

Cartografía de la probabilidad de inundación como consecuencia de la subida del nivel medio del mar en Punta Umbría, Huelva.

Mapping the probability of inundation due to sea level rise in Punta Umbría, Huelva.

J. I. Álvarez-Francoso¹, P. Fraile-Jurado¹ y J. Ojeda-Zújar¹

¹ Departamento de Geografía Física y A.G.R. Universidad de Sevilla, Universidad de Sevilla 41004. jalvarez2@us.es

Resumen: En este trabajo se calcula la probabilidad de incremento de los procesos de inundación permanente por la pleamar como consecuencia el actual fenómeno de subida del nivel del mar en el núcleo urbano de Punta Umbría. Este cálculo requiere de un proceso de modelado de diferentes variables espaciales. En primer lugar, la estimación de las tendencias locales de cambios del nivel del mar y su relación con el fenómeno global, a través de los registros del mareógrafo de Huelva. En segundo lugar, la definición de una serie de escenarios locales en los que se combinen los resultados del análisis anterior con diferentes escenarios climáticos futuros. En tercer lugar, se implementa el análisis espacial del cálculo de la probabilidad de inundación futura para cada escenario sobre un modelo digital de elevaciones LiDAR de alta precisión vertical (0,1 m) y resolución espacial (1 m), obteniéndose, entre otros resultados un mapa en el que el valor de cada celdilla representa la probabilidad de que dicha celdilla se ve inundada por la pleamar a finales del siglo XXI. Los resultados obtenidos evidencian que la extensión del área inundable se incrementará significativamente independientemente del escenario climático a finales del siglo XXI. Por otra parte, se identifican amplias diferencias entre los escenarios de emisiones más pesimistas y los más optimistas.

Palabras clave: Subida del nivel del mar, probabilidad, cartografía, modelo digital de elevaciones, inundación.

Abstract: *The aim of this work is to calculate the probability of permanent inundation by high tide as a consequence of the current phenomenon of sea level rise in the urban core of Punta Umbría. This calculation requires to model different spatial variables. First, the estimation of the local trend of the sea level changes and their relation to the global phenomenon, through the records of the Huelva tide gauge. Second, the definition of local scenarios of sea level rise by combining the results of the previous analysis with different future climate scenarios. Third, the spatial analysis of the calculation of the future flood probability for each scenario is implemented on a digital model of elevations LiDAR with high vertical precision (0.1 m) and spatial resolution (1 m), obtaining among other results a map in which the value of each cell represents the probability that the cell is flooded by high water at the end of the 21st century. The results show that the extension of the inundated area will increase significantly regardless of the climatic scenario at the end of the 21st century. On the other hand, large differences are identified between the most pessimistic and the most optimistic emission scenarios.*

Key words: *Sea level rise, probability, mapping, digital elevation model, inundation.*

INTRODUCCIÓN

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, Ojeda et al., 2009) 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 basado que permite identificar qué celdillas son vulnerables a la subida del nivel del mar y qué celdillas no lo son, obteniéndose por tanto un resultado dicotómico. La segunda aproximación se basa en la comparación de las altitudes de las celdillas de modelos digitales de elevaciones (MDE) con superficies de inundación definidas por los registros locales de mareógrafos y / o escenarios de cambio global. Pese a que todos los modelos de subida del nivel del mar 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” (Gesch, 2009).

Frente a esta aproximación se ha planteado el cálculo de la probabilidad de inundación por celdilla como manera de abarcar todo el espectro de probabilidades (Fraile et al., 2017), permitiendo 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.

En este trabajo se aplica el método desarrollado para el cálculo de la probabilidad de inundación por celdilla en el núcleo urbano de Punta Umbría, empleando para ello un modelo digital de elevaciones (MDE) derivado de un LiDAR.

DATOS

Para la elaboración de este trabajo se ha empleado un MDE generado a partir de los datos obtenidos en una campaña realizada con un sensor LiDAR en enero de 2013. Este MDE cuenta con una resolución espacial de 1 metro y una precisión vertical estimada en 10 cm (Fernández Núñez, 2017).

MÉTODOS

El proceso metodológico aplicado constó de las siguientes fases:

FASE 1. Identificación del nivel de inundación para $p \geq 0,5$ a partir de los registros del mareógrafo de Huelva y los diferentes escenarios de cambio climático. 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, 2004). 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 quedaría de acuerdo a la ecuación 1:

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

Siendo:

- N_i , el nivel de inundación local a finales del siglo XXI para una $p \geq 0,5$.

- 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. En el caso de Huelva, este valor es de 0,43 m.

- 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 las dos variables en el trabajo de Fraile y Fernández (2016), y son el resultado de la combinación de la tasa local de cambio del nivel medio del mar con cuatro escenarios de subida del nivel medio del mar (Tabla I).

MODELO	ESCENARIO	MEDIA	DESV.
IPCC (2013)	RCP2.6	0,40 m	0,091 m
IPCC (2013)	RCP6.0	0,47 m	0,097 m
IPCC (2013)	RCP8.5	0,63 m	0,115 m
Jevrejeva et al. (2012)	-	0,84 m	0,12 m

Tabla I. Parámetros de centralidad y desviación de los modelos y escenarios de subida del nivel medio del mar empleados.

- 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 IEO. En el caso de Huelva este valor es de 1,7 m.

FASE 2. Modificación del MDE. La tercera fase consiste en modificar el MDE de manera que la cota máxima de inundación inducida por 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, 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 3. 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 a partir de los parámetros de media y desviación típica que se muestran en la Tabla I. El resultado obtenido representa el valor de la probabilidad de

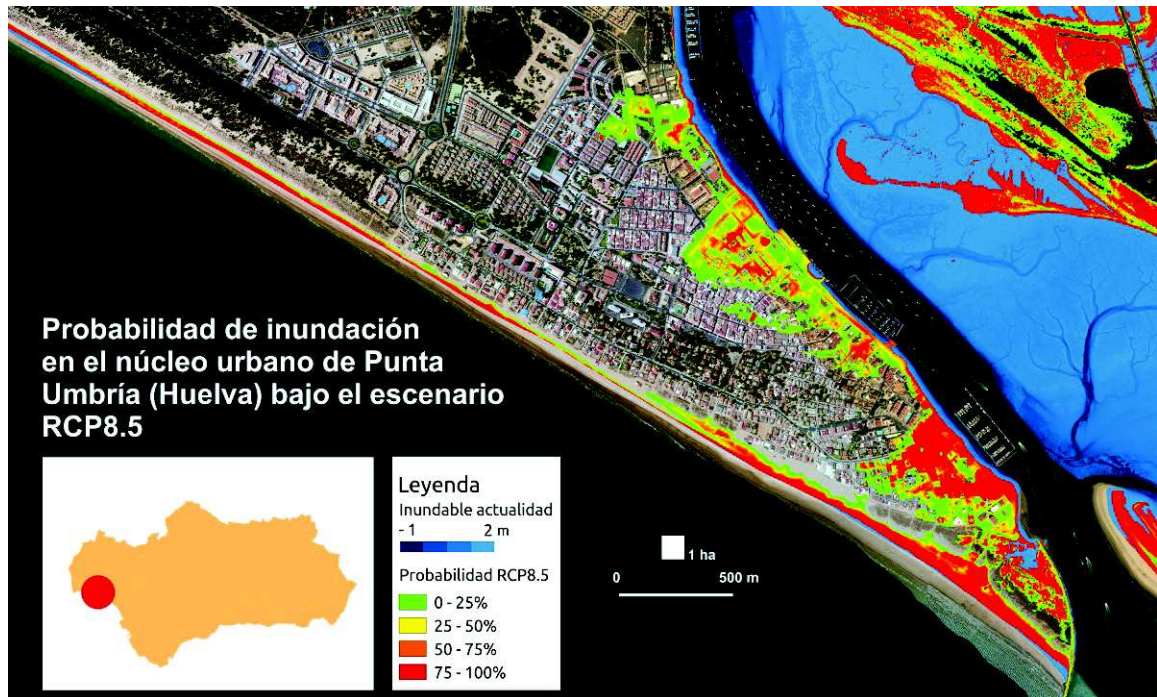


Figura 1. Distribución espacial de la probabilidad de inundación bajo el escenario RCP8.5.

inundación para cada celdilla en una situación de pleamar a finales del siglo XXI.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Fig. 1 aparecen representada la distribución espacial de la probabilidad de inundación bajo el escenario RCP8.5. Aunque se han elaborado análisis y mapas semejantes para el resto de escenarios empleados, por motivos de espacio únicamente se incluye este mapa en el presente trabajo. Tal y como se puede observar, las zonas con mayor probabilidad de inundación, además de la playa y de las superficies ya inundadas en la actualidad, se encuentran en el sector norte, en el que se aprecian en general probabilidades bajas de inundación, y en el extremo de la flecha litoral de Punta Umbría, donde las probabilidades son sensiblemente más altas. Este fenómeno parece explicarse por la configuración topográfica de la flecha litoral, siguiendo aparentemente las líneas de acreción de los sucesivos límites de las antiguas flechas. Más allá de este sector se observan valores altos de inundación, si bien se trata de la zona arenosa que ha crecido como consecuencia de la presencia del espigón, por lo que su vulnerabilidad es prácticamente nula.

Las estadísticas obtenidas del resto de análisis (Fig. 2 y Fig. 3) evidencian que los modelos locales de subida del nivel medio del mar elaborados a partir de los modelos de cambio climático del IPCC presentan menores expectativas de inundar amplias zonas del área de estudio, frente al de Jevrejeva et al. (2012), lo

cual resulta coherente con estudios semejantes (Fraile et al. 2017). Si bien inicialmente este fenómeno se explica como la consecuencia de la existencia de niveles de inundación sucesivamente más altos en función del escenario, resulta interesante observar cómo el área inundable según modelo de Jevrejeva en cualquier probabilidad media o alta multiplica el área inundable del resto de modelos del IPCC, pese a existir únicamente una diferencia de 0,21 m entre el modelo RCP8.5 y el de Jevrejeva et al. (2012). Esta diferencia es incluso inferior a la existente entre el RCP2.6 y RCP8.5 (0,23 m). Por lo tanto es posible concluir que las diferencias observadas entre los modelos IPCC y Jevrejeva et al. (2012) resultan críticas localmente, al distribirse parte del núcleo urbano de Punta Umbría en torno a estos valores inundables según un modelo, pero no inundables según el resto.

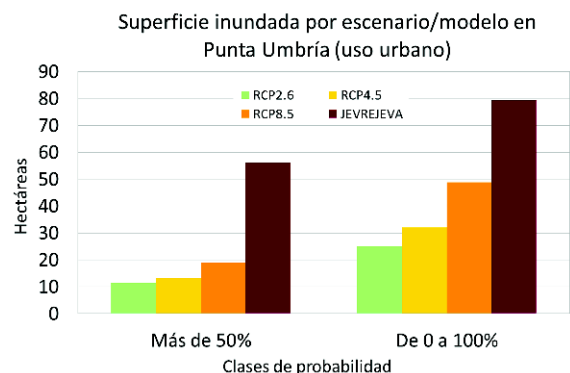


Figura 2. Superficie inundada por escenario con $p < 0,5$ y con $p < 1$.

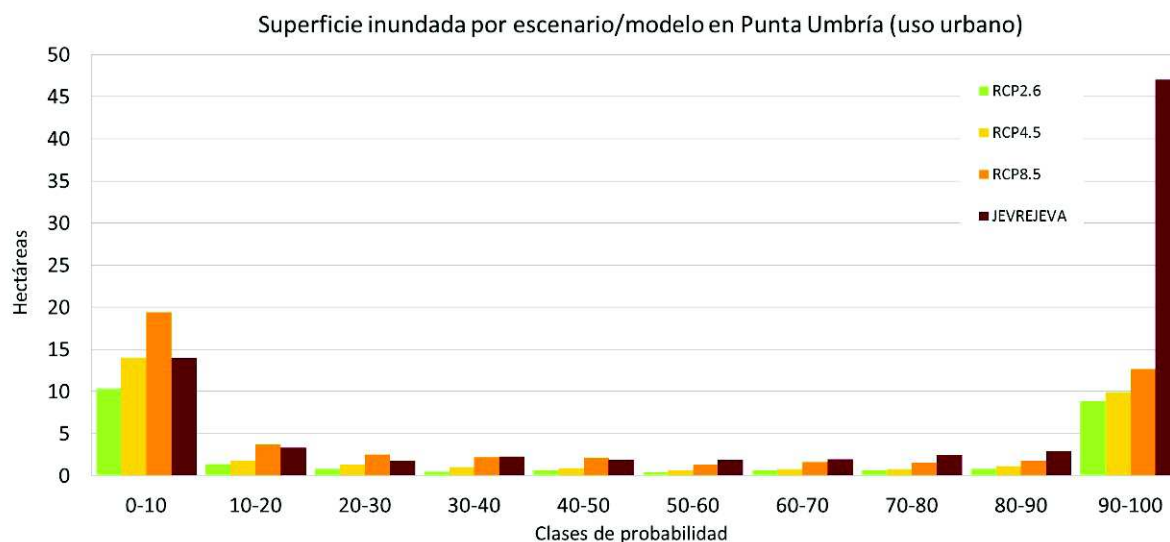


Figura 3. Superficie inundada por escenario.

CONCLUSIONES

El método aplicado permite identificar la distribución espacial de la probabilidad de inundación en el área de estudio, verificando que se trata de una herramienta útil para el análisis de la exposición a la subida del nivel medio del mar.

El núcleo urbano de Punta Umbría, según el análisis realizado, se enfrentará a probables inundaciones en su sector suroccidental y en algunas zonas cercanas a las marismas, independientemente del escenario de emisiones o modelo climático aplicado. Este fenómeno debe ser tenido en cuenta por las autoridades con competencia urbanística para planificar cómo hacer frente a la subida del nivel medio del mar en las próximas décadas, antes de que cualquiera de los escenarios de futuro analizados llegue a producirse.

REFERENCIAS

- Church, J. A., y White, N. J. (2011): Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century. *Surveys in geophysics*, 32(4), 585-602.
- Fernández Núñez, M. (2017): Fusion of airborne LiDAR, multispectral imagery and spatial modelling for understanding saltmarsh response to sea-level rise. Doctoral thesis, UCL (University College London).
- Fraile Jurado P., y Fernández Díaz, M. (2016): Escenarios de subida del nivel medio del mar en los mareógrafos de las costas peninsulares de España en el año 2100. *Estudios Geográficos*, 77, 57-79.
- Fraile Jurado, P., Sánchez Carnero, N., y Ojeda Zújar, J. (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: Valdegrana (Cádiz). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (65), 59-70.
- Fraile Jurado, P., y Leatherman, S. 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.
- Fraile-Jurado, P., Álvarez-Francoso, J.I., Guisado-Pintado, E., Sánchez-Carnero, N., Ojeda-Zújar, J., y Leatherman, S.P. (2017): Mapping inundation probability due to increasing sea level rise along El Puerto de Santa María (SW Spain). *Natural Hazards*, 87(2), 581-598.
- Gesch, D.B. (2009): Analysis of lidar elevation data for improved identification and delineation of lands vulnerable to sea-level rise. *Journal of Coastal Research*, 49-58.
- Gornitz, V.M., Daniels, R.C., White, T.W., y Birdwell, K.R. (1994): The development of a coastal risk assessment database: vulnerability to sea-level rise in the US Southeast. *Journal of Coastal Research*, 327-338.
- Jevrejeva, S., Moore, J. C., y Grinsted, A. (2012): Sea level projections to AD2500 with a new generation of climate change scenarios. *Global and Planetary Change*, 80, 14-20.
- Ojeda, J., Álvarez, J.I., Martín, D., y Fraile, P. (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*, (9), 83-100.
- 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.
- Pugh, D. (2004): *Changing sea levels: effects of tides, weather and climate*. Cambridge University Press.