escaso desarrollo de los cordones dunares (por otra parte, cada vez más degradados) y la nula capacidad de adaptación de la costa hacia estados más disipativos. Este conjunto de factores producirá un incremento de los riesgos asociados a los temporales.

El hecho de que la relación entre las variables estudiadas no sea mayor se debe a la intervención de otros factores, también de ámbito local, cuyo efecto no ha sido posible cuantificar para el presente estudio. Sin embargo, el grado de protección y la orientación de la costa parecen ser dos de los factores más importantes, dado el escaso cambio presentado por aquellas zonas protegidas de la llegada del oleaje procedente del NE.

Finalmente, es importante destacar como la previsión e identificación de tramos de costa más vulnerables frente a la llegada de temporales, podría permitir una mejor planificación de los usos del litoral, cuestión de gran importancia dado el gran desarrollo urbanístico que esta sufriendo esta costa debido al aumento de la demanda turística.

6. Agradecimientos

Este trabajo es una contribución al proyecto de la Junta de Andalucía nº AM/3 -2004 y al proyecto marroquí PROTARS III D16/07 y una contribución al Grupo PAI RNM-328. Los autores agradecen a Roberto Guiatti y Alessandro Ghetti la ayuda aportada en el trabajo de campo. Agradecen también las sugerencias y comentarios realizados por los revisores (Drs. Juan Antonio Morales y Antonio Rodríguez), que contribuyeron a mejorar el trabajo.

7. Referencias

- Anfuso, G., Benavente, J., Nachite, D., Bello, E., Guiati, R., Ghetti, A., Meklach, Y. & A. Macías (2004). Actas VIII Reunión Nacional de Geomorfología, 283-289.
- Barragán Muñoz, J. M. (2004). *Las áreas litorales de España. Del análisis geográfico a la gestión integrada*. Ariel, Barcelona, 214 pp.
- Bekkali R. (1987). *Les ostracodes du Lac Smir*. Tesis Doctoral. Univ. Mohammed V, Rabat, 184 p. (Inédita).
- Bellomo, D., Pajak, M.J., Sparks, J., 1999. Coastal flood hazards and the National Flood Insurance Program. In: *Coastal Erosion Mapping and Management*. (Crowell, M., Leatherman, S.P., eds.), Journal of Coastal Research SI 28, 21-26.
- Benavente, J.; Gracia, F.J., López-Aguayo, F. (2000). Empirical model of morphodynamic beachface behaviour for low-energy mesotidal environments *Marine Geology*, (167) 375-390
- Benavente, J.; Del Río, L.; Anfuso, G.; Gracia, F.J. and Reyes, J.L. (2002). Utility of morphodynamic characterization in the prediction of beach damage by storms. *Journal of Coastal Research*. SI 36. p. 56-64.
- Benavente, J.; Del Río, L.; Gracia, F.J. y Martínez, J.A. (2004). Riesgo de inundación costera debida a temporales en la facha de Valdelagrana (Bahía de Cádiz). En: *Contribuciones recientes sobre Geomorfología*. (Benito, G. y Díez-Herrero, A., eds.)CSIC-Centro de Ciencias Medioambientales, Madrid. p.299-307
- Birkemeier, W. A. (1979). The effects of the 19 December 1977 coastal storm on beaches in North Carolina and New Jersey. *Shore and Beach*, 47, 7-15.
- Bowden, K.F. (1983). *Physical oceanography of coastal waters*. John Wiley, 302 pp
- Cheung, K.F.; Phadke, A.C.; Wei, Y.; Rojas, R.; Douyere, Y.J.M.; Martino, C.D.; Houston, S.H.; Liu, P.L.F.; Lynett, P.J.; Dodd, N.; Liao, S. & Nakazaki, E. (2003). Modeling of storm-induced coastal flooding for emergency management. *Ocean Engineering*, 30, 1353-1386.
- Ciavola, P. and Corbau, C. (2002). Modeling the response of an intertidal through-bar to "medium energy" events. In: *Solutions of Coastal Disasters '02*, ASCE, New York, USA, 526-542.
- Dally, W. R., Dean, R. G. and Dalrymple, R. A. (1984). Modelling wave transformation in the surf zone. In: *Miscellaneous Paper, CERC-84-8*. US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburgh, MS.
- Davies, J.L., 1964, A morphogenic approach to world shorelines: *Zeit. f. Geomorph.*, v. 8., p. 27-42.
- El Gharbaoui, A (1981). La terre et l'homme dans la péninsule tingitane. *Tav. Inst. Sci. Rabat, Ser géol. et géog. Phys.*, 15, 439pp.
- El Moutchou, B. (1995). *Dynamique côtière actuelle et évolution morphosédimentaire de la frange littorale méditerranéenne entre M'diq et Oued Laou*. Tesis Doctoral, Univ. Mohammed V, Rabat, 165 P. (inédita).
- FEMA(Federal Emergency Management Agency), 1988. *Basis of erosion assessment procedures for coastal flood insurance studies*. Washington, D.C.
- Hayes, M. O., 1979. Barrier island morphology as a function of wave and tide regime, in Leatherman, S. P. ed., *Barrier islands from the Gulf of St. Lawrence to the Gulf of Mexico*: Academic Press, New York, NY, pp 1-29.
- Holman, R.A. (1986). Extreme value statistics for wave run-up on a natural beach. *Coastal Engineering*, 9, 527-544.
- Jennings, J.N. (1964). The question of coastal dunes in tropical humid climates. *Z. Geomorph.* 8, 150-4.
- L.P.E.E. (1987). Rapport technique et expertise sédimentologique sur le port de Restinga Smir (Tétouan, Maroc). En : *Mém. C.E.A. de Géologie*, Uni. Mohamed V, Fac. Sci. Rabat, 72 p.
- Lakhdar Idrissi J., Zidane F., Orbi A., Hilmi K., Sarf F., Rhrbi N. (2001). Etude d'impact des apports terrigènes sur l'activité aquacole dans la baie de M'diq. *L'eau, L'industrie, les nuisances*, N° 243, p 61-67.
- Morton, R.A. (2002). Factors controlling storm impacts on coastal barriers and beaches-a preliminary basis for near real-time forecasting. *Journal of Coastal Research*, 18 (3), 486-501.
- Morton, R.A., Gibeau, J.C., and Paine, J.G. (1995). Meso-scale transfer of sand during and after storms: implications for prediction of shoreline movement. *Marine Geology*, 126, 161-179.

- Nachite, D., El Moutchou, B., Anfuso, G., Benavente, J., Bello, E. y Macías, A. (2004). Morfología y evolución reciente del litoral entre Fnideq y M'diq (Tetuán, NE de Marruecos). *Geogaceta*, 35: 43-46.
- Nachite, D., Amri, I., Anfuso, G., Bello, E., Marocchino, E., Benavente, J. y Vaccaro, C. (2005). Geoquímica de los sedimentos de playas entre Fnideq y M'diq (Tetuán, NE de Marruecos). *Geogaceta*, 35: 43-46.
- Trenhaile, A.S. (1997). *Coastal dynamics and landforms*. Clarendon Press, Oxford, 366 pp.
- Wakelin S.L. and Proctor R. The impact of meteorology on modelling storm surges in the Adriatic Sea. *Global and Planetary Change* (34), 1, pp. 97-119 (23).
- Zerger, A.; Smith, D.I.; Hunter, G.J. & Jones, S.D. (2002). Riding the storm: a comparison of uncertainty modelling techniques for storm surge risk management. *Applied Geography*, 22, 307-330.