



Riesgo de inundación por temporales extremos en la playa de La Victoria (Cádiz).

Flood risk due to extreme storm events in La Victoria Beach (Cádiz).

Durán, C. ⁽¹⁾; Benavente, J. ⁽¹⁾ y Del Río, L. ⁽¹⁾

(1) Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, Universidad de Cádiz. Avda. República Árabe Saharaui s/n, 11510, Puerto Real, España. carolina.duranrogers@gmail.com

Resumen

Los daños económicos generados por las inundaciones costeras registradas en la playa de La Victoria (Cádiz) durante los temporales de comienzos de 2010 evidenciaron la necesidad de diseñar medidas para evaluar el riesgo y la vulnerabilidad de dicha zona ante este tipo de eventos extremos. Los resultados de un modelo empírico de inundación aplicado a esta playa muestran cómo la topografía de la zona, las características de la marea y la cota de los elementos antrópicos son determinantes en la del riesgo y la vulnerabilidad a lo largo del área de estudio. Así, por un lado, para un mismo escenario de temporal, la extensión de las zonas inundables está condicionada por la topografía de la playa. Por otro, considerando los diversos tipos de temporales analizados, se observaron claras diferencias en el riesgo y la vulnerabilidad asociados a situaciones de mareas vivas mensuales o pleamares vivas equinocciales.

Palabras clave: marea meteorológica, riesgo, vulnerabilidad, inundación costera.

Abstract

Socioeconomic damage caused by coastal flooding at La Victoria beach (Cadiz, Spain) during winter storms early in 2010 proved that actions based on risk and vulnerability assessment are needed at this location. After an empirical flooding model was applied to the study area, it became evident that risk and vulnerability along the beach depend on coastal elevation and tide conditions. Within a given storm scenario, flood extent can differ according to beach topography. However, significant differences can be detected in risk and vulnerability assessment related to spring tide or equinoctial spring tide conditions. Interviews with members from public administrations showed the need for implementing measures in order to prevent storm surge risk in



the study area. In addition, cooperative strategies between public authorities and research institutions are recommended.

Key words: storm surge, risk, vulnerability, coastal flooding.

1. Introducción

Los eventos de inundación costera durante temporales marítimos extremos son considerados un fenómeno de alto riesgo en zonas expuestas. Las inundaciones producidas bajo estas condiciones meteorológicas se deben al fenómeno de la marea meteorológica (*storm surge* en inglés). Este fenómeno genera una sobre elevación del nivel del mar causada por varios factores: la bajada de la presión atmosférica, cuyo efecto es el ascenso de la superficie del mar (*barometric set-up*); rachas de viento soplando perpendicularmente a la costa, que apilan agua en esta dirección (*wind set-up*); y olas de gran altura de rompiente y extensión de batida, cuyo alcance sobre la playa (*wave set-up*) es muy superior al del oleaje de buen tiempo (Komar, 1998). También hay que tener en cuenta que el fenómeno del *storm surge* se agrava cuando la componente de marea astronómica es importante (Komar, 1998). Como resultado, la altura a la que llega el recorrido de ola sobre la playa durante un temporal puede inundar zonas del supralitoral (Benavente et al., 2006). Predecir la peligrosidad del *storm surge* presenta dificultades al depender de parámetros meteorológicos y oceanográficos cuyo comportamiento es aleatorio.

Sin embargo, es posible establecer medidas para evaluar la vulnerabilidad y el riesgo al que se exponen comunidades y sistemas naturales ubicados en la franja costera cuando ocurren este tipo de eventos.

Durante el invierno de 2009-2010, en diferentes zonas del litoral español se registraron eventos de inundación costera asociados a diversos temporales energéticos consecutivos.

Estos eventos meteorológicos tuvieron su efecto en numerosas zonas de la franja costera de la provincia de Cádiz, registrándose daños socioeconómicos de diversa consideración e importantes cambios morfológicos en sistemas de playas y dunas (Rangel-Buitrago y Anfuso, 2011; Del Río et al., 2012). En concreto, para la playa urbana de La Victoria (Cádiz) (Fig. 1) el Ayuntamiento estimó las pérdidas directas en 150.000 €. Adicionalmente, los trabajos realizados por López-Dóriga et al. (2010) en la zona permitieron estimar los costes directos por daño y los indirectos derivados de la reducción de playa seca, considerando el elevado valor económico de la misma como recurso turístico, calculándose las pérdidas totales en aproximadamente unos 28 millones de euros.

Ante esta situación, se decidió realizar un estudio detallado en esta playa para analizar el riesgo por inundaciones y determinar las infraestructuras que podrían sufrir daños en el futuro bajo diferentes condiciones de temporal marítimo. Para ello se evaluó la magnitud del *storm surge* estableciendo diferentes escenarios de temporal extremo. En cada escenario, se analizó el grado del riesgo y de la vulnerabilidad aplicando diversas herramientas y teniendo en cuenta las infraestructuras asociadas a la playa, con el fin de proponer medidas específicas de gestión acordes con los resultados obtenidos.

2. Zona de estudio

La playa de La Victoria se sitúa en el perímetro externo de la Bahía de Cádiz, localizada al Suroeste de la Península Ibérica (Fig. 1). El clima de la región se clasifica como Medite-

(swell) provienen principalmente del O y del OSO (Fig. 3A). El oleaje en esta zona suele ser de baja energía con alturas medias en torno al metro (Fig. 3B), si bien durante los temporales la altura significativa media puede superar los 4 metros. Los eventos de temporal pueden tener una duración media de 4 días, siendo principalmente frecuentes durante los meses de Octubre-Noviembre a Marzo (Benavente y Gracia, 2003; Benavente et al, 2002).

La zona de estudio está bañada por el océano Atlántico y constituye un ambiente mesomareal, con un rango máximo en mareas vivas de 3,71 m (Benavente, 2000). Este tramo costero se incluye dentro de la cuenca neógena postorogénica del Guadalquivir, compuesta principalmente por arenas, biocalcarenitas y conglomerados del Plioceno (García, 2005). La costa presenta una orientación general NO-SE con intervalos E-O, consecuencia de la

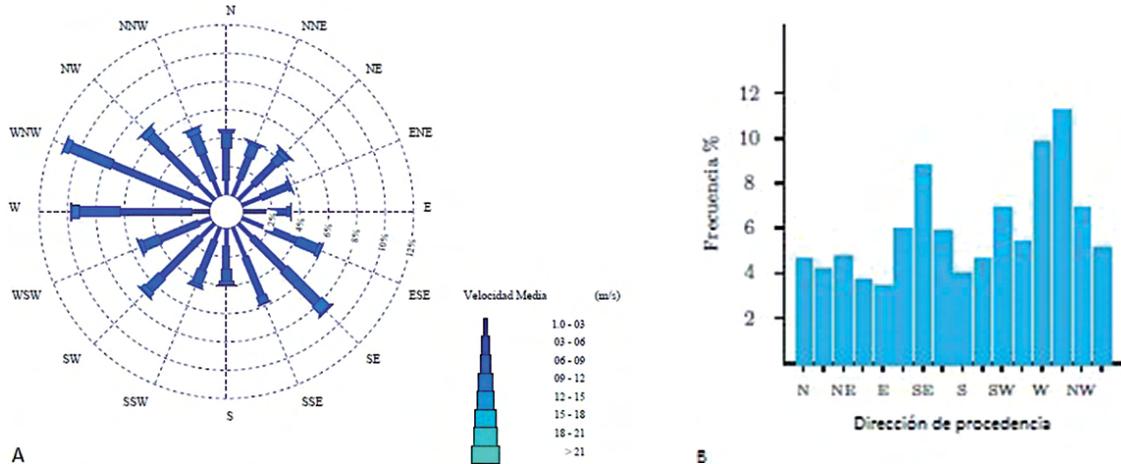


Figura 2: Rosa de vientos anual (A) y gráfico de distribución anual de frecuencia de vientos según dirección de procedencia (B) en Cádiz, correspondientes al período Enero 1998 - Noviembre 2005 (Datos REMPOR, Puertos del Estado, Ministerio de Fomento).

Figure 2. Annual wind rose (A) and graph representing wind frequency distribution according to wind direction (B) in Cádiz. (REMPOR data, Puertos del Estado, Ministerio de Fomento).

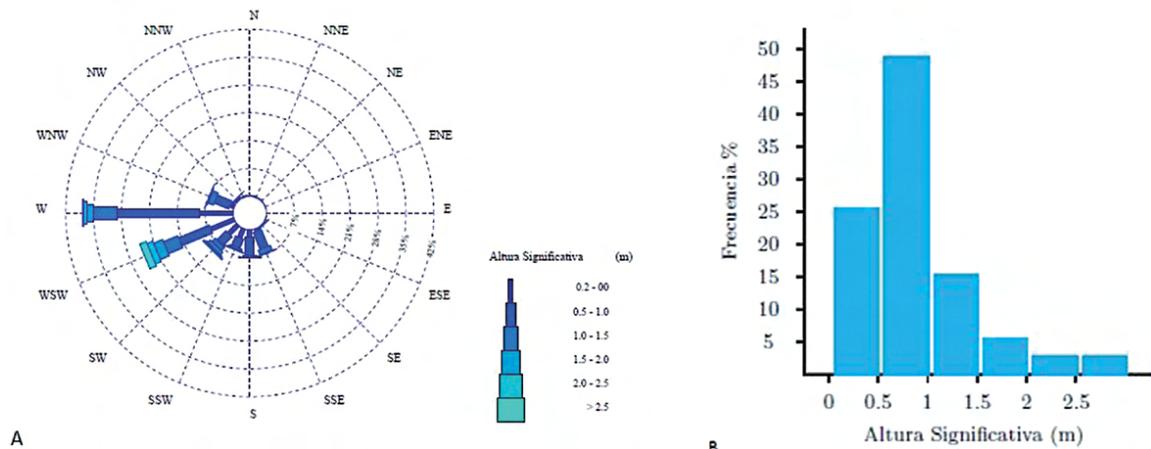


Figura 3: Rosa de oleaje anual (A) y gráfico anual de distribución de frecuencia (B) para la altura significativa de ola en la boya de Cádiz, correspondiente al período Julio 2001 - Julio 2011. (Datos REDCOS, Banco de datos oceanográficos de Puertos del Estado, Ministerio de Fomento).

Figure 3. Annual wave rose (A) and graph representing annual frequency distribution (B) for significant wave height in Cádiz buoy, corresponding to the period July 2001 - 2011 (REDCOS Data, Banco de datos oceanográficos de Puertos del Estado, Ministerio de Fomento).

existencia de fracturas que siguen las direcciones mencionadas y que están relacionadas con la tectónica general del Estrecho de Gibraltar y de la parte más occidental de la Cordillera Bética. Esta tectónica reciente afectó a los estratos rocosos del Plioceno, sobre los que se apoyan las playas de esta zona, elevando los estratos en unas zonas y hundiéndolos en otra (Gutiérrez-Mas et al., 1991). La playa de La Victoria presenta en su base una laja rocosa constituida por areniscas y conglomerados calcáreos del Plioceno, cuya cota superior oscila alrededor del nivel del mar (Muñoz-Pérez, 1996). Su constitución geológica se fundamenta en conglomerados cementados, popularmente llamados “rocas ostioneras”, y que aparecen junto con materiales margosos y arenosos (Domínguez-Bella, 2008). La playa se extiende a lo largo de unos 3 km en direc-

ción NO-SE, formando parte del tómbolo que une las ciudades de Cádiz y San Fernando (Fig. 1). Su anchura es variable, oscilando entre 40-60 m en la zona septentrional y entre 120-180 m en la mitad meridional. Presenta un carácter disipativo con una pendiente moderada-baja con valores cercanos al 6% (Muñoz-Pérez, 1996; López-Dóriga et al., 2010). Es una playa de carácter urbano, limitada por muros y espigones en sus laterales y por un paseo marítimo en la zona posterior. La diferencia de altura del paseo marítimo respecto al de la playa seca es variable: presenta valores altos de entre 6 y 4 m al Norte de la playa, valores bajos de entre 0,5 y 1 m en la zona central, y alturas entorno a los 2-3 m al Sur. En las últimas dos décadas se han realizado en la playa de La Victoria varias obras de realimentación artificial para compensar las pérdidas de are-

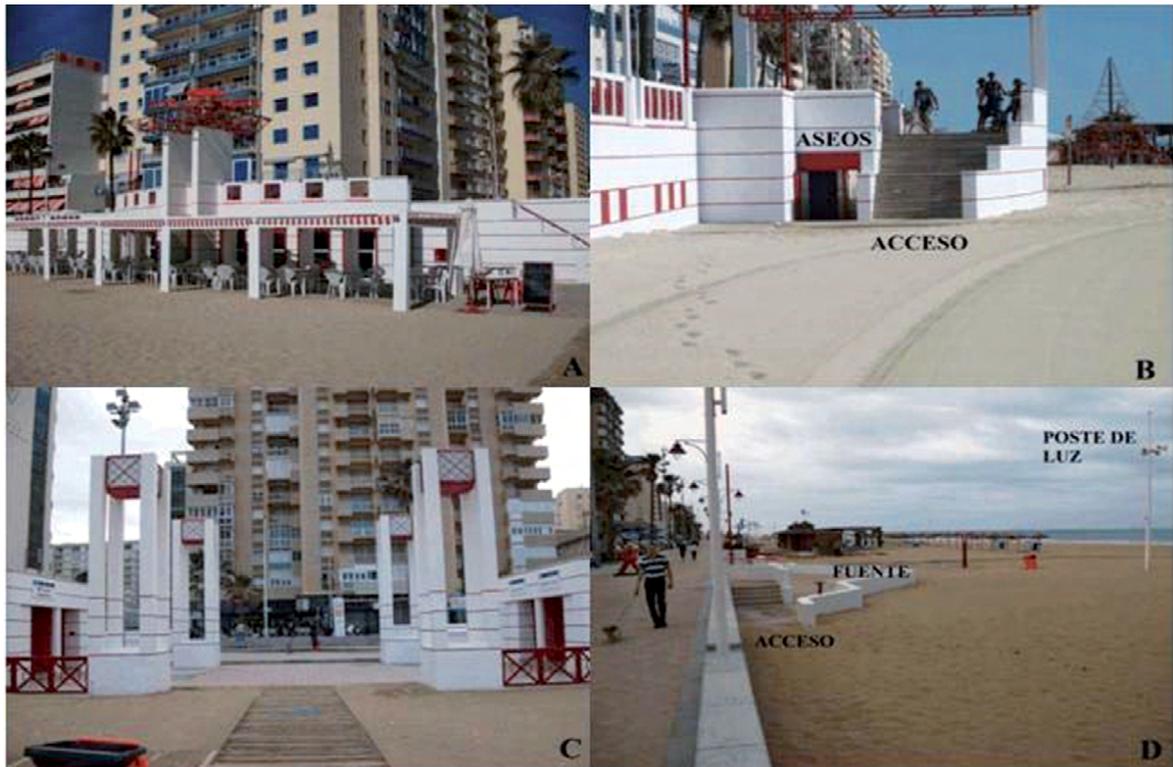


Figura 4: Diversas infraestructuras presentes en la playa de La Victoria. A. Restaurante. B. Aseos y accesos a la playa. C. Edificios de Policía e Información Turística. D. Fuentes, postes de luz y accesos bajos. Las fotografías C y D fueron tomadas en los alrededores al Hotel Playa Victoria.

Figure 4. Different facilities located in La Victoria Beach. A. Restaurant. B. Toilets and access points. C. Police services and Tourist information modules. D. Fountains, lampposts and access points. Photographs C and D were taken nearby the Hotel Playa Victoria.

na producidas a lo largo de los años: en 1991 se vertieron aproximadamente 2.000.000 m³ de sedimento, en 2004 se aportaron otros 260.000 m³ de sedimento y finalmente en 2010 se vertieron 57.000 m³ (Muñoz-Pérez et al., 2001, Muñoz-Pérez y Medina, 2010; Muñoz-Pérez et al., en prensa). En la actualidad, esta playa es el principal atractivo turístico de la ciudad y mantiene su uso recreativo durante todo el año, constituyendo la principal zona de esparcimiento de la población local. En la figura 4 se muestra el aspecto de diferentes tramos del paseo marítimo, así como algunas instalaciones y accesos a la playa.

3. Metodología

3.1. Ecuación General del Riesgo

Para el análisis del riesgo en la playa de La Victoria nos hemos basado en la ecuación general del riesgo definido en el trabajo de Ayala-Carcedo y Olcina (2002):

$$\text{Riesgo} = \text{Peligrosidad} \times \text{Vulnerabilidad} \times \text{Exposición} \quad (1)$$

Con el fin de evaluar los parámetros de esta ecuación, se ha establecido el procedimiento de toma de datos, los modelos numéricos necesarios para el análisis de los mismos y los criterios fijados para valorar el grado de riesgo y vulnerabilidad según los resultados obtenidos. En este trabajo, la evaluación del riesgo de temporal se ha basado en la combinación de datos topográficos de la playa de La Victoria y la cota de inundación teórica que podría alcanzarse en la zona de estudio bajo determinadas condiciones de temporal, como se expone a continuación:

3.2. Levantamiento topográfico con GPS

Para ello, se realizó un levantamiento topográfico de la playa durante los meses de Febrero, Abril y Mayo de 2011. Se eligió este período del año con el objeto de estudiar el perfil típico de invierno de la playa y trabajar durante una época con baja afluencia de ba-

ñistas. El levantamiento se llevó a cabo con un GPS diferencial en modo RTK (*Real Time Kinematics*) y la toma de datos se realizó durante el periodo de estoa de la bajamar para obtener la mayor superficie posible de la zona intermareal. Posteriormente, se trataron los datos del GPS asignándoles el sistema de referencia de coordenadas *European Datum 1950, UTM-29* y se filtraron para mantener los datos cuyo error de coordenada fuese menor a 0,05 m. Finalmente se referenciaron los datos de altura al 0 hidrográfico establecido para la Bahía de Cádiz y se elaboró un Modelo Digital del Terreno (MDT) trabajando con el programa *Surfer*[®].

Durante el levantamiento topográfico se registraron también las coordenadas de las instalaciones, los accesos y el paseo marítimo asociado a la playa, para posteriormente cartografiarlos sobre ortofotografías a escala 1:10.000. La siguiente figura (Fig. 5) muestra el modelo digital de terreno para el área de estudio.

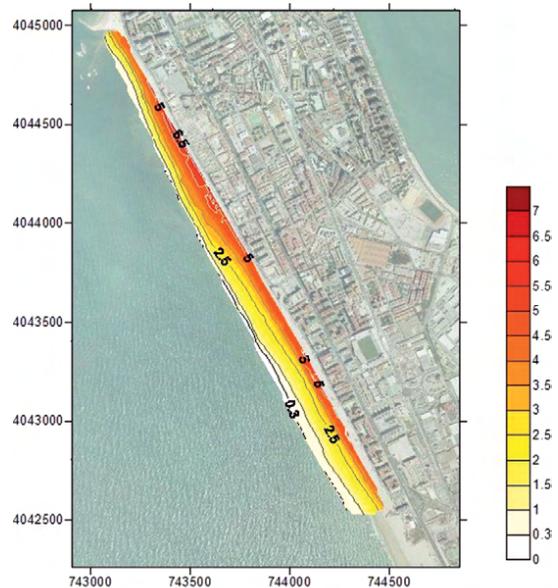


Figura 5: Modelo digital de terreno (MDT) resultado del trabajo de campo con el GPS en la playa de La Victoria, este modelo se superpone sobre la ortofotografía de la zona de estudio.

Figure 5. Digital terrain model (DTM) created as a result of the GPS data taken during field work at La Victoria beach. This model is superimposed to the aerial photograph of the area.

3.3 Ecuación TSLV

Por otro lado, y siguiendo la metodología de Benavente et al. (2006) y Del Río et al. (2012), se calculó la variación total del nivel del mar (TSLV) asociada al temporal, teniendo en cuenta los factores que condicionan el *storm surge*. El modelo empírico utilizado se ha aplicado a 6 escenarios de temporal extremo, correspondientes al oleaje con periodos de retorno de 10, 50 y 100 años, en situación de pleamares vivas mensuales y pleamar viva equinoccial. La variación total del nivel del mar o cota de inundación se calculó mediante la siguiente expresión (Benavente et al., 2006, Del Río et al., 2012):

$$TSLV = TL + WiS + BaS + WaR \quad (2)$$

TSLV	variación total del nivel del mar (Total Sea Level Variation)
TL	altura de marea
WiS	sobreelevación asociada al viento
BaS	sobreelevación por la baja presión atmosférica
WaR	variación por el <i>run-up</i> del oleaje

Como se ha mencionado anteriormente, en las variaciones debido a la marea astronómica (TL) se ha tenido en cuenta el dato de altura media en mareas vivas mensuales (AMMVM), cuyo valor es de 2,76 metros por encima del cero hidrográfico para la Bahía de Cádiz (Benavente, 2000), y la pleamar máxima viva equinoccial (PMMVE), cuyo valor es de 3,74 metros por encima del mismo cero hidrográfico establecido anteriormente (Tejedor y Bruno, 1996; Benavente, 2000). Los parámetros BaS y WiS constituyen el *surge* (S), y se ha estimado empleando una correlación logarítmica entre este *surge* y la altura del oleaje en aguas profundas (H_0), propuesta para la zona por Del Río et al. (2012):

$$S = 41,45 \ln(H_0) - 36,16 \quad (3)$$

La correlación se basa en el análisis del *surge* (S) y la altura del oleaje (H_0) para eventos de temporal estudiados durante un período de 12 años (1996-2008), considerando para el

estudio aquellos temporales que ha tenido lugar entre Octubre y Marzo, con altura significativa de ola superior a 2,5 m y duración de temporal mayor de 12 horas. El parámetro WaR se obtiene mediante la ecuación original de Holman (1986) modificada por Komar (1998), y cuyo cálculo se estima en función del periodo de pico de ola (T_p), la pendiente media de la playa ($\tan \beta$) y la altura significativa de ola en aguas profundas (H_0).

$$WaR = 0,36 \times g^{0,5} \times H_0^{0,5} \times T_p \times \tan \beta \quad (4)$$

g	aceleración de la gravedad
T_p	período de pico de oleaje
$\tan \beta$	pendiente media de la playa
H_0	altura significativa de ola en aguas profundas

Para el cálculo de la pendiente media de la playa, se dividió el área de estudio en 19 tramos. Su distribución no es equidistante puesto que va en función del gradiente longitudinal de la pendiente de playa en toda la zona, determinado con el MDT. En aquellas zonas donde el gradiente de pendiente es mayor, los tramos están más próximos entre sí. En cada tramo también se trazó un perfil topográfico transversal y se calculó el valor de pendiente media a partir de los datos de altura extraídos del MDT. En la figura 6 se muestra la distribución de los 19 tramos y los perfiles transversales llevados a cabo en la playa.

En cuanto a los datos de oleaje, el periodo de pico (T_p) se ha calculado teniendo en cuenta la ecuación que relaciona este parámetro con H_0 , establecida por Puertos del Estado para la boya de oleaje de Cádiz en régimen extremal (Puertos del Estado, 2010):

$$T_p = 4,95 \times H_0^{0,49} \quad (5)$$

La altura significativa en aguas profundas (H_0) se ha obtenido teniendo en cuenta el periodo de retorno de los temporales estudiados (R_p): en este sentido, se estima una altura de 7,26 m para temporales de 10 años de periodo de retorno, de 8,77 m para temporales de 50 años y de 9,41 m para tem-

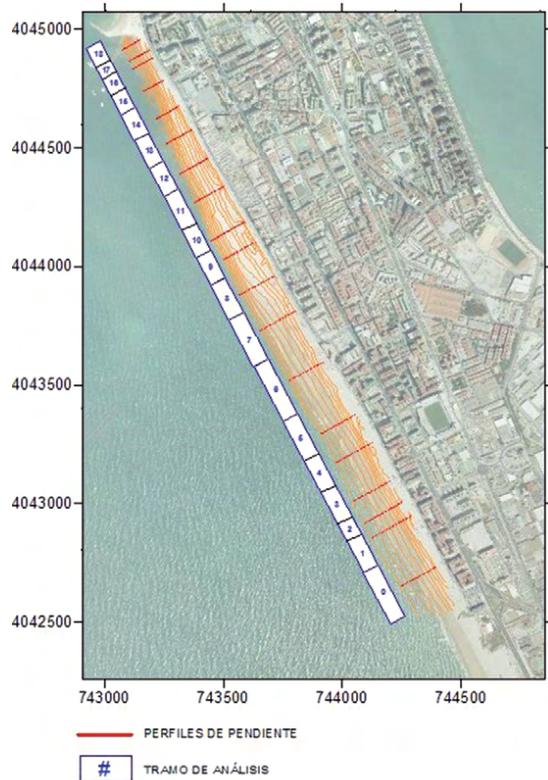


Figura 6: Imagen donde se muestran las curvas de nivel obtenidas con del MDT y los perfiles transversales para los 19 tramos de playa.

Figure 6. Image showing the contour levels obtained from the DTM and the cross-sections for each of the 19 transects of the beach.

porales de 100 años. Para la obtención del parámetro de altura de ola se utilizó la base

de datos de retroanálisis SIMAR-44 del proyecto HIPOCAS, estos datos son resultado del uso de modelos numéricos de alta resolución que facilita información sobre viento, oleaje y marea meteorológica para un período de tiempo que abarca desde 1958 a 2001 (Guedes-Soares et al., 2002). Los datos de altura oleaje provenientes de estos modelos se filtraron con el fin de obtener aquellos correspondientes a eventos de temporal para la zona de Cádiz y se corrigieron teniendo en cuenta los registros reales de altura proporcionados por la boya de oleaje de Cádiz (Del Río et al., 2012). En la tabla 1 se muestran los valores obtenidos a través de la bibliografía y las ecuaciones descritas para cada uno de los seis escenarios considerados en este trabajo. Como se puede observar, en el primer, segundo y tercer escenario de previsión se calcula el parámetro TSLV para una situación de pleamares vivas mensuales, mientras que para los restantes escenarios el parámetro TSLV se calcula para las mayores pleamares del año.

3.4. Valoración del riesgo y de la vulnerabilidad

Para comenzar es interesante definir los términos de riesgo y vulnerabilidad para el fenómeno de estudio, que es el temporal extremo. El riesgo puede definirse como la

Escenario	Tl (m)	H ₀ (m)	T _p (s)	R _p (años)	S (m)
1º	2,76	7,26	13,07	10	0,46
2º	2,76	8,77	14,34	50	0,53
3º	2,76	9,41	14,84	100	0,56
4º	3,74	7,26	13,07	10	0,46
5º	3,74	8,77	14,34	50	0,53
6º	3,74	9,41	14,84	100	0,56

Tabla I.- Características de temporal para los seis escenarios de previsión. H₀: Altura de ola en aguas profundas, T_p: periodo de pico del oleaje, R_p: Periodo de retorno del temporal, Tl: valor de marea considerando el 0 hidrográfico de referencia para la Bahía de Cádiz, S: marea meteorológica calculada a partir de la ecuación TSLV y que es combinación de los parámetros Wis y Bas.

Table I. Storm parameters for each scenario. H₀: Wave height in deep water, T_p: Peak period, R_p: storm's return period, Tl: Tidal level considering the hydrographic zero for Cádiz Bay, S: surge height calculated using the TSLV numerical model, this value is the combination of the Wis and BaS parameters.

probabilidad de que se produzcan daños personales y materiales a consecuencia de la interacción entre el temporal y unas condiciones previas de vulnerabilidad. Así mismo, la vulnerabilidad representa las condiciones determinadas por factores físicos, sociales, económicos y ambientales que pueden aumentar la susceptibilidad de una zona expuesta al impacto de este evento; y la exposición se explica por el conjunto de bienes a preservar que pueden ser dañados por la acción del mismo.

La peligrosidad por otro lado, supone el conjunto de aspectos naturales relativos al temporal, y que tiene incidencia en el riesgo. Este parámetro se determina en función de la severidad del mismo, que hace referencia a sus aspectos físicos, y de la probabilidad de ocurrencia. Todos los factores mencionados anteriormente se analizan de forma subjetiva, aunque se establecen algunos límites cuantitativos para ayudar en el análisis.

3.4.1 Análisis de la Peligrosidad

La peligrosidad del temporal se determina en función del período de retorno (R_p), la altura de ola en aguas profundas (H_0) y la situación mareal (TI) en cada escenario. Aunque los condicionantes de la peligrosidad para este estudio presentan unos valores concretos se lleva a cabo una estimación aproximada de la contribución del riesgo en cada escenario.

3.4.2 Análisis de la Exposición

El grado de exposición se determina observando las instalaciones y accesos que podrían verse afectados por el ascenso total del nivel del mar. Este parámetro está condicionado por:

A. La importancia de las infraestructuras, no todas tienen el mismo valor: las duchas, fuentes o postes de luz se consideran de importancia relativamente baja, ya que o bien parte de su estructura se retira durante el invierno, o bien los costes para

cubrir los desperfectos por inundaciones son bajos. En cambio los módulos de aseo y otros servicios municipales se han considerado de gran importancia, ya que los daños registrados pueden conllevar un mayor coste económico. Respecto a los accesos a la playa, habría que determinar si toda su estructura podría presentar daños considerables o si únicamente el nivel de agua llegaría a los primeros peñaños.

B. El número de instalaciones y accesos expuestos en cada uno de los tramos de análisis. Como se mencionó en el apartado 3.2 de la metodología, estos datos son conocidos ya que su ubicación quedó registrado al realizar el levantamiento topográfico en campo.

Para determinar el grado de exposición se procede de la siguiente forma: se asigna un valor de 0,5 para aquellas infraestructuras consideradas de menor importancia y un valor de 1 para las de mayor importancia. En cada tramo se observa el número de instalaciones presentes y se calcula el valor total considerando el valor de importancia. Para el cálculo del valor de exposición se aplica la siguiente ecuación:

$$\text{Exposición}_{\text{tramo}} = (\text{n}^{\circ} \text{ infraestructuras} \times \text{tipo})_{\text{tramo}} / (\text{n}^{\circ} \text{ infraestructuras} \times \text{tipo})_{\text{total tramos}} \quad (6)$$

Los resultados obtenidos se ponderan en función del valor máximo de exposición en la zona de estudio, correspondiente al tramo 6. Se calcula el valor relativo en porcentaje y se le asocia un número dentro de una escala del 0 al 4. En la tabla 2 se muestra los resultados para cada tramo.

Los resultados de la tabla 2 dan una idea de cuán importante puede ser el factor de exposición en cada tramo ante los efectos de un temporal. Sin embargo, para evaluar la exposición en cada escenario se tendrá en cuenta las instalaciones y accesos que puedan resultar afectados no el total de las infraestructuras en cada tramo.

Tramo	Valor exposición	Nivel de exposición
0	0,091	2,5
1	0,045	1,25
2	0,045	1,25
3	0,027	0,73
4	0,064	1,7
5	0,073	2
6	0,146	4
7	0,128	3,5
8	0,073	2
9	0,018	0,5
10	0,073	2
11	0,1	2,7
12	0,027	0,7
13	0,064	1,7
14	0	0
15	0	0
16	0	0
17	0,018	0,5
18	0	0

Tabla II. Valor de exposición calculada para cada tramo, considerando el valor adjudicado a cada tipo de instalación y el número total de instalaciones por tramo.

La tercera columna representa el valor relativo de exposición ponderándolo respecto al valor máximo en toda la zona de estudio, y que corresponde al tramo 6.

Table II. Exposure level calculated for each of the 19 transects, considering the value given to each facility and total number of them per transect. The third column represents the exposure relative value which is weigh up against the maximum exposure value in all the study area.

3.4.3 Análisis de la Vulnerabilidad

Finalmente, la vulnerabilidad se evalúa combinando los siguientes factores:

A. La distancia horizontal entre el límite TSLV y el muro del paseo marítimo. Este dato se estima calculando la extensión horizontal del límite TSLV y conociendo las coordenadas X e Y de los puntos del paseo en cada tramo. Para distancias mayores de 10 m la vulnerabilidad es baja y para valores menores de 10 m la vulnerabilidad aumenta. En este último caso se debe tener en consideración si el valor se encuentra dentro de un rango de 10 a 5 m o si es menor a 5 m.

B. La altura del paseo marítimo con respecto al nivel TSLV. Este dato se obtiene calculando la diferencia entre el valor TSLV y la altura del paseo marítimo en el punto donde la distancia horizontal (A) es nula. El peso de este factor es bajo con diferencias superiores a 1,5 m, mientras que con valores menores aumenta su importancia al existir peligro de que el nivel del agua rebase el paseo marítimo.

Como resumen, la figura 7 representa un esquema donde aparecen los factores a considerar a la hora de evaluar el nivel de riesgo y de la vulnerabilidad en cada escenario.

Complementariamente, se ha calculado la variación del riesgo y de la vulnerabilidad al cambiar de un escenario al siguiente. Para ello, a cada grado de riesgo y vulnerabilidad se le ha asignado un valor determinado (Tabla 3). Para calcular la variación entre escenarios, se suman los valores de vulnerabilidad y riesgo para todos los tramos de la playa en un escenario anterior ($Vuln_{ant}$ y $Riesgo_{ant}$), y se suman también los valores para el siguiente escenario ($Vuln_{post}$ y $Riesgo_{post}$). La diferencia entre los totales del escenario anterior y posterior se divide entre el número total de tramos en la playa y determina su porcentaje:

$$\text{Vulnerabilidad} = [(Vuln_{post} - Vuln_{ant}) / n^{\circ} \text{ total tramos}] \times 100 \quad (7)$$

$$\text{Riesgo} = [(Riesgo_{post} - Riesgo_{ant}) / n^{\circ} \text{ total tramos}] \times 100 \quad (8)$$

Con estos datos se puede determinar cuánto varía el riesgo y la vulnerabilidad teniendo en cuenta el cambio de los condicionantes de cada temporal.

Grado de Riesgo y Vulnerabilidad	Valor asociado
Bajo	0,25
Medio	0,5
Alto	0,75
Muy alto	1

Tabla III.- Valores asociados a cada grado de vulnerabilidad y riesgo.

Table III. Values related to the different levels of risk and vulnerability considered in this work.

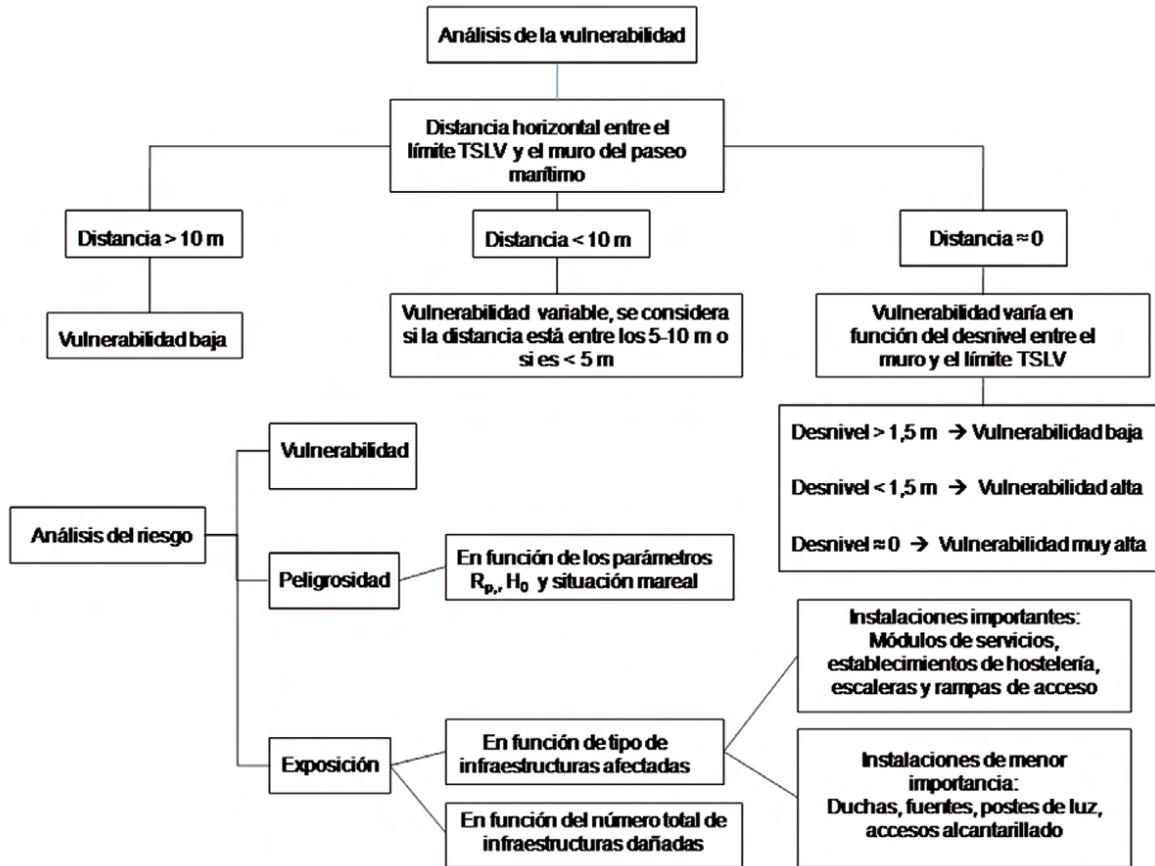


Figura 7: Esquema indicando cada uno de los aspectos considerados para el análisis del riesgo y de la vulnerabilidad.
 Figure 7. Diagram indicating different factors considered for the assessment of risk and vulnerability.

4. Resultados

4.1 Análisis de las zonas inundables

La combinación de la topografía de la playa de La Victoria y la cota de inundación calculada para los diversos escenarios de temporal se ha representado sobre una ortofoto del área de estudio, lo que permite apreciar cómo afectaría la inundación a las infraestructuras de la zona (Fig. 8-10).

En un primer escenario, con un temporal de 10 años de periodo de retorno y situación de mareas vivas mensuales (Fig. 8-A), las distancias entre el paseo marítimo y el límite TSLV varían entre los 5 y 60 m a lo largo de toda la playa. Se registran valores mínimos en los

dos tramos más próximos al espigón Norte de la playa y valores máximos en la zona central. En el segundo escenario (Fig. 8-B), con temporal de 50 años de periodo de retorno y mareas vivas mensuales, las distancias entre el paseo y el límite TSLV varían entre 5 y 40 m, aunque excepcionalmente aparecen tres tramos de playa donde el oleaje podría llegar al muro del paseo marítimo. En estas condiciones habría algunas instalaciones en el Norte y centro de la playa, como duchas, fuentes y accesos (Fig. 4), donde se podrían presentar daños por inundación.

El tercer escenario, correspondiente a un temporal con un periodo de retorno de 100 años y marea vivas mensuales (Fig. 9-A), el rango de separación entre el límite TSLV y

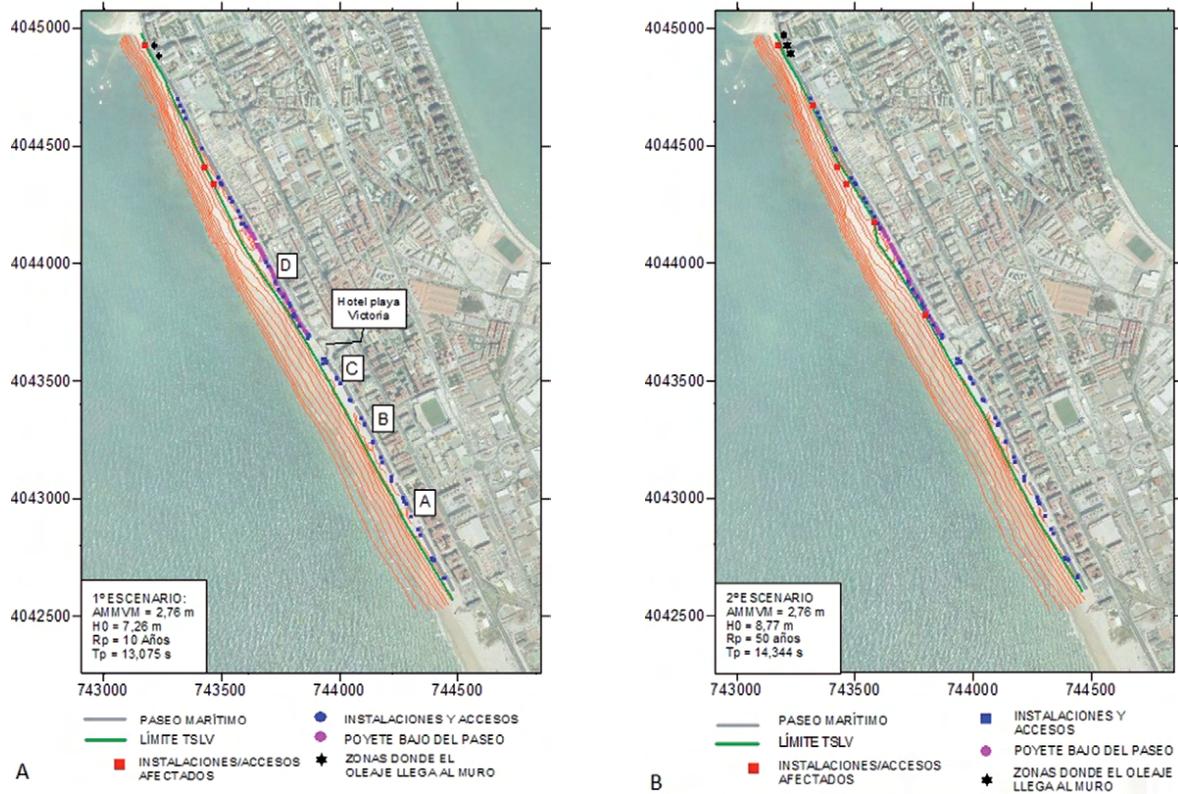


Figura 8: Primer escenario de temporal (A) y segundo escenario de temporal (B). En ambas aparecen las curvas de nivel con equidistancia de 0,5 m, el límite hasta donde llegaría el nivel del mar (TSLV) y los tramos donde el oleaje llegaría al muro del paseo. Figura el trazado de un poyete bajo que separa la playa del paseo marítimo y la localización de las instalaciones y accesos que se muestran en la figura 4.

Figure 8. First (A) and second (B) storm scenario. In both maps, contour lines with 0.5 m equidistance, the TSLV limit and the sections along the beach where waves could reach the promenade wall are depicted. It is also shown the location of a section of a low wall that separates the beach area from the promenade and the different access points and beach facilities.

el paseo marítimo varía entre los 4 y 43 m. Se aprecian cuatro tramos al Norte donde el oleaje llegaría al muro del paseo, y la mayoría de los accesos e instalaciones localizadas al Norte y al centro de la playa podrían resultar afectadas. En algunos edificios, como los módulos de servicios cercanos a los puntos de acceso centrales de la playa, se podrían registrar inundaciones puntuales.

Para el cuarto escenario (Fig. 9-B), con temporal de 10 años de periodo de retorno pero con situación de pleamar viva equinoccial, la situación se agrava considerablemente. Las distancias entre el límite TSLV y el paseo se reducen notablemente, variando entre 0 y 3 m. En 15 de los 19 tramos de la playa el oleaje

llegaría al muro del paseo marítimo, y aparecerían dos zonas en la sección central donde el paseo marítimo presentaría inundaciones puntuales. Se trata de dos accesos próximos al Hotel Playa Victoria, donde se localizan los módulos de servicios, que presentan un escaso desnivel entre el paseo marítimo y la playa seca. En este escenario, la gran mayoría de las instalaciones y accesos en la playa podrían verse afectadas.

Considerando un quinto escenario (Fig. 10-A), con temporal de 50 años de periodo de retorno y situación de pleamar viva equinoccial, el oleaje podría llegar al muro del paseo marítimo en todos los tramos. De hecho, existiría un tramo del paseo de aproximadamente

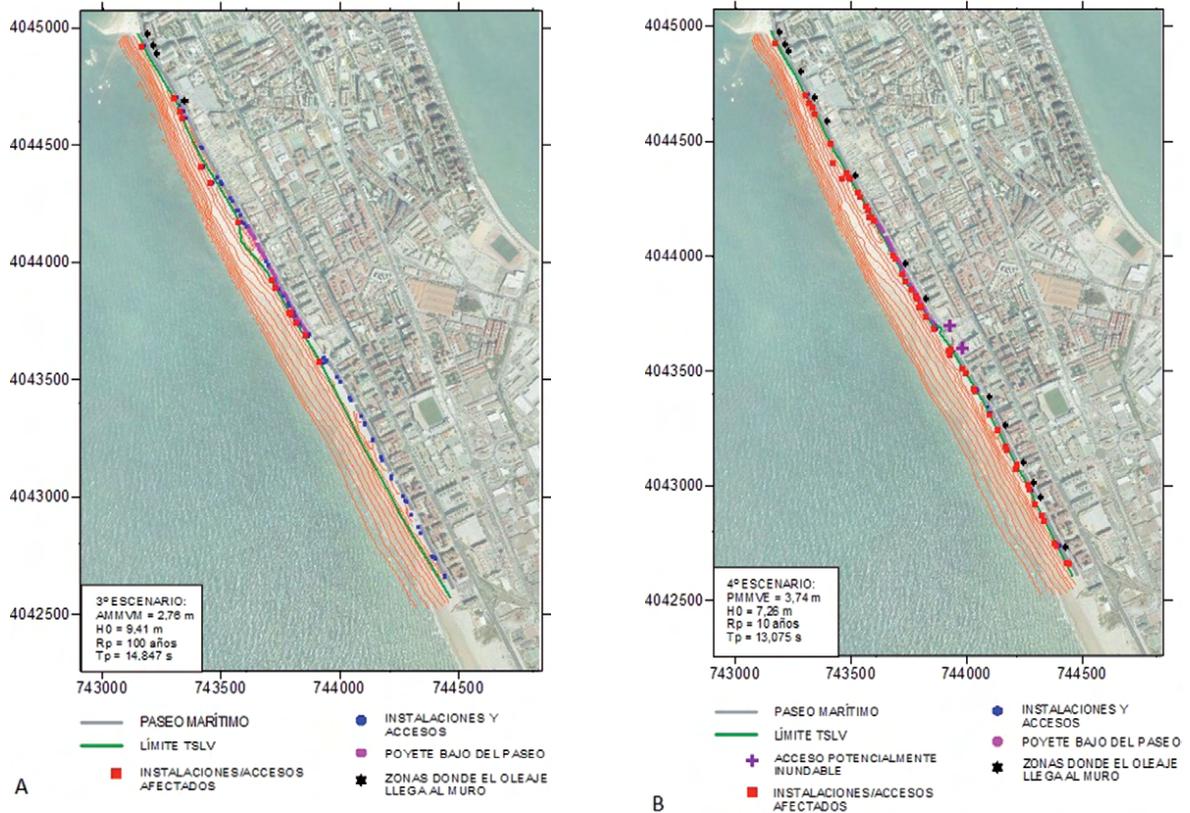


Figura 9: Tercer escenario de temporal (A) y cuarto escenario de temporal (B). Nótese como para el cuarto escenario aparece nueva simbología, que indica donde podrían producirse inundaciones puntuales bajo estas condiciones de temporal.

Figure 9. Third (B) and fourth (B) storm scenario. In the fourth scenario new symbology appears indicating areas where flooding can take place under these weather conditions.

340 metros calificado como potencialmente inundable. En este escenario todas las instalaciones y accesos se podrían ver afectados en mayor o menor medida. Finalmente en el sexto escenario (Fig. 10-B), con temporal de 100 años de periodo de retorno y pleamar viva equinoccial, el oleaje llegaría al muro en todos los tramos y el tramo del paseo potencialmente inundable se incrementaría a 400 metros. Al igual que en el escenario anterior, todas las instalaciones y accesos podrían sufrir daños.

4.2 Mapas de vulnerabilidad y riesgo

Para los seis escenarios de temporal, se ha dividido la playa en 19 tramos (Fig. 6), siguiendo la distribución de los perfiles trazados para el cálculo de la pendiente media.

Con el fin de asignar un grado de vulnerabilidad en cada tramo se sigue el siguiente procedimiento: Primero se determina la distancia horizontal entre el límite TSLV y los puntos que marcan el trazado del paseo marítimo. Este cálculo se lleva a cabo utilizando herramientas de medición, disponibles en los programas SIG, en los mapas de zonas inundables. Posteriormente, y en los casos donde el oleaje llegase al muro del paseo, se calcula la diferencia de altura entre el nivel del mar y el paseo. Para ello, se observa el valor del parámetro TSLV en este punto y el valor de altura del paseo registrado con el GPS. Para asignar un nivel de riesgo analizamos además de la vulnerabilidad, el factor de exposición y peligrosidad. Para la exposición, observamos las instalaciones/accesos afectados en los mapas donde se muestran las zonas inundables (Fig

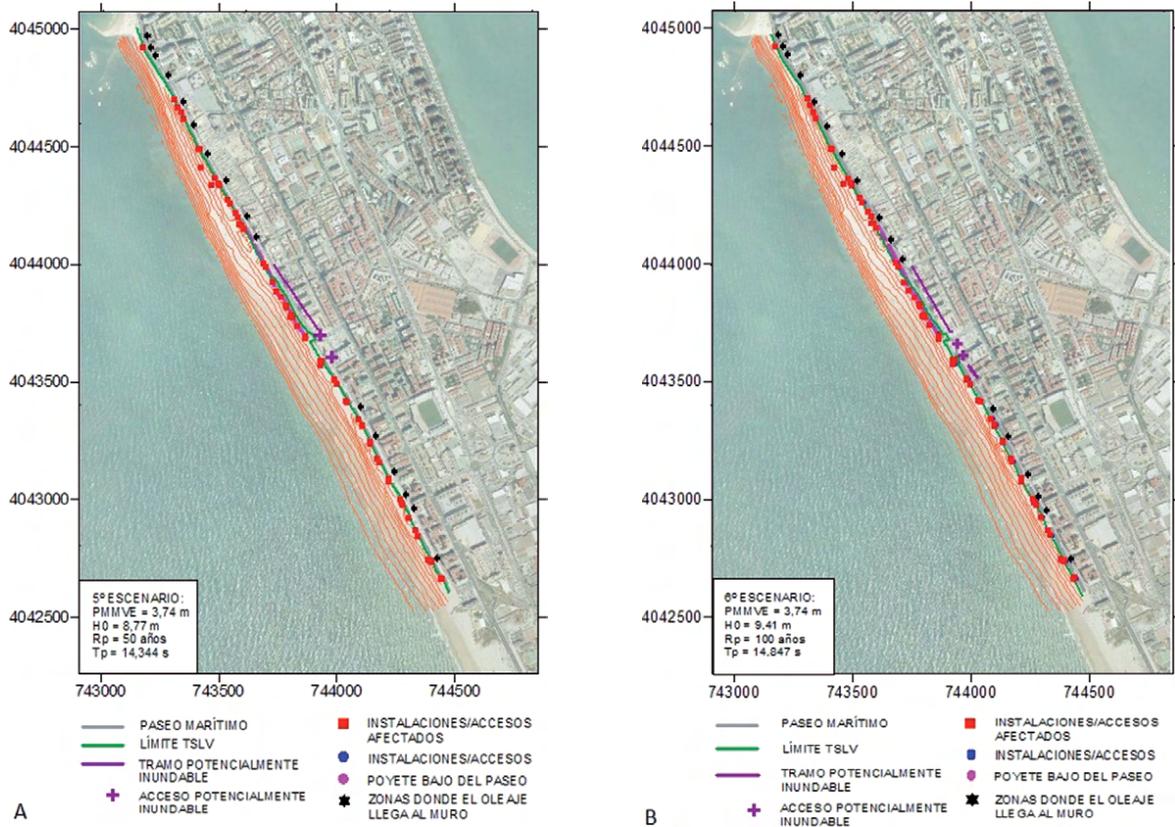


Figura 10: Quinto escenario (A) y sexto escenario (B) de temporal. En ambos escenarios se observa el tramo potencialmente inundable siguiendo el trazado del poyete bajo del paseo marítimo.
 Figure 10. Fifth (A) and sixth (B) storm scenario. In both scenarios a section of the beach promenade with potential flooding is represented.

8-A a 10-B). Cuando el nivel TSLV sobrepasa las instalaciones y accesos en cada tramo estos aparecen marcados en rojo, por lo que analizando en cada tramo el número y tipo de infraestructura marcada podemos establecer un nivel cualitativo del grado de exposición. Finalmente, la valoración de la peligrosidad se estima a partir de los datos de altura de ola en aguas profundas y la situación mareal.

Considerando un primer escenario de temporal (Fig. 11-A), se observa que la mayoría de los tramos presentan un bajo grado de vulnerabilidad. La distancia entre el límite TSLV y el paseo es mayor de 10 m, a excepción de los dos últimos tramos al Norte, y el número de instalaciones afectadas es reducido. Analizando el mapa de riesgo (Fig. 11-B), y teniendo en cuenta que se trata de un temporal de 10

años de periodo de retorno y situación de mareas vivas mensuales, la peligrosidad es relativamente baja. Únicamente el tramo 17, al Norte, tiene un riesgo medio por el factor de vulnerabilidad y exposición, en este tramo el oleaje llega al muro viéndose afectado el acceso a la playa. Otras estructuras de menor importancia, como los postes de luz algo más al Sur, tendrían daños pero no se ha elevado el grado de riesgo por el bajo nivel de exposición y vulnerabilidad.

En el segundo escenario, con temporal con periodo de retorno de 50 años y mareas vivas mensuales (Fig. 12-A), aumenta el número de tramos con vulnerabilidad media. La distancia entre el límite TSLV y el paseo marítimo se reduce de forma generalizada, registrándose en tres tramos al Norte distancias menores a 5

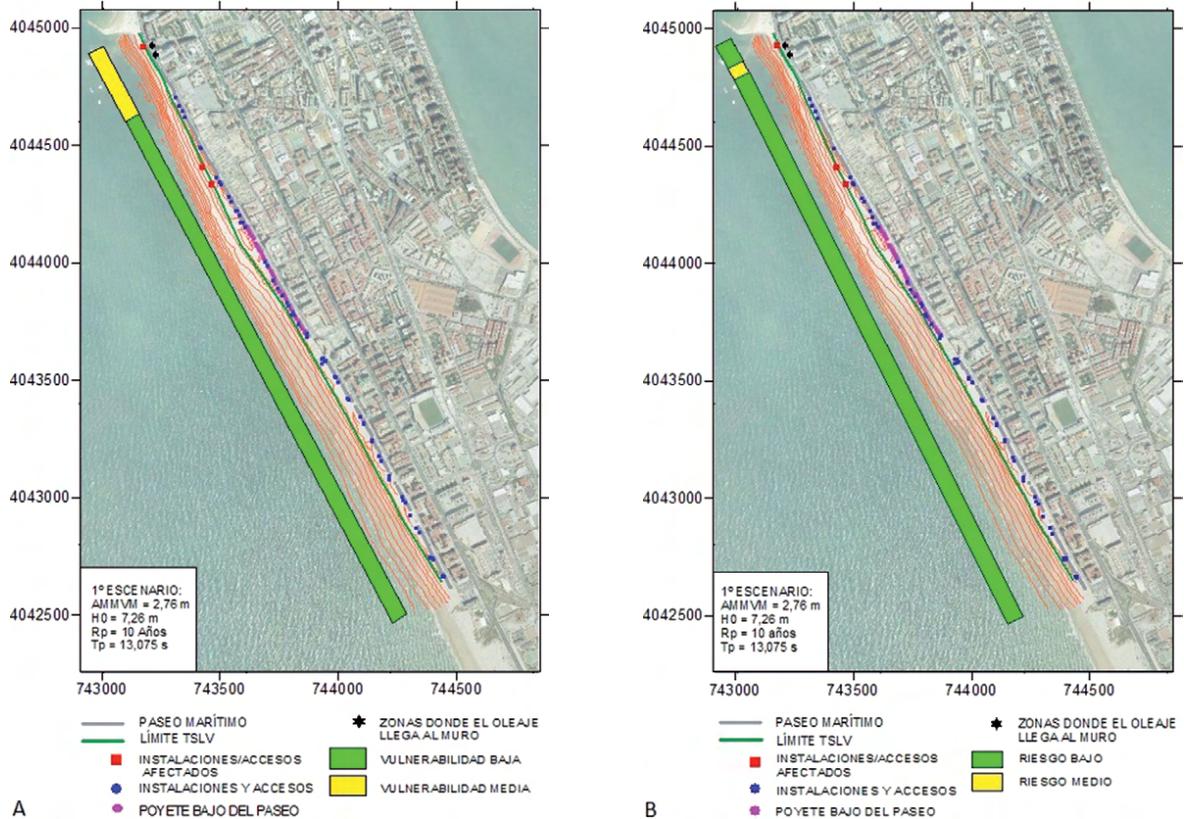


Figura 11: Mapa de la vulnerabilidad (A) y del riesgo (B) para el primer escenario de temporal. Se representan la simbología descrito para el análisis de zonas inundables a los que ahora se superpone la clasificación de la vulnerabilidad y riesgo para los distintos tramos.

Figure 11. Vulnerability (A) and Risk (B) maps for the first storm scenario. Symbology representing flood areas and sections along the beach with the classification given for risk and vulnerability assessment are shown in these maps.

m y en otros tres tramos algo más al Sur distancias entre 5 y 10 m. En los tramos donde el oleaje llegarse al muro del paseo no existe un incremento de la vulnerabilidad ya que en estos tramos el muro registra alturas de entre 5 y 6 m sobre la playa seca. En el mapa de riesgo (Fig. 12-B), se observan tramos de riesgo medio coincidentes en su mayor parte con tramos de vulnerabilidad media. La exposición es variable en estos tramos aunque de forma general el peso del factor sigue siendo bajo: algunos tramos en la zona Norte y centro tiene instalaciones como duchas y lavapiés, que podrían inundarse siendo las pérdidas económicas bajas. Y en los tramos donde hay accesos afectados, estos registrarían daños pero de poca consideración ya que el nivel del mar no alteraría gravemente su

estructura. La peligrosidad en este escenario es algo mayor al incrementar la altura de ola para la misma condición mareal que el primer escenario.

Con el propósito de calcular la variación de la vulnerabilidad y riesgo entre el primer y segundo escenario, se parte de las condiciones del primero, resultando un incremento de la vulnerabilidad en un 2,63 % y del riesgo en un 13,1%.

El tercer escenario corresponde con un temporal de 100 años de periodo de retorno y mareas vivas mensuales. Las distancias entre el límite TSLV y el paseo son menores a 10 metros en seis tramos y menores a 5 m en 5 tramos, por esta razón incrementan el número de tra-

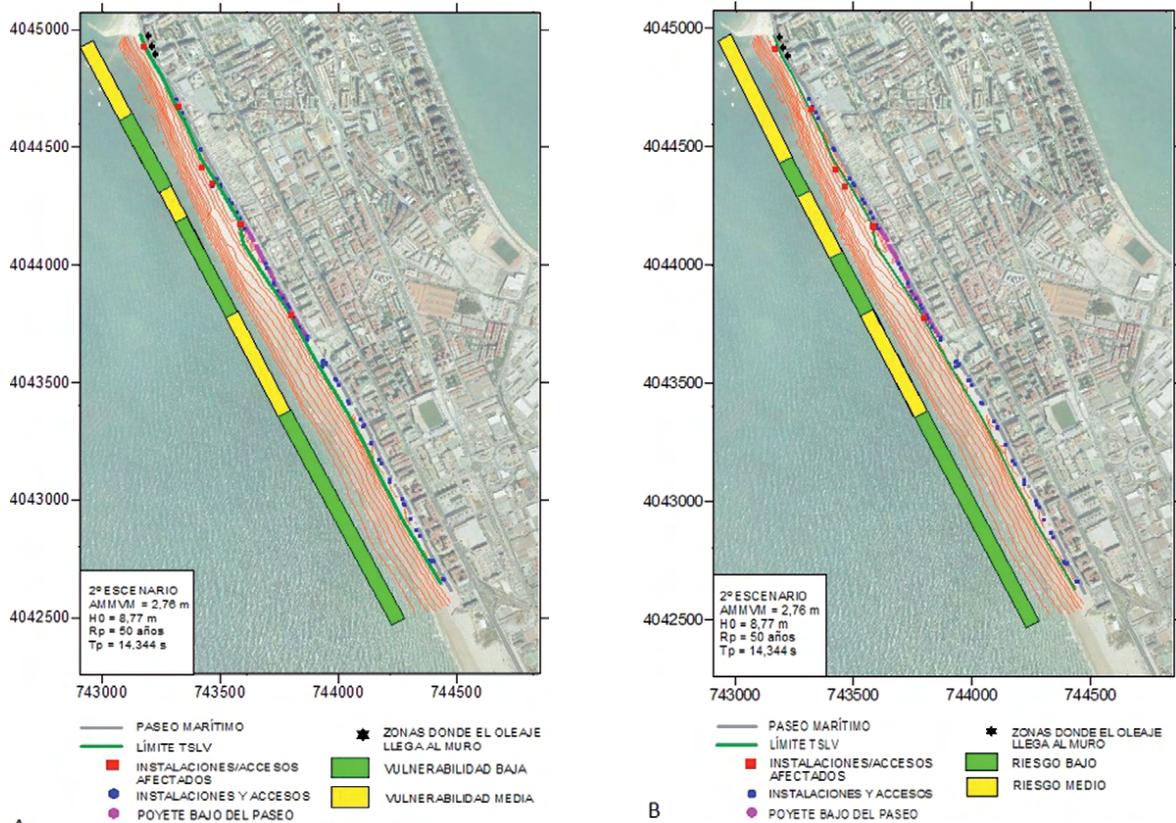


Figura 12: Mapa de la vulnerabilidad (A) y del riesgo (B) para el segundo escenario de temporal. En este escenario de temporal comienzan a aparecer tramos con riesgo alto en el sector central y Norte de la playa.

Figure 12. Vulnerability (A) and Risk (B) maps for the second storm scenario. In this scenario, some sections along the North and central part of the study area are classified as high risk.

mos con vulnerabilidad media en el centro y Norte de la playa. Es importante destacar que existe un tramo de alta vulnerabilidad, próximo al hotel Playa Victoria, donde la distancia entre el paseo y el límite TSLV sería inferior a 5 m y el desnivel entre la cota del paseo y la playa seca es próximo al metro (Fig. 13-A).

La situación de riesgo para el tercer escenario (Fig. 13-B) se caracteriza por el alto peso del factor de peligrosidad, ya que la altura de ola alcanzaría su máximo para el peor escenario de previsión. Por ello la mayor parte de los tramos, a excepción de la zona Sur, incrementan su nivel de riesgo. El factor de exposición es muy importante y a su vez muy variable en determinados puntos de la playa, por ello es posible encontrar tramos de riesgo bajo y medio próximo a tramos de riesgo muy alto.

Cerca del hotel Playa Victoria se encuentra el tramo de muy alto riesgo debido a una alta vulnerabilidad y a que varios accesos y un módulo de servicios pueden resultar dañados. Aparecen igualmente varios accesos afectados en tramos de riesgo alto algo más al Norte de la playa, y duchas, fuentes y postes de luz en los tramos de riesgo medio. Para este escenario la variación relativa de la vulnerabilidad con respecto al escenario anterior es del 7,89 % mientras que la variación del riesgo es del 7,89 %.

Tras analizar los tres primeros escenarios de previsión, cabe destacar cómo el grado de riesgo y la vulnerabilidad va aumentando progresivamente en las zonas situadas en el centro y Norte de la playa, mientras que al Sur los niveles se mantienen prácticamente in-

riables. Los mapas de zonas inundables (8-A, 8-B y 9-A) muestran cómo al Sur el nivel TSLV se mantiene cierta distancia del muro del paseo, por lo que muy pocas infraestructuras resultarían deterioradas. No obstante, hay que tener en cuenta que el nivel del mar puede estar influenciado por, entre otros factores, la morfología del perfil de playa; por lo que serían las diferencias morfológicas entre las diversas zonas de la playa la causa del diferente alcance del nivel TSLV.

El cuarto escenario representa el cambio a una nueva situación, un temporal de 10 años de periodo de retorno y con pleamares vivas equinociales. En la figura 14-A se observa

cómo aumenta el grado de vulnerabilidad en toda la playa, presentando niveles de vulnerabilidad alta o muy alta en el centro y Norte de la misma. Atendiendo a los criterios de vulnerabilidad, todos los tramos presentan distancias entre el nivel TSLV y el paseo menor a 5 metros, de hecho el oleaje llegaría al muro en 17 de los 19 tramos. En esta situación, la diferencia en altura entre el nivel TSLV y el paseo es el parámetro que controla los diferentes niveles de vulnerabilidad en estos tramos. En los de alta vulnerabilidad la diferencia en altura entre el paseo y el nivel TSLV es menor de 1,5 m y en los de muy alta vulnerabilidad es menor de 1 m. Los tramos localizados más al Norte y Sur de la playa, de vulnerabilidad me-

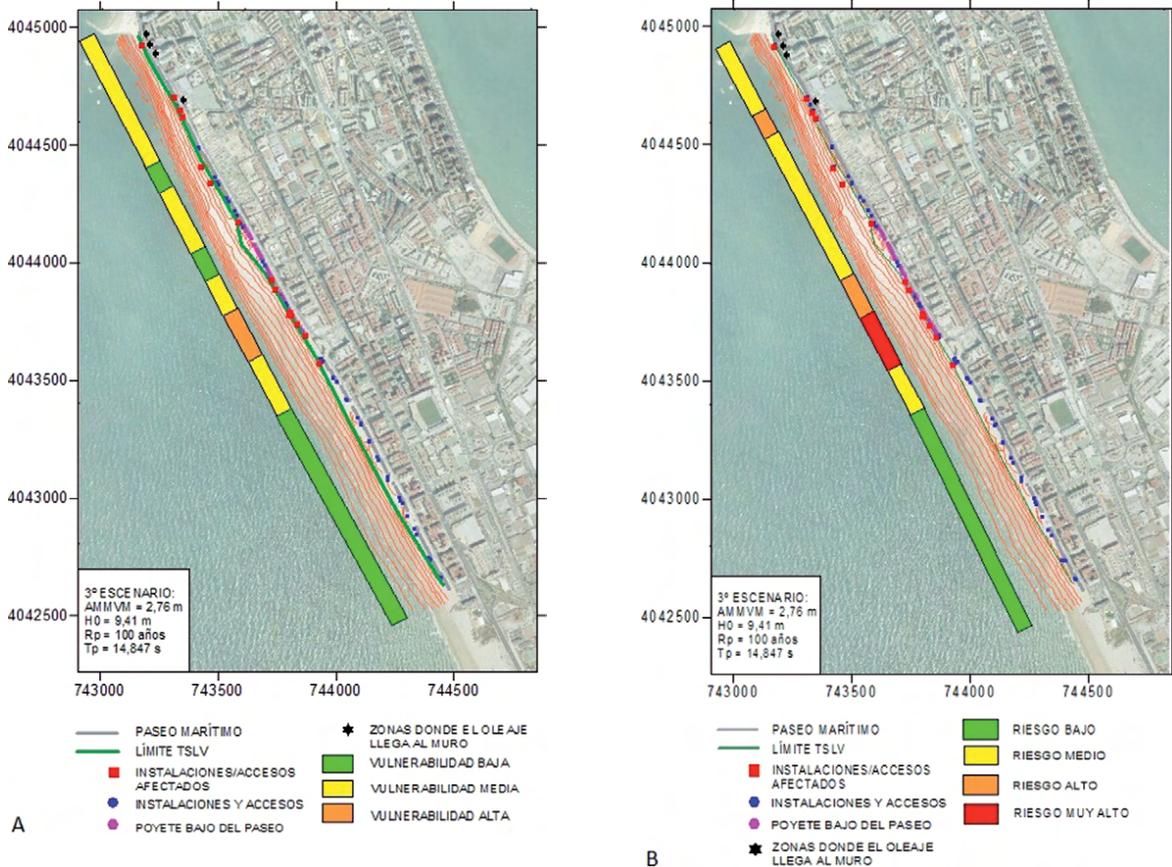


Figura 13: Mapa de vulnerabilidad (A) y de riesgo (B) para el tercer escenario. Se observan tramos con grado de riesgo y vulnerabilidad alta y muy alta debido a la proximidad del nivel de inundación al paseo y a la importancia de las instalaciones afectadas.

Figure 13. Vulnerability (A) and Risk (B) maps for the third storm scenario. Sections of very high vulnerability and risk level appear due to the proximity of the sea level to the beach promenade and the importance of the facilities affected by flooding.

dia la diferencia en alturas están por encima de los 1,5 m.

Con la nueva situación de pleamares vivas equinocciales, el factor de peligrosidad incrementa aun considerando la menor altura de ola registrada (Fig. 14-B). La mayor parte de las instalaciones sufrirían daños en mayor o menor medida. Los desperfectos registrados en accesos localizados en los sectores más al Norte y al Sur no se consideran de gravedad debido a que por el importante desnivel entre la playa seca y el paseo marítimo, el oleaje afectaría a los primeros escalones sin alterar la estructura significativamente. Aquéllos tramos donde el riesgo es alto y muy alto presentan un gran número de instalaciones de importancia afectadas, como son módulos de servicios o aseos, y accesos cuya estructura se vería dañada, un ejemplo son los accesos

próximos al Hotel Victoria donde se registraría inundaciones puntuales en el paseo.

Resumiendo, el ascenso del nivel del mar, que llega a reducir las distancias entre el nivel TSLV y el paseo a menos de 5 metros, implicaría que el factor de marea es determinante en las inundaciones por temporal en la costa gaditana, como ya apuntaron estudios anteriores (Reyes et al., 1999; Benavente et al., 2006; Del Río et al., 2012, entre otros). La variación relativa de la vulnerabilidad y del riesgo en comparación con el tercer escenario incrementa notablemente, resultando en un 21,05 % y 18,4 % respectivamente.

El quinto escenario (Fig. 15-A) corresponde a un temporal con periodo de retorno de 50 años y pleamares vivas mensuales. En esta situación el oleaje llega al muro del paseo en

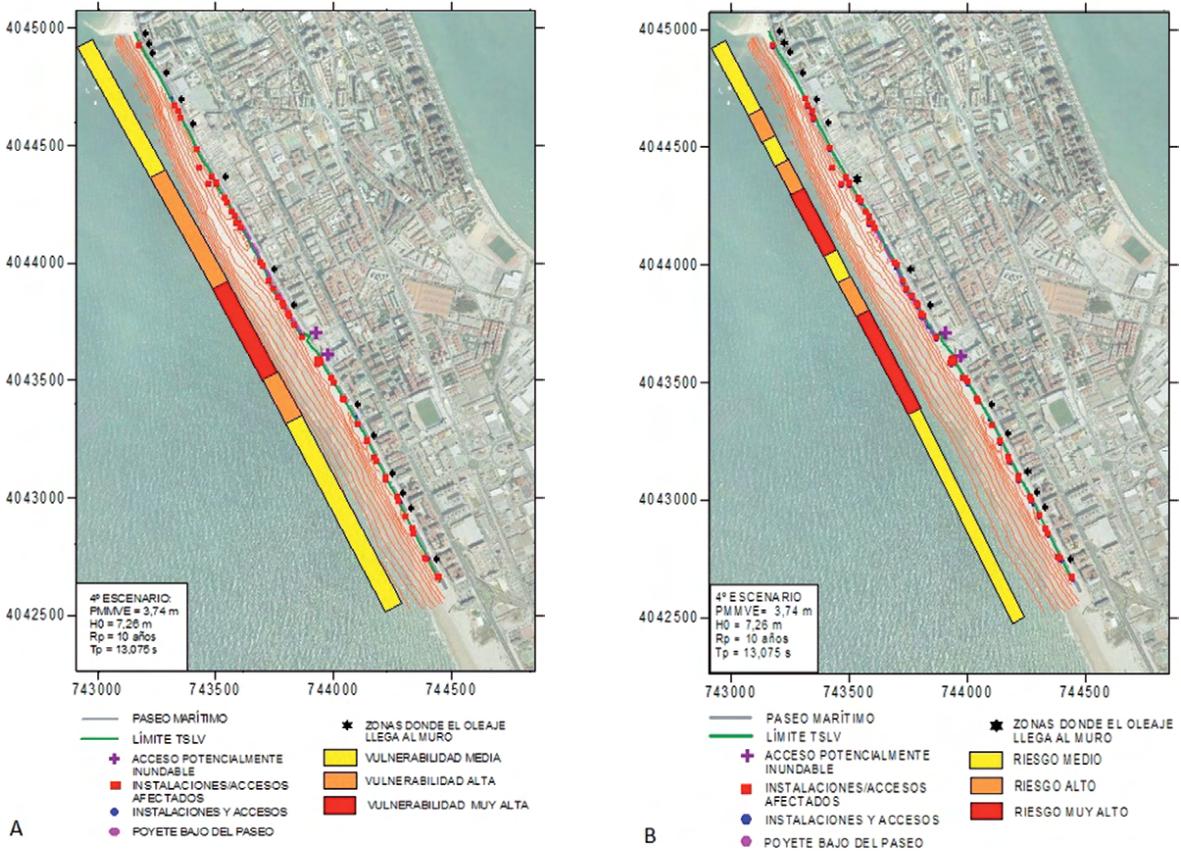


Figura 14: Mapa de la vulnerabilidad (A) y de riesgo (B) para el cuarto escenario de temporal.
Figure 14. Vulnerability (A) and Risk (B) maps for the fourth storm scenario.

todos los tramos, y la diferencia entre el nivel TSLV y la cota del paseo es menor de 1,5 metros en 7 de los 19 tramos. Aparece, además de los accesos aledaños al hotel, un segmento de unos 300 m justo al Norte del mismo donde se registraría inundaciones de paseo. En los 6 de los 15 tramos, de muy alta vulnerabilidad, la diferencia es de 1 m, y 1 de vulnerabilidad alta donde la altura es menor a 1,5 m.

Además, dadas las condiciones del quinto escenario, es necesario tener muy en cuenta el factor de peligrosidad ya que para la situación de pleamares vivas, aumenta la altura del oleaje incidente (Fig. 15-B). En todos los tramos, todas las instalaciones y accesos presentarían daños de consideración por lo que el factor de exposición también adquiere gran peso. La variación relativa de la vulnerabili-

dad en comparación con el cuarto escenario es del 5,26 % mientras que la variación relativa del riesgo es del 17,1%.

En el último escenario, con temporal de 100 años de retorno y pleamares vivas equinociales (Fig. 16-A), se observa un mapa de vulnerabilidad donde la mayor parte de los tramos la diferencia entre el paseo y el nivel TSLV es menor de 1,5 m, a excepción de los 4 más al Norte. En estos tramos sigue existiendo diferencias en altura entorno a los 5-6 m, ya que la cota del muro en estos tramos varía entre los 9 y 12 m. El mapa de riesgo para este escenario (Fig. 16-B) muestra un nivel de muy alto riesgo en la sección central y Norte de la playa. El factor de peligrosidad es máximo para este escenario, registrándose la mayor altura de ola para las condiciones de pleamar

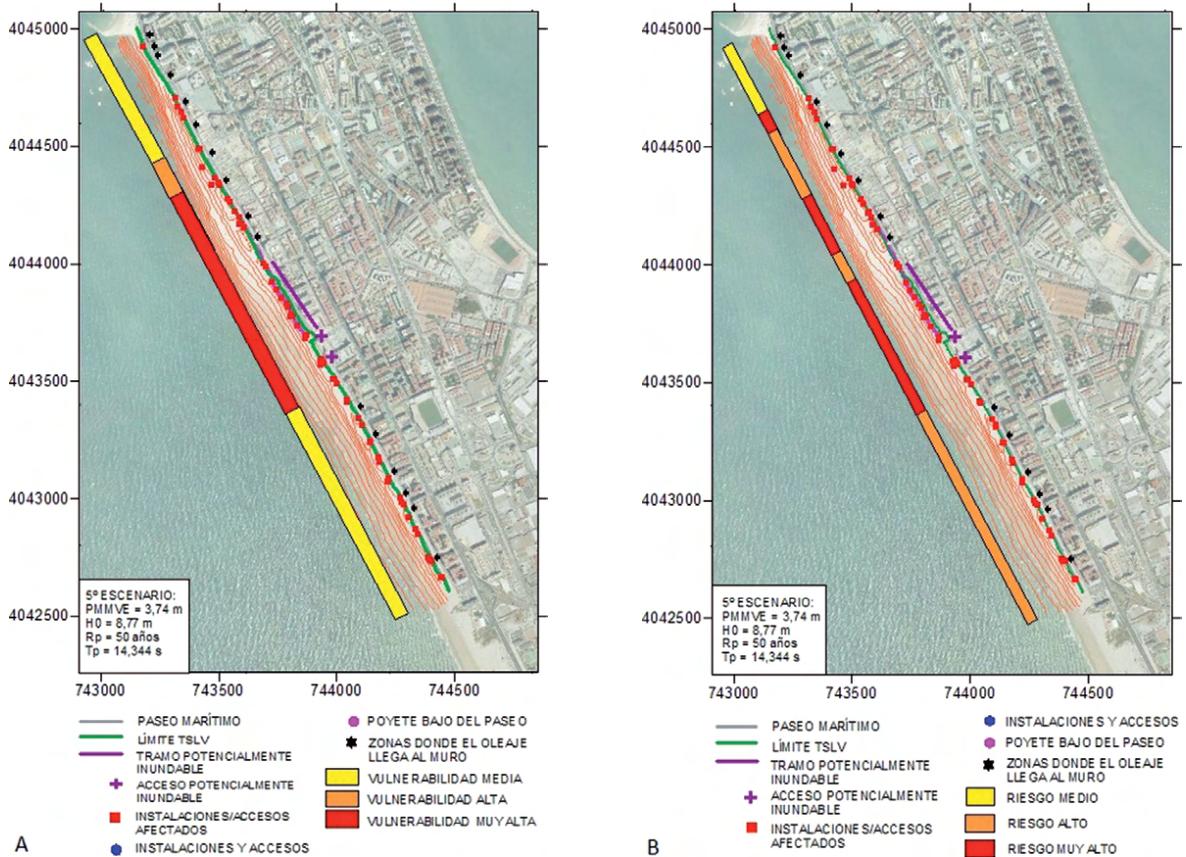


Figura 15: Mapa de vulnerabilidad (A) y de riesgo (B) para el quinto escenario de temporal.
 Figure 15. Vulnerability (A) and Risk (B) maps for the fifth storm scenario.

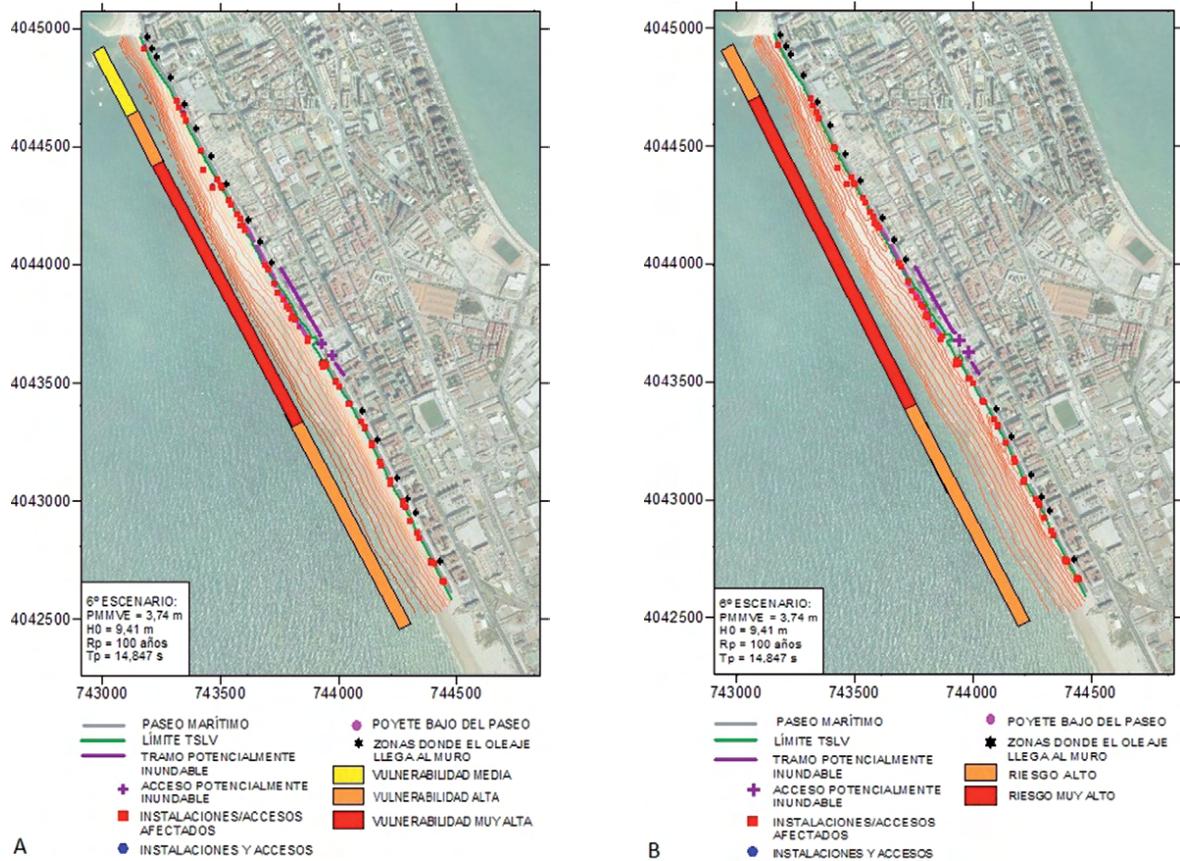


Figura 16: Mapa de vulnerabilidad (A) y de riesgo (B) para el sexto escenario.
 Figure 16. Vulnerability (A) and Risk (B) maps for the sixth storm scenario.

viva; y la exposición mantiene un alto peso y sin cambios en comparación con el escenario anterior. La variación relativa de la vulnerabilidad sería pues del 11,84 % y la variación del riesgo se calcula en un 17,1 %.

5. Discusión

5.1 Consideraciones sobre los resultados.

Analizando los resultados de las zonas inundables y los consecuentes mapas de riesgo y vulnerabilidad para los seis escenarios, se observa un cambio en el comportamiento de los datos al pasar de una situación de mareas vivas mensuales y pleamares vivas equinociales. Para los tres primeros escenarios (Fig. 8-A, 8-B y 9-A), la distancia entre el nivel TSLV

y el muro del paseo es menor en el sector Norte de la playa con respecto al sector Sur, registrándose valores mínimos cerca del hotel Playa Victoria. También es cierto que existe una mayor variabilidad en los resultados obtenidos con la ecuación TSLV para la mitad Norte con respecto al Sur. En los tres primeros escenarios, la cota de media del nivel TSLV para el sector Sur (tramos 0-8) es de 4,5 m y su desviación típica es de 0,06 m, mientras que en el sector Norte (tramos 9-18) la media es de 5,17 m y la desviación típica es de 0,22 m. Al pasar de una situación de mareas vivas mensuales a pleamares vivas equinociales (Fig. 9-B, 10-A y 10-B) el rango de distancias varía por completo. Existe una importante reducción del valor de distancia en toda la playa, pasando de máximos de 40 m en el tercer escenario a menos de 5 m en el cuarto y prác-

ticamente de 0 m en los últimos escenarios. Aún así la distribución de máximos y mínimos es similar al de los 3 primeros escenarios, la cota media del nivel TSLV para el sector Sur es de 5,48 m con una desviación típica de 0,06 m mientras que al Norte la cota media es de 6,14 m con desviación típica de 0,23 m. Asimismo, incrementan los tramos donde el oleaje llega al paseo alcanzando a toda la playa, y el número de instalaciones afectadas pasan de aproximadamente 15 en el tercer escenario a afectar al total de instalaciones registradas con el GPS en la zona de estudio. En los tres primeros escenarios, el grado de vulnerabilidad está condicionado principalmente por la distancia horizontal entre el nivel TSLV y el paseo marítimo, mientras que en los tres últimos escenarios, es la diferencia en altura entre el nivel TSLV y el muro del paseo el condicionante de peso para analizar este factor. El grado de exposición se evalúa en función del número y tipo de instalaciones afectadas; es interesante tener en cuenta el grado de daño en determinadas estructuras, como los accesos, que podría estimarse en función de la diferencia en altura entre el nivel TSLV y el paseo. Cabe destacar cómo el factor de vulnerabilidad es bajo-medio y constante en casi todo el sector Sur, debido a la distancia entre el nivel TSLV. El grado de riesgo para los tres escenarios viene determinado por la vulnerabilidad y la exposición, a excepción del tercer escenario donde cobra peso el factor de peligrosidad al considerar la mayor altura de ola registrada para este estudio.

Al pasar a la situación de pleamar viva equinoccial, el factor de exposición incrementa considerablemente ya que el nivel del mar llegaría al muro del paseo afectando a las instalaciones y accesos registrados. Por ello, es la diferencia entre la cota del paseo y la de la playa seca el factor de variabilidad de la vulnerabilidad en estos escenarios. La nueva situación mareal añade peso al factor de peligrosidad al evaluar la situación de riesgo, siendo máximo en el sexto escenario. La variación en el porcentaje de riesgo y vulnerabilidad es especialmente significativa entre el tercer y cuarto escenario debido a que supo-

ne el punto de inflexión entre las dos situaciones mareales.

Los resultados obtenidos en los mapas de inundación para los diferentes escenarios pueden explicarse si consideramos el tipo de modelo utilizado para medir el nivel TSLV y el modelo topográfico de la playa de La Victoria. Para un mismo escenario de temporal se observa que la extensión de las zonas inundables varía espacialmente a lo largo de la playa de La Victoria, debido a que el nivel TSLV depende directamente del factor de *run-up* (WaR) del oleaje. A diferencia de los demás parámetros del modelo, este factor varía longitudinalmente bajo las mismas condiciones de temporal debido a que en su cálculo se incluye la pendiente de la playa. En este sentido, Benavente et al. (2006), que analizaron los efectos de los temporales en zonas costeras próximas al área de estudio, destacan la morfología de la playa como un importante factor de control sobre la inundación. Así, las pendientes pronunciadas incrementan el alcance del oleaje y desplazan hacia la playa la zona de rompiente, aumentando la cantidad de energía y el poder erosivo de la ola.

Otro aspecto clave son las mareas, ya que se observa una diferencia muy significativa en el valor de la cota de inundación al pasar de una situación de mareas vivas mensuales (AMMVM) a pleamares vivas equinociales (PMMVE). Esto implica una notable variación en el grado de vulnerabilidad y riesgo del área de estudio entre ambas situaciones. Sin embargo, en la costa de Cádiz las pleamares máximas del año no coinciden generalmente con la época de temporales, ya que las mareas equinociales se registran a finales de marzo y en septiembre, mientras que los temporales suelen ocurrir durante el período desde octubre a marzo (Rodríguez-Ramírez et al., 2003) Aun así, no se debe obviar el posible daño que puede registrarse por eventos de temporal cuando coinciden con mareas vivas mensuales, como se demostró durante los temporales del invierno de 1996 (Benavente et al., 2006) y de 2009-2010 (Rangel-Buitrago y Anfuso, 2011; Del Río et al., 2012).

Además de las mencionadas variables incluidas en el modelo empírico (oleaje, marea y morfología de la playa), existen otros procesos que pueden influir en la extensión de la inundación, como la dinámica de corrientes o las tasas de transporte sedimentario. Éstos condicionan la cantidad de sedimento existente en la playa y su tendencia erosiva o acumulativa a corto, medio y largo plazo, y por tanto afectan a la frecuencia y alcance de la inundación por temporales. Así por ejemplo, Ávila-Serrano et al. (2009), que llevaron a cabo estimaciones del transporte litoral en esta playa, destacan la movilización neta de sedimento que se produce hacia el Sur, detectándose también una cierta componente perpendicular a costa, lo que condicionaría la evolución de la playa a largo plazo.

Por otro lado, la morfología de la zona submareal puede condicionar los efectos del oleaje y de las corrientes durante un temporal extremo. En este sentido, Muñoz-Pérez y Medina (2010) ponen en evidencia la importancia del control geológico del perfil de playa, al constatar que existen diferencias en el volumen de sedimento que se moviliza transversalmente durante un temporal entre los tramos donde la playa se encuentra apoyada sobre una plataforma rocosa (la zona Norte del área de estudio, de mayor susceptibilidad ante la inundación) y los tramos donde la playa presenta un perfil completo (la zona Sur, menos afectada por las inundaciones). Por este motivo y de cara a incrementar la precisión de la delimitación de las áreas inundables durante los temporales, sería interesante realizar un seguimiento durante un periodo de tiempo prolongado (Cooper et al., 2004), con el fin de monitorizar las variaciones en el volumen de sedimento antes y después de los temporales. Así, Ávila-Serrano et al. (2009), apuntan como en el sector Norte disminuye progresivamente la altura del perfil a lo largo del verano, mientras que en el centro aumenta la anchura de playa durante esta periodo, por el oleaje constructivo propio de la estación. Por otro lado, López-Dóriga et al. (2010) destacan la reducción de la cota del perfil en toda la playa tras los intensos temporales del invierno

de 2009, así como la escasa capacidad de recuperación sedimentaria de la playa a lo largo del año siguiente, mostrando una peor capacidad en la zona Sur.

En cuanto a los criterios de vulnerabilidad y riesgo, estos se establecieron en función de los resultados del modelo, de la topografía y de la localización de las infraestructuras. Estos criterios se han basado en el posible daño que se podría producir en las estructuras asociadas a los servicios de playa. No obstante, son varias las consideraciones que se deben tener en cuenta para futuros estudios en la zona. Así, existen otras fuentes de información que podrían combinarse con los datos empleados en este trabajo, con el fin de obtener información más completa con la que estimar el grado de riesgo y de vulnerabilidad cuando se presenten eventos de temporal extremo. En este sentido, sería interesante incluir los condicionantes comentados anteriormente y que controlan la cota de inundación, como es la presencia de la laja rocosa. La evolución a medio plazo de la playa también sería un factor fundamental a incluir en este tipo de cálculos. Así, por ejemplo, Benavente et al. (2006) utilizaron series de fotografías aéreas de diferentes años para observar cambios en la evolución de la línea de costa y establecer las zonas de erosión y acreción. Por otro lado, la comprobación de los resultados obtenidos en cuanto a riesgos podría realizarse según la metodología apuntada por Del Río et al. (2012) mediante la comparación de la información publicada en prensa sobre los daños registrados para temporales concretos. De igual forma, es necesario considerar la posibilidad de que en la zona de estudio se produzcan temporales consecutivos en un corto espacio de tiempo (grupos de temporales). Precisamente los graves daños sufridos en toda la costa del Golfo de Cádiz en el invierno 2009-2010, mencionados en la introducción del presente trabajo, se debieron a la acción de varios grupos de temporales (Del Río et al., 2012). En este caso, la larga duración del *storm surge*, coincidiendo algunos picos de tormenta con mareas vivas mensuales, generó unos efectos de inundación y erosión

significativamente superiores a los que cabría esperar considerando únicamente el periodo de retorno del oleaje asociado. De esta forma, una evaluación del efecto de los grupos de temporales contribuiría a ampliar la caracterización del riesgo de inundación realizada en este trabajo.

Finalmente, el análisis de la probabilidad de ocurrencia de temporales en la zona, y sobre todo, la probabilidad conjunta con mareas vivas mensuales, también constituye una información esencial desde el punto de vista de la prevención del riesgo, ya que será un factor clave para determinar la programación de las actuaciones de mantenimiento de la playa y el diseño de planes de acción para los servicios de emergencia. Se habrán de tener en consideración los temporales de gran magnitud y baja probabilidad de ocurrencia, ya que sus efectos podrían influir en la toma de decisiones para una adecuada planificación de los usos del suelo en zonas expuestas, especialmente en áreas de potencial desarrollo urbano en el futuro (McInnes et al., 2003).

A partir de la información proporcionada por los servicios públicos entrevistados y los datos de trabajos previos realizados en la playa de La Victoria, se han propuesto distintas actuaciones para optimizar el gasto y la eficiencia de las tareas de mantenimiento en esta playa urbana. En primer lugar, se sugiere que los servicios de limpieza de playa mantengan la cobertera de algas, que con frecuencia llegan a la playa durante el invierno, ya que reducen la movilización de sedimento en la zona intermareal por acción del oleaje. Además se debe tener muy en cuenta la actual realización de re-perfilados y regeneraciones artificiales de la playa, se trata de intervenciones de gran importancia por sus efectos en la evolución natural del sistema y por la necesidad de llevarlos a cabo para mantener la calidad turística exigida a esta playa urbana. Las obras de realimentación artificial conllevan una gran inversión y suponen un considerable impacto ambiental, por lo que siempre es recomendable consultar estudios previos sobre el comportamiento de la playa receptora

del sedimento antes de llevar a cabo este tipo de obras. Así por ejemplo, Muñoz-Pérez et al. (2001), destacaron la mayor eficiencia de las obras de rehabilitación de gran envergadura en playas con perfil completo que en aquellas apoyadas sobre plataforma rocosa. Para este segundo tipo de perfil, se recomiendan pequeñas regeneraciones anuales ya que así se reducen las pérdidas económicas y se mejora el uso del recurso sedimentario. Por otra parte, dado que el objetivo de estas obras es mantener la zona de playa seca adecuada para su uso turístico, sería interesante analizar parámetros como el coste de mantenimiento anual por unidad de playa seca con el fin de decidir dónde invertir fondos públicos en un futuro.

6. Conclusiones

El trabajo realizado en la playa de La Victoria (Cádiz) demuestra que, bajo determinadas condiciones meteorológicas, existe el riesgo de inundación de grandes extensiones de playa. Según la peligrosidad de estos eventos, el nivel del mar puede llegar a alcanzar el paseo marítimo en las situaciones más adversas y causar daños a las infraestructuras costeras. Analizando los diferentes escenarios, se ha podido observar que el factor de marea es determinante en el cambio de la peligrosidad de los temporales. Asimismo, se destaca cómo las condiciones morfológicas de la playa y su evolución a medio-largo plazo son fundamentales para analizar la capacidad de respuesta ante la acción de temporales de diferente período de retorno. Aunque este tipo de eventos no son frecuentes, sus efectos suponen importantes perjuicios económicos y alteran gravemente la calidad turística de la playa urbana. De hecho, en casos extremos podrían incluso poner en riesgo la seguridad de los ciudadanos. El modelo empírico propuesto para evaluar el ascenso del nivel del mar, parte de fórmulas clásicas para calcular el *run up* del oleaje y de una relación empírica entre el *storm surge* y la altura de ola. Su aplicación sobre el MDT de la playa ha permitido obtener resultados fiables, estimando zonas potencialmente inun-

dables para cada uno de los escenarios considerados. Los datos calculados, sobre todo con temporales de menor periodo de retorno, son comparables con las observaciones en campo de zonas afectadas por las inundaciones durante los temporales recientes de 2009-2010. Esta metodología, que combina el modelo de inundación y mapa topográfico de la playa, ha dado lugar a la creación de mapas de riesgo y de vulnerabilidad, localizando aquellas infraestructuras de la playa que pueden resultar potencialmente afectadas. En base a estos mapas es posible determinar las zonas que frecuentemente pueden inundarse y evaluar la relocalización de las infraestructuras durante el periodo de temporales, sobre todo aquéllas cuyos costes por daños pueden ser importantes. Igualmente, es importante prestar atención a las obras de mantenimiento en la playa, que necesitarán de estudios previos antes de llevarlas a cabo para analizar su impacto a medio-largo plazo. Para el logro de los objetivos propuestos en este trabajo, es imprescindible la cooperación entre las instituciones científicas y la administración pública para mejorar la efectividad de los planes de emergencia ante eventos de inundación costera y asesorar en las actuaciones de mantenimiento de las playas de esta región.

Agradecimientos

Este trabajo es una contribución al grupo de investigación RNM-328 del PAI, y a los proyectos RNM-6547 y GERICO (CGL 2011-25438). Los autores quieren agradecer al editor y a los tres revisores anónimos sus sugerencias y recomendaciones, que han contribuido significativamente a la mejora del trabajo.

Referencias Bibliográficas

Ávila Serrano, G.E., Santa Rosa del Río, M.A., Anfuso-Melfi, G., Benavente-González, J., Guardado-France, R., González-Yajimovich, O. & Velázquez-González, E.K. (2009). Sediment variations and litoral transport at la Victoria Beach, Cádiz, Spain. *Ciencias Marinas*, 35 (3), 259-269.

- Ayala-Carcedo, F.J. & Olcina, J. (2002). *Riesgos Naturales*, Ed. Ariel Ciencia, Barcelona, 1512 pp.
- Benavente, J. (2000). *Morfodinámica litoral de la bahía externa de Cádiz*. Tesis Doctoral. Universidad de Cádiz, Cádiz, 534 pp.
- Benavente, J., Del Río, L., Anfuso, G., Gracia, F.J. & Reyes, J.L. (2002). Utility of morphodynamic characterisation in the prediction of beach damage by storms. *Journal of Coastal Research*, 36, 56-64.
- Benavente, J. & Gracia, F.J. (2003). Modelización del transporte sedimentario longitudinal en playas de poca energía. Playa de Vistahermosa (Bahía de Cádiz). *Geogaceta*, 33, 7-10.
- Benavente, J., Del Río, L., Gracia, F.J. & Martínez del Pozo, J.A. (2006). Coastal flooding hazard related to storm and coastal evolution in Valdelagrana spit (Cádiz Bay Natural Park, SW Spain). *Continental Shelf Research*, 26, 1061-1076.
- Cooper, J.A.G., Jackson, D.W.T., Navas, F., McKenna, J. & Malvarez, G. (2004). Identifying storm impacts on an embayed, high-energy coastline: examples from western Ireland. *Marine Geology*, 210, 261-280.
- Del Río, L., Plomaritis, T.A., Benavente, J., Valladares, M. & Ribera, P. (2012). Establishing storm thresholds for the Spanish Gulf of Cádiz coast. *Geomorphology*, 143-144, 13-23.
- Domínguez-Bella, S. (2008). Geología en el entorno de la ciudad de Cádiz. *Revista Atlántica-Mediterránea de Prehistoria y Arqueología Social*, 10, 117-130.
- Gálvez, M.J. (2005). Climatología. En: *Atlas hidrogeológico de la provincia de Cádiz* (J.A. López, M. Martín, R. Morales, R. Durán, J.J. Navarro, D. Torreira (coords.)). Instituto Geológico y Minero de España y Diputación de Cádiz, Madrid, 53-58.
- García, A. (2005). Geología de la provincia de Cádiz. En: *Atlas hidrogeológico de la provincia de Cádiz* (J.A. López, M. Martín, R. Morales, R. Durán, J.J. Navarro, R. Torreira, coords.)). Instituto Geológico y Minero de España y Diputación de Cádiz, Madrid, 63-72.
- Guedes-Soares, C., Weisse, R., Carretero, J.C., Álvarez, E., (2002). A 40 years hindcast of wind, sea level and waves in European waters. Proc. 21st Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE 2002), ASME, New York, Paper MAE2002-28604.
- Gutiérrez-Mas, J.M., Martín, A., Domínguez, S. & Moral, J.P. (1991). *Introducción a la geología de la provincia de Cádiz*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cádiz, 315 pp.

- Holman R.A., (1986). Extreme value statistics for wave run-up on a natural beach. *Coastal Engineering*, 9, 527-544.
- Instituto Hidrográfico de la Marina (1973). Carta náutica nº 443B – *Aproaches del Puerto de Cádiz*. E. 1:25.000. Instituto Hidrográfico de la Marina, Cádiz.
- Komar, P.D. (1998). *Beach Processes and sedimentation* 2nd Ed. Prentice-Hall Inc., Upper Saddle River, New Jersey, 544 pp.
- López-Doriga, U., Benavente, J., Plomaritis, T.A. (2010). Natural recovery processes in an urban beach, La Victoria (Cádiz, SW Spain). In: *Y : HMIMSA, M. Sedrati, B. El Moumi and D. Menier (eds.) Proceedings 1er Colloque International « Littoraux Méditerranéens : états passés, actuels et futurs »*. p 9.
- McInnes, K.L., Walsh, J.E., Hubbert, G.D. & Beer, T. (2003). Impact of sea-level rise and storm surges on a coastal community. *Natural Hazards*, 30, 187-207.
- Muñoz-Pérez, J.J. (1996). *Análisis de la morfología y variabilidad de playas apoyadas en lajas rocosas*. Tesis Doctoral. Universidad de Cádiz, Cádiz, 158 pp.
- Muñoz-Pérez, J.J., López de San Román Blanco, B., Gutiérrez-Más, J.M., Moreno, L. & Cuenca, G.J. (2001). Cost of beach maintenance in the Gulf of Cádiz (SW Spain). *Coastal Engineering*, 42, 143-153.
- Muñoz-Pérez, J.J. & Medina, R. (2010). Comparison of long-, medium- and short term variations of beach profiles with and without submerged geological control. *Coastal Engineering*, 57, 241-251.
- Muñoz-Pérez, J.J., Román-Sierra, J., Navarro-Pons, M., Neves, M.G. & del Campo, J.M. (en prensa). Comments on “Confirmation of beach accretion by grain-size trend analysis: Camposoto beach, Cádiz, SW Spain” by E. Poizot et al. (2013) *Geo-Marine Letters* 33(4). *Geo-Marine Letters*. DOI 10.1007/s00367-013-0344-0.
- Puertos del Estado (2010). Extremos máximos del oleaje para la boya de Cádiz. *Banco de datos oceanográficos de Puertos del Estado*. Ministerio de Fomento, 8 pp.
- Rangel-Buitrago, N. & Anfuso, G. (2011). Morphological changes at the Levante Beach (Cádiz, SW Spain) associated with storm events during the 2009-2010 winter season. *Journal of Coastal Research*, Special Issue 64, 1886-1890.
- Reyes, J.L., Martins, J.T., Benavente, J., Ferreira, O., Gracia, F.J., Dias, J.A., López-Aguayo, F. (1999). Gulf of Cadiz beaches: A comparative response to storm events. *Boletín Español de Oceanografía*. 15 (4), 221-228.
- Rodríguez-Ramírez, A., Ruiz, F., Caceres, L. M., Rodríguez-Vidal, J., Pino, R., Muñoz, J. M. (2003). Analysis of the recent storm record in the southwestern Spanish coast: implications for littoral management. *Science of the Total Environment*, 303, 189-201.
- Sánchez, J.L. (1988). *Estudio climatológico de la Bahía de Cádiz*. Instituto hidrográfico de la Marina, Ministerio de Defensa, Cádiz, 150 pp.
- Tejedor, L. & Bruno, M. (1996). Nivel del mar en la Bahía de Cádiz. En: *Estudios para la ordenación, planificación, y gestión integradas de las zonas húmedas de la Bahía de Cádiz* (J.M. Barragán, coord.). Oikos-tau, Barcelona, 183-214.