

Estudio sedimentario y fotogramétrico de la evolución reciente de la llanura mareal del Río San Pedro (Bahía de Cádiz, España)

Sedimentary and photogrammetric study on the recent evolution of the tidal flat from the Río San Pedro tidal channel (Cádiz Bay, Spain)

José Manuel Gutiérrez Mas, Santiago García-López, Jesús Manuel Ibáñez Ageitos y Orestes Hidalgo Huertas

Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Cádiz, Campus Río San Pedro, 11510-Puerto Real, Cádiz, España.
santiago.garcia@uca.es

ABSTRACT

Sedimentary evolution of the Cadiz Bay (SW Spain) is associated to numerous tidal deposits, which are very sensitive to climatic and eustatic changes. In fact, these have undergone significant changes from Late Holocene to Present-day. Recent climatic and sea-level changes have significantly modified the littoral environments, but the depositional effects of some factors have not yet been sufficiently established. This paper deals with the study of recent evolution of tidal flat from left bank from the Río San Pedro, by mean of sedimentary and photogrammetric analysis. The study has revealed that the tidal flat is receding at a rate of 0.65m/year, caused by hydrodynamic action of tidal currents and small waves, and favored by presence of abundant tidal pools situated on the tidal flat that have facilitated the erosion and dismantling of the tidal mud layer from the marsh edges.

Key-words: Cadiz Bay, orthophotography, tidal flat, coastline retreat, tidal pool.

Geogaceta, 54 (2013), 3-6.
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Introducción

La evolución de la Bahía de Cádiz (SO de España) está asociada al desarrollo de llanuras mareales localizadas en zonas internas protegidas, que son muy sensibles a los cambios y responden rápidamente a las variaciones climáticas y eustáticas. Desde el final del Holoceno, la Bahía de Cádiz ha experimentado cambios cuyos efectos han sido estudiados por diversos autores (Dabrio *et al.*, 1998; Gracia *et al.*, 1999; Dabrio *et al.*, 2000; Muñoz-Pérez *et al.*, 2001; Alvarez *et al.*, 2003; Lario *et al.*, 2002; Zazo, 2006; Gutiérrez-Mas *et al.*, 2009; Gutiérrez-Mas, 2011). En este trabajo se aborda el estudio de aspectos poco conocidos, como los factores que controlan la sedimentación en el margen izquierdo del Río San Pedro, me-

dante el análisis sedimentológico y fotogramétrico, con objeto de caracterizar estos procesos.

La zona de estudio está localizada en la costa atlántica andaluza, entre la desembocadura del Río Guadalquivir y el Cabo de Trafalgar (Fig. 1).

El régimen hidrodinámico está controlado por las mareas (Fig. 2A), que son de carácter semidiurno, con rango medio de 2,2 m, máximo de 3,7 m y mínimo de 0,65 m. El proceso dominante es el depósito de materia en suspensión y floculación, que da lugar a depósitos fangosos característicos.

Métodos

Las *campañas de campo*, consistieron en la exploración directa del terreno, toma

RESUMEN

La evolución sedimentaria de la Bahía de Cádiz (SO de España) está asociada al desarrollo de numerosas llanuras mareales, que son muy sensibles a los cambios climáticos y eustáticos. Estos medios han experimentado grandes modificaciones desde el final del Holoceno, que han causado la evolución morfológica de la zona. Sin embargo, algunos efectos de estos cambios no han sido suficientemente estudiados. En este trabajo se aborda la evolución reciente de la llanura mareal de la margen izquierda del Río San Pedro, mediante análisis sedimentario y fotogramétrico. El estudio revela que el borde de la llanura mareal retrocede a velocidad de 0,65m/año, debido a la acción erosiva de la corriente ma-real combinada con pequeñas olas, y favorecido por la presencia de charcos mareales que facilitan la erosión y el desmantelamiento del fango intermareal.

Palabras clave: Bahía de Cádiz, ortofotografía, llanura mareal, retroceso línea de costa, charcos mareales.

Fecha de recepción: 31 de enero de 2013
Fecha de revisión: 25 de abril de 2013
Fecha de aceptación: 24 de mayo de 2013

de datos y muestras de sedimentos y fósiles. El *análisis sedimentario* consistió en el levantamiento de perfiles y cortes geológicos, y secciones estratigráficas (Fig. 2B y C). El *trabajo de laboratorio* ha consistido en el análisis textural, determinación de frecuencias de tamaño de grano y análisis de la fracción arena a partir del tamizado mecánico. La *datación* del sedimento se ha realizado mediante el método del ¹⁴C en el Laboratorio de Datación de la Universidad de Granada, a partir de caparzones de moluscos presentes en las arenas del Pinar de La Algaída. La calibración se realizó con el Programa CALIB (Stuiver *et al.*, 1998). Los valores del Efecto Reservorio (ΔR) son los proporcionados por Monge-Soares y Matos-Martins (2010) ($\Delta R = -160 \pm 80$ para muestras entre 1.000 y 2.000 años de edad).

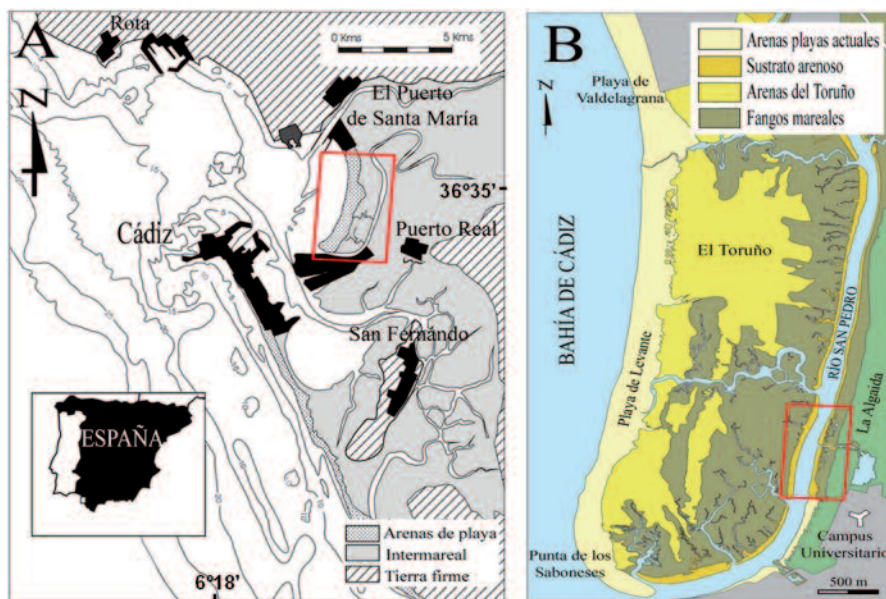


Fig. 1.- Situación de la zona de estudio. A) Mapa general. B) Cartografía sedimentaria y medioambiental del Río San Pedro.

Fig 1.- Location of the study area. A) General map. B) Sedimentary and environmental map of Río San Pedro.

El estudio fotogramétrico ha tenido por objeto el establecimiento de la evolución temporal de la llanura mareal, mediante análisis de ortofotografías digitales. Las imágenes proceden de REDIAM, Red de Información Ambiental de Andalucía de la Junta de Andalucía, Hoja 1061-4-4. Se eligieron imágenes de 9 fechas, según criterios de calidad geométrica y radiométrica y diversidad espectral. La corrección de desajustes posicionales entre fotogramas se realizó mediante transformación geométrica por el método de puntos de control, utilizando la imagen de 2008 como referencia. Finalmente se vectorizaron los límites de cubiertas y se realizó la superposición de tales elementos sobre la imagen de referencia (Fig. 3).

Tipos de sedimentos

La sección estratigráfica más representativa muestra la siguiente sucesión sedimentaria (Fig. 2B):

1. Arena fina gris oscura y de color pardo en fresco, con estratificación cruzada en surco. Espesor: 0,3 m.
2. Nivel bioclástico con conchas de *Glycymeris* y base erosiva, con valvas sueltas y articuladas de 2 a 5 cm y matriz gravoso-arenoso-bioclástica. Espesor: 0,25 a 0,3 m.
3. Capa arenosa-ferruginosa de color

rojizo, con algunas conchas. Espesor: 1 a 1,2 m.

4. Arena fangosa color pardo oscuro. Espesor: 0,7 a 1,3 m.

5. Arena gravoso-bioclástica con valvas de *Glycymeris* de 2 a 6 cm y matriz arenosa. Espesor: 0,4 m.

6. Arenas que soportan un suelo salitroso con vegetación y valvas dispersas. Espesor: 1 a 2 m.

7. En discordancia con estos materiales aparece un depósito de arena-fangosa y fango, representativo de la llanura mareal actual, en el que en sentido ascendente se observa (Fig. 2D y E): a) Arena bien clasificada color beige, con fragmentos de conchas. b) Arena-fangosa color gris con laminación paralela. c) Arena bioturbada por galerías de crustáceos rellenas de arena fangosa. d) Arena fangosa y fango. Espesor: 0,75 m.

Edad de los depósitos.- El nivel bioclástico inferior ha proporcionado una edad ^{14}C de 1.910 ± 60 años BP, una edad Calibrada de 1.637 ± 119 años BP y una edad Calendario de 313 ± 119 años DC. Otros niveles más altos han proporcionado edades Calendario de 559 ± 107 DC y 648 ± 108 DC. Dado que no se dispone de dataciones directas del fango, su edad se ha establecido a partir de su posición estratigráfica, pudiéndose afirmar que ésta es posterior al año 650 DC.

Facies y cubiertas fotogramétricas

A partir de los datos se han diferenciado 5 tipos de cubiertas:

1. *Sustrato arenoso.*- Predomina la fracción arena con contenidos del 99%. Aflora en el borde externo de la llanura mareal (Figs. 2 y 3) y en la parte interna de la marisma, allí donde ha desaparecido el fango suprayacente. No muestra cubierta vegetal, pero sí bioturbación por galerías.

2. *Fango intermareal.*- Fango arcilloso-limoso-arenoso de origen mareal, cubierto por tapetes algales. Ocupa desde el borde externo de la llanura mareal al límite de la pleamar media (Fig. 3). Presenta cohesión y está cubierto de vegetación halófila que protege al sedimento de la disgregación y arrastre. Hacia tierra disminuye el contenido en fango a favor de arena. Por encima de las zonas de pleamar muerta y media, el contenido en arena se incrementa, hasta alcanzar el 95%, debido a la proximidad del sustrato arenoso de la Algaida. Este hecho se pone de manifiesto también en la gradación de tono de gris o color que muestran las imágenes asociadas a variación del contenido en fango y vegetación.

3. *Charcas (tidal pools) y pequeños canales mareales (tidal creeks).* Charcos de tamaño variable, 0,5 a 200 m², que aparecen en la llanura mareal, entre la zona de bajamar media-baja, donde son más abundantes, y la zona de pleamar media-alta (Figs. 2A, 3 y 4). Están generalmente inundados, incluso en bajamar, aunque los más altos se inundan solo en pleamar viva. En época de lluvia recogen agua dulce, dando lugar a un medio peculiar, al menos respecto al resto de marisma que les rodea. Destacan en el terreno por la ausencia de vegetación, encharcamiento en bajamar, y presencia de algas.

4. *Llanura mareal alta.* Zona entre el límite de las pleamares media y viva. Constituida por arena fina fangosa cubierta de vegetación halófila, fundamentalmente matorral de *limoniastrum* (Fig. 3 y 4). Contenido en arena de 88 a 95%. La fracción grava es más abundante que en otros sectores, entre 3 y 19%, estando constituida por conchas de *Glycymeris* procedentes de la erosión de los niveles bioclásticos intercalados en las arenas de La Algaida.

5. *Arenas cubiertas por vegetación mediterránea.* Es la zona más alta no inundable en pleamar viva. Está constituida

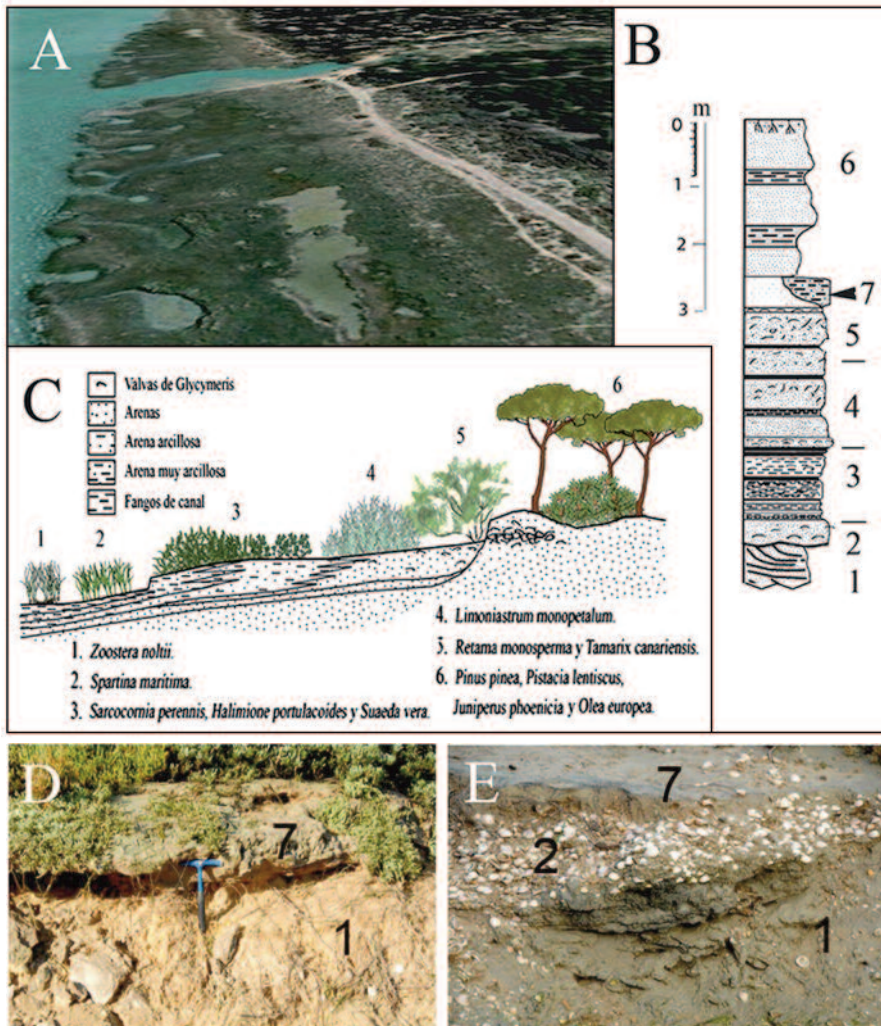


Fig 2.- A) Imagen de la llanura mareal. B) Sección estratigráfica representativa (niveles en texto). C) Perfil medioambiental. D) Contacto entre arenas finas de la Algaída y fango. E) Nivel bioclástico inferior (1), arenas (2) nivel bioclástico (7) fango mareal.

Fig 2.- A) Image of the tidal flat. B) Representative stratigraphic section (layers in text). C) Environmental profile. D) Contact between fine sands and tidal mud. E) Bioclastic lower layer (1), sands (2) bioclastic level (7) tidal mud.

por arenas cuarcíferas, con un 97,7% de arena, fijadas por el bosque mediterráneo del pinar de La Algaída (Fig. 3). Intercaladas en las arenas aparecen varios niveles bioclásticos. Representa el sustrato sobre el que se asienta la llanura mareal, siendo su principal fuente de arena. Aparentemente tienen estructura masiva, pero en detalle se observa laminación cruzada en surco que, junto al tamaño de grano, 0,18 mm, y un *sorting* de 0,55 (bien seleccionado) indican un origen eólico.

Evolución de la llanura mareal

Los datos indican la existencia de sectores donde predomina la erosión, puesta de manifiesto mediante el desmantelamiento de la capa fangosa que recubre la

marisma, así como por la pérdida de vegetación y exhumación del sustrato arenoso. Los datos fotogramétricos indican una disminución de extensión de la llanura mareal entre el año 1977 y el 2008, y un retroceso del límite distal de la marisma (Fig. 4). La tasa media de retroceso en estos años es de 0,65 m/año. Sin embargo, entre 1956 y 1977, la tasa de retroceso fue inferior; se observa incluso un incremento de fango en algunos sectores.

El proceso de pérdida de cobertura fangosa entre 1977 y 2008 se observa también en pequeños canales que drenan las zonas bajas de la marisma, apreciándose un incremento de anchura de sus cauces. También es visible en la desembocadura de canales secundarios que vierten al canal principal (Fig. 3). En estas zonas, el desmante-

lamiento del nivel fangoso produce la exhumación del sustrato arenoso y el ensanchamiento de las desembocaduras, donde se desarrollan pequeños deltas de reflujo, alimentados por las arenas exhumadas.

Respecto a los charcos, los datos indican que su tamaño y forma persisten en el tiempo, al menos en los últimos 50 años. Constituyen un factor decisivo en el proceso de retroceso de la llanura mareal. En el año 1977 el número de estos elementos de superficie superior a 0,5 m² era de 190, el mayor de 203 m², y la superficie ocupada de 1648 m², que representa el 6,7% de la superficie fangosa (Fig. 4C). En 2008, el número de elementos mayores que 0,5 m² fue 62, el mayor de 186 m², mientras que la superficie ocupada fue de 582 m², un 3,6% de la superficie mareal total (Fig. 4C).

Esta disminución de superficie ocupada por charcos y canales, no está relacionada con la reducción de su tamaño, ni por colmatación sedimentaria o colonización de plantas, sino con la erosión y desmantelamiento de la capa fangosa mareal. Cuando el frente erosivo alcanza la zona donde se encuentran los charcos, se produce un fuerte retroceso de ésta.



Fig 3.- Ortofotografía de 2008. Línea de contacto fango-arena: 1956 (negro), 1977 (morado), 1984 (azul), 1998 (cian), 2004 (verde) y 2008 (amarillo). Tipos de cubierta: 1) arena, 2) fango con vegetación halófila, 3) charcos y canales, 4) intermareal alto y 5) zona no inundable con vegetación mediterránea.

Fig 3. - Orthophotography of 2008. Mud-sand contact line: 1956 (black), 1977 (purple), 1984 (blue), 1998 (cyan), 2004 (green) and 2008 (yellow). Landcover types: 1) sand, 2) mud and halophyte vegetation, 3) tidal pools and creeks, 4) high intertidal zone and 5) unflooded zone and mediterranean vegetation.

Factores de control

Los datos indican una progresiva disminución de la anchura de la llanura mareal,

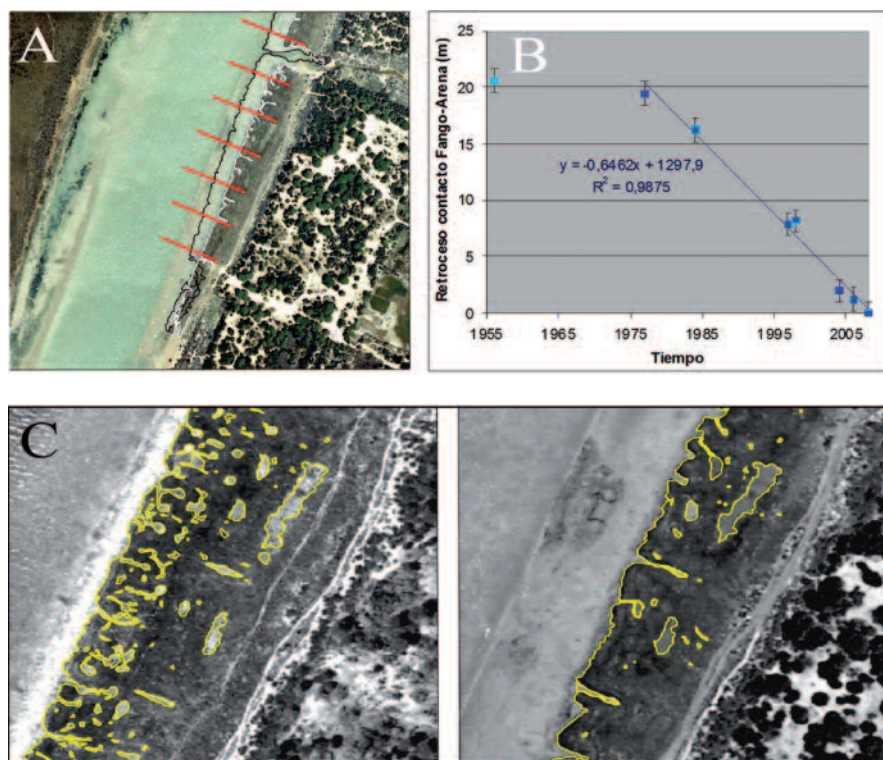


Fig. 4.- A) Transectos usados en la medida del retroceso del límite de la llanura mareal sobre la imagen de referencia (2008). Línea blanca: límite en 2008, Línea negra: límite en 1956. B) Evolución del retroceso medio entre 1955 y 2008. C) Evolución de charcas y canales entre 1977 (izquierda) y 2008 (derecha).

Fig. 4.- A) Transects used to measure the decrease of the tidal flat limit on the reference image (2008). White line: limit in 2008, Black line: limit in 1956. B) Retreat between 1955 and 2008. C) Evolution of ponds and creeks between 1977 (left) and 2008 (right).

por acción combinada de la corriente mareal y el pequeño oleaje, que dan lugar al desmantelamiento de la cubierta fangosa (Fig. 4). Este proceso se produce preferentemente en los flancos de la marisma expuestos a la corriente, donde la protección vegetal frente a la disgregación y el arrastre es menor, tal y como sucede en el borde distal de la llanura mareal y en la desembocadura de los canales mareales secundarios.

Otros factores que controlan el retroceso de la marisma, además de la acción hidrodinámica, son: a) pequeño espesor de la capa de fango, que facilita la erosión, el desmantelamiento y la rápida exhumación del sustrato arenoso; b) baja tasa de aportes de materia en suspensión de origen mareal, que impide la reposición y crecimiento de fango; c) relativa alta tasa de aportes de arena, procedentes de la erosión del sustrato de la Algaida, que incrementa el carácter arenoso de estos fangos; d) presencia de charcos y canales que facilitan la erosión y retroceso de la marisma.

La diferente tasa de retroceso detectada entre los periodos de 1956 a 1977 y de 1977 a 2008 (Fig. 4), puede estar relacionada con la presencia de estas morfologías, de forma que el retroceso más ralentizado observado en el primer periodo, quizás se corresponda con una etapa en la que la llanura mareal era más extensa y los charcos mareales menos numerosos, lo que ralentizaría el retroceso de la llanura mareal, al minimizar el efecto de la erosión. Más tarde, al alcanzar el frente erosivo la zona de mayor abundancia de charcos, la erosión de los fangos y la velocidad de retroceso de la marisma se incrementaron de forma considerable.

Conclusiones

El análisis sedimentario y fotogramétrico de la ribera del Río San Pedro, indica la acción de procesos erosivos que causan el desmantelamiento de la capa fangosa que recubre la marisma, así como la pérdida de vegetación halófila y la exhumación del sus-

trato arenoso. La tasa de retroceso es de 0,65 m/año entre 1977 y 2008, en un proceso que se produce preferentemente en los flancos de la marisma expuestos a la corriente mareal. Sin embargo, entre 1956 y 1977, la tasa de retroceso fue menor, observándose incluso incrementos locales del depósito de fango. Otros factores que controlan este retroceso son: el pequeño espesor de la capa de fango, que facilita su erosión, la baja tasa de aportes de materia en suspensión, que impide la recuperación del fango, alta tasa de aportes de arena, y presencia de charcos y canales mareales que facilitan la erosión y el retroceso de la llanura mareal.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Proyecto GL2010-16878 del Ministerio de Ciencia e Innovación (España /FEDER).

Referencias

- Alvarez, O., Tejedor, B., Tejedora, L. y Kaganc, B.A. (2003). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 58, 805–812.
- Dabrio, C.J., Goy, J.L. y Zazo, C. (1998). *Geogaceta* 23, 31–34.
- Dabrio, C.J., Zazo, C., Goy, J.L., Sierro, F.J., Borja, F., Lario, J., González, J.A. y Flores, J.A. (2000). *Marine Geology* 162, 381–404.
- Gracia, F.J., Alonso, C., Gallardo, M., Giles, F., Benavente, J. y López Aguayo, F. (1999). *Geogaceta* 27, 71–74.
- Gutiérrez-Mas, J.M. (2011). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 92, 546–554
- Gutiérrez-Mas, J.M., López Arroyo, J. y Morales, J.A. (2009). *Earth Surface Processes and Landforms* 34, 810–823.
- Lario, J., Zazo, C., Goy, J.L., Dabrio, C.J., Borja, F., Silva, P.G., Sierro, F., González, A., Soler, V. y Yll, E. (2002). *Quaternary International* 93–94, 171–176.
- Monge-Soares, A. y Matos-Martins, J.M. (2010). *Quaternary International* 221, 9–12.
- Muñoz-Pérez, J.J., De la Casa, A. y Enríquez, J. (2001). *Ingeniería Civil* 123, 71–81.
- REDIAM (Red Información Ambiental de Andalucía, Junta de Andalucía) (2012). Ortofotografía Digital Hoja 1061-4-4. <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/rediam>
- Stuiver, M., Reimer, P.J. y Braziunas, T.F. (1998). *Radiocarbon* 90, 1127–1151.
- Zazo, C. (2006). *Cuaternario y Geomorfología* 20, 115–130.