

# Cartografía de inundaciones por subida de nivel del mar en las islas orientales de Canarias.

## *Mapping inundations by sea level rise in the Eastern Canary Islands.*

J. M. López-Torres<sup>1</sup>, P. Fraile-Jurado<sup>2</sup> y E. Sánchez-Rodríguez<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Geografía Humana, Universidad de Sevilla. C/ María de Padilla s/n CP 41004; [jlopez72@us.es](mailto:jlopez72@us.es)

<sup>2</sup> Departamento de Geografía Física y A.G.R., Universidad de Sevilla. C/ María de Padilla s/n CP 41004; [pfraile@us.es](mailto:pfraile@us.es)

**Resumen:** En este trabajo se presenta un análisis de las posibles inundaciones asociadas a diferentes escenarios de subida del nivel del mar para finales del siglo XXI en las islas orientales del archipiélago de Canarias. A diferencia de otros trabajos que suelen emplear datos procedentes de mareógrafo, se ha utilizado como fuente principal de información la altimetría por satélite. La principal ventaja de este tipo de datos estriba en que se trata de registros absolutos, por tanto libres de otros procesos asociados a fenómenos de componente vertical como sucede con los datos provenientes de mareógrafos. A partir de los resultados estadísticos obtenidos se ha realizado un análisis espacial asociando cada sector costero a su correspondiente celdilla de los datos provenientes de los registros de los satélites. Independientemente del escenario del IPCC de subida del nivel del mar elegido las morfologías arenosas, especialmente en los sectores costeros meridionales, muestran una elevada exposición al fenómeno de subida del nivel del mar.

**Palabras clave:** Subida del nivel del mar, Canarias, altimetría por satélite, análisis espacial, exposición.

**Abstract:** *The aim of this work is to analyze the potential inundations caused by sea level rise, which data have been obtained from different scenarios. This analysis has been made for the eastern Canary Islands. The main data sources for this study are the altimetry images from satellite observations that have been made since 1992 to the present. The main advantage of the use of this type of data lies on the fact that they are free of any vertical component, as it often occurs with the data from tidal gauges. A spatial analysis has been made from the obtained results, in which each coastal area has been associated to its satellite corresponding cell. Independently of the chosen IPCC scenario, sandy areas located at the southernmost regions of the islands show a high exposure to sea level rise phenomena.*

**Key words:** *Sea level rise, Canary Islands, satellite altimetry, spatial analysis, exposure.*

## INTRODUCCIÓN

El nivel medio mundial del mar se ha constatado como variable especialmente sensible al proceso de cambio climático. En este sentido, basta con citar datos publicados recientemente como la constatación de que el ritmo de la elevación del nivel del mar desde mediados del siglo XIX ha sido superior a la media de los dos milenios anteriores o que durante el período 1901-2010, el nivel medio global del mar se elevó 0,19 metros [0,17 a 0,21 metros] (IPCC, 2014). Generalmente se mencionan cuatro efectos directos sobre las áreas costeras: i) el incremento de los procesos de inundación permanente o mareal, ii) el aumento en la incidencia de temporales, iii) el agravamiento de los procesos erosivos, y iv) la salinización de acuíferos y aguas subterráneas. Desde un punto de vista humano, además, la cuestión se agrava al considerar que las zonas costeras susceptibles de verse directamente afectadas con una altitud por debajo de los 10 metros, albergan aproximadamente al 10% de la población mundial.

La necesidad de análisis de futuros escenarios de subida del nivel del mar en las zonas costeras ha sido

abarcada por diversos autores que remarcan el desafío que supondrá a lo largo del siglo XXI y el impacto potencial que podría sufrir el litoral. Supone un reto a escala mundial dada la discontinuidad, disponibilidad y variabilidad de los datos obtenidos de mareógrafos y sus métodos de aplicación a escala local, así como su implementación en la ordenación, gestión y planificación del territorio.

No obstante, un problema asociado a los registros provenientes de mareógrafos es la dificultad de discernir los movimientos verticales de estos de los cambios eustáticos, ya sea por efectos tectónicos, o simplemente por alzamientos o hundimientos de las infraestructuras sobre las que se asientan. Las series temporales de niveles del mar procedentes de satélites altimétricos se han planteado a menudo como una alternativa a este tipo de registros, al medir los cambios absolutos del nivel del mar. No obstante, su escasa duración ha hecho que hasta tiempos muy recientes no haya tenido sentido realizar predicciones a partir de sus series. Un problema adicional consiste en la dificultad de realizar predicciones con carácter local, teniendo en cuenta que los modelos de subida del nivel del mar con más

aceptación solamente ofrecen salidas para valores globales.

El objetivo de este trabajo consiste en estimar las áreas potencialmente inundables en las islas orientales de Canarias, a través del cálculo de las expectativas de cambio del nivel medio del mar en las presentando los resultados de tres escenarios de subida del nivel del mar. Para ello se emplearán los registros de los satélites altimétricos, cuya correlación con los registros globales ha demostrado ser sensiblemente superior a la obtenidas en los mareógrafos localizados en estas islas (Fraile et al. 2014).

## ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio elegida son las islas orientales de Canarias: Fuerteventura, Lanzarote y La Graciosa. Los motivos principales de la elección de esta zona son: 1) la existencia en esta zona de series temporales de satélites altimétricos de suficiente longitud y con solape temporal que permiten testar la metodología desarrollada para este trabajo; 2) el profundo conocimiento existente en la bibliografía de referencia sobre la geología de las Islas Canarias, que permite una información más precisa que en otros territorios sobre la neotectónica de las áreas.

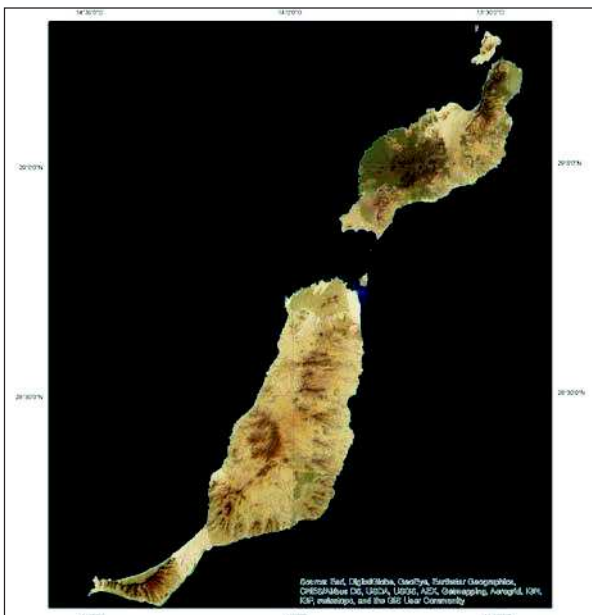


FIGURA 1: Norte a Sur: La Graciosa, Lanzarote y Fuerteventura.

Fuerteventura y Lanzarote se formaron a partir de un punto caliente de acuerdo con la teoría de mayor aceptación en la actualidad (Carracedo et al, 1998). Se tratan de las islas más antiguas de Canarias con 23 m.a. y 20 m.a. respectivamente. La formación de cada una de las islas es un proceso complejo compuesto por varias fases de magmatismo (Meléndez Hevia, 2004).

En las islas orientales se observa un fenómeno de ligera subsidencia relacionado con su antigüedad (Carracedo et al., 2002). No obstante, los rangos de

velocidades de cambio vertical de cada una de las islas resultan mínimos en comparación con las tasas de cambio del nivel medio del mar observadas en los océanos (IPCC, 2013) durante las últimas décadas, por lo que para los propósitos de este trabajo resultan despreciables.

## DATOS Y MÉTODOS Datos

Para el desarrollo de este trabajo se han empleado esencialmente dos tipos de datos:

- Imágenes de altimetría por satélite procedentes del Topex / Poseidon, Jason-1 y Jason-2, pertenecientes a la Agencia Espacial Europea (ESA). Estas imágenes, de libre uso, se han obtenido ya tratadas por el CU Sea Level Research Group de la Universidad de Colorado (Estados Unidos), que proporciona una serie temporal semanal con inicio en julio de 1992 y está permanentemente actualizada. La información así obtenida tiene una resolución espacial de 1°, y proporciona datos sobre la altura media de cada celdilla de 1° medida respecto a la superficie del geoide, presentando una precisión vertical de hasta 0,15 mm. La periodicidad de los datos adquiridos por estos sistemas de teledetección es semanal (Degnan, 1993), aunque para este trabajo se calcularon los promedios anuales, con el objetivo de equiparar la periodicidad de los registros a las de las otras fuentes de información.

- Modelo digital del terreno con paso de malla de 5 m, elaborado por el IGN mediante interpolación de modelos digitales del terreno procedentes del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). La precisión vertical de este modelo ha sido evaluada por el IGN en torno a 0,5 m de RMS.

El método aplicado se puede sintetizar en dos grandes apartados, consistentes en el análisis estadístico de las series de niveles del mar y el análisis espacial sobre el MDE empleado:

### Análisis estadístico

Se estimaron las expectativas locales de cambio del nivel del mar en las aguas de las Islas Canarias orientales mediante la extrapolación hacia el futuro de la relación lineal entre los registros recientes de niveles del mar y una serie temporal global integrada por registros de todos los mareógrafos del planeta, elaborada por Church y White (2012), empleando el método descrito en Fraile et al. (2014), alargando el análisis temporal de las series a 2014.

La relación reciente entre las series temporales global y cada una de las series locales representadas por los registros de los satélites altimétricos fue estimada mediante un modelo de regresión lineal simple, en el que la serie global se consideró como variable independiente y las series locales como dependientes. De este modo, se realizaron predicciones para cada celdilla de 1°x1° en el

entorno del área de estudio, obteniendo finalmente un valor de subida del nivel del mar para cada uno de los tres escenarios analizados.

Se realizó una estimación del error por celdilla a través de la integración del error de cada modelo de regresión lineal (entendido como el error medio cuadrático con un nivel de significación de 0,95) y el error asignado por el IPCC a cada uno de los escenarios empleados.

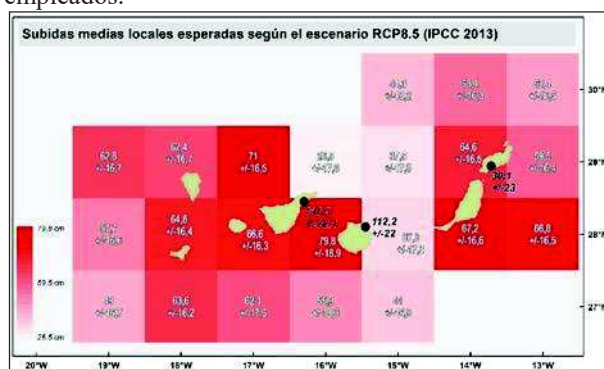


FIGURA 2. Expectativas de subida del nivel medio del mar en Islas Canarias en el periodo 2081-2100 (en cm) según el escenario RCP8.5 del IPCC (2013), y error asociado a cada celdilla para un nivel de confianza del 95% (modificado de Fraile et al. 2014).

Se generaron 7 superficies de inundabilidad, correspondientes a los tres escenarios del IPCC elegidos (RCP2.6, RCP4.5 y RCP 8.5) y sus correspondientes errores espaciales calculados (RCP26+, RCP4.5+ y RCP8.5+). Adicionalmente, se calculó la superficie inundable en la actualidad, para ser empleada como referencia a partir de la cual comparar el incremento de superficie inundable en el futuro con respecto a la actualidad.

## RESULTADOS

Los resultados finales obtenidos aparecen sintetizados en la tabla 1. Se han expuesto los resultados totales, por islas y en algunas playas singulares por su relevancia turística. Los resultados muestran incrementos de entre 200 y 500 ha. inundables para el conjunto de las islas. En términos relativos, esto supone incrementos de entre un 33% y un 62% de la superficie inundable por encima del cero local de cada isla, con respecto a la superficie inundable en el presente.

Fuerteventura resulta ser la isla con incrementos más significativos, oscilando entre un 40% y un 76% de la superficie inundable. En este sentido destacan las playas de Jandía, con incrementos que oscilarían entre el 51% y el 150% con respecto a la actualidad.

## Análisis espacial

		Presente	RCP2.6		RCP2.6+		RCP4.5		RCP4.5+		RCP8.5		RCP8.5+	
		ha.	ha.	inc (%)	ha.	inc (%)	ha.	inc (%)	ha.	inc (%)	ha.	inc (%)	ha.	inc (%)
<b>TOTAL</b>		746,7	996,1	33,4	1103,0	47,7	1043,6	39,8	1147,3	53,7	1147,9	53,7	1213,9	62,6
POR ISLAS	<b>FUERTEVENTURA</b>	370,2	520,9	40,7	578,3	56,2	546,7	47,7	603,1	62,9	604,3	63,2	644,8	74,2
	<b>LANZAROTE</b>	300,7	376,7	25,3	418,2	39,0	395,1	31,4	434,4	44,5	433,8	44,3	456,3	51,7
	<b>LA GRACIOSA</b>	64,8	82,6	27,4	89,6	38,1	85,7	32,2	92,1	42,0	92,0	41,8	94,8	46,2
	<b>LOBOS</b>	40,7	52,4	28,8	56,8	39,7	54,2	33,3	58,6	44,2	58,6	44,2	61,1	50,3
POR PLAYAS	<b>COSTA PAPAGAYO</b>	2,8	3,9	41,1	4,9	76,7	4,3	56,3	5,2	88,3	5,2	88,3	5,8	108,3
	<b>COFETE-BARLOVENTO</b>	7,2	9,3	29,2	10,5	45,4	9,9	36,8	11,1	53,3	11,1	54,0	11,6	60,9
	<b>JANDÍA</b>	26,9	51,8	92,8	58,9	119,2	55,1	105,3	61,7	129,7	62,0	130,8	67,2	150,5
	<b>LAS CONCHAS</b>	1,6	1,9	19,5	2,1	29,6	2,0	23,1	2,2	35,8	2,2	35,8	2,1	32,4
	<b>GRAN TARAJAL</b>	4,0	9,7	142,0	10,8	169,8	10,2	153,8	11,5	187,2	11,6	189,0	12,7	217,3

TABLA 1. Áreas inundables totales e incrementos relativos observados con respecto al total inundable en la actualidad.

Para testar la calidad de los resultados obtenidos y comprobar su adecuación se procedió a un análisis espacial sencillo de áreas inundables sobre el MDE. Se procedió a restar dos superficies: la superficie emergida, representada por el MDE, y la superficie de inundación, con un tamaño de celdilla de 1º y calculada como la suma entre las subidas calculadas localmente y la pleamar de coeficiente 1,17, registrada el 19 de marzo de 2011. Como resultado de este análisis se identificaron las celdillas del MDE potencialmente inundables (Fraile y Ojeda, 2012).

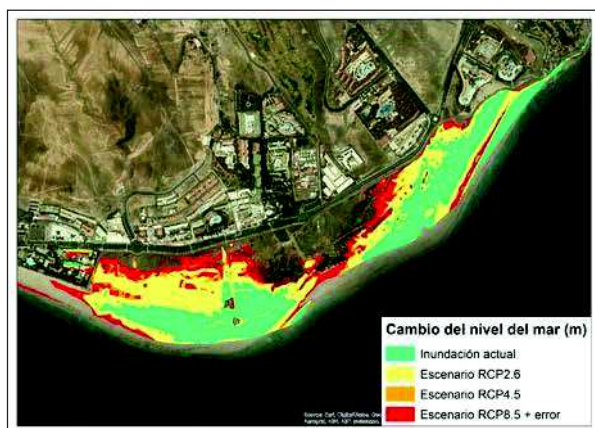


FIGURA 3: Punta del Matorral, Fuerteventura. Zonificación por escenarios futuros de áreas afectadas por el cambio del nivel del mar. Elaboración propia.

## DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en el análisis de los registros de satélites altimétricos, muestran un notable grado de coherencia interna, con valores muy parejos a los predichos por el modelo del IPCC en la mayor parte del área de estudio, tal y como se había señalado en trabajo recientes (Fraile et al., 2014), en los que es posible identificar diferencias internas, que de continuar, se plasmarían en cambios del nivel del mar del mismo signo pero de diferente rango en las aguas oceánicas, tal y como ha sido señalado por el IPCC (2013).

Los autores desean ser especialmente cautos con los resultados obtenidos, subrayando que el análisis espacial se ha realizado con intenciones más metodológicas que analíticas. Adicionalmente, la calidad del MDE empleado conlleva análisis notablemente pobres en su precisión vertical y resolución espacial, por lo que los resultados finales han de ser considerados bajo estas circunstancias. Asimismo, los autores son conscientes de los riesgos que entraña realizar este tipo de análisis espacial de inundabilidad en áreas naturales, donde los perfiles costeros, de no estar limitados por infraestructuras, podrían adaptarse a las nuevas condiciones hidrodinámicas. En este sentido cabe destacar que este tipo de trabajos deben ser entendidos como de la exposición de cada sector, y no estrictamente como predicciones de eventos futuros.

En cualquier caso, se observan dos elementos de notable interés: i) la constatación de que el incremento absoluto de las áreas inundables es relativamente escaso, tal y como cabe esperar en unas islas volcánicas de fuertes pendientes en sus áreas costeras, playas inclusive, y ii) que los incrementos relativos esperados para cada escenario están en consonancia con otros estudios (Fraile y Ojeda, 2012). No obstante, las diferencias espaciales observadas en cada celdilla de los registros de los satélites resultan demasiado tenues para

resultar observables en un territorio de las fuertes pendientes y escasa área como el elegido para el análisis.

## CONCLUSIONES

El análisis estadístico de los registros de los satélites altimétricos permite constatar que el fenómeno de la subida del nivel medio del mar presenta diferencias espaciales que han de ser tenidas en cuenta en los análisis de inundabilidad derivados de este tipo de datos.

Aparentemente, el impacto del incremento de subida del nivel del mar en el litoral estudiado es relativamente bajo, si bien cabría esperar que la combinación con otros fenómenos (aumento en la incidencia de temporales, de los procesos erosivos) incremente los aspectos negativos del mismo.

Es esperable que durante los próximos años se produzca una mejora significativa en varios aspectos que afectan a los datos empleados en este trabajo, como la difusión de MDE de mejor resolución y el lógico alargamiento de las series temporales de los satélites, lo que redundará en una mayor precisión de este tipo de análisis.

## REFERENCIAS

- Carracedo, J.C., Pérez Torrado, F.J., Ancochea, E., Meco, J., Hernán, F., Cubas, C.R. y Ahijado, A., (2002): *Cenozoic volcanism II: the Canary Islands*. Londres: The Geological Society
- Church, J.A. y White, N.J., (2011): *Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century. Surveys in Geophysics*, vol. 32 (4-5), 585-602.
- Degnan, J.J., 1993. Millimeter accuracy satellite laser ranging: a review. *Contributions of space geodesy to geodynamics: technology*, p. 133-162.
- Fraile Jurado, P. Sánchez Rodríguez, E., López Torres, JM, Fernández Díaz, M. y Pita López, MF. (2014): *Estimación del comportamiento futuro del nivel del mar en las Islas Canarias a partir del análisis de registros recientes. Geographicalia*, 66, 79-98.
- Fraile Jurado, P. y Ojeda Zújar, J., (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. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 12, 329-348.
- 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.