

Análisis comparativo de la exposición a la subida del nivel medio del mar de la playa y marismas de Valdelagrana (Cádiz)

Comparative analysis of the exposure to sea level rise of the beach and marshes of Valdelagrana (Cádiz)

P. Fraile-Jurado¹, J. Álvarez-Francoso¹, N. Sánchez-Carnero^{1,2} y J. Ojeda-Zújar¹

1 Dpto. Geografía Física y A.G.R., Universidad de Sevilla. C/ María de Padilla s/n 41004. pfraile@us.es

2 Kartenn Tecnologías para la gestión ambiental y territorial. www.kartenn.es; noela@kartenn.es

Resumen: Existen muchos modelos que explican el cambio climático. Cada uno de ellos incluye algunos posibles escenarios de subida del nivel del mar. Sin embargo, la mayoría de los trabajos publicados sobre esta cuestión solo considera un único modelo y escenario e, incluso más, un único umbral de probabilidad (generalmente de $p=0,5$) en sus análisis. Esto implicará dos efectos: i) la obtención de resultados limitados que no muestren todo el espectro de probabilidades y ii) los resultados mostrarán una falsa impresión de certeza, clasificando las áreas únicamente como inundables y no inundables. Este trabajo presenta una metodología que utiliza tres modelos diferentes de probabilidad para calcular la probabilidad de inundación a cada altitud específica, para un escenario escogido. Los resultados obtenidos se han especializado sobre un MDE obteniendo una cartografía en la que cada celdilla tiene una probabilidad de inundación asociada.

Palabras clave: subida del nivel del mar, exposición, modelo de probabilidad, MDE.

Abstract: *There are several models that explain climate change. Each of them includes some possible scenarios of sea level rise. However most of the published works that deal with the assessment of the hazard due to sea level rise, only consider one model and scenario. Moreover these approaches only include a probability threshold (generally $p= 0.5$) in their analysis. This means that the result will encompass two effects: i) to obtain limited results that do not show all probability spectrum, and ii) to show a false impression of certainty, classifying areas as both flooded and unflooded. This work presents a methodology that uses three different probability models of sea level rise to calculate the probability of flooding at a specific altitude. The obtained values were spatialized over a DEM obtaining a cartography where each cell has a flood probability associated.*

Key words: *sea level rise, exposure, probability model, DEM.*

INTRODUCCIÓN

La subida del nivel del mar es desde hace décadas la consecuencia del cambio climático que menos discusiones ha generado (IPCC, 2007), centrándose el debate en la cuantificación de su rango de subida.

Dicha cuantificación se ha realizado a partir de diferentes escenarios (asunciones sobre las emisiones de la sociedad del futuro) y modelos (relaciones matemáticas entre variables). Existen trabajos precedentes sobre la zona de estudio (Calle y Del Río, 2011), que conllevan una cartografía de las áreas inundadas.

Pese a que todos los modelos manejan necesariamente una incertidumbre, que queda

definida por un modelo de probabilidad, es muy frecuente encontrar en la literatura especializada la consideración de un único escenario, y de un único umbral de probabilidad. Este umbral suele ser de $p=0,5$, ignorando el resto del espectro de probabilidades y generando una falsa sensación de certeza acerca de la ocurrencia del fenómeno analizado. De este modo, son frecuentes los análisis cartográficos que distinguen entre zonas inundables y no inundables en el futuro, sin considerar la existencia de áreas con significativos valores de probabilidad (por ejemplo, con $0,5 > p > 0,3$), cuyo riesgo no aparece identificado en estos análisis y son clasificadas como “no inundables”.

En este trabajo, se comparan dos escenarios del IPCC y un escenario de síntesis de las posturas críticas con las previsiones del IPCC. Los dos escenarios del

IPCC empleados son el A1F1, que es el que prevé una mayor subida del nivel medio del mar, y el B1, el más moderado. El escenario de síntesis de las críticas es el elaborado por Hunter (2012) a partir de los trabajos de Rahmstorf (2007) y Pfeffer (2008), entre otros, con los que se ha evidenciado una notable diferencia entre las expectativas del IPCC para el período 1990-presente y la realidad observada.

El objetivo de este trabajo es comparar la distribución espacial de la probabilidad de inundación en el supuesto que produzca una pleamar de coeficiente 1,17 utilizando diferentes modelos y escenarios de subida del nivel medio del mar para todo el complejo de playas-barrera y marismas mareales de Valdelagrana (Cádiz). Este artículo enfatiza la metodología para integrar y cartografiar la probabilidad resultante de los modelos empleados en cada celdilla a partir de su altura proporcionada por un MDE.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se localiza en 36°30' N y 6°O, dentro de la costa atlántica de la provincia de Cádiz (España). Se ha elegido este área por la diversidad paisajística y ambiental que presenta, al identificarse en ella sectores arenosos litorales, marismas y núcleos urbanos. El rango mareal local es de 3,4 m en el frente costero (Puertos del Estado, 2011; Tejedor y Bruno, 1996), y la posición del nivel medio del mar local (NMML) está 13 cm por encima del NMMA - nivel medio del mar en Alicante- (Fraile et al., en prensa).

La mayor parte del frente costero está dominada por la playa de Valdelagrana, separada por un cordón dunar de la margen derecha del estuario del río San Pedro (Fig. 1).

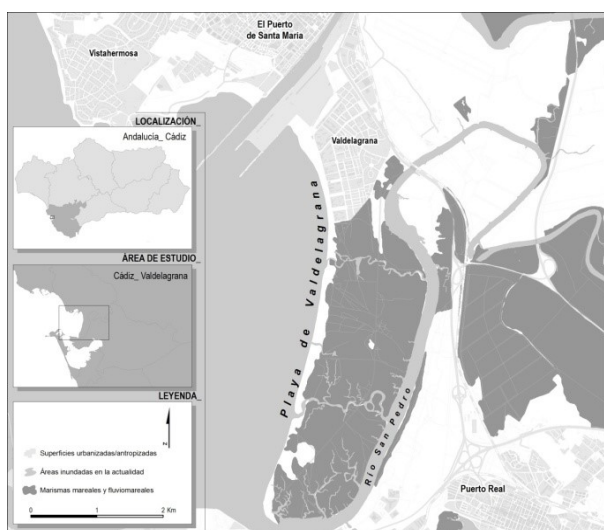


FIGURA 1. Área de estudio.

DATOS

Para la elaboración de este trabajo se han empleado un modelo digital de elevaciones (MDE) generado a partir de los datos obtenidos en una campaña realizada con un sensor LIDAR, en diciembre de 2007. Este MDE cuenta con una resolución espacial de 1 metro y una precisión vertical estimada en 15 cm para este tipo de MDE (Thieler, 2009; Fraile y Ojeda., 2012).

MÉTODOS

El análisis planteado presenta tres fases:

Cálculo de la subida del nivel medio del mar prevista para un horizonte de 100 años para tres modelos y escenarios diferentes

A partir de estos valores (Tabla I), se ha calculado la subida media esperada para el mareógrafo de Cádiz, considerando la tasa local de cambio del nivel medio del mar. Para ello es preciso conocer la diferencia entre la tasa local registrada en el período 1961-2011 (4,0 mm/año, calculado mediante regresión lineal en Fraile (2011) y la tasa global observada para el mismo período (1,8 mm/año, IPCC 2007). De este modo, se estima la diferencia local en 2,2 mm/año.

MODELO	ESCENARIO	MODELO	MEDIA	DESV. TÍPICA
IPCC (2007)	A1F1	Normal	0,425	0,165
IPCC (2007)	B1	Normal	0,28	0,1
Hunter (2012)	-	Coseno creciente	1	1

Tabla I. Tipo de modelo de modelo, subida media del nivel del mar y desviación típica utilizados en los escenarios empleados en el trabajo.

Tomando como referencia el año 1990 (fecha empleada por el IPCC para la proyección de sus modelos) y calculando la posición del nivel medio del mar para esa fecha de acuerdo a un método de regresión lineal de la serie temporal del mareógrafo (Fraile et al. 2013), se obtuvo un valor de 6,8 cm por encima del Nivel Medio del Mar en Alicante (NMMA). Se estimó que, entre 1990 y 2100, el factor local de la subida del nivel medio del mar (por causas tectónicas, hidrológicas u otras) supondrá una subida de 0,242 m en el año 2100. Este valor se obtiene a partir de la asunción de que los factores locales permanecerán inalterables durante el período 1990-2100 (Titus y Narayan, 1998) y es el resultado de multiplicar la tasa referente a los factores locales de 2,2 mm/año por los 110 años entre 1990 y 2100.

Integrando este valor con las expectativas de cambio global expuestas en la tabla 1, y con la altura de una marea de coeficiente 1,17 (la del 19 de marzo de 2011), se obtuvieron las expectativas media, máxima y mínima de subida local del nivel medio del mar, entendiendo los

valores máximos y mínimos como la media más/menos 3 desviaciones típicas para los modelos normales. Para el modelo de Hunter no fue necesario este cálculo, puesto que al tratarse de un modelo no asintótico, los límites máximos y mínimos quedan definidos por la forma de la curva del modelo.

MODELO	ESCENARIO	SUBIDA MEDIA	MINIMO	MÁXIMO
IPCC	A1F1	2,394	1,899	2,889
IPCC	B1	2,249	1,949	2,549
Hunter		2,969	-	-

Tabla II. Subida local media, máximo y mínimo sobre el NMMA.

Cálculo de las ecuaciones de exposición

El cálculo de la exposición (probabilidad de inundación de cada elemento físico emergido en la actualidad) exige que para todas las celdillas que queden entre los valores mínimo y máximo de inundación en el año 2100 (Tabla II) y por encima de la cota local de la pleamar (establecida en 1,73 m, al añadirle el NMML - estimado anteriormente en 6,8- a la mitad del rango mareal), se obtenga un valor de probabilidad. Éste será calculado a partir de una ecuación en la que la probabilidad depende de la altura de la celdilla.

De este modo, aislar el término de probabilidad en una ecuación que caracterice la distribución de probabilidades de este evento (inundación permanente por la pleamar) permite la generación de un único mapa que resume todas las situaciones posibles contempladas por cada modelo.

Esta ecuación se calcula a partir del modelo de distribución de probabilidades. En el caso de los modelos del IPCC A1F1 y B1 de distribución normal, resultan medias 2,394 y 2,249 y desviaciones típicas 0,165 y 0,1 respectivamente (eq. 1). El modelo de Hunter consiste en un modelo de coseno creciente, de media 2,969 y parámetro de desviación 1 (eq. 2).

$$F(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{x - \mu}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right] \quad (\text{eq.1})$$

$$F(x; \mu, s) = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{x - \mu}{s} + \frac{1}{\pi} \sin \left(\frac{x - \mu}{s} \pi \right) \right] \quad (\text{eq.2})$$

En donde:

x es la altitud de subida del nivel del mar.

μ es el valor medio de subida del nivel del mar para cada modelo

ρ es el valor de la desviación típica en los modelos del IPCC.

s es el parámetro de desviación en el modelo de Hunter.

Corrección del MDE para garantizar su continuidad hidrológica

Dado que la configuración topográfica del territorio puede presentar zonas endorreicas, especialmente a la escala de detalle abordada en este trabajo, un análisis en el que no se corrijan estas configuraciones podría identificar como inundables algunos espacios confinados por celdillas de altitud superior a la cota de inundación asociada a un determinado nivel de inundación. Por esta razón, las zonas endorreicas del MDE fueron modificadas y su altitud ajustada a la menor de las altitudes circundantes (aquella que debe superar la cota de inundación para que se produzca).

Implementación de las ecuaciones de exposición para los 3 modelos

Se calculó el valor de probabilidad para cada celdilla a partir de las ecuaciones 1 y 2, obteniéndose mapas de probabilidad de inundación por celdilla. Para contextualizar el resultado obtenido, se añadió a cada mapa el área ya inundada por la pleamar citada, asumiendo la precisión del MDT lidar. El proceso de inundación se ha simulado a partir de un modelo tipo *Bathtub* en todos los casos.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos aparecen sintetizados en la figura 2 para el escenario A1F1. El sumatorio del área inundable en los dos modelos del IPCC utilizados A1F1 (934 ha.) y B1 (826 ha.) considerando toda la masa de probabilidad es ligeramente superior al área inundada en la actualidad por una pleamar de las mismas características sobre el MDE (entendido como el año 1990 por las características del análisis), que es de 785 ha. Sin embargo, el escenario de síntesis de Hunter muestra valores muy superiores, de 1325 ha en total, como consecuencia de la consideración de una subida media superior a las del IPCC, y sobre todo de un parámetro de dispersión mucho mayor, de 1 metro, que amplía el área asumida como inundable.

CONCLUSIONES

La elección del modelo de inundación elegido para llevar a cabo un estudio de riesgos influye de forma significativa en la cartografía de probabilidades de inundación que se obtiene en este tipo de análisis.

Aunque, en áreas como la zona de estudio, este efecto no es tan evidente, dado que se trata de una zona topográficamente muy baja que se inundaría con cualquier situación de subida de nivel medio del mar. Es

necesario tenerlo en cuenta para estudios de riesgos, especialmente en áreas topográficamente más irregulares, donde más diferencias entre modelos se observará.

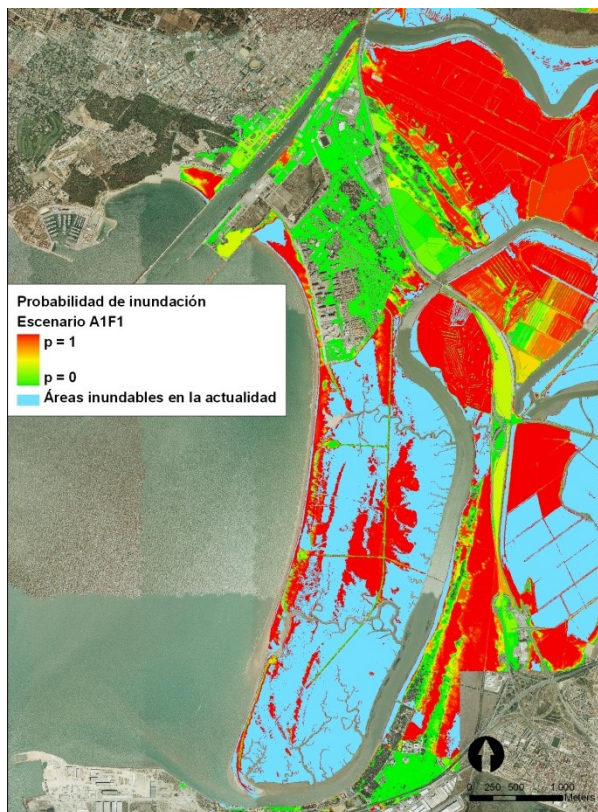


FIGURA 3. Resultados obtenidos con el modelo A1F1.

Este tipo de aproximaciones permite no solo disponer de una cartografía de zonas inundables, sino obtener una visión general de las probabilidades de inundación esperadas en un solo mapa.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación forma parte del desarrollo del proyecto de I+D: "Espacialización y difusión Web de variables demográficas, turísticas y ambientales para la evaluación de la vulnerabilidad asociada a la erosión de playas en la costa andaluza (CSO2010-15807)" financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y por Fondos FEDER y del Proyecto de Excelencia "Espacialización y Difusión Web de Datos de Urbanización, y Fitodiversidad para el Análisis de Vulnerabilidad ante los Procesos de Inundación Asociados a la Subida del Nivel del Mar en la Costa Andaluza".

REFERENCIAS

- Calle, J.R. y Del Río, L. (2011): *Impacto futuro del ascenso del nivel del mar en la Bahía de Cádiz: resultados preliminares*. En I. Montoya, I. Rodríguez y M.J. Sánchez (eds.): *Avances en Geomorfología Litoral. Actas de las VI Jornadas de Geomorfología Litoral*, Tarragona, Comunicaciones: 15 -162.
- Fraile Jurado P (2011): *Análisis de las problemáticas asociadas a la espacialización, evolución y representación de niveles del mar presentes y futuros en Andalucía*. Universidad de Sevilla.
- Fraile-Jurado, P., Sánchez-Carnero, N. y Ojeda Zújar, J. Sensibilidad del cálculo de los niveles medios del mar al método y periodo de las series temporales de los mareógrafos en los procesos de inundación: Valdelagrana (Cádiz). *Boletín de la Asociación de Geógrafos de España* (en prensa).
- Fraile-Jurado P. y Ojeda-Zújar J. (2012): *The importance of the vertical accuracy of digital elevation models in gauging inundation by sea level rise along the Valdelagrana beach and marshes (Bay of Cádiz, SW Spain)* en *Geomarine Letters*, DOI 10.1007/s00367-012-0317-8.
- Hunter, J. (2012): *A simple technique for objectively estimating an allowance for uncertain sea-level rise*. *Climatic Change*, 113, 2: 239-252.
- IPCC (2007): *Climate change. The scientific basis. Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Pfeffer W.T., Harper, J.T y O'Neel S. (2008): *Kinematic Constraints on Glacier Contributions to 21st-Century Sea-Level Rise*. *Science*, 321, 5894: 1340-1343.
- Rahmstorf (2007): *A Semi-Empirical Approach to Projecting Future Sea-Level Rise*. *Science*, 315, 5810: 368-371.