

# Optimización de las regeneraciones de playa mediante el estudio de la variación de la densidad de la arena

## *Study of sand density variation to achieve beach nourishment optimization*

J. Román-Sierra<sup>1</sup>, M. Navarro-Pons<sup>1</sup>, G. Gómez-Pina<sup>2</sup>, A. Ruiz-Cañavete<sup>1</sup> y Juan J. Muñoz-Perez<sup>1</sup>

1 Dpto. de Física Aplicada, Grupo de Investigación de Ingeniería Costera (RNM-912), Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, Universidad de Cádiz. Polígono Universitario Río San Pedro, s/n. 11510 Puerto Real (Cádiz). jorge.roman@uca.es; marina.navarro@uca.es; antonio.ruiz@uca.es; juanjose.munoz@uca.es.

2 Demarcación de Costas Andalucía-Atlántico, Dirección Gral. de Sostenibilidad de la Costa y del Mar, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. C/ Marianista Cubillo, 7. 11008 Cádiz. ggomez@magrama.es.

**Resumen:** Para reducir la erosión costera, las regeneraciones de playas han desempeñado un papel fundamental en la protección de la costa a nivel mundial. Muchos países invierten grandes cantidades de dinero en este tipo de actuaciones pese a las consecuencias económicas, sociales y ambientales. A pesar de las numerosas investigaciones realizadas respecto a la eficiencia de las regeneraciones de playa, existen aspectos técnicos que aún no han sido investigados. Con el fin de estudiar la variación de volumen de arena tras una regeneración de playa, en este estudio, se describe una técnica rápida y novedosa para medir in situ la densidad de la arena mediante un densímetro nuclear. Junto a estas medidas, se han desarrollado análisis granulométricos y levantamientos topográficos en diferentes playas de la provincia de Cádiz. Tras las regeneraciones, se han apreciado importantes diferencias de nivel del terreno debidas, en parte, a la variación de la densidad y porosidad de la arena. Desde un punto de vista técnico y económico, la metodología descrita y los resultados expuestos pueden ser útiles para estimar el volumen de arena preciso en regeneraciones de playas similares.

**Palabras clave:** Densidad; porosidad; arena de playa; regeneraciones de playa, tamaño de grano.

**Abstract:** *In order to reduce coastal erosion, beach nourishment plays an important role in coastal protection around the world. Many countries spend a lot of money in relation to these activities in spite of economical, social and environmental consequences. Despite existing researches on nourishment efficiency, there are some technical aspects that have not been still researched. With the aim of studying the sand volume variation after beach nourishment works, a fast and novel application has been described herein in order to measure sand beach density in-situ through a nuclear densimeter. In the same way, grain size analysis and topographic levelling have been performed at different beaches in the province of Cadiz (SW of Spain). After the nourishment activities, significant differences of levelling have been registered due in part to density and porosity sand variations. From a technical and economical point of view, the applicability of the methods and results published in this paper can be very useful to estimate an accurate sand volume for other similar beach nourishment projects.*

**Key words:** *Density; porosity; sand beach; beach nourishment; grain size.*

## INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Durante los últimos decenios, las zonas costeras de todo el mundo han sido muy demandadas como zona de construcción y residencia. El interés en esta área ha ido creciendo hasta el punto de que, casi la mitad de la población de países europeos con borde litoral, está localizado en regiones costeras (Eurostat, 2009). Esta ocupación de la franja costera ha ido acompañada de importantes cambios en la morfología de la línea de costa, siendo la regresión costera el factor más destacable de todos ellos.

Para mitigar los procesos de erosión costera, que afectan a la costas con asentamientos humanos, las regeneraciones de playa periódicas se presentan como una estrategia alternativa en muchas zonas del mundo para favorecer la protección y restauración de playas y

dunas con aceptables impactos ambientales (Hanson et al. 2002; Román-Sierra et al. 2011). Dichas actuaciones no están exentas de controversia social, económica y ambiental en cuanto a la eficacia a corto, medio y largo plazo de las regeneraciones de playa.

Con el objetivo de minimizar los impactos ambientales y los costes económicos, debidos al aporte de arena en playas, se han desarrollado diversas investigaciones para valorar la gestión técnica y económica de las erosiones y regeneraciones de playas (Muñoz-Perez et al. 2001; Gómez-Pina et al. 2006), así como la metodología y control de playas y sistemas dunares costeros (Navarro et al. 2011). En este sentido, además de conseguir el equilibrio del perfil de playa, su evolución volumétrica es de gran interés, especialmente el volumen de arena resultante tras la regeneración (Dean, 2002).

Los cambios volumétricos de la playa, después de una regeneración, pueden llegar a apreciarse claramente por la sociedad, dando la impresión de que gran parte de la arena vertida y su coste económico “se ha perdido” inmediatamente. Dichos cambios volumétricos han sido ampliamente estudiados mediante topografía y batimetría, pero hasta la fecha, no se han analizado los cambios de porosidad interna del sedimento de una playa antes, durante y después de una regeneración. Este esponjamiento del volumen de sedimento, tras el vertido masivo y la disposición desordenada de los granos de arena, se muestra como una posible causa de esta variación volumétrica.

La compactación del sedimento es un parámetro relevante para la predicción de la porosidad y permeabilidad. Una consideración importante es el volumen relativo que ocupa el sedimento dentro del volumen total de playa, lo que da una idea de la percolación-drenaje del agua de mar. Este volumen es cuantificado mediante la concentración de grano o la porosidad, estando ambos ampliamente relacionados con la forma geométrica, la disposición espacial y el tamaño medio de grano.

La presente investigación ha sido especialmente diseñada para evaluar los cambios ocurridos en la densidad de la masa de arena, en los primeros 30 centímetros de profundidad. Los procesos más importantes de filtración de agua ocurren en este sistema, estableciendo algunos autores que la profundidad de removilización de la arena, debida al oleaje de verano, es inferior a 22 centímetros (Anfuso, 2005), aunque en algunos puntos el efecto de la marea pueda ser algo superior (Muñoz-Perez y Medina, 2000).

De este modo, el principal propósito de este estudio es describir una técnica precisa, rápida y novedosa para medir in situ la densidad de la arena de playa a través de un densímetro nuclear. Esta aplicación proporciona una estimación real de los cambios volumétricos del perfil de playa, debido a variaciones en la densidad y porosidad de la arena, justamente después de la regeneración. Simultáneamente al densímetro, se han desarrollado análisis granulométricos y levantamientos topográficos. El seguimiento posterior de todos estos parámetros, a medio y largo plazo, ha servido para estudiar la estabilidad del perfil de playa debido a la influencia de factores naturales como las mareas, el oleaje y los temporales.

## ZONA DE ESTUDIO

El marco geológico donde se han desarrollado los estudios está localizado en la provincia de Cádiz (Fig. 1). Las zonas estudiadas son las playas de la Victoria (T.M. de Cádiz), Camposoto (T.M. de San Fernando) y Atunara (T.M. de La Línea de la Concepción), compuestas mayoritariamente por cuarzo y algo de

bioclastos. Las playas de la Victoria y Camposoto están orientadas al océano Atlántico, con un régimen mesomareal y compuestas por arenas medias. Aunque próximas entre sí, la primera tiene un paseo marítimo anexo a la playa, mientras que la segunda tiene un sistema dunar. En cuanto a la playa Atunara, situada dentro del mar Mediterráneo, está sometida a un régimen micromareal y está compuesta por arenas medias y gruesas. Cuenta con un paseo marítimo a lo largo de la playa, además de diversos espigones perpendiculares a la línea de playa.

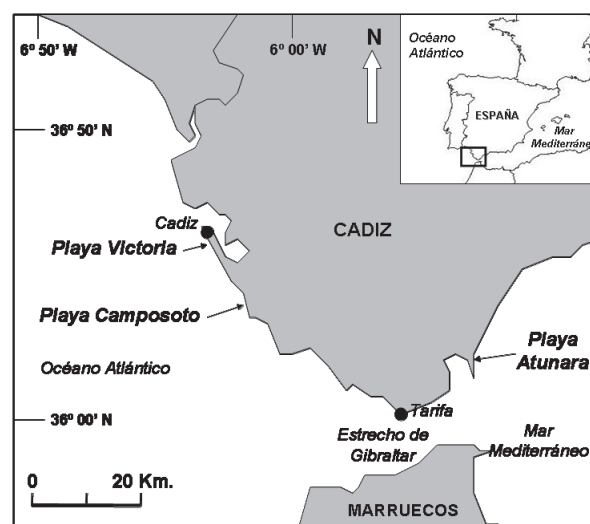


FIGURA 1. Localización de las playas estudiadas.

## METODOLOGÍA

Diversos autores han medido la densidad y porosidad de arenas no consolidadas mediante diferentes metodologías, pero la mayoría asumían errores en la medición debido a perturbaciones del sedimento debido a la cata y transporte al laboratorio. El método del densímetro nuclear, utilizado en esta investigación, está considerado como una técnica no destructiva del suelo, midiéndose la densidad de forma rápida y directa sin alterar la estructura natural de los granos de arena. Este aparato es usado normalmente en el control de compactación de áridos en la construcción de carreteras. Resumidamente, para medir la densidad, el dispositivo usa la interacción de la radiación gamma con la materia mediante transmisión directa. El aparato determina la densidad del material mediante el conteo del número de fotones emitidos por una fuente radiactiva de Cesio 137, que llegan hasta el detector situado en la base del medidor (Fig. 2). Asimismo, el aparato mide el porcentaje de agua a partir de la variación de la velocidad de los neutrones de hidrógeno.

Con el propósito de tener un valor de referencia, paralelamente se ha tomado una muestra de arena suficiente para realizar en el laboratorio un ensayo Proctor Modificado, el cual nos determinará el valor máximo alcanzado de densidad de la arena en un porcentaje óptimo de humedad.

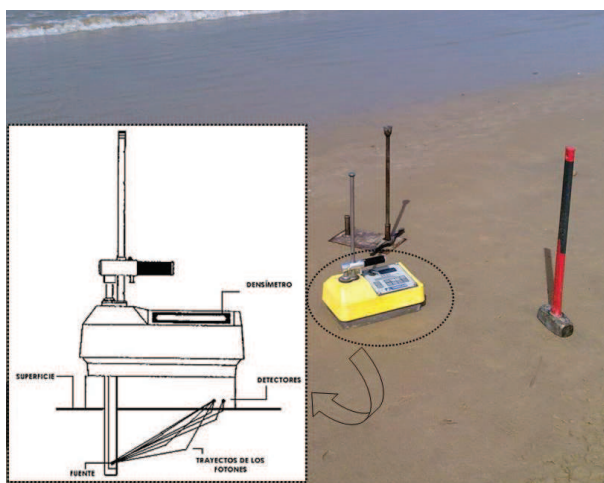


FIGURA 2. Imagen del densímetro nuclear, midiendo en la playa. Se acompaña de un croquis de emisión de radiación desde la fuente emisora hasta el receptor colocado en la base del densímetro.

La toma de datos de densidad, topografía y muestras de arena se realizó de manera simultánea antes de la regeneración de las playas, justo después y posteriormente en campañas sucesivas, hasta completar al menos un año de seguimiento. En cada playa, se trazaron 2 perfiles transversales (P1 y P2) con tres puntos de medida en cada uno de ellos (Fig. 3): playa alta o supramareal (A), zona media o intermareal (M) y zona baja en bajamar (B).

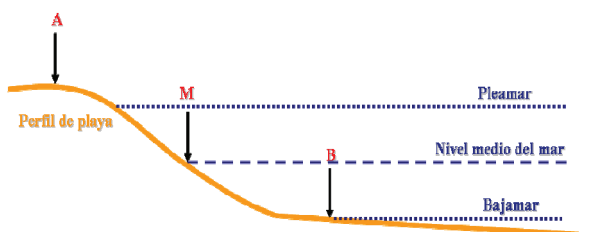


FIGURA 3. Esquema del perfil transversal de playa y zonas de muestreo: A (supramareal), M (intermareal) y B (bajamar).

Las muestras de arena se analizaron mediante granulometría por tamizado en seco según Román-Sierra et al. (2013). La topografía se realizó mediante GPS Diferencial y Estación Total, con un rango de precisión espacial centimétrico. Los datos de oleaje fueron obtenidos de la base de datos de la web de Puertos del Estado (2012). La precisión del densímetro nuclear se estimó en base a dos factores: la homogeneidad de la arena a medir y la repetitividad del propio aparato. Para el primer caso, se midieron varios puntos dentro de una parcela de  $1 \text{ m}^2$ . Para el segundo, se midió consecutivamente el mismo punto varias veces. Todos estos ensayos se realizaron en la playa de Camposoto.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Debido a la sucinta extensión de este resumen, todos los resultados obtenidos de densidad, humedad, tamaño medio de grano, porosidad, compactación,

densidad máxima, humedad óptima, topografía, etc, se efectuará durante la presentación oral. Aquí se tratará de resumir los aspectos más significativos de cada una de las playas estudiadas.

Según los ensayos realizados de precisión, el máximo error relativo cometido por el densímetro nuclear, debido a la variabilidad del estado natural del terreno (húmedo, seco...), está en torno al 3%, mientras que el error relativo cometido por la propia metodología del aparato, es del 1%. Según la bibliografía consultada, algunos autores han considerado que la densidad de la masa de arena seca por unidad de volumen se encuentra entre  $1.650$  y  $1.950 \text{ kg/m}^3$  (Roberts et al. 1998). En el caso de la playa de la Victoria, la regeneración tuvo lugar durante el mes de agosto de 2010. El rango máximo de variabilidad de la densidad natural de la arena, a lo largo de todas las campañas, fue de  $\pm 227 \text{ kg/m}^3$  ( $1.759$ - $1.532 \text{ kg/m}^3$ ). Justo tras la regeneración de la playa, se registró una disminución de la densidad en torno al -6% ( $-104 \text{ kg/m}^3$ ) en el punto M del perfil 1 (P1M) (Fig. 3). La cota del nivel del terreno se vio aumentada hasta +1,08 m, como consecuencia del vertido de arena y en parte a la disminución de la densidad. Este efecto de esponjamiento fue reducido por las primeras mareas y especialmente por las vivas equinocciales, aumentando la densidad +6% y reduciendo en parte la cota del terreno -1,05 m. La granulometría de la muestra maestra de la playa Victoria para todas las campañas no experimentó grandes cambios, registrando un tamaño medio de  $0,24 \text{ mm}$ .

En el caso de la playa de Camposoto, con un tamaño medio de grano de  $0,26 \text{ mm}$ , la densidad tuvo una disminución máxima del -14% ( $-261 \text{ kg/m}^3$ ) en el P1A, justo tras la regeneración y con un aumento máximo del nivel del terreno de +1,67 m. A pesar de los temporales registrados en la boya del Golfo de Cádiz, únicamente el efecto de las mareas vivas equinocciales provocó un aumento máximo de la densidad superior al +11% en el P1M, un mes después del vertido. Dicho aumento de densidad se vio reflejado, en parte, en una compactación máxima del terreno hasta alcanzar casi valores originales ( $-1,53 \text{ m}$ ).

La playa de la Atunara, en cambio, está compuesta por una arena medio-gruesa, con un tamaño medio de grano de  $0,49 \text{ mm}$ . En este tipo de arena, se registraron importantes descensos de la densidad, justo tras la regeneración, en la zona submareal, alcanzando una disminución de  $-246 \text{ kg/m}^3$  y un aumento asociado del nivel del terreno de +1,07 m. Únicamente, tras ocho meses, con el paso de varios temporales y diferentes oleajes, la densidad de la arena y la cota del terreno volvieron a valores similares a los originales.

## CONCLUSIONES

En este estudio, se ha demostrado la posibilidad de medir in situ y de forma precisa la densidad y

porosidad del volumen de arena de una playa, a través de un densímetro nuclear. Esta novedosa aplicación es rápida, fiable y no altera la estructura del suelo.

Con el estudio y seguimiento de las variables apropiadas, se pueden determinar diferentes niveles de compactación de la arena, así como la variabilidad de la densidad asociada a movimientos de arenas.

En las playas estudiadas, se ha demostrado que las diferencias apreciadas en las cotas del nivel del terreno tras una regeneración de playa son debidas en parte a la variación de la densidad y porosidad de la arena. Esta variación provoca un efecto de esponjamiento-compactación de la arena a diferentes escalas temporales.

Tras el aumento de volumen, debido al vertido de arena durante las obras, y a la disminución de la densidad por la disposición desordenada de los granos de arena, se ha comprobado que el efecto de compactación y reorganización de los granos de arena por parte de las mareas y oleaje tipo swell es suficiente, sin necesidad de temporales. No obstante, se deberían ampliar las investigaciones para conocer el papel que juegan la forma del grano en esta reorganización, así como su disposición aleatoria tras el vertido y su posterior seguimiento espacio-temporal. También se deberían considerar los efectos a corto plazo de otros factores hidrodinámicos en la zona mareal, como las corrientes, resacas, deriva litoral, etc.

Desde el punto de vista técnico y económico, la metodología descrita y los resultados expuestos pueden ser útiles para estimar de un modo más preciso el volumen de arena necesario para conseguir la regeneración proyectada en cada tipo de playa.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer expresamente a todo el personal de la Demarcación de Costas en Cádiz por su trabajo y apoyo. Asimismo, se agradece también a todo el personal en prácticas que colaboró en la tediosa labor de toma de datos, no importara la hora o las condiciones meteorológicas.

## REFERENCIAS

Anfuso, G. (2005): Sediment-activation depth values for gentle and steep beaches. *Marine Geology*, 220: 101-112.

- Dean, R.G. (2002): *Beach nourishment: theory and practice*. Advanced Series on Ocean Engineering. World Scientific, Singapore. 399 pp.
- Eurostat (2009): *Nearly half of the population of EU countries with a sea border is located in coastal regions*. Statistics in Focus 47/2009. European Commission, 12 pp. ISSN 1977-0316.
- Gómez-Pina, G., Fages, L., Ramírez, J. L., Muñoz-Pérez, J. J., and Enriquez, J. (2006): A critical review of beach restoration projects in the northern coast of Cadiz (Spain) after thirteen years. En: *30th Int. Conf. on Coastal Engineering, ASCE, Reston, VA*. Comunicaciones: 4167-4178.
- Hanson, H., Brampton, A., Capobianco, M., Dette, H.H., Hamm, L., Laustrup, C., Lechuga, A., Spanhoff, R. (2002): Beach nourishment projects, practices, and objectives – a European overview. *Coastal Engineering*, 47: 81-111.
- Muñoz-Perez, J.J. and Medina, R. (2000). Profile changes due to a fortnightly tidal cycle. En: *Int. Conf. on Coastal Engineering (ASCE)*, Sydney. Comunicaciones: 3063-3075.
- Muñoz-Perez, J.J., Lopez, B., Gutierrez-Mas, J.M., Moreno, L., Cuenca, G.J. (2001): Cost of Beach Maintenance in the Gulf of Cadiz (SW Spain). *Coastal Engineering*. 42: 43-153.
- Navarro, M., Muñoz-Perez, J.J., Román-Sierra, J., Tsoar, H., Rodríguez, I., Gómez-Pina, G. (2011): Assessment of highly active dune mobility in the medium, short and very short term. *Geomorphology* 129 (1-2): 14-28.
- Puertos del Estado (2012). Oceanografía y meteorología. www.puertos.es.
- Roberts, J., Jepsen, R., Gotthard, D., and Lick, W. (1998): Effects of Particle Size and Bulk Density on Erosion of Quartz Particles. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(12): 1261-1267.
- Román-Sierra, J., Navarro, M., Muñoz-Pérez, J.J. and Gómez-Pina, G. (2011): Turbidity and other effects resulting from Trafalgar sandbank dredging and Palmar beach nourishment. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 137 (6): 332-343.
- Román-Sierra, J., Muñoz-Perez, Juan J., Navarro-Pons, M. (2013). Influence of sieving time on the efficiency and accuracy of grain-size analysis of beach and dune sands. *Sedimentology* (in press). doi: 10.1111/sed.12040.