

Aproximaciones al análisis y representación cartográfica de la subida del nivel del mar sobre modelos digitales de elevaciones: los casos de West Palm Beach County y Miami-Dade County (Florida, EEUU).

Approaches to the cartographic analysis and representation of sea level rise by means of digital elevation models: the cases of West Palm Beach and Miami-Dade Counties (Florida, USA).

P. Fraile-Jurado¹ y S. B. Leatherman²

¹ Departamento de Geografía Física y A.G.R. Facultad de Geografía e Historia, Universidad de Sevilla. C/ María de Padilla s/n CP 41004. Dirección de los Autores; pfraile@us.es

² Department of Earth & Environment, Florida International University, Miami, Florida, USA; sleat003@fiu.edu

Resumen: En este trabajo se presentan tres aproximaciones cartográficas del fenómeno de la subida del nivel medio del mar en los condados de West Palm Beach y Miami-Dade. Frente al uso tradicional de modelos digitales de elevaciones para distinguir de manera dicotómica, entre celdillas inundables y no inundables, se proponen tres alternativas que permiten realizar análisis de mayor profundidad y expresividad. La primera aproximación consiste en una representación dicotómica de siete escenarios y/o modelos en un único mapa, lo cual permite una sencilla visualización de un amplio abanico de posibles situaciones futuras contempladas por la comunidad científica. La segunda aproximación es temporal, puesto que representa la fecha en la que, de acuerdo con un único escenario de inundación, será cubierta una celdilla durante situaciones de pleamar. La tercera aproximación representa en cada celdilla la tasa lineal de cambio del nivel medio del mar que debe producirse como promedio durante el siglo XXI para que una celdilla quede inundada durante pleamares de coeficiente 0,7.

Palabras clave: cartografía, subida del nivel del mar, modelo digital de elevaciones, inundación, Florida.

Abstract: *The aim of this paper is to present three different cartographic approaches to sea level rise in West Palm Beach and Miami-Dade counties, Florida, USA. In comparison to the traditional use of digital elevation models to distinguish between inundated and non-inundated cells, three alternatives that allow deeper analysis and cartographic expression are proposed. The first approach represents seven scenarios and/or models in a single map, which allows an easy viewing of a wide range of possible future situations accepted by the scientific community. The second approach is temporal, and it represents the date on which each cell will be inundated during high tides. The third approach represents the linear rate of mean sea level rise during the XXI century in which a cell remains flooded during a high tide coefficient of 0.7.*

Key words: *mapping, sea level rise, digital elevation model, inundation, Florida.*

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, buena parte de las publicaciones relacionadas con la subida del nivel del mar se han centrado en el cálculo de los impactos que diferentes subidas del nivel medio del mar tendrían sobre las áreas costeras, para lo cual ha sido esencial el uso de la cartografía, con el empleo de modelos digitales de elevaciones (MDEs) como herramienta principal. En este sentido, existen tres aproximaciones que aplican diferentes técnicas de análisis cartográfico:

El tipo de análisis más común es el centrado en el uso de MDEs. La asunción de un único valor de subida del nivel medio del mar asociado a un umbral de probabilidad determinado, utilizado para identificar las celdillas que quedarían por encima o por debajo de dicho nivel de inundación en un horizonte temporal

fijo, señalándose por tanto como inundables o no inundables. Este tipo de análisis ha sido aplicado tanto a escalas de detalle, empleando MDEs de alta resolución espacial, como a territorios amplios (Titus y Richman, 2000; Fraile, 2011). Se trata por tanto de análisis que únicamente obtienen dos tipos de resultados, de carácter dicotómico, puesto que los valores para cada celdilla solo pueden ser inundado / no inundado.

Frente a este tipo de aproximaciones, un análisis menos común es aquel que no considera que todas las celdillas inundables reaccionen por igual ante una subida del nivel medio del mar, calculando la profundidad de la futura inundación con un horizonte temporal fijo. Esta técnica permite una aproximación más realista al carácter de la inundación, obteniendo como resultados una variable continua, dado que la

inundación es más profunda en las áreas topográficamente más bajas (y que por tanto se inundarían por mayor profundidad) que en las más altas, pese a que queden por debajo de una eventual cota de inundación.

Por último, otra aproximación cartográfica a este tipo de trabajos es la estimación de la probabilidad de subida del nivel medio del mar en cada celdilla del MDE, tal y como ha sido realizado por Purvis et al. (2008) y Fraile et al. (2013). Se trata en este caso de la espacialización de la peligrosidad, entendida como la probabilidad de ocurrencia de un evento adverso, en una fecha futura determinada.

El uso de un horizonte temporal fijo para la identificación de las celdillas inundables es un elemento común a todos los trabajos reseñados. Esta fecha generalmente hace referencia al final del siglo XXI, como el año 2100 o el período 2080-2100 (para las publicaciones más recientes que se derivan de los datos del informe del IPCC de 2013). La dimensión temporal, por lo tanto, apenas está presente en la cartografía de inundaciones futuras.

Este trabajo pretende realizar una aportación al tratamiento cartográfico de los mapas de inundabilidad por subida del nivel medio del mar, profundizando en el tratamiento de la dimensión temporal. El objetivo de este trabajo es, en definitiva, estimar el horizonte temporal para la inundación de territorios actualmente emergidos, ante la eventual subida del nivel medio del mar a partir del desarrollo de un método de análisis espacial sobre MDE basado en el cálculo de isócronas de inundación.

ÁREAS DE ESTUDIO

Para el desarrollo de este trabajo se eligieron dos áreas de estudio situadas en Florida: el sector norte de West Palm Beach, en el entorno de Jupiter Beach, y el sector norte de Miami-Dade County, donde se encuentra situado Biscayne Boulevard y el espacio natural protegido de Oleva River State Park, localizado al abrigo de la isla-barrera de Miami Beach. La elección de ambos lugares responde a los siguientes motivos: a) la semejanza entre el comportamiento el nivel medio del mar durante el último siglo en la costa este de Florida y los registros globales, lo cual permite asumir los registros globales futuros la estabilidad tectónica de la costa este de Florida, b) la disponibilidad de un MDE de suficiente calidad y c) la existencia de áreas costeras urbanas consolidadas como Miami-Dade County y West Palm Beach, excluidas de la posibilidad de cambios morfológicos como consecuencia de una subida del nivel medio del mar.

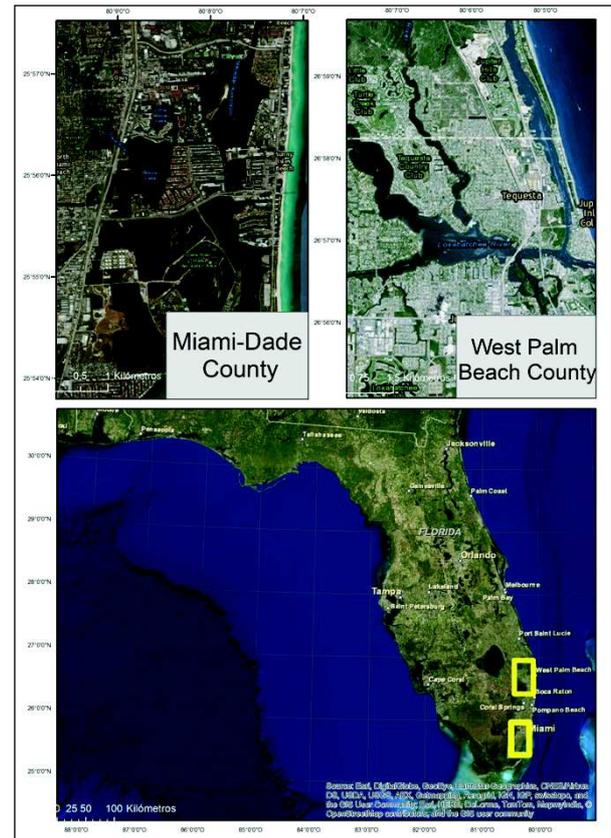


FIGURA 1. Áreas de estudio.

MATERIAL Y MÉTODOS

El MDE empleado tiene una resolución espacial de unos 3 metros (5 pies), y ha sido elaborado a partir de la adquisición de información mediante un sensor Lidar en el año 2012. Está disponible con carácter público en la web <http://www.sfwmd.gov/>, gestionada por la institución South Florida Water Management District. Las estimaciones empleadas para la determinación de los diferentes umbrales de subida del nivel medio del mar a finales del siglo XXI proceden de los cálculos y modelizaciones realizados por Rahmstorf (2007), Church y White (2011), y el IPCC (2013).

Se han realizado tres aproximaciones metodológicas a la representación de futuras inundaciones provocadas por la subida del nivel del mar. La primera es la más sencilla, y consiste en una representación dicotómica de siete escenarios y/o modelos de subida del nivel del mar en un único mapa, para un umbral de probabilidad de $p < 0.5$ y con una pleamar de coeficiente 0.7. Los escenarios y /o modelos que se han incluido son los escenarios RCP2.6 (+26 cm), RCP4.5 (+40 cm) RCP6.0 (+45 cm) y RCP8.5 (+63 cm) del IPCC, y el de Rahmstorf (2007) (+98 cm), así como dos escenarios ficticios en los que se asumen que las tasas observadas durante el siglo XX continuarán (+17 cm) o que se mantendrá la tendencia observada en el período 2000-2014 (+34 cm).

La segunda aproximación considera la variable temporal, puesto que representa la fecha en la que, de acuerdo con un único escenario de inundación (en este caso el RCP8.5), será cubierta una celdilla durante episodios de pleamar (de coeficiente 0,7) a final del siglo XXI. El valor representado en cada celdilla se calcula mediante la siguiente expresión:

$$T = H / NI_e,$$

Siendo T el horizonte temporal en el cual la celdilla quedará inundada por la pleamar, H la altura de la celdilla, y NI_e el nivel de inundación, calculado a partir de la suma de las variables altura de la pleamar local con coeficiente 0,7 y subida del nivel medio del mar, diferente en función del escenario elegido.

La tercera aproximación representa en cada celdilla la tasa lineal de cambio del nivel medio del mar que debe producirse como promedio durante el siglo XXI para que una celdilla quede inundada durante pleamares de coeficiente 0,7. Responde a la expresión:

$$T_l = H / T_r,$$

Siendo T_l es la tasa lineal de inundación que debe producirse durante lo que resta de siglo XXI para que una celdilla quede inundada, y T_r el tiempo restante desde la elaboración del MDE a un horizonte temporal dado. En este caso toma valor 86, al estar calculado sobre el año 2100.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de la evaluación aparecen sintetizados en las figuras 2, 3 y 4. La figura 4 (localizada al final por razones de maquetación) corresponde a las tres propuestas metodológicas aplicadas a West Palm Beach, mientras que la figura 4 muestra el tiempo que falta para que se produzca la inundación de todos los espacios potencialmente inundables en el área de Miami-Dade County. El incremento de las áreas inundables con respecto a la superficie inundada en el presente de cada una de las tres aproximaciones está recogido en la figura 2, para el caso de Miami-Dade County.

Es común a las tres aproximaciones desarrolladas la identificación los espacios con una mayor exposición a la subida del nivel del mar. La mayor parte de la isla barrera de Miami Beach aparece identificada con valores que implican una elevada exposición: ya sea a) en caso de producirse los escenarios más conservadores, b) por aparecer las celdillas del MDE como inundables antes de 2030, o c) por inundarse de continuar las tasas globales observadas durante el siglo XX (algo que de acuerdo con la mayoría de autores e informes, se sobrepasará ampliamente). Asimismo, se identifican valores que implican una elevada exposición en las áreas construidas artificialmente,

como las islas creadas al norte de las marismas de Oleva River State Park.

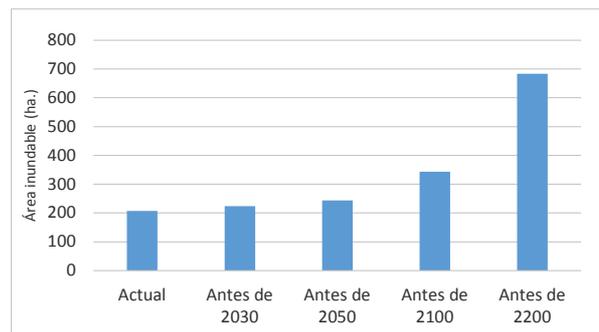


FIGURA 2. Área inundable por horizonte temporal en Miami-Dade County.

Metodológicamente, la representación de múltiples escenarios de subida del nivel medio del mar (figuras 3 y 4) no supone estrictamente una aportación relevante sobre los mapas más comúnmente realizados, al tratarse de variables dicotómicas que solo tienen en cuenta un único umbral de probabilidad para distinguir entre la condición de inundado o no inundado en cada celdilla. No obstante, la inclusión de los escenarios más significativos en un único mapa sí resulta una aportación relevante, especialmente en términos de capacidad de comunicación y concienciación de la sociedad. En la figura 2 se observa cómo ambas áreas de estudio muestran un incremento notable en cualquiera de los escenarios, superando el 200% de la superficie inundable en la actualidad en un escenario relativamente conservador como el RCP4.5. Más allá de la cuantificación de las áreas inundables, el análisis visual (figuras 3 y 4) indica que la mayor parte de las nuevas áreas inundables están consolidadas en la actualidad como zonas residenciales, viario y otro tipo de infraestructuras.

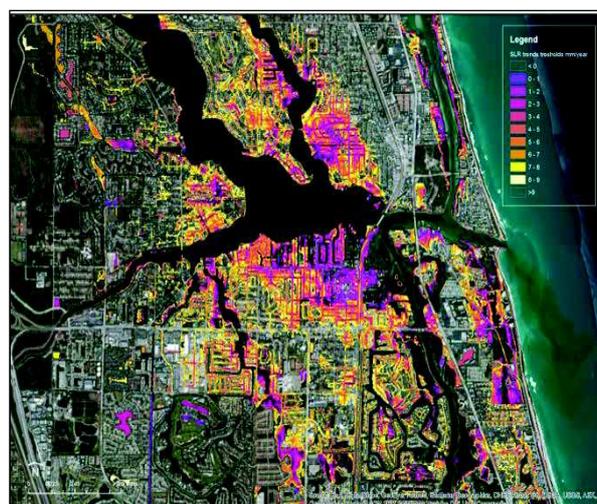


FIGURA 3. Mapa de tendencias necesarias para la inundación por celdilla a finales del siglo XXI en West Palm Beach.

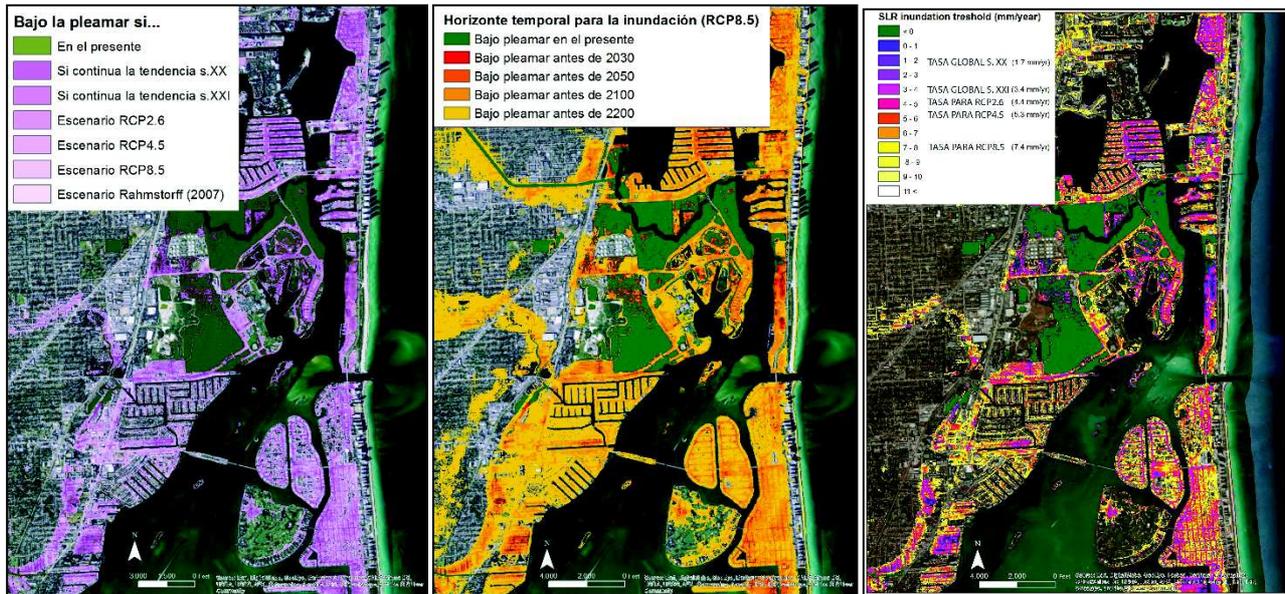


FIGURA 4. Resultados obtenidos en West Palm Beach County. A la izquierda, representación multisenario sobre el MDE. En el centro, umbral temporal para la inundación de cada celdilla. A la derecha, tasa necesaria para la inundación de cada celdilla del MDE antes del año 2100.

La aproximación que calcula el horizonte temporal de inundación se ha aplicado en otro tipo de estudios, vinculados al riesgo de avenidas fluviales o incluso riesgo sísmico. Además de por su expresividad cartográfica, aproximaciones semejantes deberían ser tenidas en cuenta desde el punto de vista del planeamiento urbano. Los resultados obtenidos para el escenario RCP8.5 indican incrementos leves en el área de estudio de Miami para mediados del siglo XXI, que solo son muy intensos a finales del siglo XXI y durante el siglo XXII.

La representación de las tasas de cambio del nivel del mar necesarias para inundar una celdilla requiere de un perfil más técnico para su interpretación, aunque su potencial de comunicación es notorio si se emplea una gama e intervalos adecuados (figura 3). Cabe destacar que más del 50% de las áreas coloreadas en la figura 4 quedarían inundadas a finales del siglo XXI bajo las tasas que se han observado en el período 1992-2014.

CONCLUSIONES

El trabajo realizado demuestra el potencial de la representación cartográfica sobre MDE, especialmente en el cálculo del riesgo de inundación permanente. Este potencial no es solo analítico (ofreciéndose nuevas variables a las comúnmente empleadas) sino de comunicación a la ciudadanía y opinión pública. Resulta conveniente, por tanto, ampliar los horizontes temporales de análisis de este tipo de estudios considerando todas las posibles fechas de inundación entre el presente y el año 2100, así como fechas posteriores.

Desde el punto de vista de la planificación espacial, es esencial contar con herramientas cartográficas que permitan desarrollar un adecuado conocimiento del

horizonte de la inundabilidad de cada punto de la superficie emergida, de cara a la autorización de determinados usos y actividades en el territorio.

Las áreas elegidas para el estudio, profundamente antropizadas y de muy baja altitud, muestran tener una excepcional exposición al fenómeno de la subida del nivel medio del mar, cuyas consecuencias serán evidentes en cortos plazos de tiempo. Los espacios potencialmente inundables que se deducen de los análisis realizados no solo son formaciones arenosas litorales, sino la mayor parte de las infraestructuras viarias y edificaciones de las ciudades de Miami y de West Palm Beach.

REFERENCIAS

- Fraile Jurado, P., Álvarez Francoso, J., Sánchez Carnero, N., Ojeda Zújar, J. (2013): Análisis comparativo de la exposición a la subida del nivel medio del mar de la playa y marismas de Valdelagrana (Cádiz). *Geotemas (Madrid)*. Vol. 14. Pag. 167-170
- IPCC (2013): *Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Purvis, M.J., Bates, P.D., Hayes, C.M., 2008. A probabilistic methodology to estimate future coastal flood risk due to sea level rise. *Coastal engineering*, 55(12), 1062-1073.
- Rahmstorf, S., 2007. A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise. *Science*, 315(5810), 368-370.
- Titus, J., Richman, C., 2001. Maps of lands vulnerable to sea level rise: modeled elevations along the U.S. Atlantic and Gulf Coasts. *Clim. Res.*, 18, 205-228.