

Cartografía de la probabilidad de inundación del litoral andaluz a finales del siglo XXI ante la subida del nivel del mar

PABLO FRAILE JURADO¹ ✉ | JOSÉ ÁLVAREZ-FRANCOSO² | JOSÉ OJEDA-ZÚJAR³

Recibido: 05/04/2017 | Aceptado: 12/02/2018

Resumen

En este trabajo se evalúa la probabilidad de inundación por subida del nivel medio del mar para el conjunto del litoral andaluz empleando un modelo digital de elevaciones con una resolución espacial de 5 metros y los resultados del análisis estadístico de las series temporales de los mareógrafos localizados en esta costa. El método empleado para espacializar la probabilidad de subida del nivel medio del mar en cada celdilla del área de estudio consiste en relacionar los diferentes modelos de probabilidad acumulada de subida del nivel del mar, caracterizados por unos parámetros locales de centralidad y desviación, y la altitud de cada celdilla, obteniéndose un valor p indicador de la probabilidad de que esta sea rebasada por la pleamar en el futuro. Los resultados obtenidos muestran que es probable que amplias zonas de la costa andaluza actualmente no inundables se vean inundadas a finales del siglo XXI. Las diferencias identificadas en los resultados obtenidos entre los cuatro escenarios empleados evidencian que el análisis realizado es altamente dependiente del escenario elegido.

Palabras clave: subida del nivel del mar; probabilidad; exposición; cambio climático; cartografía.

Abstract

Cartography of the probability of inundation of the andalusian coast by the end of the 21st century

The aim of this work is to evaluate the probability of inundation caused by sea level rise for the entire Andalusian coast using a digital elevation model with a spatial resolution of 5 meters and the registers of the local tide gauges located on this coast. The applied methodology involves spatializing the mean sea level rise probability on each cell of the study area, relating the different models of cumulative probability of sea level rise and the altitude of each cell, obtaining a p value that indicates the probability of being exceeded by the future high water. The results show that it is likely that large areas of the Andalusian coast will be flooded by the end of the 21st century. The identified differences in the results for the four scenarios show that the analysis performed is highly dependent on the chosen scenario.

Key words: sea level rise; probability; hazard; climate change; cartography.

1. Universidad de Sevilla. Departamento de Geografía Física y A.G.R. pfraile@us.es

2. Universidad de Sevilla. Departamento de Geografía Física y A.G.R.

3. Universidad de Sevilla. Departamento de Geografía Física y A.G.R.

Résumé

Cartographie de la probabilité d'inondation à l'élevation du nivel de la mer à la fin du xxi^{ème} siècle

L'objectif de ce travail est l'évaluation de la probabilité d'inondation due à la hausse du niveau de la mer en Andalousie, au moyen d'un modèle numérique de terrain de 5 mètres de résolution spatiale et des données issues de marégraphes. La méthodologie utilisée pour la spatialisation de la probabilité dans chaque pixel de l'aire d'étude consiste à mettre en relation les différents modèles de probabilité cumulée de hausse du niveau de la mer (caractérisés par un ensemble de paramètres locaux de centralité et de déviation), et l'altitude dans chaque pixel. Les résultats obtenus montrent qu'une extension importante non-inondable actuellement pourrait être inondable à la fin du XXI^{ème} siècle. Les différences trouvées dans les résultats obtenus pour les quatre scénarios utilisés mettent en évidence que l'analyse est fortement dépendant du scénario choisi.

Mots-clés: hausse de niveau de la mer; probabilité; danger; changement climatique; cartographie.

1. Introducción

De todas las consecuencias del cambio climático, la subida del nivel del mar es probablemente aquella sobre la que existe un mayor grado de consenso acerca de su ocurrencia. Desde principio del siglo XX el nivel del mar ha subido de manera global unos 20 cm, lo cual supone una subida de 1,2 – 1,8 mm / año desde principios del siglo XX hasta el presente (Church y White, 2006; Church *et al.*, 2013).

Pese a que la subida del nivel medio del mar se suele presentar como un fenómeno global, los registros de los mareógrafos evidencian amplias diferencias en las tasas de cambio observadas, tanto por causas hidrológicas (hay zonas del planeta donde el nivel del mar fluctúa de manera diferente de la media, incluso registrándose descensos) como por causas tectónicas (ascensos o descensos de la superficie sobre la que se halla anclado el mareógrafo). El lanzamiento de satélites altimétricos en 1992 permitió la toma de registros de cambio del nivel del mar de forma independiente a los movimientos verticales de la superficie emergida, constatando tanto el fenómeno de subida, como una aceleración de la misma, cuantificada en aproximadamente 3,4 mm/ año desde 1992. Existe un consenso científico casi total en vincular esta subida del nivel del mar con el fenómeno de cambio climático causado esencialmente por las emisiones antrópicas de gases de efecto invernadero (Stocker, 2014; DeConto y Pollar, 2016).

El futuro de este fenómeno es aún muy impreciso y definirlo depende tanto de la calidad de los modelos matemáticos de cambio climático desarrollados, como de los escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero que asumen una serie de supuestos sobre el futuro de nuestras sociedades. En cualquier caso, todos los modelos climáticos y escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero coinciden en que el fenómeno se agravará durante el siglo XXI, si bien las predicciones realizadas oscilan entre modelos conservadores, cuyo principal referente son las realizadas por el IPCC (Church y White, 2006; Gregory, 2013) y modelos críticos con estos, considerablemente más pesimistas (Rahmstorf, 2007; Jevrejeva *et al.*, 2008; Pfeffer, *et al.*, 2008). Las críticas de los autores de estos modelos se centran en la aparente evidencia de la existencia de diferencias entre las predicciones realizadas por los modelos del IPCC y los registros observados. Algunos autores han señalado posibles errores en el modelado del fenómeno de deshielo que se

está produciendo en Groenlandia como posible causa de estas diferencias entre predicciones y registros, no resueltas en el informe del IPCC de 2013. Los pronósticos realizados a partir de la constatación de estas diferencias implican ascensos de entre 1 y 2 metros a finales siglo XXI, independientemente del escenario elegido, frente a la subida de entre 0,4 y 0,7 metros pronosticada por el IPCC en su último informe.

Las implicaciones de la subida del nivel del mar para la sociedad son evidentes, y se suelen ordenar en torno a cuatro grandes efectos, que se verán incrementados o agravados con respecto a la situación actual: a) los procesos de inundación permanente como consecuencia de la subida del nivel del mar, en los que se centra este trabajo (Marfai y King, 2008), b) la intensidad y frecuencia de los temporales costeros (Dasgupta *et al.*, 2011; Tebaldi *et al.*, 2012), c) los procesos erosivos (Leatherman *et al.*, 2000) y d) los fenómenos de intrusiones de agua salina en las aguas dulces superficiales o subterráneas (Alpar, 2009; Rotzoll y Fletcher, 2012).

La mayor parte de los análisis espaciales sobre el incremento de los procesos de inundación asociados a la subida del nivel medio del mar se han centrado en dos metodologías básicas: por una parte, el uso de índices relativos, como el CVI (Gornitz *et al.*, 1994) basados en la valoración local de parámetros relativos a la exposición de la costa a la subida del nivel del mar; por otra, el empleo de modelos digitales de elevaciones (MDE) para comparar las altitudes de la superficie emergida con las expectativas futuras de subida del nivel del mar, identificando las zonas inundables (Gesch, 2009) o variables temporales derivadas directamente de estas (Fraile-Jurado y Leatherman, 2016). La primera aproximación únicamente permite distinguir entre las zonas más expuestas de cada sector costero objeto de análisis, mientras que la segunda es un análisis absoluto que permite identificar qué celdillas son vulnerables a la subida del nivel del mar y qué celdillas no lo son, a partir de un modelo de subida del nivel medio del mar que se deduce de un modelo matemático de cambio climático, y de un escenario de emisiones de gases de efecto invernadero en el futuro. Los resultados de este tipo de trabajos suelen presentarse frecuentemente de manera dicotómica, es decir, identificando únicamente qué celdillas se verán inundadas bajo unas condiciones determinadas, y qué celdillas permanecerán por encima del nivel del mar en el futuro ante dichas condiciones (Titus y Richman, 2001).

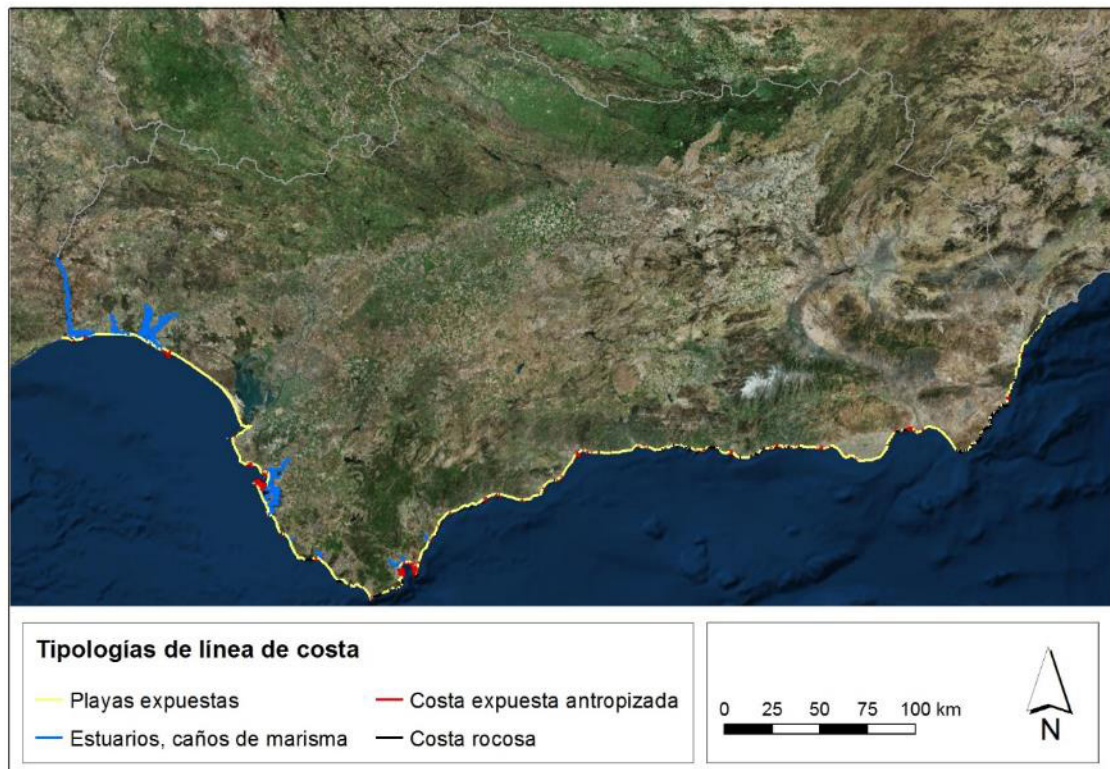
Pese a que todos los modelos de subida del nivel del mar manejan necesariamente una incertidumbre, implícita en el uso de cualquier modelo de probabilidad, es muy frecuente encontrar en la literatura especializada la consideración de un único escenario, y de un único umbral de probabilidad. Este umbral 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» (Titus *et al.*, 2009; Gesch, 2009).

El objetivo de este trabajo consiste en espacializar la probabilidad de la subida del nivel medio del mar en las costas andaluzas, mediante el empleo de los tres escenarios de inundación del IPCC (Gregory, 2013) y un escenario extremo como el de Jevrejeva *et al.* (2014). La principal innovación de este trabajo consiste en realizar un análisis probabilístico de la subida del nivel del mar sobre un área de la magnitud espacial de la costa andaluza. El método empleado es el resultado de la síntesis de dos procedimientos presentados en trabajos anteriores por los autores de este artículo: por una parte, el método para la interpolación de los análisis de inundación en las amplias

áreas existentes entre mareógrafo y mareógrafo (Fraile y Ojeda, 2012), por otra, el cálculo de la probabilidad de inundación por subida del nivel medio del mar, aplicada hasta ahora sobre áreas de dimensiones reducidas (Fraile-Jurado *et al.*, 2017).

El área de estudio elegida para este trabajo es la totalidad del frente costero del litoral andaluz, que se extiende desde los municipios de Ayamonte (Huelva) a Pulpí (Almería), a lo largo de unos 6° de longitud y más de 1° de latitud, sumando un total de unos 700 km (mapa 1).

Mapa 1. Área de estudio



La costa atlántica andaluza se desarrolla sobre los materiales de relleno de la prefosa alpina de la Depresión del Guadalquivir en las provincias de Huelva y Sevilla, y los del Subbético y los flysch del Campo de Gibraltar en la costa de Cádiz. Una amplia plataforma litoral de más de 60 km refracta parte del oleaje incidente procedente del SW. La costa de Huelva se caracteriza por amplias morfologías arenosas costeras, marcadas por una fuerte deriva litoral de componente oeste y que tiene al río Guadiana como principal fuente de sedimentos, con un fuerte desarrollo longitudinal (flecha litorales activas o relictas) de diferentes tipos de morfologías arenosas, que a menudo cierran amplios espacios de marismas mareales (desembocaduras de los ríos Guadiana, Carreras, Piedras, Tinto y Odiel) o pluvio-fluviales (Doñana).

La costa de Cádiz presenta una fuerte compartimentación en bloques, por la presencia de fallas noroeste-sudeste, con importante promontorios como Tarifa o Trafalgar. Este hecho, junto con la ausencia de grandes ríos que aporten amplios excedentes sedimentarios, condiciona la existencia de unidades de menor tamaño que en la costa de Huelva. Por lo tanto, este sector se caracteriza por la existencia de amplias bahías, y por la sucesión de playas con acantilados. En el sector costero del Estrecho de Gibraltar destaca la presencia de una costa rocosa formada por flysch que solo permite la presencia de escasas y pequeñas playas (Fraile Jurado, 2011).

La costa mediterránea andaluza está marcada por la presencia de las Béticas a lo largo de todo el litoral. Por este motivo, los ríos que aportan sedimentos a las costas mediterráneas presentan cuencas de pequeña entidad y fuertes pendientes. Este hecho, sumado a unas precipitaciones escasas, irregulares y frecuentemente torrenciales provoca un desarrollo irregular de las formaciones arenosas a lo largo de la costa. Adicionalmente, la plataforma continental presenta un escaso desarrollo, generalmente inferior a 3 km, lo que permite un oleaje de alta energía procedente de diferentes sectores. Las características locales de la marea en este sector, de rango micromareal, condicionan el desarrollo de unidades mareales específicas como lagoons y albuferas. Los deltas forman las mayores planicies costeras de todo este sector, si bien las formas acantiladas son las predominantes.

2. Métodos

Para el desarrollo del presente trabajo se han empleado datos procedentes de dos tipos de fuentes:

- Las expectativas de cambio del nivel del mar en los mareógrafos de la costa andaluza a finales del siglo XXI, calculadas por Fraile y Fernández (2016) a partir de la integración de los registros de las series temporales de los mareógrafos con los escenarios climáticos globales elaborados por el IPCC (Gregory, 2013) y por Jevrejeva *et al.* (2012) (denominado «modelo de Jevrejeva» para los propósitos de este artículo, en lo sucesivo)
- Modelo Digital de Elevaciones del área de estudio, elaborado para la totalidad del territorio de España por el Instituto Geográfico Nacional, con una resolución espacial de 5 metros (Instituto Geográfico Nacional, 2013). Las marismas de Doñana fueron eliminadas del área de estudio de este trabajo debido a que las características del MDE no se adecuan correctamente al modelado hidrológico de este territorio: al tratarse de una zona extraordinariamente llana, es muy dependiente de la existencia de barreras que delimiten la circulación de las aguas, tanto en los estuarios como en las zonas de cultivos de arroz. Este tipo de estructuras se encuentran presentes en amplios territorios de Doñana, y resultan prácticamente invisibles para celdillas de 5 metros de resolución espacial.

A partir estos datos, el proceso metodológico desarrollado constó de las siguientes fases:

FASE 1. Identificación de los niveles de inundación por pleamar para cada mareógrafo a finales del siglo XXI. De acuerdo con la bibliografía, el cálculo de inundaciones por la marea ante la subida del nivel del mar responde a la suma de dos variables: altura de la marea local sobre el cero topográfico, y subida del nivel del mar local (Fraile Jurado *et al.*, 2014; Pugh, 1996). No obstante, y puesto que en la costa andaluza existen diferencias notables entre el cero topográfico local y el nivel medio del mar local, el cálculo de una cota de inundación futura se obtiene a partir de la ecuación 1:

$$N_i = NMML + SLRL + PL \quad (1)$$

Siendo:

- N_i , el nivel de inundación local a finales del siglo XXI para una probabilidad dada, en este caso $p \geq 0,5$.
- NMML, la posición del nivel medio del mar con respecto al cero topográfico de Alicante. Este valor permite una adecuada representación espacial de los niveles del mar sobre el MDE,

puesto que relaciona el nivel medio del mar local (variable espacialmente) con respecto al datum altimétrico (o cero topográfico de Alicante) a partir del cual se representan las altitudes en mapas topográficos y por tanto en los MDE. Los valores empleados se obtuvieron del trabajo de Fraile Jurado (2011).

- SLR, la subida del nivel medio del mar esperada a finales del siglo XXI para una probabilidad $p \geq 0,5$. Esta variable estima la subida del nivel del mar para cada mareógrafo a partir de la relación existente entre los cambios globales descritos por Church y White (2012) y los registros locales observados. Los datos empleados para el presente artículo están recogidos en el trabajo de Fraile y Fernández (2016).
- PL, la pleamar local para cada uno de los mareógrafos de la costa andaluza analizados. Los registros corresponden al 19 de marzo de 2011, fecha en la que se produjo una marea cercana a la más alta posible de acuerdo a la posición relativa de los cuerpos celestes (marea astronómica o *king tide*). Los valores empleados están recogidos en los repositorios de datos de Puertos del Estado y del Instituto Español de Oceanografía.

Un ejemplo de los valores identificados en la bibliografía aparece en el Cuadro 1, en el que se recogen las variables sobre nivel medio del mar local (NMML), tasa de subida del nivel medio del mar (SLR) y la altura de la pleamar local sobre el nivel medio del mar (PL). En el caso de los mareógrafos en los que el valor de cada variable no pudo ser identificado por no existir datos suficientes o porque en la bibliografía consultada se señalase la baja fiabilidad del mismo, se empleó la técnica de interpolación espacial descrita en la fase 3.

Cuadro 1. Valores de nivel medio del mar local (NMML), tasa de cambio del nivel medio del mar (SLR), y altura de la pleamar sobre el nivel medio del mar (PL).

Mareógrafo	NMML	SLR	PL
Huelva	0,41 m	5,63 mm/ año	1,71 m
Bonanza	0,29 m	5,69 mm/ año	1,69 m
Cádiz	0,17 m	3,95 mm/ año	1,72 m
Tarifa	0,06 m	-	1 m
Algeciras	0,04 m	0,40 mm/ año	0,9 m
Málaga	0,01 m	2,34 mm/ año	0,6 m
Motril	0,06 m	-	0,4 m
Almería	-	0,29 mm/ año	0,4 m

FASE 2. Interpolación espacial de los niveles de inundación esperados a finales del siglo XXI a lo largo de la costa andaluza. Dado que, por una parte, la red de mareógrafos situados en la costa andaluza es relativamente pobre en cuanto a su densidad, especialmente en su vertiente mediterránea, y por otra, la variabilidad espacial de las tres variables consideradas en la fase anterior es significativa en el área de estudio, fue necesario interpolar las tres variables analizadas a lo largo de la costa, obteniendo datos continuos en todo frente costero. La técnica de interpolación de los niveles del mar a lo largo de la costa requiere que las variaciones de dichos niveles entre dos mareógrafos sean perpendiculares a la orientación general del frente costero. El proceso de interpolación necesario para ello está descrito en Fraile y Ojeda (2012). Con este método se obtuvieron cuatro superficies de tendencia para la variable SLR, correspondientes a cada uno de los escenarios climáticos considerados (cuadro 1) con una $p \geq 0,5$, una superficie de tendencia correspondiente a la variable PL, y otra superficie de tendencia correspondiente a la variable NMML.

FASE 3. Modificación del MDE. La tercera fase consiste en modificar el MDE de manera que la cota máxima de inundación, integrada mediante la suma de las variables PL, SLR y NMML, coincida con un nuevo valor «cero», que se correspondería con la cota altimétrica local a lo largo de toda la costa andaluza en una situación de pleamar y subida del nivel del mar con una probabilidad $p = 0,5$. Para ello, se sumaron las tres superficies de tendencia generadas en la fase anterior de acuerdo con la ecuación 1. La superficie resultante se restó al MDE original, obteniéndose una nueva superficie en la que la altitud de cada celdilla es relativa al nivel de inundación futuro para una probabilidad de $p \geq 0,5$.

FASE 4. Cálculo de la probabilidad de inundación por celdilla. Se implementó la ecuación de la curva normal acumulada para cada uno de los cuatro escenarios considerados en cada una de las celdillas del MDE (Fraile-Jurado *et al.*, 2017), a partir de los parámetros de media y desviación típica que se muestran en el cuadro 2. El resultado obtenido representa el valor de la probabilidad de inundación para cada celdilla en una situación de pleamar a finales del siglo XXI. Al tratarse de un modelo asintótico, se limitó el área potencialmente inundable por la pleamar a la media más 3 desviaciones típicas en el caso de las celdillas situadas a más altitud y por lo tanto con menos probabilidad de inundación, y al límite con las zonas inundables en la actualidad en las áreas situadas a menor altitud.

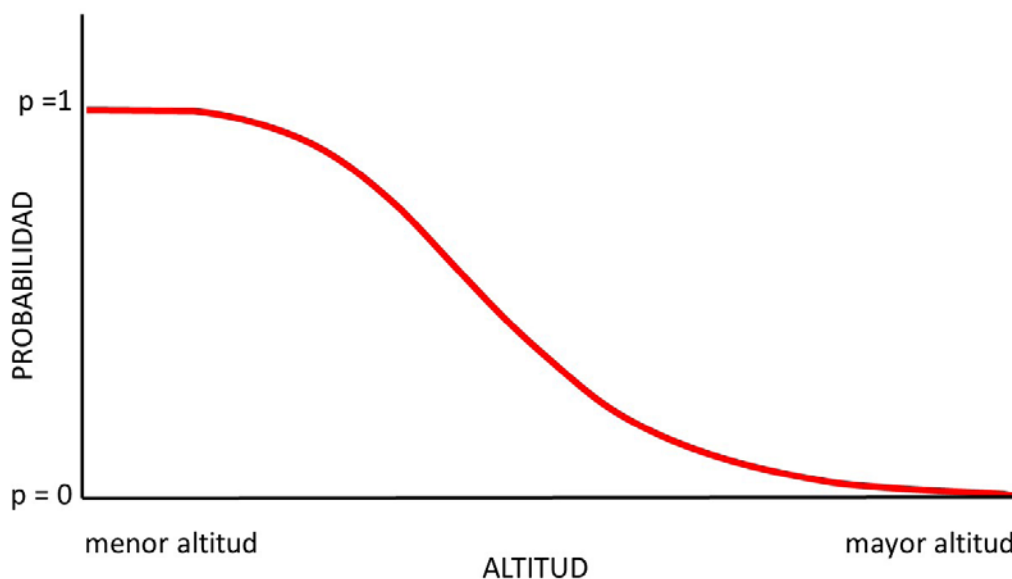
Cuadro 2. Parámetros de centralidad y desviación de los modelos y escenarios de subida del nivel medio del mar empleados.

MODELO	ESCENARIO	MODELO DE PROBABILIDAD	MEDIA	DESVIACIÓN
IPCC (2013)	RCP2.6	Normal	0,40 m	0,091 m
IPCC (2013)	RCP4.5	Normal	0,47 m	0,097 m
IPCC (2013)	RCP8.5	Normal	0,63 m	0,115 m
Jevrejeva <i>et al.</i> (2012)	-	Normal	0,84 m	0,12 m

El gráfico 1 representa el modelo de probabilidad normal acumulada resultante de la integración de las tres variables descritas en la ecuación 1 con respecto a la altitud de la celdilla sobre la que se realiza el cálculo. De acuerdo con este modelo, existe una relación por la cual a cada celdilla le corresponde un valor de probabilidad determinado por la curva de la función que aparece en el ejemplo. Las celdillas situadas a menor altitud presentan probabilidades más altas de inundación, próximas a $p = 1$ en el caso de aquellas situadas muy cerca de la actual línea de costa, mientras que las celdillas situadas a mayor altitud se corresponden con valores bajos o muy bajos de probabilidad de inundación.

Esta relación varía a lo largo de toda la costa y solo tiene sentido con carácter local, debido a las variaciones espaciales del rango mareal, de la altura del nivel medio del mar local o de los registros de las tasas de cambio del nivel del mar observados en los mareógrafos y más recientemente por los satélites altimétricos. Por ello, en la fase anterior fue imprescindible modificar el MDE original obteniendo una superficie en la que el valor 0 de las celdillas resultantes se correspondiese, a lo largo de toda la costa andaluza, con la probabilidad $p_0 = 0,5$.

Gráfico 1. Modelo de la probabilidad normal acumulado en función de la altitud.



3. Resultados

3.1. Descripción de los resultados

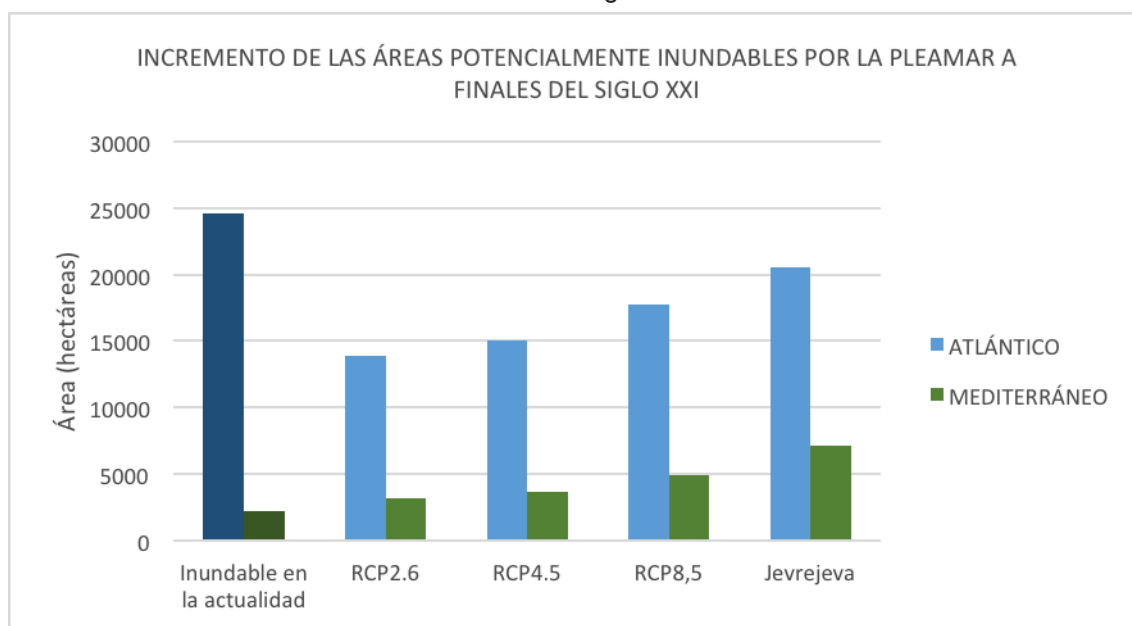
Los mapas completos obtenidos se hallan a disposición pública en la web <https://www.excelencia.gis-and-coast.org/>. Algunas de las localizaciones más relevantes, así como las principales estadísticas derivadas de este trabajo aparecen sintetizadas en los mapas 2 al 11, en los gráficos 3, 4 y 5 y en el cuadro 3. Tal y como se puede observar en los gráficos, existe un amplio abanico de situaciones que se pasan a describir a continuación. En general, se puede observar que existe una alta probabilidad de que la mayoría de las formaciones arenosas litorales existentes en el litoral andaluz se vean inundadas durante la situación de pleamar. En la actualidad, tal y como se puede observar en los mapas 2 a 11, ya se ven inundadas (gama de azules en todos los mapas), si bien los resultados obtenidos indican que se producirá un amplio incremento de la cota de inundación por pleamar, ocupando amplios espacios de cada playa alta. Se identifican numerosos espacios en los que la probabilidad de inundación es muy elevada (superior al 90%) hasta la base de las dunas litorales.

Debido a la configuración topográfica de los espacios litorales andaluces, el área inundable por la pleamar en el futuro es mucho más amplia en la costa atlántica que en la mediterránea en la actualidad (cuadro 3). No obstante, y tal y como se identifica en el gráfico 2, las áreas con alguna probabilidad de inundación en el ámbito mediterráneo en el futuro son incluso mayores que las áreas inundables en la actualidad, independientemente del escenario elegido, lo que implica un incremento relativo de las áreas inundables muy superior al observado en la costa atlántica. Este fenómeno no se produce en la costa atlántica, donde ni siquiera en el escenario más extremo de los considerados (el de Jevrejeva) se llegaría a un incremento neto del área inundable por encima de la situación actual. Adicionalmente, tal y como se puede comprobar en el cuadro 3, los espacios con una alta probabilidad de ser inundados por la pleamar en el futuro ($p < 0,9$) son muy extensos. En el caso de ocurrir el escenario de Jevrejeva en el área mediterránea, se duplicaría el área inundable con respecto a la zona actual solamente considerando $0,9 < p < 1$ es decir, los territorios con una alta probabilidad de inundación según este modelo.

Cuadro 3. Resultados del análisis (en hectáreas).

Probabilidad (%)	Atlántico				Mediterráneo			
	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	JEVREJEVA	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	JEVREJEVA
0-10	4856	5194	6193	4739	1611	1905	2674	2865
10-20	403	434	492	355	97	106	158	165
20-30	302	321	375	255	85	73	108	121
30-40	267	282	324	231	81	65	89	102
40-50	256	268	322	201	171	78	111	90
50-60	263	277	324	210	64	72	82	89
60-70	285	306	348	230	89	197	84	96
70-80	332	372	424	261	72	88	67	83
80-90	460	527	611	364	98	143	59	79
90-100	6463	7084	8373	13659	790	916	1493	3448
Actualidad	24642	24642	24642	24642	2221	2221	2221	2221

Gráfico 2. Incremento de las áreas potencialmente inundables por la pleamar en el litoral andaluz a finales del siglo XXI.



Atendiendo a la distribución de probabilidades generadas en cada escenario y cada ámbito del litoral andaluz (gráficos 3 y 4), se observa que los valores extremos de probabilidad, es decir, aquellos por encima de $p > 0,8$ y $p < 0,2$ en los gráficos 3 y 4, representan la mayor parte del área de estudio, mientras que las áreas con probabilidades intermedias son menos numerosas. Este fenómeno es común en los cuatro escenarios empleados.

Gráfico 3. Distribución de probabilidades por escenario de inundación de nuevas áreas en la costa atlántica andaluza a finales del siglo XXI.

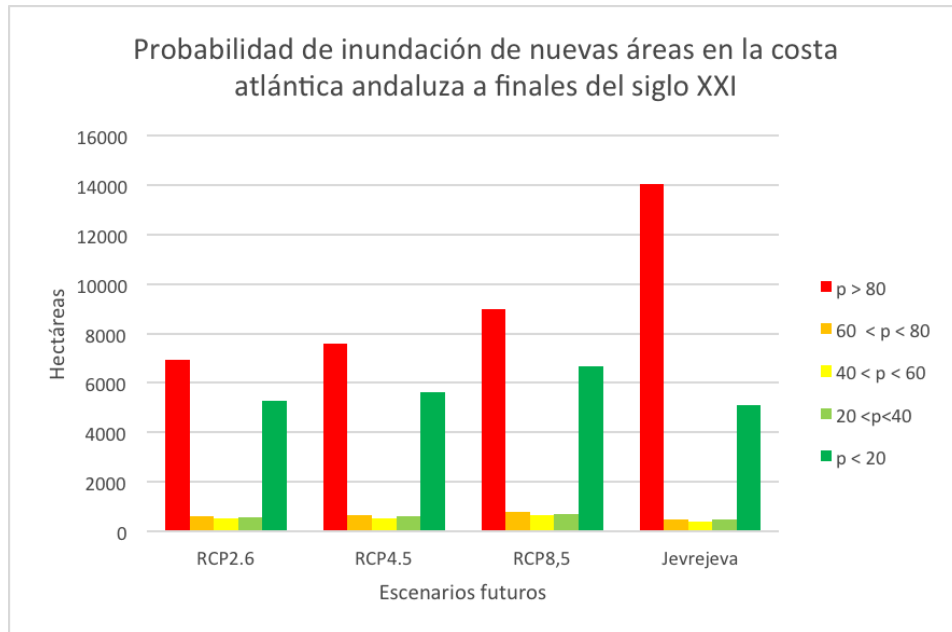
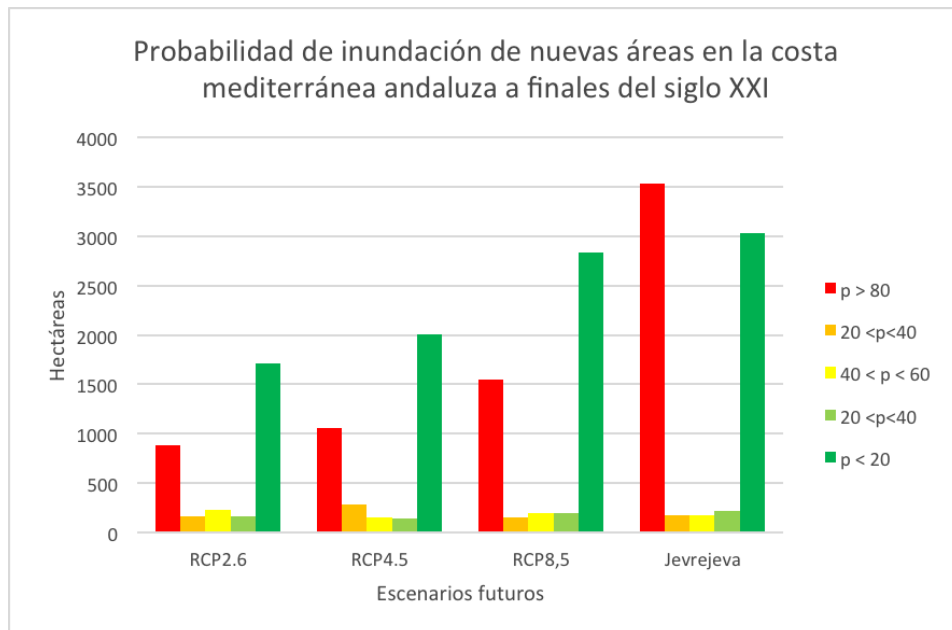


Gráfico 4. Distribución de probabilidades por escenario de inundación de nuevas áreas en la costa mediterránea andaluza a finales del siglo XXI.



En el mapa 2 se representa la probabilidad de inundación en el futuro en el entorno de la ciudad de Huelva y Marismas del Odiel de acuerdo con el escenario del IPCC RCP2.6 y el modelo de Jevrejeva. Aunque las áreas con alguna probabilidad de inundación son semejantes en cuanto a extensión, las diferencias observadas en la probabilidad de inundación entre ambos escenarios son significativas, apreciándose amplios sectores con alta probabilidad de inundación en el escenario de Jevrejeva que en el escenario RCP2.6 aparecen con probabilidades medias o bajas al sudoeste del núcleo urbano.

Mapa 2. Probabilidad de inundación en el entorno del núcleo urbano de Huelva a finales del siglo XXI según el escenario RCP2.6 y el de Jevrejeva. En la gama de azules aparece representada la superficie inundable en la actualidad.



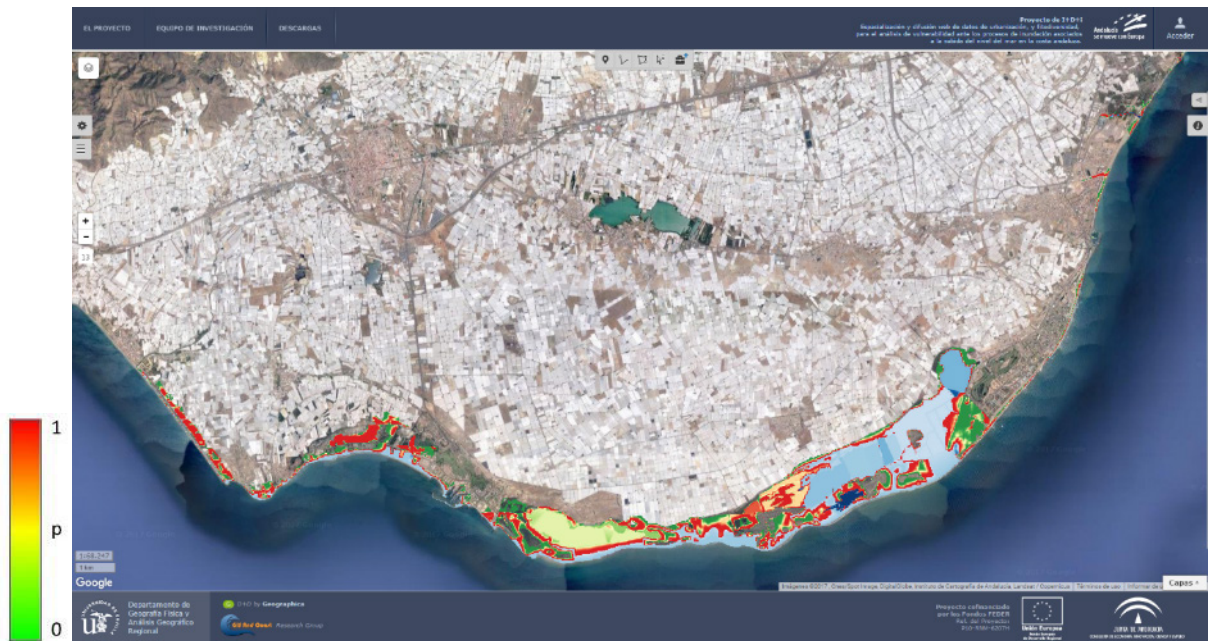
Los resultados obtenidos pronostican un probable incremento del área inundable en el entorno de los humedales costeros, como es el caso de los lagoons mediterráneos. En el mapa 3 se identifica el caso de los aplanamientos litorales del entorno de Motril donde, según el escenario de Jevrejeva, la agricultura intensiva bajo plásticos podría llegar a verse muy afectada por el fenómeno de la inundación directa de extensas superficies actualmente cultivables, más allá del previsible impacto que podría llegar a producirse sobre las aguas subterráneas empleadas a menudo para el riego de este tipo de explotación.

Mapa 3. Probabilidad de inundación en Calahonda (Granada) a finales del siglo XXI de acuerdo con el escenario de Jevrejeva. En la gama de azules aparece representada la superficie inundable en la actualidad.

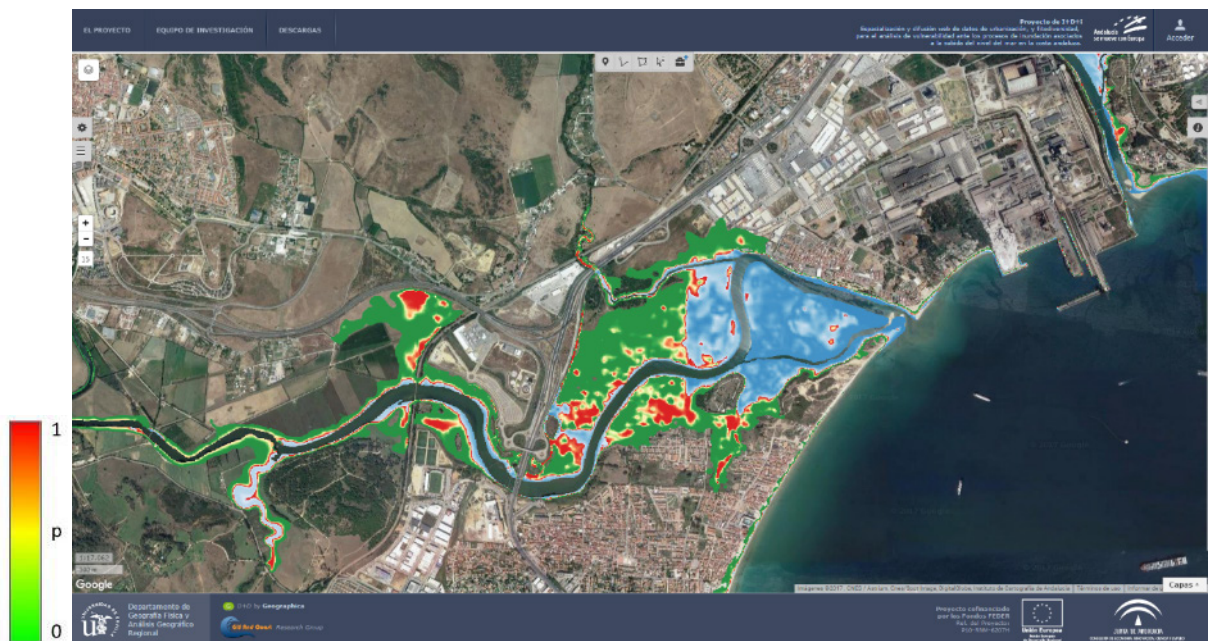


Un caso semejante se produce en Campo de Dalías, donde se obtienen probabilidades medias de inundación en los humedales costeros en la franja no cubierta por plásticos según el escenario RCP4.5 (mapa 4). Estas probabilidades son cercanas a $p=1$ en el escenario de Jevrejeva y muy altas ($p>0,7$) en el escenario RCP8.5, mientras que presentan valores bajos en el escenario RCP2.6.

Mapa 4. Probabilidad de inundación en Campo de Dalías (Almería) a finales del siglo XXI de acuerdo con el escenario RCP4.5. En la gama de azules aparece representada la superficie inundable en la actualidad.

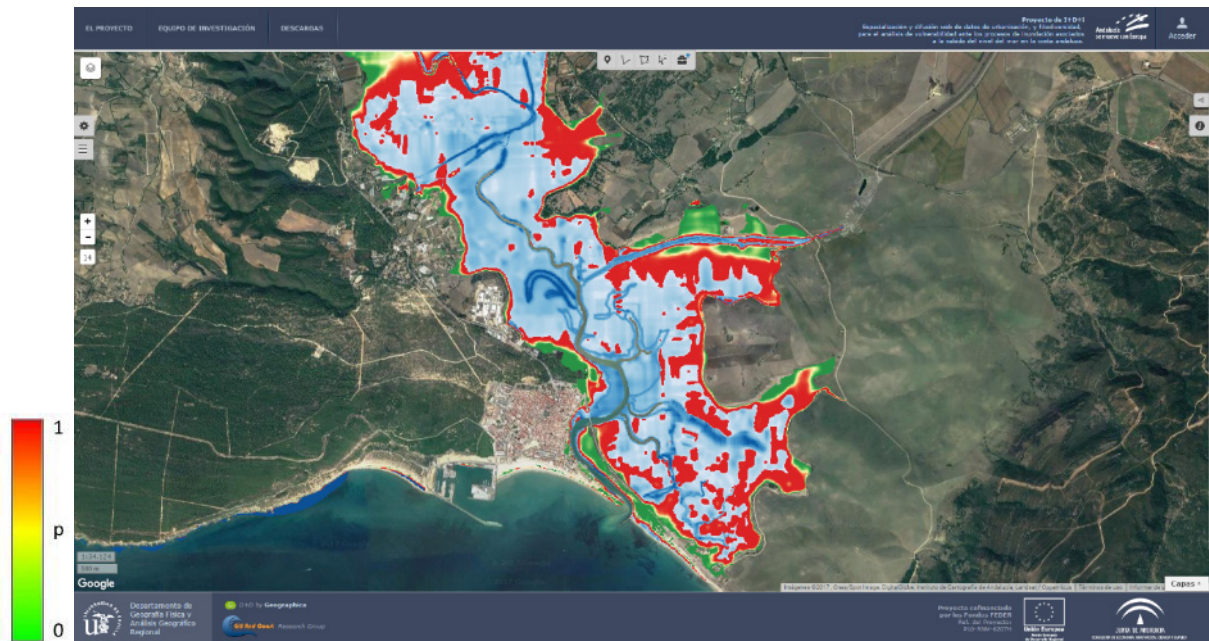


Mapa 5. Probabilidad de inundación en la desembocadura del río Palmones (Cádiz) a finales del siglo XXI de acuerdo con el escenario de Jevrejeva. En la gama de azules aparece representada la superficie inundable en la actualidad.

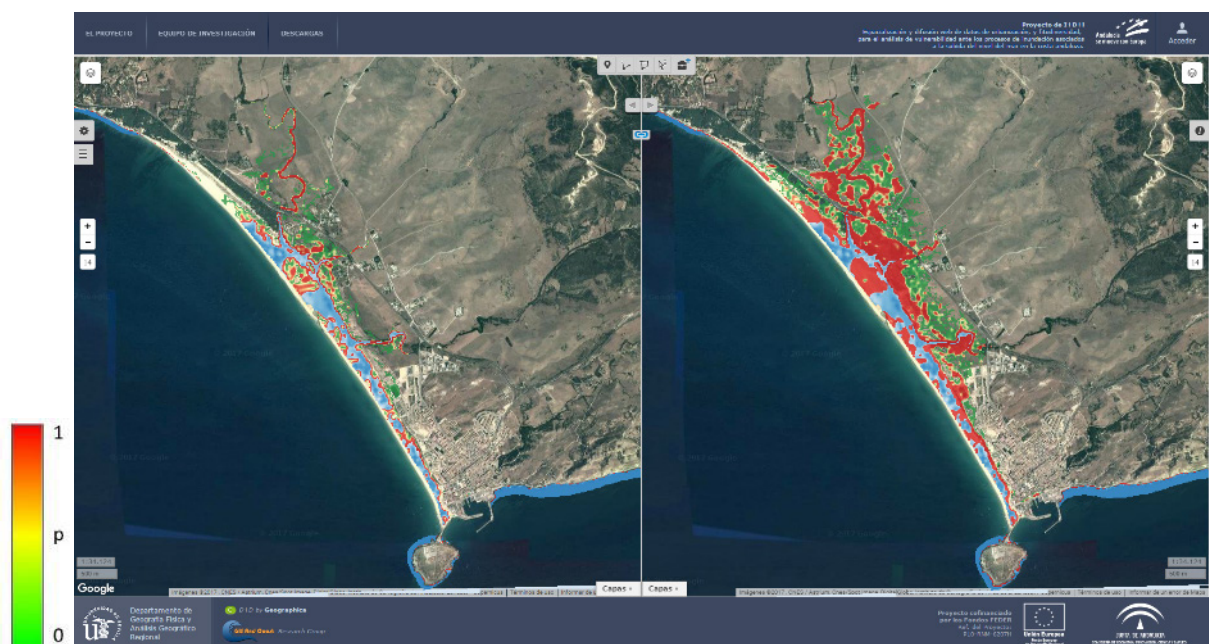


En la mayoría de las desembocaduras fluviales se observa cierta probabilidad de incremento del área inundable, que en algunos casos es baja, como en el río Palmones para el escenario RCP4.5 (mapa 5), o prácticamente nula en el caso de los ríos que presentan un mayor confinamiento en su tramo bajo, como es el caso del río Barbate (escenario RCP8.5, mapa 6), independientemente de los escenarios elegidos para la representación cartográfica presentada en este trabajo.

Mapa 6. Probabilidad de inundación en la desembocadura del río Barbate (Cádiz) a finales del siglo XXI de acuerdo con el escenario RCP8.5. En la gama de azules aparece representada la superficie inundable en la actualidad.



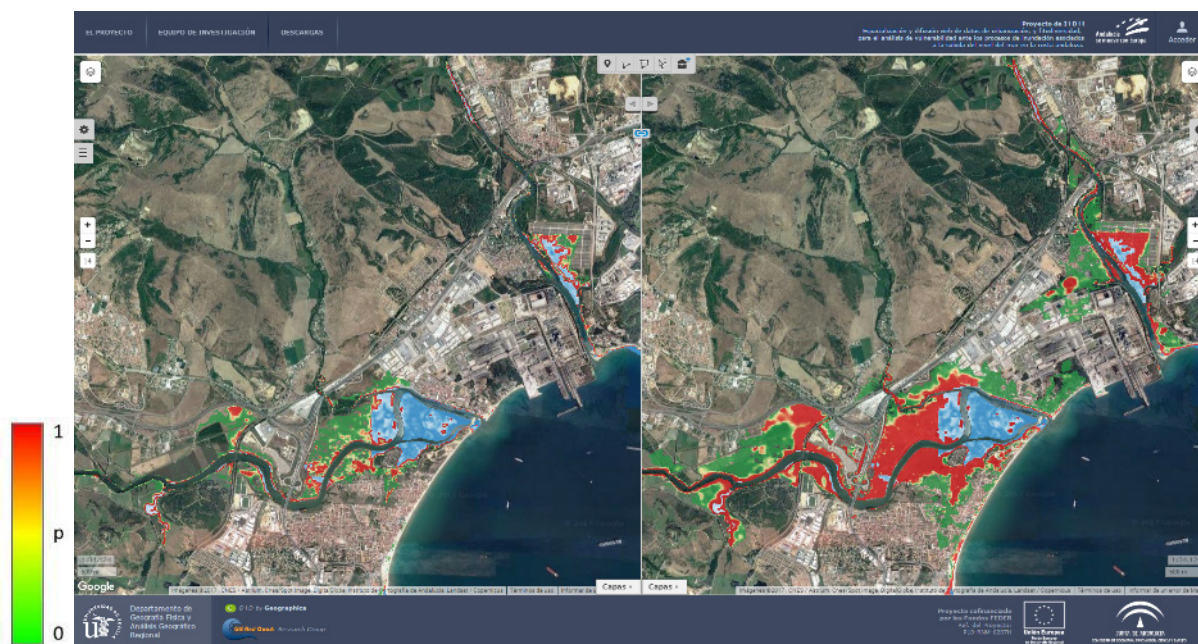
Mapa 7. Probabilidad de inundación en la playa de Los Lances (Cádiz) a finales del siglo XXI según el escenario RCP2.6 y el de Jevrejeva. En la gama de azules aparece representada la superficie inundable en la actualidad.



En espacios litorales con un mayor confinamiento también se observan diferencias significativas entre los distintos escenarios estudiados, como la playa de Los Lances (Cádiz): en escenarios con expectativas de cambios del nivel del mar más bajas como el RCP2.6 o el RCP4.5 apenas se identifica celdillas con probabilidades altas o medias de inundación, mientras que las celdillas con este tipo de probabilidades suponen un amplio incremento en los escenarios más pesimistas, como el RCP8.5 o el de Jevrejeva (2014) (mapa 7). No obstante, en este tipo de espacios, de fuertes pendientes, se suelen identificar áreas con alta probabilidad de inundación rodeadas de una estrecha orla de probabilidades medias y bajas (como el escenario de Jevrejeva reflejado en el mapa 8).

En otros tipos de espacios confinados, como las desembocadura de los ríos Palmones y Guadarranque, en la Bahía de Algeciras (Cádiz), las diferencias entre los escenarios estudiados se evidencian más en cuanto a la menor probabilidad de inundación de los escenarios más conservadores, como el RCP 2.6, que en los incrementos de las áreas con alguna probabilidad de inundación, tal y como se observa en el mapa 8.

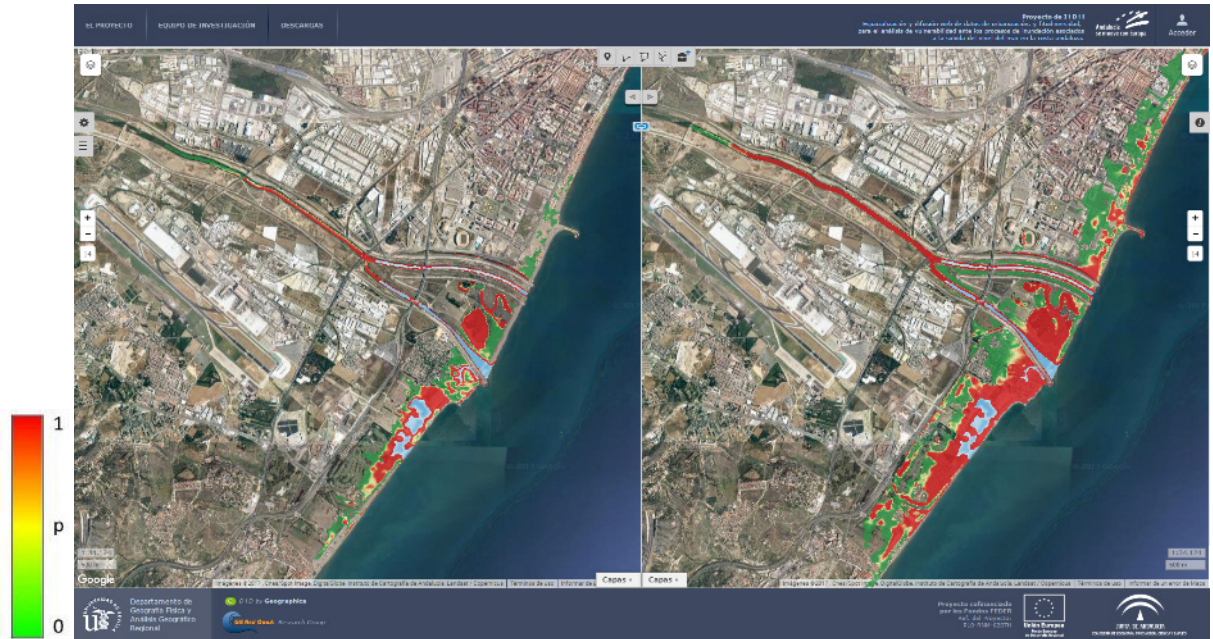
Mapa 8. Probabilidad de inundación en las desembocaduras de los ríos Palmones (al sudoeste) y Guadarranque (al noreste) en la Bahía de Algeciras (Cádiz) a finales del siglo XXI según el escenario RCP2.6 y el de Jevrejeva. En la gama de azules aparece representada la superficie inundable en la actualidad.



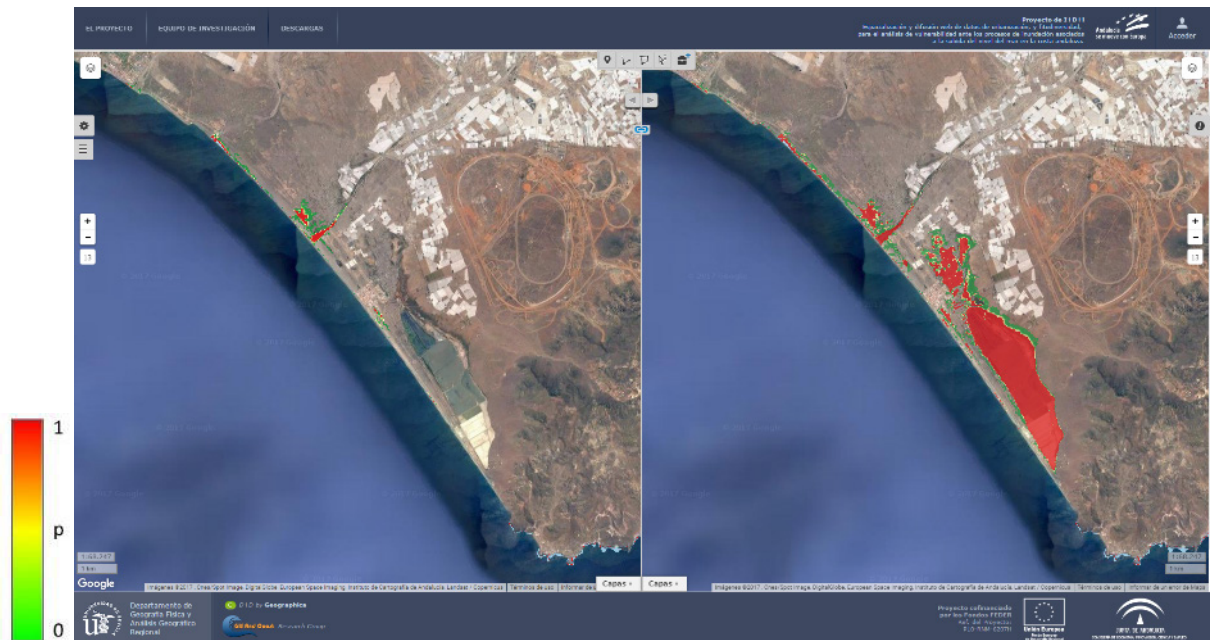
En espacios con pendientes suaves y constantes hacia el mar, como la costa sur del municipio de Málaga (mapa 9), en la desembocadura del río Guadalhorce, se observa una gradación de probabilidades análoga a la altimetría local, más evidente en los escenarios pesimistas que en los más optimistas. En el escenario de Jevrejeva se observan probabilidades bajas y medias de inundación de espacios urbanos consolidados situados al norte de la desembocadura del río, y alta probabilidad de inundación del campo de golf situado al sur.

En determinados espacios se observan diferencias absolutas en cuanto a la inundabilidad del territorio, como en el caso de las salinas del Cabo de Gata. La diferencia entre cualquier escenario del IPCC, incluyendo el escenario RCP8.5, y el de Jevrejeva (mapa 10) estriba en la inundabilidad o no del amplio espacio de salinas situado al oeste del Cabo de Gata.

Mapa 9. Probabilidad de inundación en la desembocadura del río Guadalhorce (Málaga) a finales del siglo XXI según el escenario RCP2.6 y el de Jevrejeva. En la gama de azules aparece representada la superficie inundable en la actualidad.

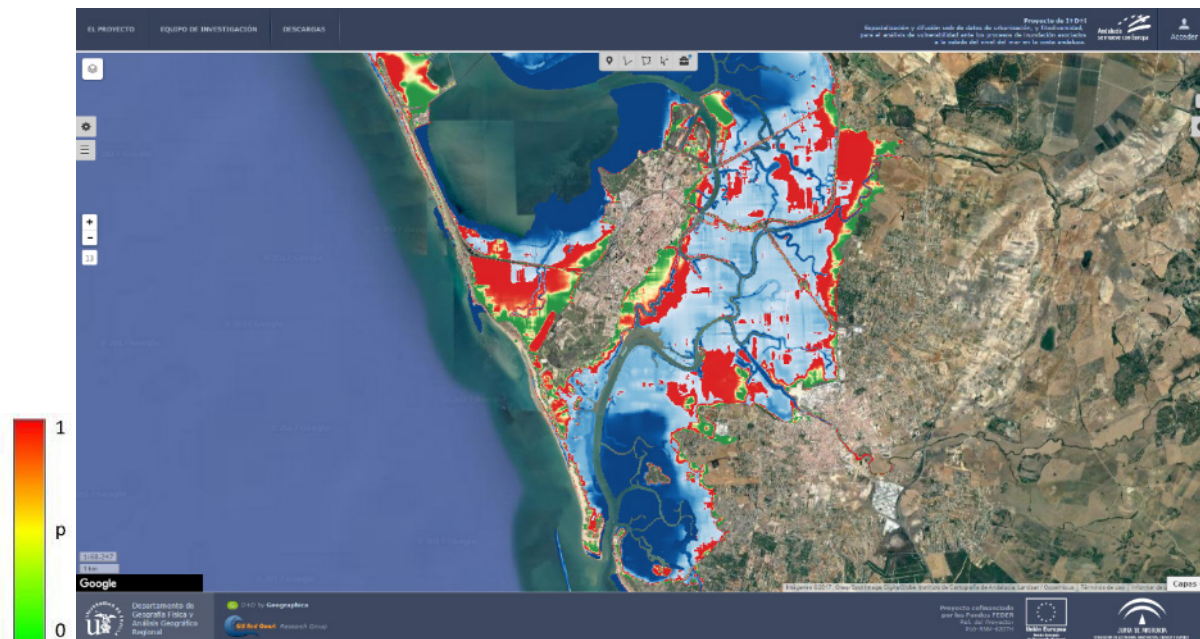


Mapa 10. Probabilidad de inundación en la costa occidental del Cabo de Gata (Almería) a finales del siglo XXI según el escenario RCP8.5 y el de Jevrejeva. En la gama de azules aparece representada la superficie inundable en la actualidad.



Los resultados obtenidos indican que es muy probable que el área inundada por la pleamar se incrementa, desconectando el istmo entre los núcleos de San Fernando y de Cádiz, independientemente del escenario empleado. Incluso en el caso del escenario más conservador (RCP2.6, mapa 11), se observa una alta probabilidad del incremento del área inundable.

Mapa 11. Probabilidad de inundación en la desembocadura de los municipios de San Fernando y Chiclana de la Frontera (Cádiz) a finales del siglo XXI de acuerdo con el escenario RCP2.6. En la gama de azules aparece representada la superficie inundable en la actualidad.



3.2. Discusión de los resultados

Los resultados obtenidos permiten aplicar un método probado en la actualidad para espacios reducidos (Fraile-Jurado *et al.*, 2017) en un área tan amplia como la costa andaluza, con resultados satisfactorios, al no detectarse más aberraciones que las propias derivadas del empleo de un MDE de una resolución espacial media. Los resultados obtenidos son coherentes con análisis de inundabilidad realizados a esta misma escala en la misma área (Fraile, 2011) con MDE menos precisos, así como con análisis de detalle (Benavente *et al.*, 2006; Raji *et al.*, 2011). Igualmente, los resultados son coherentes con los derivados de metodologías diferentes aplicadas a la misma área de estudio, como el CVI (Gornitz *et al.*, 1994), que en el caso de la costa andaluza permite identificar como espacios más expuestos a la subida del nivel del mar a la mayoría de los apilamientos litorales costeros propios de la costa atlántica y los deltas y desembocaduras fluviales mediterráneas (Ojeda *et al.*, 2009).

Pese a que la tendencia de subida del nivel del mar se puede apreciar en los cuatro escenarios empleados para el análisis espacial, las diferencias existentes entre cada uno de ellos son significativas. En algunos casos llegan a ser absolutas, como se aprecia en el mapa 10 para las salinas del Cabo de Gata, mientras que en otros territorios (mapas 2 y 9, especialmente) las diferencias resultan menos evidentes. No obstante, es preciso destacar que el hecho de que las diferencias sean más o menos ostensibles en un territorio u otro se debe a las características topográficas locales y no al comportamiento local de las proyecciones del nivel del mar elaboradas. En cualquier caso, la resolución del debate científico planteado por Rahmstorf (2007) desde 2007, así como por varios autores más en el resto de la década (Church *et al.* 2013; Pfeffer *et al.*, 2008) acerca de las diferencias empíricas observadas entre los modelos tradicionales del IPCC (Parry *et al.* 2007; Warrick y Oerlemans 1990) y los análisis de los registros de mareógrafos y satélites altimétricos (Cazenave y Llovel 2010) debería permitir descartar –o aceptar– modelos como el de Jevrejeva. En cualquier caso, los resultados evidencian la sensibilidad del método empleado a los datos de

entrada del escenario climático empleado, lo cual se puede considerar como un modo indirecto de validar la calidad del modelo

El fenómeno identificado en los gráficos 2 y 3 por el cual los valores extremos de probabilidad, es decir, aquellos por encima de $p > 0,8$ y $p < 0,2$ en dichos gráficos, representan la mayor parte de las áreas identificadas como inundables por la pleamar en el futuro, mientras que las áreas con probabilidades intermedias son menos numerosas se debe en parte a las características del método elegido, así como a la morfología del litoral andaluz. El modelo de probabilidad empleado es el normal, que se caracteriza por ser asintótico, es decir, que es posible identificar valores de probabilidad infinitesimales para cualquier área, incluyendo valores extraordinariamente bajos en áreas no inundables como zonas de montaña. Pese a que tanto el análisis realizado como la representación cartográfica incluida en el trabajo limitan la cola de la distribución de probabilidad asociada a cada escenario a la media más 3 desviaciones típicas, el límite de 3 desviaciones típicas incluye una gran cantidad de celdillas con valores de probabilidad próximos a 0 (a altitudes moderadas como 2, 3 y 4 metros de altitud, en función de la zona), y que hacen que la categoría extrema del lado derecho de la distribución de probabilidades (los valores más bajos) abarque un área muy extensa. Por el contrario, las celdillas con una alta probabilidad de inundación no requieren de esta consideración a la hora de interpretar estos altos valores, ya que existe un límite natural no vinculado a parámetros estadísticos, que es el área inundable en la actualidad.

En cualquier caso, la escasa resolución horizontal y precisión vertical propias de un MDE de 5 metros obligan a considerar con cautela los resultados obtenidos. En este sentido son numerosas las publicaciones que han identificado la importancia de la resolución espacial en la simulación de inundaciones como una de las limitaciones más importantes a la hora de realizar este tipo de análisis (Gesch, 2009). La importancia del MDE empleado para el análisis resulta evidente en el sector de Valdelagrana, donde se han realizado análisis semejantes sobre un MDE lidar (Fraile-Jurado *et al.* 2017). Aunque los resultados obtenidos en este trabajo son parecidos a los obtenidos al emplear el MDE lidar, la importancia de las infraestructuras se amplifica en los espacios llanos, tal y como ha sido señalado por Leon, Heuvelink, y Phinn (2014).

Igualmente, en trabajos anteriores de estos mismos autores se ha subrayado que, en áreas particularmente llanas como muchos de los aplanamientos litorales atlánticos, la resolución espacial pierde importancia frente a la precisión vertical (Fraile y Ojeda 2013), que resulta crítica a la hora de identificar elementos lineales confinadores de la inundación, como carreteras o vías férreas.

Aproximaciones semejantes a la propuesta metodológica aplicada fueron realizadas con anterioridad (Purvis *et al.*, 2008), empleando un modelo más sencillo en el que la probabilidad estaba representada por una forma triangular en lugar de por la campana de Gauss.

El método desarrollado permite implementar una ecuación aparentemente única para cada punto de la costa (puesto que las tres variables PL, SLR y NMML varían espacialmente) en cualquier celdilla, independientemente de las características locales de las variables consideradas. Con ello, se evita tener que adaptar la ecuación 1 en función del rango mareal local, los registros de los mareógrafos o la posición local del nivel medio del mar, empleando una superficie elaborada a partir de la rectificación del MDE original.

El trabajo presentado en este artículo responde a la propuesta de Gesch (2009), según la cual es preciso realizar análisis espaciales de subida del nivel medio del mar considerando la incertidumbre asociada al proceso de modelado del fenómeno. Si bien en dicha propuesta se hace referencia

a identificar los errores inherentes asociados al empleo de un MDE (tanto por la precisión vertical como por la resolución espacial de este) para poder valorar adecuadamente los mapas resultantes, es evidente que la propuesta metodológica aplicada en este trabajo permite valorar adecuadamente toda la incertidumbre asociada al modelo de cambio del nivel del mar. No obstante, aún es preciso profundizar considerablemente en esta línea de trabajo, ya que para poder valorar adecuadamente las incertidumbres asociadas al modelado sobre MDE de la subida del nivel del mar será preciso integrar las incertidumbres asociadas al MDE (Gesch, 2009), al modelo de cambio del nivel del mar (realizado en este trabajo), pero también al análisis temporal de los registros del mareógrafo.

4. Conclusiones

El método elegido resulta útil para evaluar la probabilidad de inundación por subida del nivel del mar de la totalidad de la costa andaluza para diferentes escenarios climáticos. Este fenómeno requerirá de análisis cada vez más precisos, como el que se aborda en este trabajo, que permitan superar la dicotomía de los mapas clásicos entre celdillas indudables y no inundables, asociadas a un determinado umbral de probabilidad, comúnmente de $p = 0,5$.

Esta aproximación metodológica permite no solo describir de forma pormenorizada las probabilidades de inundación en el área de estudio, sino también abordar la primera fase del análisis común de riesgos naturales mediante la representación de la peligrosidad, al calcular la probabilidad de inundación de cada elemento de la superficie emergida. Por lo tanto, una línea futura de trabajo consistirá en realizar el cálculo de la vulnerabilidad de la costa andaluza (de la población, de la vivienda, de las infraestructuras...) para completar la ecuación en la que el riesgo es el producto de la exposición, aquí calculada, por la vulnerabilidad.

El método presentado representa un considerable avance en el análisis de la exposición a la subida del nivel del mar de las áreas costeras, al permitir adaptar cualquier tramo costero a un análisis considerablemente más profundo que los mapas comunes de análisis de inundaciones ante la subida del nivel del mar, en los que se identifica un único umbral mediante el cual se distingue entre celdillas inundables y no inundables en función de si están por encima o por debajo de un valor determinado comúnmente por un valor de probabilidad fijo. Aunque se hayan publicado trabajos con premisas semejantes a las aquí descritas, la aportación principal estriba en adaptar metodologías empleadas previamente en áreas muy reducidas a un territorio tan amplio como la costa de Andalucía, con su importante variabilidad espacial tanto en la configuración de sus geofomas como en la distribución de las variables consideradas.

Pese a la cautela necesaria a la hora de trabajar con análisis elaborados a partir de fuentes espaciales de resolución intermedia, como el MDE de 5 metros empleado, de los resultados obtenidos pueden derivarse dos cuestiones principales. En primer lugar, que la subida del nivel del mar es un fenómeno que va a tener un fuerte impacto en amplias zonas costeras de Andalucía independientemente del escenario estudiado, tal y como se ha reportado para la mayoría de las costas del planeta. En segundo lugar, que la intensidad de este fenómeno, así como el hecho de que algunas áreas se vean más o menos afectadas por dicha subida, es aún fuertemente dependiente del escenario climático futuro elegido. El impacto de la subida del nivel del mar exigirá tomar medidas de adaptación y mitigación lo antes posible, tanto a escala municipal como a escala regional y estatal. Los costes que se podrían derivar de cualquiera de los escenarios considerados en este trabajo serían desmesurados, en caso de no tomarse decisiones basadas en una adecuada planificación lo

antes posible. En cualquier caso, las decisiones que se tomen durante las próximas décadas como sociedad en cuanto a la emisión de gases de efecto invernadero condicionarán que el futuro se pueda predecir con mayor precisión de acuerdo con alguno de los escenarios empleados en este trabajo.

5. Referencias

- Alpar, Bedri (2009), «Vulnerability of Turkish Coasts to Accelerated Sea-Level Rise». *Geomorphology* 107(1–2), 58–63.
- Benavente, Javier; Del Río, Laura; Gracia, Francisco Javier y Martínez-del-Pozo, J. Antonio (2006), «Coastal Flooding Hazard Related to Storms and Coastal Evolution in Valdelagrana Spit (Cadiz Bay Natural Park, SW Spain)». *Continental Shelf Research* 26(9), 1061–1076.
- Cazenave, Anny y William Llovel, (2010), «Contemporary Sea Level Rise». *Annual Review of Marine Science* 2(1), 145–173.
- Church, John A.; Clark, Peter U.; Cazenave, Anny; Gregory, Jonathan M.; Jevrejeva, Svetlana; Levermann, Anders; Merrifield, Mark A.; Milne, Glenn A.; Nerem, Steve; Nunn, Patrick; Payne, Anthony J.; Pfeffer, W. Tad; Stammer, Detlef; y Unnikrishnan, Alakkat S. (2013), «Sea Level Change», *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1137–1216.
- Church, John A., y White, Neil J. (2006), «A 20th Century Acceleration in Global Sea-Level Rise». *Geophysical Research Letters* 33(1).
- Dasgupta, Susmita; Laplante, Benoit; Murray Siobhant, y Wheeler, David (2011), «Exposure of Developing Countries to Sea-Level Rise and Storm Surges». *Climatic Change* 106(4), 567–579.
- DeConto, Robert M. y Pollard, David (2016), «Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise». *Nature*, 531, 591 - 597.
- Fraile Jurado, Pablo; Sánchez-Carnero, Noela y Ojeda Zújar, José, (2014), «Sensibilidad del cálculo de los niveles medios del mar al método y período de las series temporales de los mareógrafos en los procesos de inundación: Valdelagrana (Cádiz)». *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 65, 59-70.
- Fraile Jurado, Pablo (2011), *Análisis de Las Problemáticas Asociadas a La Especialización, Evolución Y Representación de Niveles Del Mar Presentes Y Futuros En Andalucía*, Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla.
- Fraile-Jurado, Pablo; Álvarez-Francoso, José; Guisado-Pintado, Emilia; Sánchez-Carnero, Noela; Ojeda-Zújar, José, y Leatherman, Stephen B. (2017), «Mapping Inundation Probability due to Increasing Sea Level Rise along El Puerto de Santa María (SW Spain)». *Natural Hazards*, 87 (2), 581-598.
- Fraile Jurado, Pablo y Ojeda Zújar, José (2012), «Evaluación de la peligrosidad asociada al aumento de la superficie inundable por la subida del nivel medio del mar en la costa entre Cádiz y Tarifa». *Geofocus*, 12, 329-348.
- Fraile Jurado, Pablo y Ojeda Zújar, José (2013), «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)». *Geo-Marine Letters* 33, 225-230.
- Fraile Jurado, Pablo y Leatherman, Stephen B., (2016), «Alternativas Al Análisis Y Representación Cartográfica de La Subida Del Nivel Del Mar Sobre Modelos Digitales de Elevaciones: El Caso de Miami-Dade County (Florida, EEUU)». *GeoFocus* (17), 115–132.
- Gesch, Dean B., (2009), «Analysis of Lidar Elevation Data for Improved Identification and Delineation of Lands Vulnerable to Sea-Level Rise». *Journal of Coastal Research* 10053(10053), 49–58.
- Gornitz, Vivien M.; Daniels Richard C.; White, Tammy W., y Birdwell Kevin R. (1994), «The Development of a Coastal Risk Assessment Database: Vulnerability to Sea-Level Rise in the U.S. Southeast». *Journal of Coastal Research*, 12, 327.
- Gregory, Jonathan, (2013), «Projections of Sea Level Rise», *IPCC Fifth Assessment Report: 16*. http://www.ipcc.ch/pdf/unfccc/cop19/3_gregory13sbsta.pdf.
- Instituto Geográfico Nacional, (2013), «Modelo Digital de Elevaciones. 5 metros». *Centro Nacional de Información Geográfica*. <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/buscar.do> [consulta: abril de 2017].

- Jevrejeva, Svetlana; Moore, John C. y Grinsted, Aslak (2008), «Relative Importance of Mass and Volume Changes to Global Sea Level Rise» *Journal of Geophysical Research* 113(D8): D08105. <http://doi.wiley.com/10.1029/2007JD009208>.
- Leatherman, Stephen P.; Zhang, Keqi y Douglas, Bruce C. (2000), «Sea Level Rise Shown to Drive Coastal Erosion». *Eos*, 81(6), 55–57.
- Marfai, Muh Aris, y King, Lorenz (2008), «Potential Vulnerability Implications of Coastal Inundation due to Sea Level Rise for the Coastal Zone of Semarang City, Indonesia». *Environmental Geology* 54(6), 1235– 1245.
- Ojeda Zújar, José; Álvarez Francoso, José; Martín Cajaraville, Daniel, y Fraile Jurado, Pablo (2009), «El Uso de Las TIG Para El Cálculo Del Índice de Vulnerabilidad Costera (CVI) Ante Una Potencial Subida Del Nivel Del Mar En La Costa Andaluza (España)». *GeoFocus (Artículos)* 9, 83-100.
- Parry, Martin L. *et al.*, (2007), «IPCC, 2007: Summary for Policymakers». *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: 7–22*.
- Pfeffer, W. Tad; Harper, Joel T. y O’Neel, Shad (2008), «Kinematic Constraints on Glacier Contributions to 21st-Century Sea-Level Rise». *Science (New York, N.Y.)* 321(5894): 1340– 1343.
- Pugh, David T. (1996), «Tides, Surges and Mean Sea-Level (Reprinted with Corrections)». *Marine and Petroleum Geology* 5(3), 301.
- Purvis, Matthew J.; Bates Paul D. y Hayes, Christopher M. (2008), «A Probabilistic Methodology to Estimate Future Coastal Flood Risk due to Sea Level Rise». *Coastal Engineering*, 55(12), 1062– 1073.
- Rahmstorf, Stephan (2007), «A Semi-Empirical Approach to Projecting Future Sea-Level Rise». *Science* 315(5810), 368– 370.
- Raji, Otmane; Del Río, Laura; Gracia, Francisco Javier y Benavente, Javier (2011), «The Use of LIDAR Data for Mapping Coastal Flooding Hazard Related to Storms in Cadiz Bay (SW Spain)». *Journal of Coastal Research* (64), 1881– 1885.
- Rotzoll, Kolja; y Fletcher, Charles H. (2012), «Assessment of Groundwater Inundation as a Consequence of Sea-Level Rise». *Nature Climate Change* 3(5), 477– 481.
- Stocker, Thomas F. (2014) *Climate change 2013: the physical science basis: Working Groups I contribution to the Fifth Assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Nueva York: Cambridge University Press.
- Tebaldi, Claudia; Strauss, Benjamin H., y Zervas, Chris (2012), «Modelling Sea Level Rise Impacts on Storm Surges along US Coasts». *Environmental Research Letters* 7 (1), 14 - 32.
- Titus, James G. y Richman, Charlie (2001), Maps of land vulnerable to sea level rise: modeled elevations along the US Atlantic Gulf coast, *Climate Research*, 18, 205-218.
- Titus, James G.; Anderson, K. Eric.; Cahoon, Donald R.; Gesch, Dean B.; Gill, Stephen K.; Gutierrez, Benjamin T.; Thieler E., Robert (2009) *Coastal Sensitivity to Sea-Level Rise: A Focus on the Mid-Atlantic Region. A report by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research*, Createspace Independent Publishing Platform, 320.
- Warrick, Richardy Oerlemans, Johannes (1990), «Sea Level Rise». En: Houthon, John T.; Kenkins George J. y Ephraums John J., *Climate Change: The IPCC scientific assessment*, Nueva York: Cambridge University Press, 263–281.

Sobre los autores

Pablo Fraile-Jurado

Doctor en Geografía por la Universidad de Sevilla y licenciado en Geografía. Miembro del Departamento de Geografía Física y A.G.R. desde 2003, su línea de investigación principal son los riesgos costeros, especialmente los vinculados a la subida del nivel del mar, a partir de las cuales ha publicado numerosos artículos de investigación. Adicionalmente, es coordinador del Master Erasmus Mundus en Planificación Espacial Marina, y recientemente ha desarrollado una nueva línea de trabajo en las aplicaciones docentes de la fotografía del paisaje, dentro del marco del proyecto abierto Geophotopedia.

José Álvarez-Francoso

Doctor en Geografía por la universidad de Sevilla y licenciado en Geografía (Maîtrise de Géographie por la Universidad de Estrasburgo I (Francia)). Miembro del grupo de investigación “Ordenación del Litoral y Tecnologías de Información Territorial”, ha participado como investigador en varios Proyectos de Excelencia y de convocatoria nacional y en contratos con una alta carga de transferencia, a partir de los que han surgido más de una treintena de publicaciones. Sus trabajos de investigación están vinculados, desde un punto de vista temático, a los campos de la climatología y riesgos naturales, y desde un punto de vista técnico a los Sistemas de Información Geográfica y a las tecnologías de tratamiento y difusión de la información espacial.

José Ojeda-Zújar

Catedrático de Geografía Física en el Departamento de Geografía Física y A.G.R. Es director del grupo de investigación “Ordenación del Litoral y Tecnologías de Información Territorial”, y responsable de decenas de proyectos de investigación y contratos de alta carga de transferencia. Dentro de una amplia línea temática centrada esencialmente en la costa, la mayor parte de sus publicaciones hacen referencia a las aplicaciones de los Sistemas de Información Geográfica al conocimiento y gestión de la información espacial de este ámbito.