



## **TESIS DOCTORAL**

# **Variabilidad de los diferentes parámetros granulométricos de la arena dragada en cántara y su aplicabilidad a la regeneración de playas**

Autor: Patricio Poulllet Brea

Director de la tesis: Dr. Juan José Muñoz Pérez



## TABLA DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS .....	5
RESUMEN.....	8
SUMMARY .....	12
<b>1. INTRODUCCION y OBJETIVOS.....</b>	<b>16</b>
<b>1.1 Introducción.....</b>	<b>16</b>
<b>1.2 Razones de la pertinencia de esta investigación .....</b>	<b>16</b>
<b>1.3 Hipótesis planteadas.....</b>	<b>16</b>
<b>1.4 Objetivos generales .....</b>	<b>17</b>
<b>1.5 Objetivos específicos.....</b>	<b>17</b>
<b>2. ESTADO DEL ARTE: ANÁLISIS CRÍTICO DE LOS ANTECEDENTES .....</b>	<b>19</b>
<b>3. INFLUENCIA DE LOS DIFERENTES MÉTODOS DE TAMIZADO EN LA ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE TAMAÑO DE ARENA .....</b>	<b>24</b>
<b>3.1 Introducción.....</b>	<b>24</b>
<b>3.2 Zona de estudio.....</b>	<b>27</b>
<b>3.3 Metodología.....</b>	<b>29</b>
<b>3.4 Resultados y Discusión.....</b>	<b>31</b>
3.4.1 <i>La mediana del tamaño de grano o <math>D_{50}</math> .....</i>	<i>31</i>
3.4.2 <i>Desviación típica o sorting .....</i>	<i>32</i>
3.4.3 <i>Skewness.....</i>	<i>32</i>
3.4.4 <i>Kurtosis .....</i>	<i>34</i>
3.4.5 <i>Porcentaje de bioclastos o conchas .....</i>	<i>34</i>
3.4.6 <i>Tabla resumen.....</i>	<i>34</i>
<b>4... VARIABILIDAD DEL TAMAÑO DE ARENA DENTRO DE LA CÁNTARA DE UNA DRAGA .....</b>	<b>38</b>
<b>4.1 Introducción.....</b>	<b>38</b>
<b>4.2 Zona de estudio.....</b>	<b>41</b>
<b>4.3 Metodología.....</b>	<b>42</b>
<b>4.4 Resultados y Discusión.....</b>	<b>46</b>
4.4.1 <i>Muestreo con la cuchara Van Veen .....</i>	<i>46</i>
4.4.2 <i>Muestreo con los tubos core.....</i>	<i>47</i>
4.4.3 <i>Comparación entre los resultados de la cuchara Van Veen y los cores versus los datos originales del fondo del mar en la zona de préstamo. ....</i>	<i>49</i>
<b>5. CONCLUSIONES .....</b>	<b>52</b>
<b>5.1 Sobre la influencia de los métodos de tamizado .....</b>	<b>52</b>

<b>5.2 Sobre la variabilidad del tamaño de la arena dentro de la cántara.....</b>	<b>53</b>
<b>5.3 Futuras líneas de actuación. ....</b>	<b>54</b>
BIBLIOGRAFIA.....	57
ANEXOS.....	67
ANEXO I. Publicaciones y ponencias. ....	69
ANEXO II. Granulometrías tamices diferentes. ....	91

## **AGRADECIMIENTOS**

## AGRADECIMIENTOS

En todo trabajo de investigación participan numerosos agentes, personas e instituciones, que gracias a su participación, llega a buen término.

Esta tesis doctoral no es una excepción. De ahí, que deseo expresar mi más sincero agradecimiento a quienes directa o indirectamente han participado, colaborado o hecho posible su ejecución.

En primer lugar, agradezco a mi director de tesis, el Dr. Juan José Muñoz Pérez, su generosidad y ayuda permanente y, fundamentalmente, la infinita paciencia que me ha mostrado en todo momento.

De manera especial, quiero expresar mi más sincero agradecimiento al equipo del Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Cádiz que, con su colaboración en campo, ha hecho posible este trabajo de investigación.

En tercer lugar a mis compañeros de la Demarcación de Costas de Andalucía Atlántico, por su comprensión, especialmente al Dr. Gregorio Gómez Pina, por procurar transferirme de forma altruista todo su conocimiento.

Igualmente, un agradecimiento especial a la institución a la que pertenezco, la Dirección General de la Costa y el Mar, que ha permitido, facilitando las condiciones necesarias, llevar a cabo la obtención de los datos requeridos para que esta tesis vea la luz; esperando poder contribuir con este trabajo a la mejora del conocimiento de los procesos de regeneración y realimentación de playas, devolviendo así parte de lo recibido.

Por supuesto, a mis padres, por ser quien soy. A mi padre, a pesar de su pronta pérdida, por sus sabios consejos, que me ayudaron siempre a seguir adelante. A mi madre, por su apoyo y cariño incondicionales en todas las acciones que he emprendido a lo largo de mi vida. Agradecimiento que hago extensivo a toda mi familia y amigos allegados.

Finalmente mi más profundo y cariñoso agradecimiento a aquellas personas que me han acompañado estos años, no siempre fáciles. Ellos saben quiénes son.

Finalmente dedico la presente investigación a mi centro. A mis hijos Patricio, Ángela, Pablo y Daniela. Espero ser el mejor ejemplo para ellos.

## **RESUMEN**

## RESUMEN

La regeneración de playas se ha convertido en la estrategia preferida en la restauración de playas (Hanson et al., 2002; Pranzini et al., 2015, 2018) para resolver el problema de la erosión costera en la mayoría de lugares de todo el mundo (Trembanis and Pilkey 1999; Dean 2003). Para establecer la idoneidad (estabilidad, tasa de erosión, forma del perfil, rotura del oleaje, ...) de la arena dragada como elemento de realimentación de una playa en regresión, se utilizan los valores granulométricos de una muestra de arena tomada en la superficie de la cántara. La muestra se realiza inmediatamente después de la carga del sedimento, y el resultado debe ser representativo de toda la arena de la cántara. Se ha diseñado una nueva metodología de toma de muestras y análisis que garantice la representatividad estadística del sedimento y su aplicación a la mejora del diseño de proyectos de futuras regeneraciones. El tamizado es el método que, debido a su simplicidad y economía, ha sido elegido de manera generalizada para el análisis del tamaño de arena a bordo de una draga. El tamizado se hace a mano dada la escasez de espacio y la consecuente ausencia de un laboratorio de materiales adecuado. Así pues, es debido a la previamente establecida importancia de la determinación del tamaño de grano por lo que se consideró imprescindible el averiguar la influencia del uso de diferentes métodos de tamizado en los resultados obtenidos para los distintos parámetros. Se tomaron muestras de dentro de la cantara de una draga de succión en marcha, y se tamizaron a mano con tamices de 10 y 20 cm de diámetro a bordo de la draga. Después, estas muestras se tamizaron mecánicamente en el laboratorio en tierra. Los resultados mostraron diferencias en los principales parámetros del tamaño, el  $D_{50}$ , la desviación estándar o sorting, asimetría o skewness y aplastamiento o Kurtosis. De entre los resultados, cabe destacar que los valores más altos de  $D_{50}$  y de Kurtosis eran los de los tamices de menor tamaño de diámetro. Por otro lado, los valores más bajos pertenecían al tamizado mecánico del laboratorio. Además, la desviación estándar y el skewness no parecen ser afectados por el método de tamizado. Las muestras que no siguen este patrón son las que tienen un alto porcentaje de conchas. Por último y definitivamente, los tamices pequeños deben ser desechados como método de tamizado abordo. Otro de los objetivos de este estudio fue evaluar la variabilidad del tamaño de arena dentro de la cántara tanto a lo largo de su superficie como en profundidad, ya que se encontraban un mayor porcentaje de conchas en la superficie de la cántara. Por tanto, se proponen algunas

mejoras de la actual metodología, exponiendo una mejor técnica de muestreo a bordo de la draga, incluyendo una comparación y discusión de los resultados obtenidos. Para alcanzar este propósito, se comparan los resultados de muestras tomadas en la cántara mediante dos diferentes metodologías. Primero, la metodología actual, que consiste en tomar una única muestra de la superficie con una cuchara Van Veen una vez la cántara está llena. La otra, dos tubos core de un metro de longitud que fueron introducidos a proa y popa por impacto con un martillo manual.



## **SUMMARY**

## SUMMARY

Beach nourishment has become the preferred strategy for beach restoring (Hanson, et al., 2002; Pranzini et al., 2015, 2018) in order to solve the issue of coastal erosion in many places around the world (Trembanis and Pilkey 1999; Dean 2003). In order to assess the suitability (stability, erosion rate, beach profile, wave breaking...) of the dredged sand as an element of beach nourishment in recession process, granulometric values are calculated from a sample of the sand taken from the hopper surface. The sample is taken just after dredging process, and the results, supposedly, are representative of the whole sand in the hopper. A new methodology of sample collection and analysis that guarantees the statistic representativeness of the sediments, and its application to the improvement of project design in future nourishments, is presented herein. Sieving, due its simplicity and economy, is the method that has been widely chosen for the analysis of sand size aboard dredgers. Sieving is handmade due to the lack of space and of a lab with the appropriate material. Therefore, the previous stablished importance of determination of the sand size is the reason why to find out the influence of use of different methods of sieving in obtaining results for the different parameters has been considered essential. Samples from inside the hopper of a trailing suction dredger were taken, and sieved by hand with sieves of 10 and 20 cm diameters on board the dredger. Afterwards, these same samples were sieved with a mechanical shaker in an onshore lab. The results showed differences for the main size parameters:  $D_{50}$ , standard deviation, skewness and kurtosis. Amongst the main results, it should be noted that the highest  $D_{50}$  and kurtosis values were obtained when using the small sieves. On the other hand, lowest values were given by the mechanical shaker method in the laboratory. Furthermore, standard deviation and skewness didn't seem to be affected by the sieving method. The samples which do not follow this pattern had a higher percentage of shells. Finally, the small sieves should be rejected as sieving method aboard. Another goal of this research was to evaluate the sand size variability inside the hopper along its surface and depth, because a higher percentage of shells were found on the hopper surface. Consequently, some new improvements of the current methodology are proposed, setting out a better technique of sampling aboard the dredging vessel, including a comparison and discussion of the obtained results. In order to achieve this aim, the results of the samples taken in the hopper throughout both methodologies, have been compared. First, the current methodology consists of taking a

single sample from the Hopper surface with a Van Veen grab sampler once the hopper is full. The other one, by introducing two tube-corers of 1-metre-long that were introduced at bow and stern with a hammer.



## **1. INTRODUCCION Y OBJETIVOS**

## **1. INTRODUCCION y OBJETIVOS**

### **1.1 Introducción**

Para establecer la idoneidad (estabilidad, tasa de erosión, forma del perfil, rotura del oleaje,...) de la arena dragada como elemento de realimentación de una playa en regresión, se utilizan los valores granulométricos de una muestra de arena tomada en la superficie de la cántara. Hasta ahora, no se ha estudiado qué grado de validez tienen los parámetros así encontrados como representativos de la totalidad del volumen de sedimento dragado. Diferentes razones apuntan a la existencia de una cierta heterogeneidad tanto en planta como en profundidad. Sin embargo y pese a la importancia científica y económica, nada se ha investigado hasta el momento. Además de los mencionados resultados de heterogeneidad y su acotación tanto en valor absoluto como relativo, se ha diseñado una nueva metodología de toma de muestras y análisis que garantice la representatividad estadística del sedimento y su aplicación a la mejora del diseño de proyectos de futuras regeneraciones

### **1.2 Razones de la pertinencia de esta investigación**

Tal y como se ha comentado ya brevemente, todos los cálculos relacionados con la estabilidad de la arena de la playa y con el volumen de sedimento a aportar están basados en la comparación de los parámetros granulométricos de la arena nativa con la de préstamo. Y, sin embargo, pese al enorme impacto científico y económico, nada se ha investigado hasta el momento sobre la representatividad de la muestra superficial de la cántara respecto al volumen del conjunto global del sedimento contenido en la misma.

### **1.3 Hipótesis planteadas**

Existen diversas razones que avalan la hipótesis de la posible heterogeneidad de los parámetros granulométricos dentro de la cántara. En primer lugar, tendríamos la variabilidad propia del sedimento con la profundidad en el fondo marino. Las embarcaciones encargadas del dragado hoy en día son en su gran mayoría del tipo TSHD (Trailing Suction Hopper Dredger), es decir, de dragado por succión en marcha, no en

modo estacionario. Habría pues que añadir la variabilidad al extraer la arena en distintos puntos.

Por otra parte, la velocidad de caída del grano es mayor en función del tamaño del mismo (para la misma densidad). Ello supondría una cierta clasificación durante el depósito en la cántara. Además, existen toberas diferenciadas a proa y popa, utilizadas por el técnico de dragado para equilibrar los calados diferenciales del buque. Y, por último, cabría destacar el hecho de que los restos de conchas o bioclastos, por su forma lajosa frente a la mayor esfericidad de la sílice y los feldespatos, tardan más en decantar y posiblemente se encuentren en mayor medida en la superficie.

#### **1.4 Objetivos generales**

El objetivo del presente Plan de Investigación es el estudio de la variabilidad de los diferentes parámetros granulométricos de la arena dragada en cántara y su aplicabilidad a la regeneración de playas.

#### **1.5 Objetivos específicos**

De manera complementaria, se cubrirán los siguientes objetivos:

- Desarrollo de una metodología para la determinación de la variabilidad de la arena acumulada dentro de la cántara de una draga, tanto en superficie como en profundidad.
- Desarrollo de una metodología que incluya el número y posicionamiento de las muestras necesarias, así como de los cálculos precisos para garantizar la representatividad estadística de los resultados respecto a la totalidad del sedimento.
- Adecuación de los actuales procesos técnicos de regeneraciones de playa, en función de los parámetros intrínsecos anteriormente descritos.



## **2. ESTADO DEL ARTE: ANÁLISIS CRÍTICO DE LOS ANTECEDENTES**

## 2. ESTADO DEL ARTE: ANÁLISIS CRÍTICO DE LOS ANTECEDENTES

Desde los años 50 hasta la fecha, la importancia del sector turístico en España se ha ido incrementando de manera permanente (Muñoz-Pérez et al., 2001). Lamentablemente, diversos estudios han demostrado que el litoral gaditano se encuentra en continua recesión, llegándose a calcular retrocesos medios de hasta un metro por año en el tramo de costa entre Chipiona y Rota (Muñoz-Pérez y Enríquez, 1998).

La alarma social generada ha conducido a una preocupación por cómo abordar la problemática de la erosión costera. Entre las soluciones “blandas” destacan las regeneraciones de playa o realimentaciones con arena procedente principalmente de placeres submarinos (Gómez-Pina et al., 2006). Entre las “duras” se contempla la construcción de espigones u otros tipos de defensa que minorasen la tasa de erosión en determinadas zonas de la costa, pero que a su vez pueden ocasionar erosión en otras áreas adyacentes (Muñoz-Pérez y Gutiérrez-Mas, 1999).

Como se ha descrito, la línea de costa en la provincia de Cádiz ha estado en recesión al menos durante el último siglo. Las principales causas son la subsidencia, el aumento paulatino del nivel del mar, la disminución de aportes por la retención de sedimento en las presas y la propia ocupación de playas y dunas por estructuras antrópicas (Muñoz-Pérez et al., 2001). Así, numerosas regeneraciones de playas han sido realizadas a lo largo de la costa del Golfo de Cádiz. Desde 1991, más de 15 millones de metros cúbicos de arena han sido vertidos en diversas playas del litoral onubense-gaditano (Muñoz-Pérez et al., 2014).

En el litoral de la provincia de Cádiz, encontramos diferentes tipologías de playas marcadas entre otros aspectos por la composición de sus arenas. En la vertiente atlántica, encontramos playas muy afectadas por las mareas y el oleaje, de arena fina y muy homogénea en tamaño. Algunas de estas playas, tanto emergidas como sumergidas, están compuestas también por fragmentos de conchas de restos de organismos vivos o bioclastos (McLachlan and Turner, 2008). En la vertiente mediterránea, encontramos playas micromareales muy afectadas por la acción erosiva del oleaje, generalmente formadas por arenas gruesas y gravas.

Entre los principales parámetros de diseño para la redacción de un proyecto de regeneración de playas, cabe destacar los granulométricos. La forma del perfil de la playa

junto con el consiguiente cálculo del volumen necesario de arena y la estabilidad de la misma en tiempo y espacio, son función de la comparación de la arena nativa (o natural de la playa) con la extraída del fondo del mar mediante dragado (o de préstamo) (Coastal Engineering Manual o CEM, 2002). Esta arena es analizada a bordo del propio buque mediante la toma de muestras superficiales con cuchara Van Veen al final de cada dragado y antes del consiguiente vertido.

Algunos investigadores han tenido ya en cuenta fenómenos que alteran el volumen teórico necesario para la regeneración (CUR, 1987); como los métodos de medición del volumen dragado (Muñoz-Perez et al., 2003) o la variabilidad de la porosidad de la arena antes y después de la regeneración (Román-Sierra et al., 2014). Sin embargo, nada se ha investigado hasta el momento sobre la variabilidad de la granulometría de la arena en la cántara de la draga.

Hoy en día, siguen sin respuesta cuestiones sobre en qué medida son representativos los resultados de la muestra de arena superficial en relación con todo el volumen de la cántara. La homogeneidad de la arena de una playa no es cierta. Existe un gradiente en la medida de los granos de la arena distribuido desde la orilla hasta la parte más alta de la playa (Blott, 2001). Este gradiente viene determinado por una sedimentación selectiva, en función del peso, forma, tamaño y densidad de las distintas partículas transportadas no sólo por las corrientes inducidas por el oleaje y la carrera de marea (Nielsen, 2001), sino también por el viento (Emery, 1945).

Existen estudios basados en varias mediciones estándares de formas de grano (Kaufman, 2006) y de otros parámetros intrínsecos al grano de arena como:

- La composición mineralógica; que dependerá, sobre todo, del tipo de roca presente en el lugar de formación (Pettijohn et al., 1987).
- La esfericidad o relación entre las tres dimensiones del grano (largo, ancho y alto). Será más esférica cuanto más iguales sean estas medidas (Kaufman, 2006). Aunque difícil de calcular, puede acudir al diagrama de Zingg (1935) para un método útil y rápido, comparando los ejes largos, intermedios y cortos de los granos anchos.
- La angulosidad y la redondez: Determina el grado de erosión de sus bordes. Generalmente los granos de arena erosionados por el agua del mar tienen mayor redondez que los erosionados por el viento. La definición oficial compara el radio medio de los

bordes con el radio de la esfera máxima que circunscribe (Kaufman, 2006). También difícil de calcular, todavía hoy se utiliza la clasificación visual realizada por Powers (1953).

Sin embargo, los parámetros que más serán tenidos en cuenta a lo largo de la presente investigación son los relacionados con el tamaño de grano y su distribución granulométrica. El diámetro medio en las arenas debe estar comprendido entre 1/16 mm y 2 mm. Por debajo de este tamaño mínimo se considera limo y por encima del máximo es grava. Del análisis de la granulometría, además del diámetro medio de la muestra de arena en milímetros ( $D_{50}$ ), se pueden extraer otros percentiles como los valores  $D_{16}$ ,  $D_{84}$ ,  $D_{95}$ ,  $D_{05}$ , y sus correspondientes valores en la escala phi ( $\phi$ ). Asimismo, además de la media, se pueden calcular estadísticos como la Desviación Estándar o Sorting, el coeficiente de asimetría o Skewness y el coeficiente de aplastamiento o Kurtosis (Coastal Engineering Manual, 2002).

Parámetros como el  $D_{50}$  y la desviación típica son imprescindibles para comprobar si la arena de préstamo es adecuada para sustituir a la nativa perdida debido a la erosión de la playa (Pranzini et al., 2018; Saponieri et al., 2018) o para estimar el volumen de arena preciso para la regeneración de una playa (USACE, 2002).

Por otro lado, valores positivos del coeficiente de Skewness indican un sesgo a fino de la muestra, lo que permite prever una mayor pérdida de material tras su aporte a la playa y ser sometida esta arena a los procesos erosivos costeros.

Además, el análisis de la distribución del tamaño de arena también proporciona indicios de su origen, del ambiente en el que se depositó, así como de la historia de sus movimientos (Bernabeu et al., 2002). Por otra parte, el estudio del tamaño de grano permite la subdivisión de las facies (Roman-Sierra et al., 2011), posibilitando asimismo el observar la reacción de las playas antes las tormentas o episodios de oleaje altamente energético (Larson y Kraus, 1991).

Se estudiará la influencia que los distintos procesos de tamizado de las arenas dragadas tienen sobre los resultados obtenidos, permitiendo concluir la bondad de cada uno de ellos, considerando también el grado de representatividad de las muestras tomadas en cántara, según la metodología de obtención.

### **3. INFLUENCIA DE LOS DIFERENTES MÉTODOS DE TAMIZADO EN LA ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE TAMAÑO DE ARENA**

### **3. INFLUENCIA DE LOS DIFERENTES MÉTODOS DE TAMIZADO EN LA ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE TAMAÑO DE ARENA**

El tamizado es uno de los métodos operacionales más utilizados para determinar los parámetros del tamaño de arena que son esenciales para analizar la dinámica costera. Sin embargo, la influencia de tamizar a mano frente al tamizado mecánico aún no se ha estudiado. Para este apartado, se tomaron muestras de dentro de la cantara de una draga de succión en marcha, y se tamizaron a mano con tamices de 10 y 20 cm de diámetro a bordo de la draga. Después, estas muestras se tamizaron mecánicamente en el laboratorio en tierra. Los resultados mostraron diferencias en los principales parámetros del tamaño, el  $D_{50}$ , la desviación estándar, skewness y kurtosis. De entre los resultados, cabe destacar que los valores más altos de  $D_{50}$  y de kurtosis eran los de los tamices de menor tamaño de diámetro. Por otro lado, los valores más bajos pertenecían al tamizado mecánico del laboratorio. Además, la desviación estándar y el skewness no parecen ser afectados por el método de tamizado, lo que significa que toda la distribución de tamaño de grano se desplaza pero la forma permanece sin cambios. Las muestras que no siguen este patrón son las que tienen un alto porcentaje de conchas. Por último y definitivamente, los tamices pequeños deben ser desechados como método de tamizado abordo.

#### **3.1 Introducción**

Varios de los parámetros estadísticos que controlan el tamaño de arena son esenciales para el estudio de la dinámica costera y otros comportamientos geomorfológicos de las playas (Guillen y Hoekstra, 1996; Medellin et al., 2018; Pranzini et al., 2018). Cabe destacar entre ellos el tamaño medio del grano o su mediana ( $D_{50}$ ), el reparto de tamaños alrededor de la media o desviación típica ( $\sigma$ ), el coeficiente de asimetría hacia alguno de los lados o Skewness y el aplastamiento de la campana de Gauss o Kurtosis.

Tabla. Distribución cualitativa por rangos del sedimento, para la desviación estándar, skewness y kurtosis (adaptado de Román-Sierra et al. 2013).

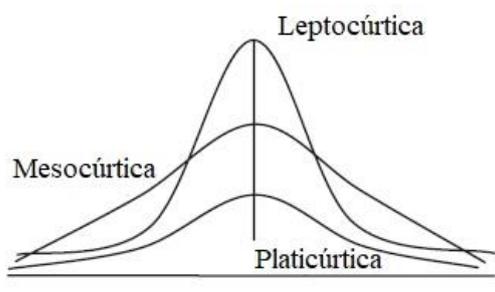
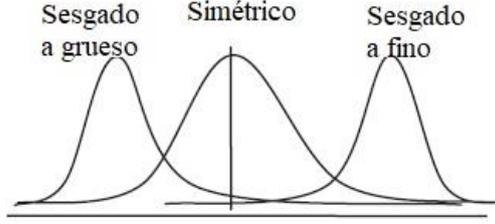
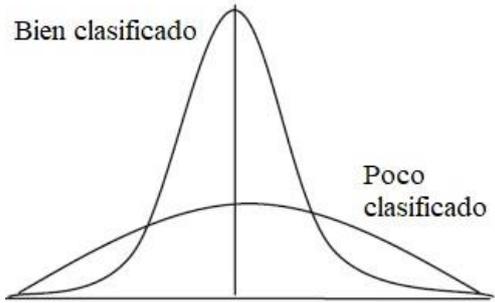
Rango de phi	Parámetro de desviación estándar (sorting)
<0.35	Muy bien clasificado
0.35–0.50	bien clasificado
0.50–0.71	Moderadamente bien clasificado
0.71–1.00	Moderadamente clasificado
1.00–2.00	Poco clasificado
2.00–4.00	Muy poco clasificado
>4.00	Extremadamente poco clasificado

Coefficiente de Skewness	Descripción
<-0.3	Sesgado a muy grueso
0.3 a -0.1	Sesgado a grueso
0.1 a +0.1	Cerca de la simetría
+0.1 a 0.3	Sesgado a fino
>+0.3	Sesgado a muy fino

Coefficiente de Kurtosis	Descripción
<0.65	Muy platicúrtica (plano)
0.65–0.90	Platicúrtica
0.90–1.11	Mesocúrtica
1.11–1.50	Leptocúrtica (apuntado)
1.50–3.00	Muy leptocúrtica
>3.00	Extremadamente leptocúrtica



Estos parámetros son, asimismo, de gran importancia a la hora de calcular perfiles de equilibrio o evaluar el transporte potencial del sedimento (Gravens et al., 2002; Giardino et al., 2019). Parámetros como el D<sub>50</sub> y la desviación típica son imprescindibles para comprobar si la arena de préstamo es adecuada para sustituir a la nativa perdida debido a

la erosión de la playa (Pranzini et al., 2018; Saponieri et al., 2018) o para estimar el volumen de arena preciso para la regeneración de una playa (USACE, 2002).

Además, el análisis de la distribución del tamaño de arena también proporciona indicios de su origen, del ambiente en el que se depositó, así como de la historia de sus movimientos (Bernabeu et al., 2002). Por otra parte, el estudio del tamaño de grano permite la subdivisión de las facies (Roman-Sierra et al., 2011), posibilitando asimismo el observar la reacción de las playas antes las tormentas o episodios de oleaje altamente energético (Larson y Kraus, 1991).

Diversas metodologías han sido estudiadas por diferentes investigadores a la hora de analizar el tamaño de las partículas de arena y de comparar resultados entre ellas: difracción laser (Blott y Pye, 2006), granulometría laser y sedigrafía (Magno et al., 2018), el microtac (Austin y Shah, 1983), comparación de resultados entre laser, pipeta y tamizado (Konert y Vandenberghe, 1997), análisis de imágenes (Orru et al., 2014) o tamizado (Pope y Ward, 1998). Es precisamente este último método el que, debido a su simplicidad y economía, ha sido elegido de manera generalizada para el análisis del tamaño de arena a bordo de una draga debido a las especiales características de este tipo de buques.

Es importante señalar que es preciso conocer los parámetros del tamaño de arena previamente a cada uno de los momentos en los que el ingeniero de costas, director de las obras de regeneración, debe tomar decisiones sobre el área de vertido del sedimento. Esto significa que el análisis granulométrico debe realizarse a bordo de la draga. Por consiguiente, el tamizado se hace a mano dada la escasez de espacio y la consecuente ausencia de un laboratorio de materiales adecuado. Y, no obstante, el uso de diferentes métodos de tamizado puede influir no sólo en la evaluación del tamaño medio sino en el resto de parámetros.

Así pues, es debido a la previamente establecida importancia de la determinación del tamaño de grano por lo que se consideró imprescindible el averiguar la influencia del uso de diferentes métodos de tamizado en los resultados obtenidos para los distintos parámetros.

### 3.2 Zona de estudio

Las muestras se tomaron del interior de la cántara de una draga de succión en marcha (TSHD de su nomenclatura en inglés: Trailing Suction Hopper Dredger) que se utilizó para llevar a cabo la regeneración de dos playas del Golfo de Cádiz (Costa Ballena y Punta Candor). La zona de préstamo fue el Placer de Meca, cerca del Cabo de Trafalgar (Figura 3.1a). La profundidad del yacimiento es de aproximadamente 15 a 20 metros por debajo del cero hidrográfico y contiene hasta 25 Mm<sup>3</sup> de arena apta para regeneraciones (para más datos puede consultarse Muñoz-Perez et al., 2014). Un estudio previo realizado en 2003 por el entonces Ministerio de Medio Ambiente (hoy Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico) demostró que la retirada de arena no producía impacto ambiental significativo.

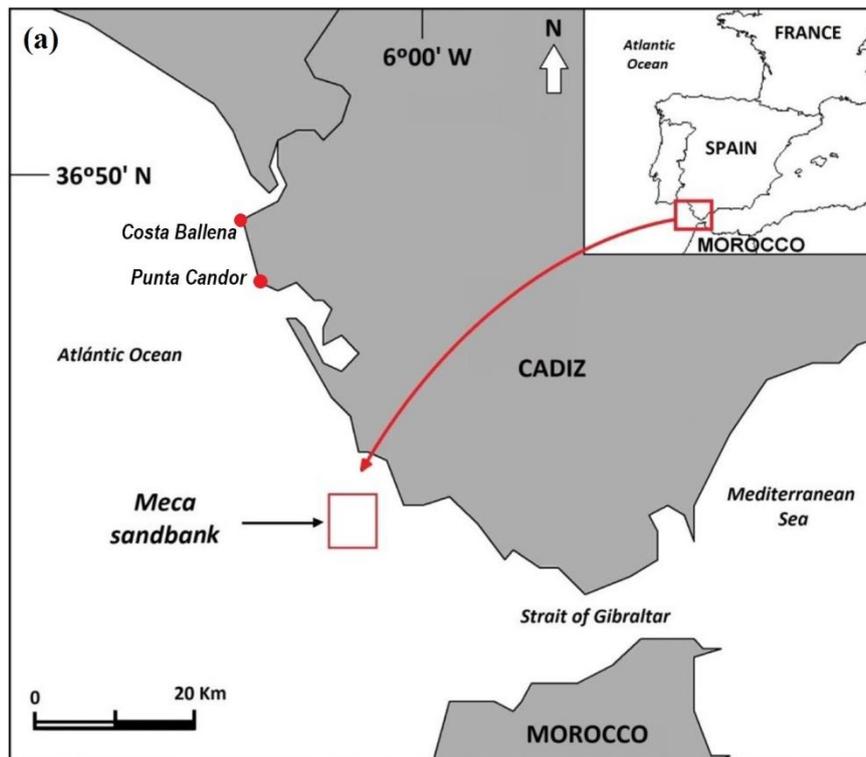


Figura 3.1.a. Localización del Placer de Meca (frente al cabo de Trafalgar), zona de préstamo con cuya arena se rehabilitaron las playas de La Ballena y Punta Candor.

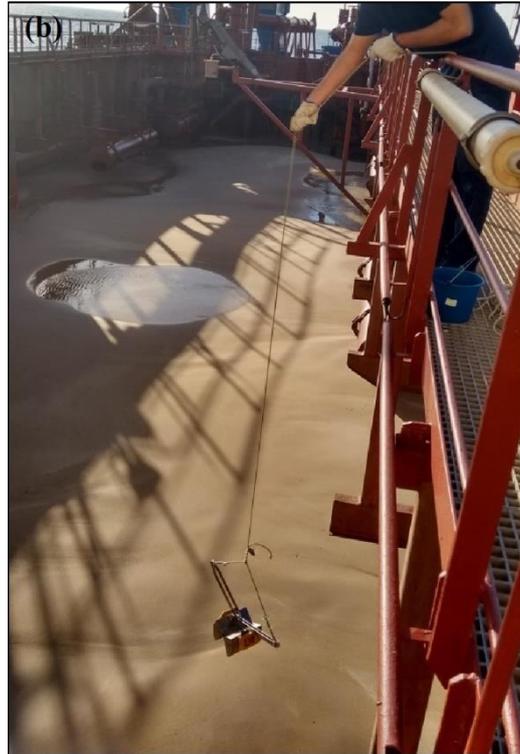


Figura 3.1.b. Metodología del muestreo a bordo de la draga.

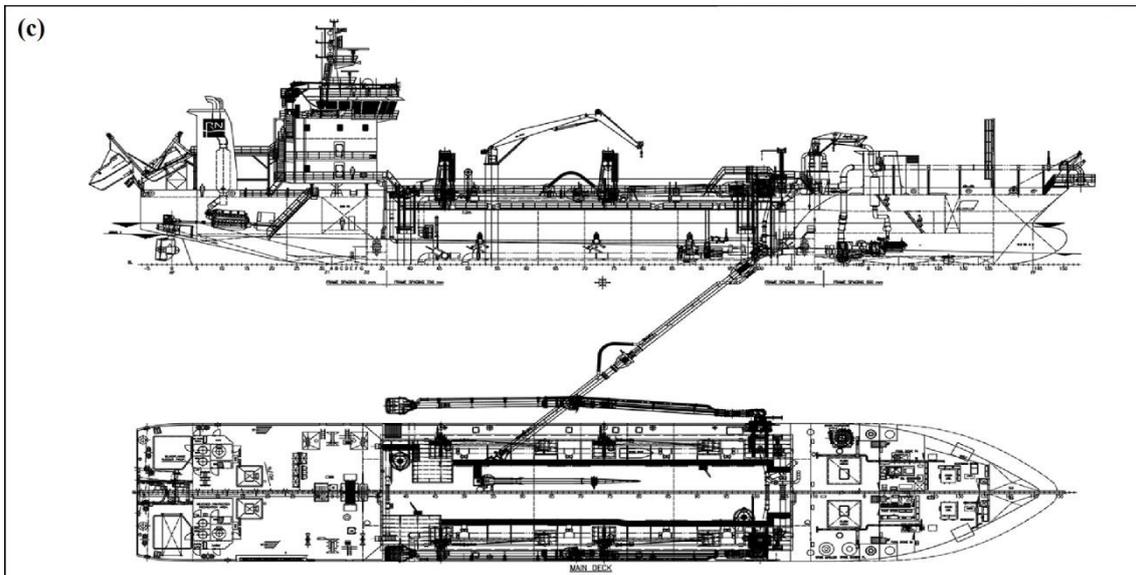


Figura 3.1.c. Esquema de la draga Njord (<https://rohde-nielsen.com>).

También se demostró que la extracción de sedimento del fondo genera únicamente una turbidez despreciable debido al mínimo porcentaje de finos (Román-Sierra et al., 2011). La zona es mesomareal con una periodicidad semidiurna y con una carrera de marea que varía entre 1.10 y 3.22 m (López-García et al., 2019). Las playas de estas costas están compuestas de una arena de tamaño entre fino y medio con un  $D_{50}$  de unos 0.25 mm a

0,30 mm y cuya composición consiste en un 10% de carbonatos (bioclastos principalmente) y un 90% de sílice (Bernabeu et al., 2001, 2002).

### 3.3 Metodología

Se tomaron 19 muestras mediante una cuchara Van Veen (Figura 3.1b) del interior de la cántara de la draga Njord (Figura 3.1c). El muestreo se efectuaba en días diferentes y una vez había terminado el dragado por razones de seguridad. Las muestras se tamizaron a bordo de manera manual con dos columnas de tamices de diámetro diferente (de 10 y de 20 cm) y con un tiempo de agitación idéntico (10 minutos siempre) y se reservaron en bolsas etiquetadas. Posteriormente, se realizó un nuevo tamizado en tierra, en el laboratorio de la Universidad de Cádiz, con una tamizadora mecánica y los tamices grandes de 20 cm. Este método, más fiable y cuyos resultados se tomaron de referencia, no siempre puede llevarse a cabo a bordo de una draga por varias razones. En primer lugar, la estabilidad de la fuente de energía eléctrica en navegación no siempre se puede garantizar. Además, y aparte del riesgo de su movilización, la máquina tamizadora mecánica tiene que lidiar con los movimientos de rotación del buque (escora, cabeceo y guiñada) y con las aceleraciones horizontales y verticales inducidas por el oleaje.

Recordaremos aquí que los tamaños de malla de los ocho tamices exigidos por la Dirección General de Costas del Ministerio de Medio Ambiente (hoy D.G. de la Costa y el Mar del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico) son: 2 mm, 1 mm, 710  $\mu\text{m}$ , 500  $\mu\text{m}$ , 355  $\mu\text{m}$ , 250  $\mu\text{m}$ , 125  $\mu\text{m}$  and 62.5  $\mu\text{m}$ .

De este modo, cada una de las muestras de aproximadamente 100 gr fue tamizada mediante tres métodos diferentes. La cantidad de sedimento es importante porque, obviamente, un mayor volumen de sedimento implica más tiempo para pasar por los distintos tamices.

Tras la pesada inicial, las muestras son colocadas en el tamiz superior (el de mayor tamaño de malla) y la columna con los 8 tamices es agitada a mano. Conviene precisar que la presión con los dedos no estaba permitida. Después de pesar la arena acumulada en cada tamiz, se obtuvieron los valores  $D_{16}$ ,  $D_{50}$  y  $D_{84}$  (ver tabla 3.1) y, a continuación, los del resto de parámetros principales como sorting, skewness y Kurtosis, aunque estos dos últimos no son utilizados habitualmente en un proyecto de regeneración de playas

(Folk y Ward, 1957). Las formulaciones utilizadas pueden consultarse en la figura 3.2. Para más detalles véase cualquier manual al uso, por ejemplo, Blott y Pye (2001).

Tabla 3.1 Valores de los parámetros  $D_{16}$ ,  $D_{50}$  y  $D_{84}$  obtenidos mediante las tres metodologías: Tamizado manual con tamices de 10 y de 20 cm de diámetro (a bordo del buque) y tamizado mecánico en laboratorio con los tamices de 20 cm (en tierra)

Muestra	A bordo de la draga						Laboratorio en tierra		
	Tamiz Ø 10cm			Tamiz Ø 20cm			Tamiz Ø 20cm		
	D16	D50	D84	D16	D50	D84	D16	D50	D84
1	0.217	0.300	0.379	0.201	0.291	0.35	0.177	0.274	0.346
2	0.218	0.300	0.375	0.203	0.297	0.384	0.143	0.281	0.347
3	0.261	0.314	0.418	0.229	0.307	0.422	0.149	0.296	0.383
4	0.220	0.301	0.383	0.179	0.278	0.349	0.138	0.256	0.343
5	0.194	0.290	0.354	0.174	0.269	0.339	0.139	0.263	0.335
6	0.204	0.297	0.385	0.192	0.29	0.377	0.178	0.277	0.35
7	0.179	0.280	0.358	0.171	0.267	0.349	0.171	0.265	0.346
8	0.177	0.280	0.407	0.168	0.261	0.38	0.177	0.277	0.354
9	0.186	0.284	0.351	0.182	0.278	0.344	0.17	0.261	0.335
10	0.193	0.301	0.539	0.177	0.285	0.571	0.141	0.281	0.549
11	0.257	0.314	0.440	0.206	0.298	0.409	0.164	0.307	0.417
12	0.220	0.295	0.349	0.179	0.278	0.348	0.14	0.272	0.346
13	0.255	0.315	0.497	0.205	0.305	0.499	0.151	0.306	0.491
14	0.181	0.284	0.385	0.211	0.297	0.363	0.187	0.286	0.354
15	0.199	0.292	0.354	0.187	0.28	0.339	0.25	0.307	0.417
16	0.182	0.280	0.350	0.163	0.244	0.326	0.137	0.247	0.327
17	0.186	0.288	0.395	0.165	0.251	0.339	0.16	0.235	0.337
18	0.240	0.306	0.448	0.24	0.306	0.448	0.239	0.306	0.45
19	0.226	0.303	0.394	0.141	0.272	0.342	0.17	0.263	0.339

(a) Logarithmic method of moments

Mean	Standard deviation	Skewness	Kurtosis		
$\bar{x}_\phi = \frac{\sum f m_\phi}{100}$	$\sigma_\phi = \sqrt{\frac{\sum f (m_\phi - \bar{x}_\phi)^2}{100}}$	$Sk_\phi = \frac{\sum f (m_\phi - \bar{x}_\phi)^3}{100\sigma_\phi^3}$	$K_\phi = \frac{\sum f (m_\phi - \bar{x}_\phi)^4}{100\sigma_\phi^4}$		
Sorting ( $\sigma_\phi$ )	Skewness ( $Sk_\phi$ )		Kurtosis ( $K_\phi$ )		
Very well sorted	<0.35	Very fine skewed	>+1.30	Very platykurtic	<1.70
Well sorted	0.35–0.50	Fine skewed	+0.43 to +1.30	Platykurtic	1.70–2.55
Moderately well sorted	0.50–0.70	Symmetrical	-0.43 to +0.43	Mesokurtic	2.55–3.70
Moderately sorted	0.70–1.00	Coarse skewed	-0.43 to -1.30	Leptokurtic	3.70–7.40
Poorly sorted	1.00–2.00	Very coarse skewed	<-1.30	Very leptokurtic	>7.40
Very poorly sorted	2.00–4.00				
Extremely poorly sorted	>4.00				

(b) Logarithmic (original) Folk and Ward (1957) graphical measures

Mean	Standard deviation	Skewness	Kurtosis		
$M_z = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3}$	$\sigma_I = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6.6}$	$Sk_I = \frac{\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)}$	$K_G = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2.44(\phi_{75} - \phi_{25})}$		
Sorting ( $\sigma_I$ )	Skewness ( $Sk_I$ )		Kurtosis ( $K_G$ )		
Very well sorted	<0.35	Very fine skewed	+0.3 to +1.0	Very platykurtic	<0.67
Well sorted	0.35–0.50	Fine skewed	+0.1 to +0.3	Platykurtic	0.67–0.90
Moderately well sorted	0.50–0.70	Symmetrical	+0.1 to -0.1	Mesokurtic	0.90–1.11
Moderately sorted	0.70–1.00	Coarse skewed	-0.1 to -0.3	Leptokurtic	1.11–1.50
Poorly sorted	1.00–2.00	Very coarse skewed	-0.3 to -1.0	Very leptokurtic	1.50–3.00
Very poorly sorted	2.00–4.00			Extremely leptokurtic	>3.00
Extremely poorly sorted	>4.00				

Figura 3.2 (a) Ecuaciones utilizadas en el cálculo de los parámetros de tamaño de grano: media, desviación típica o sorting, asimetría o skewness y aplastamiento o Kurtosis . (b) Clasificación de la arena en función de los parámetros previos, modificada de Krumbein y Pettijohn (1938) y Folk y Ward (1957)

### 3.4 Resultados y Discusión

#### 3.4.1 La mediana del tamaño de grano o $D_{50}$

En la figura 3.3 se aprecia el rango de valores del  $D_{50}$ , entre 0.24 y 0.32 mm. Los valores obtenidos con el tamizado mecánico automático, llevado a cabo en el laboratorio en tierra, son siempre valores inferiores. Por otro lado, los valores procedentes del tamizado manual con tamices de diámetro menor (10 cm) son siempre mayores. De este modo, los valores de tamizado manual pero con tamices grandes (20 cm) están comprendidos entre ambos métodos, aunque más cercanos al tamizado mecánico que tomaremos como referencia.

Una posible explicación podría provenir del hecho que la superficie del tamiz de 20 cm de diámetro es cuatro veces superior a la de los tamices de 10 cm. Obviamente, el tamiz

grande tiene más agujeros para que los granos puedan pasar a su través durante el mismo tiempo de tamizado (10 minutos en todos los casos). Esto incrementa la cantidad de arena en los tamices inferiores con la consiguiente disminución del  $D_{50}$ .

Como ya se ha comentado, a partir de ahora, se considerarán como referencia los valores obtenidos mediante tamizadora mecánica en el laboratorio en tierra dado que es el procedimiento estándar.

Probablemente, la intensidad constante y superior de la tamizadora mecánica frente al tamizado manual sea la razón por la que los valores de  $D_{50}$  manuales sean mayores que los mecánicos. Además, aunque el tiempo de tamizado permanece constante en todos los casos, el operador a bordo puede cansarse durante las labores de tamizado lo que influiría en una menor intensidad de la agitación.

Aunque la diferencia media es de un 10%, puede verse como las diferencias mayores (de hasta un 20 o 25%) entre los valores de  $D_{50}$  en laboratorio y los del tamiz pequeño a bordo coinciden con las arenas más finas (muestras 4, 16 y 17). La menor intensidad del tamizado manual junto con el menor diámetro del tamiz pequeño pueden ser las causas del menor paso de arenas finas y, por tanto, de la acumulación de dichas arenas finas en los tamices superiores (con el consiguiente incremento del  $D_{50}$ ). El mayor rango de error en arenas más finas, puede deberse a que estas requieren mayor energía aplicada para superar los tamices más finos.

#### 3.4.2 *Desviación típica o sorting*

Si miramos al gráfico de sorting en la Figura 3.3b, veremos que los resultados de los métodos de tamizado están muy cercanos unos de otros en general. Ello nos indica que la desviación típica no parece afectada por el método de tamizado. Sin embargo, los valores mayores se detectan en las muestras 10, 13 y 18 que coinciden con las que tienen un porcentaje de conchas por encima del 10% (Figura 3.3e).

#### 3.4.3 *Skewness*

La figura 3.3c muestra una tendencia similar para el coeficiente de asimetría con las tres distintas metodologías. Los valores de skewness para cada muestra no parecen depender

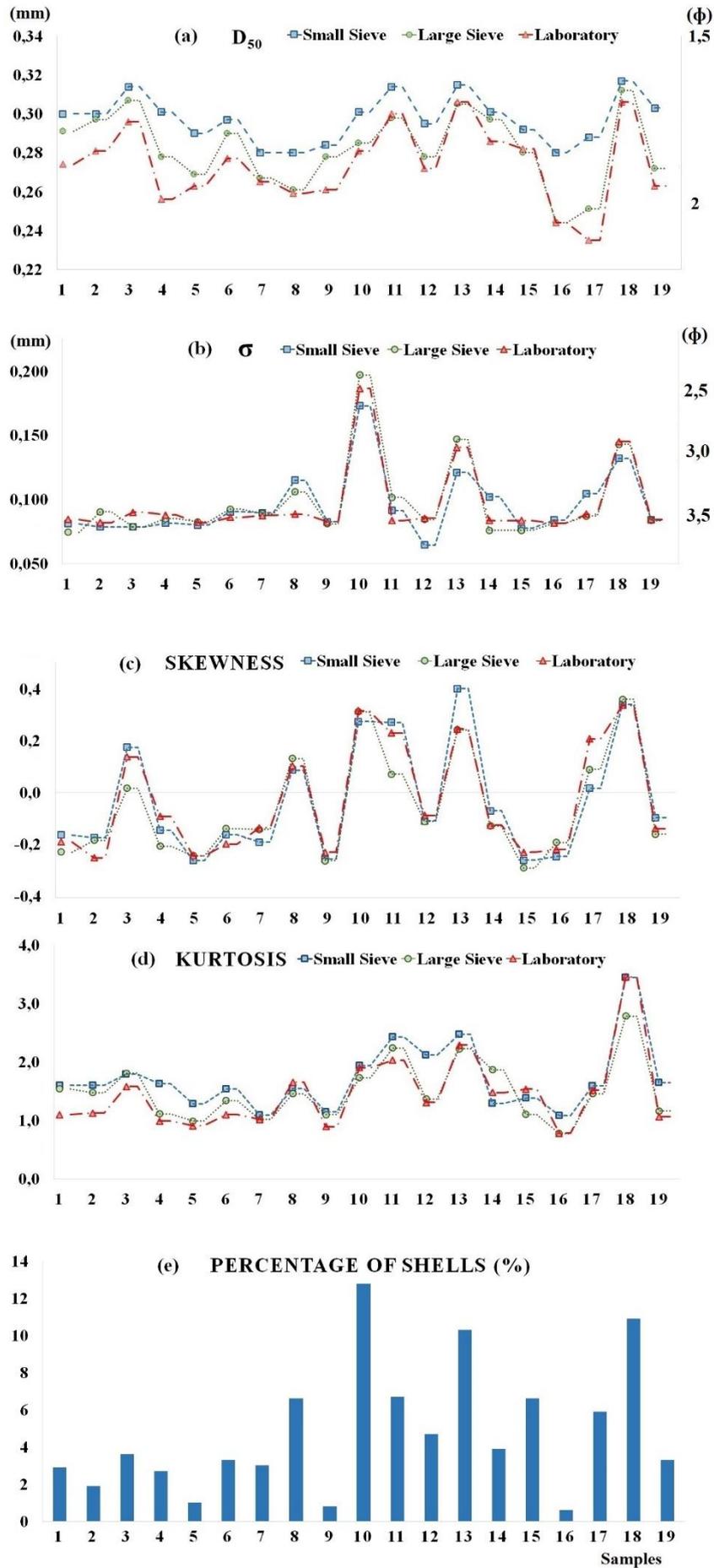


Figura 3.3 (a) D<sub>50</sub>; (b) sorting; (c) skewness; (d) kurtosis; (e) porcentaje de conchas.

del método de tamizado. Esto significa que la distribución granulométrica se desplaza, pero no cambia de forma. La mayor parte de las muestras tienen valores de casi-simétricas (de -0.4 a +0.4). Nuevamente, las muestras 10, 13 y 18 son las únicas que se salen de la tendencia (sesgadas hacia el grueso o coarse-skewed) debido seguramente a su mayor porcentaje de conchas o bioclastos.

#### 3.4.4 Kurtosis

No se observa ningún valor platicúrtico en la figura 3.3d. Todos los valores oscilan entre mesocúrticos (0.90 a 1.10) a leptocúrticos (<1.50) y muy leptocúrticos (1.50 a 3.00). No se aprecia ninguna tendencia determinada.

#### 3.4.5 Porcentaje de bioclastos o conchas

Se determinó la cantidad de conchas en cada muestra con la ayuda de un microscopio. Los resultados se muestran en la figura 3.3e. Dado que los bioclastos son mayores que las partículas de arena silíceas, el mayor porcentaje de conchas aparece en los tamices superiores. Puede apreciarse asimismo que las tres muestras con una cantidad de bioclastos mayor del 10% (la 10, la 13 y la 18) son también las que mayor desviación típica tienen.

#### 3.4.6 Tabla resumen

En la tabla 3.2 se ofrece una visión general de los resultados con tamices de pequeño (10 cm) y gran diámetro (20 cm). Los resultados del tamizado en laboratorio (procedimiento estándar) se han tomado como valores de referencia a la hora de la comparación. Puede verse que la media de los  $D_{50}$  para los tamices pequeños es mayor que la de los tamices grandes (al igual que para la kurtosis). Así pues, los tamices pequeños obtienen los peores resultados, mientras que los de los tamices de diámetro grande son los que más se parecen a los conseguidos en el laboratorio. Por consiguiente, debemos concluir que los tamices mayores son los que deberían utilizarse a bordo, mientras que los pequeños sólo podrían usarse como una primera aproximación.

*Tabla 3.2. Calculo del error cuadrático medio (RMSE o Root Mean Square Error) y del error relativo en porcentaje para los resultados de los ensayos granulométricos efectuados a bordo con tamices de diámetro grande (20 cm) y pequeño (10 cm) en comparación a los de una tamizadora mecánica en laboratorio en tierra.*

		<b>D<sub>50</sub></b>	<b>σ</b>	<b>Skewness</b>	<b>Kurtosis</b>
<b>RMSE</b>	Tamiz pequeño	0.026	0.012	0.068	0.377
	Tamiz grande	0.011	0.008	0.067	0.273
<b>Porcentaje de Error Relativo (%)</b>	Tamiz pequeño	8.8	9.7	28.2	26.5
	Tamiz grande	3.2	6.6	29.3	14.6



## **4. VARIABILIDAD DEL TAMAÑO DE ARENA DENTRO DE LA CÁNTARA DE UNA DRAGA**

#### **4. VARIABILIDAD DEL TAMAÑO DE ARENA DENTRO DE LA CÁNTARA DE UNA DRAGA**

Aún no se han llevado a cabo investigaciones sobre la variabilidad del tamaño de grano dentro de la cántara de una draga de succión en marcha, a pesar de su importancia para los proyectos de regeneración de playa. En este estudio, se tomaron varias muestras de arena a bordo de una draga, usando diferentes metodologías durante el dragado, para un caso particular de regeneración de playa. El muestreo se llevó a cabo con un tubo core y con una cuchara Van Veen en la superficie de la cántara cuando estaba llena de arena. Los resultados mostraron problemas con los resultados obtenidos de las muestras tomadas con la cuchara Van Veen, que es la metodología estándar utilizada para muestrear a bordo de dragas. Este método debería ser reconsiderado en el futuro, porque las muestras superficiales no son representativas de toda la cántara, debido al alto porcentaje de conchas que se encuentran en estas. De acuerdo con los resultados, los tubos core introducidos por percusión fueron el único método útil para determinar parámetros de arena medios cercanos a los valores obtenidos en la zona de préstamo. Además, los core mostraron tener correlación lineal entre el tamaño de arena y la profundidad: el  $D_{50}$  se incrementó un 20% desde la superficie hasta 1 metro de profundidad, siendo esto un sexto de la profundidad de la cántara de este caso de estudio. Lamentablemente, el procedimiento de la percusión manual no puede alcanzar profundidades más allá del metro.

##### **4.1 Introducción**

La regeneración de playas se ha convertido en la estrategia preferida en la restauración de playas (Hanson et al., 2002; Pranzini et al., 2015, 2018) para resolver el problema de la erosión costera en la mayoría de lugares de todo el mundo (Trembanis and Pilkey 1999; Dean 2003). Además, varios estudios han abordado la evaluación de las regeneraciones de playa tanto desde el punto de vista económico como de gestión (Hamm et al. 2002; Gomez-Pina et al. 2007) y la mejora en la industria del turismo que proveen dichas regeneraciones (Klein et al. 2004; Houston 2013).

Como ya se vio en el capítulo anterior, entre los parámetros de diseño para un proyecto de regeneración de playas, cabe destacar el tamaño de la arena (Gravens et al. 2002;

Gallop et al. 2015). El tamaño del grano es primordial no sólo para comprobar la idoneidad de la arena de préstamo a la hora de sustituir la arena nativa que ha desaparecido por la erosión, sino para identificar el nuevo perfil de equilibrio de la playa (Dean, 1991, Martín-Antón et al. 2016), para entender la respuesta de las playas a las tormentas (Larson y Kraus, 1991) y para calcular el volumen necesario para conseguir la anchura de berma deseada (USACE, 2002). Además, el tamaño de grano se usa también para evaluar la velocidad de transporte de sedimento (Muñoz-Perez et al., 1999) o para calibrar modelos numéricos en diferentes estudios costeros (Karambas and Samaras 2014).

Aunque la compatibilidad del sedimento de préstamo frente al nativo se evalúa mucho antes de que empiece el dragado, la variabilidad de las características de la arena en la zona de préstamo requiere un seguimiento o monitorización durante el proceso de dragado. De este modo, cuando se ejecuta la realimentación de una playa, es primordial recoger un número mínimo de muestras del fondo del mar antes de que comience el dragado, que dependerá de la superficie de dicha zona de préstamo (MARM 2010) o de la cantidad de arena a dragar (OSPAR 2014).

Algunos investigadores ya han tenido en cuenta ciertos fenómenos que afectan al volumen teórico de arena necesitado para un determinado proyecto de realimentación (CUR 1987; USACE 2002). Así son, la metodología para las mediciones en cántara a bordo de la draga (Muñoz-Perez et al., 2003) o la variabilidad de la porosidad de la arena (Roman-Sierra et al., 2014). Además, también se ha estudiado el proceso de sedimentación en una draga de succión en marcha mediante modelos teóricos (Miedema and Vlasblom 1996) y la validación de los mismos mediante pruebas de sedimentación en laboratorio o en algunos prototipos (v.g. van Rhee 2002). Una revisión actualizada puede consultarse en Miedema (2009).

En cuanto a la regeneración en sí, el gestor de costas necesita conocer los parámetros del tamaño antes de que comience el vertido en la propia playa a fin de tomar decisiones sobre el área de relleno (por ejemplo, si verter en zona emergida o sumergida, dejarla en superficie o enterrada,...). Por tanto, es imprescindible que el análisis granulométrico se haga a bordo de la draga, inmediatamente después de la carga del sedimento, y el resultado debe ser representativo de toda la arena de la cántara. No obstante, no debe presumirse a priori que los granos de arena se distribuyan de una manera porque, hasta

este momento, no se conoce ningún dato sobre la variabilidad del tamaño de arena dentro de la cántara de una draga de succión en marcha.

Existen varios motivos que pueden justificar esta posible heterogeneidad de los parámetros granulométricos dentro de la cántara.

En primer lugar, está la variabilidad intrínseca de las características del sedimento en el fondo del mar. En segundo lugar, la mayor parte de los buques de dragado son del tipo TSHD de Trailing Suction Hopper Dredger (Shao et al. 2015; van Ingen and Castro 2017). Esto significa que estos barcos no dragan de manera estacionaria sino de manera continua, mientras se mueven y, por tanto, dragan una gran superficie del fondo del mar. En tercer lugar, la velocidad de sedimentación de la arena depende directamente del diámetro del grano para una forma y densidad determinadas (Jimenez y Madsen 2003, Martín-Antón et al. 2017, Moreno et al. 2018, Negro et al. 2018). Esto es, cuanto mayor es el tamaño de grano, más rápido se deposita. Por consiguiente, no es improbable que los granos más gruesos pudieran encontrarse en el fondo de la cantara y los más finos cerca de la superficie. Véase la ecuación 4.1 desarrollada por Soulsby (1997)

$$w_s = \frac{10.36v}{d} \cdot \left[ \left( 1 + 0.156 \frac{(s-1)gd^3}{16v^2} \right)^{1/2} - 1 \right] \quad [4.1]$$

donde

$w_s$  es la velocidad de sedimentación

$v$  es la viscosidad cinemática del agua

$d$  el diámetro del sedimento

$s$  es la densidad relativa ( $s = \rho_s / \rho_w$ ) o cociente entre la densidad del sedimento y la del agua del mar

$g$  es la aceleración de la gravedad

O alguna otra formulación como la 4.2, más sencilla, fácil de recordar y mucho más utilizada

$$w_s = 273(D_{50})^{1.1} \quad [4.2]$$

Para estimar a bordo los parámetros granulométricos de la arena, la metodología actual consiste en tomar una única muestra de la superficie con una cuchara Van Veen una vez la cántara está llena y tras la autorización expresa del capitán (Roman-Sierra et al. 2011; Velegrakis et al. 2010).

Es también importante el considerar los fragmentos de conchas o bioclastos. A causa de su forma plana, estos trocitos de concha tardan más en decantar que los redondeados granos de sílice. De ahí que haya generalmente un mayor porcentaje de conchas en la superficie de la cántara. Es lógico pensar que esta acumulación pueda afectar la representatividad de la muestra y, por tanto, que este aspecto también debe tenerse en cuenta frente a otro método de muestreo.

Así, el objetivo de este capítulo es evaluar la variabilidad del tamaño de arena dentro de la cántara tanto a lo largo de su superficie como en profundidad. Además, se proponen algunas mejoras de la actual metodología, exponiendo una mejor técnica de muestreo a bordo de la draga, incluyendo una comparación y discusión de los resultados obtenidos. Para alcanzar este propósito, se comparan los resultados de muestras tomadas en la cántara mediante dos diferentes metodologías con los análisis de muestras tomadas del fondo del mar en la zona de préstamo elegida para la realimentación de la playa.

## **4.2 Zona de estudio**

El Golfo de Cádiz es una cuenca delimitada al norte por la costa suroeste de la Península Ibérica, al este por el Estrecho de Gibraltar y al sur por Marruecos, como se muestra en la Figura 3.1. Como ya se comentó en el apartado 3.2, la marea tiene una periodicidad semidiurna con una carrera que oscila entre 1.10 y 3.22 m en función de la fase lunar.

Aparte, deben tenerse en cuenta otras variaciones del nivel del mar debidas al viento y al factor barométrico invertido (Aboitiz et al., 2008). Los vientos dominantes son un poniente húmedo o viento de la mar y un seco levante o terral.

Recordemos que la zona de estudio incluye un área de préstamo sumergida, el Placer de Meca, localizado cerca, al SW, del Cabo de Trafalgar ( $36^{\circ}12' N; 6^{\circ}05' W$ ), que se encuentra a unos 15 o 20 m de profundidad y que tiene un volumen de arena estimado en unos 25 Mm<sup>3</sup>. Es, por tanto, una importante reserva de arenas medias utilizada durante

muchos años por la Dirección General de la Costa y el Mar con el propósito de regenerar playas relativamente cercanas (Esgemar et al. 1991; Geomytsa 1991).

### 4.3 Metodología

Antes de realizar una regeneración de playa, es imprescindible muestrear el fondo del mar de la zona de préstamo y comprobar la compatibilidad del material de préstamo frente a la arena nativa de la playa a realimentar.

Con ese propósito, debe recogerse un número mínimo de muestras dependiendo de la superficie de la zona de préstamo (MARM, 2010) o de la cantidad de arena a dragar (OSPAR, 2014). De acuerdo con la instrucción del entonces MARM (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino), el número de muestras debe calcularse según la ecuación 4.3.

$$N = \frac{\sqrt{S}}{100} \quad [4.3]$$

Donde N es el número de muestras y S la superficie a dragar en m<sup>2</sup>

Por otra parte, de acuerdo a la comisión OSPAR, el número de muestras debe tomarse siguiendo las indicaciones de la Tabla 4.1

Tabla 4.1 Número de estaciones o puntos de muestreo requeridos para obtener resultados representativos asumiendo una distribución especial uniforme del sedimento en el área de dragado (OSPAR, 2014).

Volumen dragado (m <sup>3</sup> )	Número de estaciones
Up to 25000	3
25000-100000	4-6
100000-500000	7-15
500000-2000000	16-30
>2000000	10 más por millón de m <sup>3</sup>

Por consiguiente, conociendo que la superficie de la zona de extracción en el Placer de Meca es de aproximadamente  $4 \cdot 10^6 \text{ m}^2$ , el número de muestras debería de ser de al menos 20 según la normativa MARM (2010). De modo similar, siguiendo los criterios de la OSPAR (2014), deberían tomarse entre 7 y 15 muestras dado que la cantidad dragada era inferior a los 500.000 m<sup>3</sup>. Así, se decidió la toma de 20 muestras.

Posteriormente, se tomaron las muestras a bordo de la draga Balder R de la compañía Rodhe Nielsen. Sus características se muestran en la tabla 4.2; y la cántara de 6.000 m<sup>3</sup> de capacidad, llena de arena, en la figura 4.1.

*Tabla 4.2 Características de la draga Balder R de la compañía Rodhe Nielsen*

Gross tonnage	5189 GT
Length overall	111.30 m
Breadth	19.40 m
Draught loaded	7.00 m
Draught unloaded	3.70 m
Hopper capacity	6000 m <sup>3</sup>
Hopper depth	6.50 m
Main engines	2 x 2985 kW
Bow thruster	2 x 450 kW
Pump ashore power	2 x 2117 kW
Total installed power	10504 kW
Speed empty	15.3 kn
Speed loaded	14.0 kn
Crew	7-14
Flag	Danish
Class	Bureau Veritas

El muestreo durante el dragado se realizó utilizando dos técnicas diferentes explicadas más adelante. Una vez tomadas las muestras, el análisis se efectuó siguiendo el procedimiento estándar descrito por Syvitski (1991) y ligeramente modificado por

Roman-Sierra et al. (2013). Así se obtuvieron los parámetros: mediana o  $D_{50}$ , desviación típica o sorting ( $\sigma$ ), skewness o asimetría y aplastamiento o kurtosis.

Además, a fin de facilitar la interpretación física de los datos, los dos primeros parámetros ( $D_{50}$  y  $\sigma$ ) se representan en mm. No se usó, por tanto, la transformación log-normal a unidades phi propuesta por Krumbein (1934).

El muestreo se realizaba al final del dragado, cuando la cántara estaba llena de arena y el exceso de agua de mar ya había sido drenado. De las dos diferentes técnicas usadas, hablaremos primero de la metodología estándar, la cuchara Van Veen (Figura 3.1a). La cuchara bivalva se usaba en 8 localizaciones diferentes, distribuidas en la superficie a babor y estribor y separadas unos 10 metros unos puntos de otros a fin de comprobar la homogeneidad de la superficie (Figura 4.1)

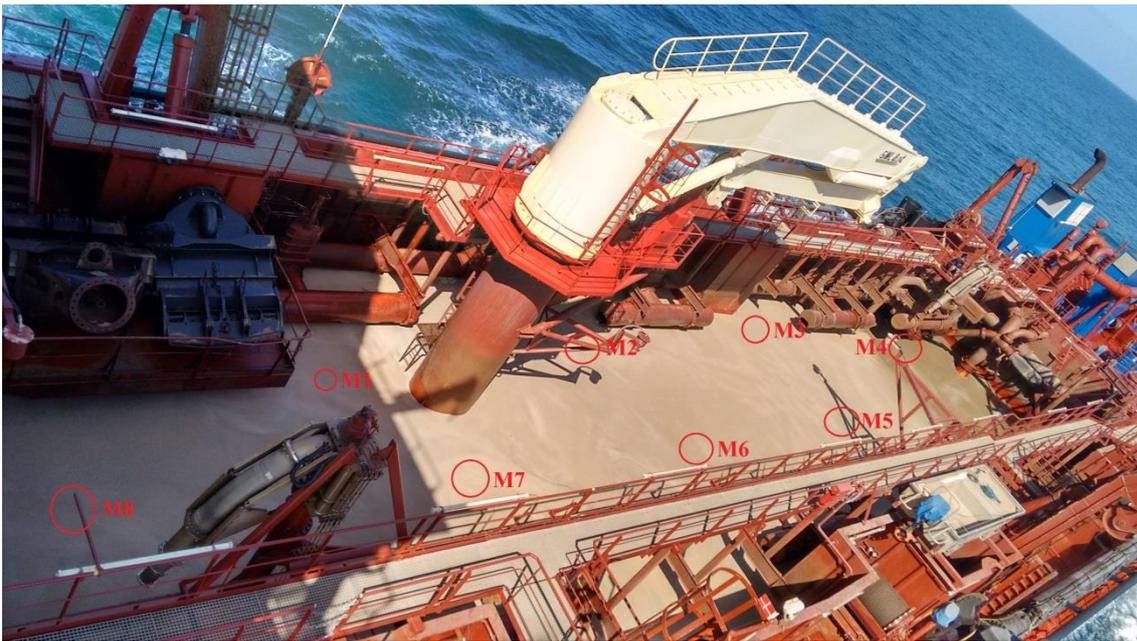


Figura 4.1 Visión general de la cántara llena de arena de la draga Balder R y de los 8 puntos de muestreo para comprobar la homogeneidad superficial del sedimento.

El segundo método está enfocado a detectar la posible heterogeneidad del tamaño de la arena con la profundidad. Dos tubos core de un metro de longitud fueron introducidos a proa y popa por impacto con un martillo manual. A través de la experimentación, se ha

deducido que un metro es la máxima profundidad que se puede conseguir mediante el golpeo con una maza sin ayuda mecánica.

La profundidad de la cántara es de 6.50 m (Fig. 3.1b), por lo que sólo se muestreó en una sexta parte de su profundidad. La primera capa de sedimento, de 5 cm de grueso y con un gran porcentaje de conchas, fue retirada de la parte superior de los cores. Después, se analizaron granulométricamente las muestras tomadas cada 10 cm (Fig. 4.2)



Fig. 4.2 Toma de muestras cada 10 cm de uno de los cores de 1 m de longitud

Se compararon los resultados de la zona de préstamo con los de las muestras tomadas a bordo de la draga a fin de comprobar con qué metodología se obtenían los más similares y cual era, en consecuencia, la mejor opción para muestrear en el buque.

## **4.4 Resultados y Discusión**

### *4.4.1 Muestreo con la cuchara Van Veen*

En cuanto a las muestras tomadas con la cuchara Van Veen en los ocho puntos repartidos a lo largo y ancho de la superficie (Fig. 4.1), debe destacarse que el  $D_{50}$  es relativamente homogéneo en la superficie, variando sólo entre 0.28 y 0.30 mm (véase Fig. 4.3), lo que supone únicamente un 10% de diferencia entre todos los valores de dichas muestras.

Sí, en cambio, hay una diferencia importante (aproximadamente del 20%) entre las muestras superficiales y la media del fondo del mar.

La desviación típica o sorting tiene un rango mayor de variabilidad, de 0.07 a 0.12 mm. Los valores medios de la zona de préstamo, 0.25 mm y 0.07 mm para el  $D_{50}$  y el sorting respectivamente, también están representados en la Figura 4.3. Finalmente, el porcentaje de conchas ascendió hasta el 25%.

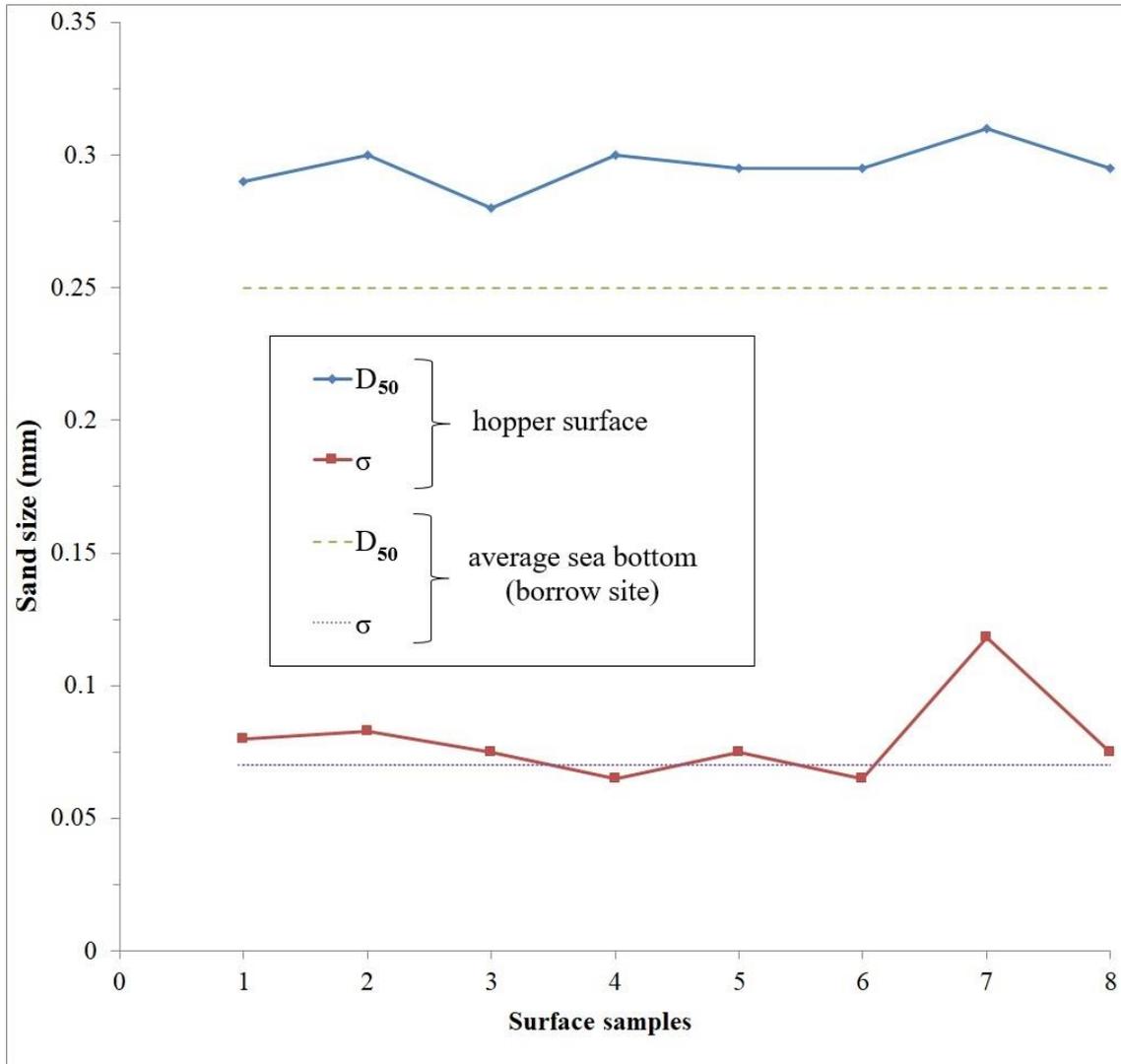


Figura 4.3 Resultados del D<sub>50</sub> y  $\sigma$  en las 8 muestras de la superficie de la cántara junto con los valores medios del fondo del mar en la zona de préstamo

#### 4.4.2 Muestreo con los tubos core

En la figura 4.4 se visualizan los datos obtenidos de los dos tubos core de un metro de longitud introducidos por percusión manual a proa y popa de la draga. Es posible observar la heterogeneidad del tamaño de grano con la profundidad en ambos casos. Se descartó el estrato más cercano a la superficie por su alto contenido en bioclastos por lo que el muestreo comenzó a partir de los 5 cm de profundidad.

Como puede verse en la figura 4.4, no hay diferencias apreciables entre los resultados de proa y popa. El D<sub>50</sub> aumenta de 0.21 o 0.22 mm en la superficie hasta 0.26 mm a 85 y 95

cm de profundidad a proa y popa respectivamente. Demostramos pues una fuerte correlación entre el  $D_{50}$  y la profundidad, al menos en el primer metro desde la superficie.

De acuerdo a lo esperado previamente, debido a la importancia de la velocidad de asentamiento (Ecuaciones 1 y 2), los resultados muestran como los granos más gruesos se encontraron en la parte inferior de los cores y los más finos cerca de la superficie. Obviamente, excepto para los trocitos de concha o bioclastos que son los últimos en depositarse debido a su forma plana. No obstante, la desviación típica o sorting permanece casi constante, alrededor de los 0.08 mm.

Por otra parte, una desventaja de este método es la imposibilidad de penetrar más de un metro con un procedimiento manual de precisión, altura seis veces menor que la de la cántara de la draga en este caso de estudio. Por tanto, esta relación lineal descubierta entre el  $D_{50}$  y la profundidad dentro de la cántara, no puede ampliarse (de momento) a profundidades mayores del metro hasta que se puedan realizar otras tomas, tipo sondeo mecanizado.

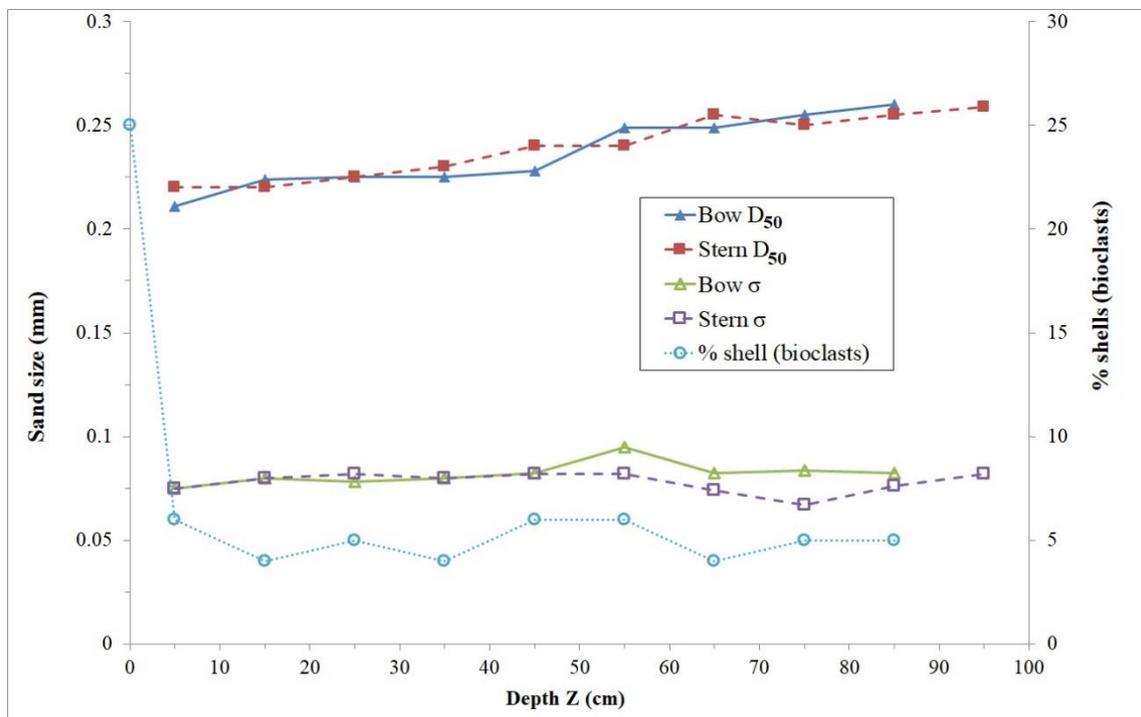


Fig. 4.4 Resultados del  $D_{50}$  y de la desviación típica  $\sigma$  de los dos sondeos de un metro de profundidad realizados a proa y popa. Item, porcentaje de bioclastos.

4.4.3 *Comparación entre los resultados de la cuchara Van Veen y los cores versus los datos originales del fondo del mar en la zona de préstamo.*

Finalmente, se ha realizado una comparación entre los resultados de la superficie de la zona del préstamo. La tabla 4.3 muestra la media de los resultados y el porcentaje de error tomando como referencia los datos del fondo del mar de la zona de préstamo. Puede verse como la metodología de muestreo con los sondeos o cores proporciona un  $D_{50}$  más similar a los del fondo del mar. Apréciase un error de sólo el 4% frente a un 20% para los resultados de la cuchara Van Veen. Por otra parte, los valores de la desviación típica son los mismos (0.08 mm en ambos casos).

Además, como puede comprobarse en la Fig. 4.4 y en la tabla 4.3, el porcentaje de fragmentos de concha o bioclastos era muy superior en la superficie que en el resto de la cántara (25% y 5% respectivamente).

Tabla 4.3 *Media de resultados y porcentaje de error de los dos diferentes métodos de muestreo (Van Veen versus sondeos o cores de 1 m de profundidad). Los datos de referencia son los resultados de la superficie del fondo del mar en la zona de préstamo.*

	Borrow site		Hopper		
	Sea Bottom	Surface (Van Veen) (0 m)	Core (0.05-1 m)		
		Average	Error	Average	Error
units	mm	mm	%	mm	%
<b>D<sub>50</sub></b>	0.25	0.30	20	0.24	- 4
<b>σ</b>	0.07	0.08	14	0.08	14
<b>% shells</b>	8	25	213	5	- 38

Estos bioclastos se concentraban en los primeros 2-3 cm, lo que supone una gran proporción de la muestra tomada por la cuchara Van Veen que atrapa un espesor de aproximadamente 5 cm de grueso de la superficie en nuestras pruebas. Aunque puede

alcanzar hasta 10 cm, dependiendo del tamaño y peso de la cuchara, según Román-Sierra et al. (2011).

La presencia de estos bioclastos también influye en el tamaño de grano, resultando en una diferencia de hasta el 30% más en la superficie que inmediatamente debajo. Puede verse en la Figura 4.4 como los primeros cm tienen un porcentaje de bioclastos del 25% mientras que este porcentaje baja y oscila entre el 4 y el 6 % para el resto de las muestras.

Así pues, en resumen, con los resultados de la cuchara Van Veen se determina la homogeneidad del sedimento a lo largo de toda la superficie de la cántara, lo que proporciona justificación en favor del protocolo de tomar una única muestra. Sin embargo, y debido al alto porcentaje de conchas, las muestras superficiales no son representativas ni del contenido general de la cántara ni de la zona de préstamo. El tomar muestras no representativas, puede causar que el ingeniero director de la obra tome una decisión equivocada respecto a la localización específica de vertido de la arena durante los trabajos de regeneración de la playa. Este error puede conducir a una menor estabilidad, un impacto negativo en el turismo y, por consiguiente, una pérdida económica. Por consiguiente, el método Van Veen debe descartarse a bordo de una draga. Además, la metodología de sondeos manuales aquí propuesta proporciona una determinación más precisa de los parámetros granulométricos.

Un último pero importante apunte. Las muestras analizadas se tomaron de un único barco ya que la Balder R era la draga operativa en aquel momento para la regeneración de este caso en estudio. Por tanto, los resultados obtenidos en este experimento no pueden (en teoría) ser generalizados urbi et orbe inmediatamente. No obstante, debido a su velocidad de ejecución y a su bajo coste, la misma metodología puede ser implementada fácilmente para otras regeneraciones de playa. Así, puede comprobarse para cada caso particular si los resultados obtenidos aquí sobre la distribución del tamaño de grano de la arena en la cántara son completamente generalizables o sólo marcan una tendencia que debe ajustarse en función de las características de cada yacimiento y las de la propia draga.

## **5. CONCLUSIONES**

## 5. CONCLUSIONES

### 5.1 Sobre la influencia de los métodos de tamizado

Es bien conocida la importancia tanto de la mediana o  $D_{50}$  como del resto de parámetros granulométricos (desviación típica, asimetría y kurtosis o aplastamiento) en el entendimiento de la dinámica costera y otros comportamientos geomorfológicos de las playas. Y, sin embargo, todavía no se había considerado la influencia del modo de tamizado en la determinación de estos parámetros.

Por esta razón, se tomaron 19 muestras a bordo de la Balder, una draga de succión en marcha, mientras extraía arena del Placer de Meca (frente al Cabo de Trafalgar) para una regeneración de playas en el Golfo de Cádiz. El tamizado de las muestras, para su posterior análisis granulométrico, se realizó mediante tres metodologías ligeramente diferentes. Tamices de diámetro pequeño (10 cm) y de diámetro grande (20 cm), y tamizado mecánico frente al manual.

Los resultados demostraron una clara relación para el valor del  $D_{50}$ . Los valores mayores se obtuvieron siempre con los tamices pequeños y agitación manual a bordo de la draga. Y el tamizado mecánico en el laboratorio en tierra proporcionó siempre los valores más pequeños.

El método de tamizado no influye ni en la desviación típica o sorting ni en el coeficiente de asimetría o skewness, lo que significa que la distribución del tamaño de grano se desplaza pero la forma permanece invariable. Sin embargo, debe apuntarse que la desviación típica es mayor para aquellas muestras con un porcentaje de conchas o bioclastos superior al 10%.

La kurtosis sufre un comportamiento similar al del  $D_{50}$  pues los valores obtenidos con los tamices pequeños son siempre mayores que con los tamices de diámetro de 20 cm. Y la tamización mecanizada nos arroja también siempre los valores inferiores.

A la hora de comparar numéricamente los resultados, se tomaron como referencia los valores obtenidos mediante agitación mecánica con tamices grandes, por ser el procedimiento estándar en tierra. Sin embargo, este método no puede utilizarse habitualmente a bordo a causa de la escasez de espacio, de las aceleraciones de todo tipo

producidas por el movimiento del buque y a la ausencia de fiabilidad en la estabilidad de la corriente eléctrica. Los errores detectados para los tamices pequeños en el  $D_{50}$  son casi del triple de los encontrados para los tamices grandes (8.8% frente al 3.2% respectivamente), de aproximadamente un 50% para la desviación típica (9.7 y 6.6%) y de casi el doble para la kurtosis (26.5 y 14.6%). Por consiguiente, podemos asumir que los tamices de 20 cm de diámetro son la mejor metodología a bordo y que, de manera definitiva, los tamices pequeños deberían rechazarse como método de tamizado en una draga.

## **5.2 Sobre la variabilidad del tamaño de la arena dentro de la cántara.**

Aunque de manera generalizada está absolutamente aceptada la importancia relevante del tamaño de arena en el diseño de proyectos de ingeniería costera, la variabilidad del tamaño de grano dentro de la cántara de una draga no ha sido investigada hasta ahora. Esta es la razón por la que numerosas muestras se tomaron usando dos diferentes metodologías en la cántara de una draga durante los trabajos que realizaba para regenerar una playa en el Golfo de Cádiz. La primera consistió en el uso de la cuchara Van Veen, método estándar contemplado en el protocolo de muestreo a bordo de una draga. Para la segunda se usaron tubos hincados mediante percusión manual con martillo.

Las ocho muestras superficiales tomadas con la cuchara Van Veen repartidas espacialmente mostraron una gran homogeneidad (las diferencias fueron inferiores al 10%), lo que reivindicaría la costumbre de tomar una única muestra como representativa del volumen global de la cántara. Sin embargo, esto no es cierto debido al altísimo porcentaje de conchas en la superficie inducido probablemente por su forma lajosa y plana y su consecuente menor velocidad de deposición frente al grano de sílice redondeado. Esa presencia de bioclastos también afecta al tamaño de grano, resultando una diferencia del  $D_{50}$  de hasta el 30 % superior en la superficie respecto al estrato inmediatamente inferior. Esta gran diferencia en el  $D_{50}$  puede repercutir en la toma de decisiones erróneas a la hora de indicar la localización específica del vertido de arena durante la realimentación de la playa. Aceptar un  $D_{50}$  equivocado, no representativo, puede conducir a una menor estabilidad respecto a la prevista y a un impacto negativo en el turismo y la consiguiente pérdida económica. Por consiguiente, el muestreo mediante cuchara Van Veen debe ser rechazado de ahora en adelante.

Los tubos o cores introducidos mediante percusión manual con martillo fueron un método útil a la hora de determinar la correlación directa entre tamaño de grano y profundidad.

El porcentaje de conchas era de un 25% en los primeros 3 cm descendiendo hasta un valor casi constante de entre un 4 a un 6% en el resto de la columna, por lo que esos 3 cm se descartaron del análisis posterior. Los valores de  $D_{50}$  obtenidos a proa y popa variaban entre 0.21 y 0.22 mm cerca de la superficie hasta 0.26 mm (un incremento superior al 20 %) a 0.85 y 0.95 m de profundidad (máxima penetración conseguida en ambos casos). Este valor de 0.26 mm es muy cercano al valor medio de 0.25 mm del fondo el mar en la zona de préstamo. La desviación típica fue casi constante en toda la profundidad.

### 5.3 Futuras líneas de actuación.

En relación con los métodos de tamizado, cabe indicar que quedaría pendiente una interesante y complementaria posibilidad de investigación. Se han visto las diferencias inducidas por la agitación manual usando tamices de diámetros de 10 y de 20 cm. Nos restaría analizar una serie de muestras con tamizadora mecánica en laboratorio en tierra usando ambas columnas de tamices (pequeños y grandes) y observar los posibles cambios.

La principal desventaja del método de percusión manual con martillo es la imposibilidad de penetrar más de un metro. Si tenemos en cuenta que la altura de la cántara de la draga utilizada era de casi 6 metros en este caso, queda claro que esta relación directa descubierta entre el  $D_{50}$  y la profundidad dentro de la cántara, no puede ampliarse (de momento) a profundidades mayores del metro. Será pues conveniente el plantear experimentos complementarios, mediante la utilización de vibrocores en la propia cántara o una metodología similar, como una futura línea de investigación. Puesto que esta operación sería la primera vez que se realizaría, es de prever una posible reticencia por parte del contratista dragador por la posible disminución de rendimiento de sus equipos, que habría de compensar económicamente.

Además, debe puntualizarse que este estudio ha sido llevado a cabo en una única draga. Por consiguiente, nos podría quedar la duda (en teoría) de si las tendencias descritas aquí son absolutamente generalizables a otros tipos de arena y a dragas con diferentes

características. Sin embargo, la metodología descrita en esta tesis es de muy fácil realización y de muy bajo coste. Se propone pues el realizar este mismo experimento en otras zonas de préstamo con arena de diferente distribución granulométrica y con dragas de otras dimensiones.

Finalmente, realizado el experimento a columna completa en la cántara, podría encontrarse una correlación entre los parámetros granulométricos superficiales (excluidos los bioclastos), de una alta facilidad de toma de muestra, y los valores medios ponderados de la columna completa, lo que permitiría desarrollar un sencillo método para estimar los parámetros representativos de las arenas de toda la cántara, habida cuenta también, la casi ausencia de variabilidad a lo largo de la superficie.



## **BIBLIOGRAFIA**

## BIBLIOGRAFÍA

Aboitiz, A., Tejedor, B., Munoz, J.J., Abarca, J.M. (2008). "Relation between daily variations in sea level and meteorological forcing in Sancti Petri Channel (SW Spain)". *Ciencias Marinas*, 34(4), 491-501.

Anfuso, G., Benavente, J. (2006). "Approximation to the classification and morphodynamic behaviour of the beaches between Chipiona and Rota (Cádiz, SW Spain)". *Ciencias Marinas*, 32 (4), 605-616.

ASTM. (2007). American Society for Testing and Materials. Annual book of ASTM Standards Worldwide.

Austin, L. G., Shah, I. (1983). A method for inter-conversion of microtrac and sieve size distributions. *Powder Technology*, 35, 271-278.

Bernabeu, A., Medina, R., Vidal, C., Muñoz-Perez, J. J. (2001). Estudio morfológico del perfil de playa: modelo de perfil de equilibrio en dos tramos. *Rev. Soc. Geol. España* 14 (3-4), 227-236.

Bernabeu, A. M., Medina, R., Vidal, C. (2002). An equilibrium profile model for tidal environments. *Sci. Mar.*, 66, 325-335.

Bernabeu, A., Muñoz-Pérez, J. J., Medina-Santamaría, R. (2002). Influence of a rocky platform in the profile morphology: Victoria Beach, Cádiz (Spain). *Ciencias Marinas*, 28(2), 181-192.

Blott, S. J.; Pye, K. (2001). Gradistat: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surf. Proc. Land*, 26, 1237-1248.

Blott, S. J., Pye, K. (2006). Particle size distribution analysis of sand-sized particles by laser diffraction: an experimental investigation of instrument sensitivity and the effects of particle shape. *Sedimentology*, 53, 671-685.

CUR. (1987). Manual on Artificial Beach Nourishment, Centre for Civil Engineering Research, Codes and Specifications, Report n. 130.

Dean, R.G. (1991). "Equilibrium beach profiles: characteristics and applications". *Journal of Coastal Research*, 7, 5-84.

Dean, R.G. (2003). Beach nourishment: theory and practice. Advanced Series on Ocean Engineering. World Scientific Pub. Co., River Edge, New Jersey (399 pp.)

Emery, K.O. (1945). Entrapment of Air in Beach Sand. *Journal of Sedimentary Research*, 15.

Esgemar. (1991). “Marine geophysical study between the Cape of Trafalgar and the Carnero Promontory”. Dirección General de Costas. Ministerio de Obras Públicas y Transportes, Madrid, Ref 00-373, 5 vols.

Folk R. L.; Ward W. C. (1957). A study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27, 3–26.

Gallop, S. L., Collins, M., Pattiaratchi, C. B., Eliot, M. J., Bosserelle, C., Ghisalberti, M., Collins, L.B., Eliot, I., Erftemeijer, P. L. A., Larcombe, P., Marigómez, I., Stul, T. and White, D. J. (2015). “Challenges in transferring knowledge between scales in coastal sediment dynamics”. *Frontiers in Marine Science* 2 (82).

Geomytsa (1991). “Marine geophysical study between the Cape of Trafalgar and the Puerco Tower (Cadiz)”. Dirección General de Costas. Ministerio de Obras Públicas y Transportes, Madrid, Ref 00-371, 5 vols.

Giardino, A., Diamantidou, E., Pearson, S., Santinelli, G., den Heijer, K. (2019). A regional application of bayesian modeling for coastal erosion and sand nourishment management. *Water*, 11, 61.

Gomez-Enri, J., Aboitiz, A., Tejedor, B., Villares, P. (2012). “Seasonal and interannual variability in the Gulf of Cadiz: Validation of gridded altimeter products”. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 96, 114-121.

Gomez-Pina, G., Fages, L., Ramirez, J.L., Muñoz-Perez, J.J., Enriquez, J. (2007). “A critical review of beach restoration projects in the northern coast of Cadiz (Spain) after thirteen years”. *Proc. Coast. Eng. Conf.* 4167–4178.

Gravens, M.B., Emersole, B.A., Walton, T.L., Wise, R.A. (2002). “Beach Fill Design”. In Warp, D.L. (Ed.) *Coastal Engineering Manual*, Part 5 Cap. 4, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC.

- Guillen, J., Hoekstra P. (1996). The “equilibrium” distribution of grain size fractions and its implications for cross-shore sediment transport: a conceptual model. *Marine Geology*, 135.1-4, 15-33.
- Hamm, L., Capobianco, M., Dette, H.H., Lechuga, A., Spanhoff, R., Stive, M.J.F. (2002). “A summary of European experience with shore nourishment”. *Coast. Eng.* 47, 237–264.
- 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”. *Coast. Eng.* 47, 81–111.
- Houston, J.R. (2013). “The economic value of beaches – a 2013 update”. *Shore and Beach*, 81, 3-11.
- Jimenez, J.A., Madsen, O.S. (2003). “A simple formula to estimate settling velocity of natural sediments”. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 129 (2), 70–78.
- Karambas, T.V., and Samaras, A.G. (2014). “Soft shore protection methods: The use of advanced numerical models in the evaluation of beach nourishment”. *Ocean Engineering*, 92, 129-136.
- Kaufman, J. (2006). Sieve analysis laboratory. *Sedimentation and Stratigraphy*.
- Klein, Y.L., Osleeb, J.P., Viola, M.R. (2004). “Tourism- generated earnings in the coastal zone: A regional Analysis”. *Journal of Coastal Research*, 20, 1080-1088.
- Konert, M., Vandenberghe, J. (1997). Comparison of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis: a solution for the underestimation of the clay fraction. *Sedimentology*, 44, 523-535.
- Krumbein WC. (1934). “Size frequency distributions of sediments”. *Journal of Sedimentary Petrology* 4, 65–77.
- Laboratorio de Geotecnia. (1996). Normas NLT II.- Ensayos de suelos. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Pág. var. ISBN: 84-7790-136-8, NIPO: 163-92-014-5
- Larson, M., Kraus, N.C. (1991). “Mathematical modelling of the fate of beach fill”. *Coastal Engineering*, 16, 83-114.

- López-García, P., Gómez-Enri, J., Muñoz-Pérez, J.J. (2019). “Accuracy assessment of wave data from altimeter near the coast”. *Ocean Eng.*, 178, 229–32.
- Magno, M. C., Venti, F., Bergamin, L., Galianone, G., Pierfranceschi, G., Romano, E. (2018). A comparison between Laser Granulometer and Sedigraph in grain size analysis of marine sediments. *Measurement*, 128, 231-236.
- Martín-Antón, M., Negro, V., del Campo, J. M., López-Gutiérrez, J. S., & Esteban, M. D. (2016). Review of coastal land reclamation situation in the world. *Journal of Coastal Research*, 75(sp1), 667-671.
- Martín-Antón, M., Negro, V., Campo, J. M. D., López-Gutiérrez, J. S., & Esteban, M. D. (2017). El impacto de las Obras Públicas en España: Paisaje natural, construido y destruido. *Revista de la construcción*, 16(1), 82-91.
- MARM. (2010). Instrucción Técnica para la Gestión Ambiental de las extracciones marinas para la obtención de arena. Ed. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 30.
- Mclachlan, A., Turner, I. (2008). The Interstitial Environment of Sandy Beaches. *Marine Ecology*, 15, 177-212.
- Medellin, G., Torres-Freyermuth, A., Tomasicchio, G. R., Francone, A., Tereszkievicz, P. A., Lusito, L., Palemon-Arcos, L., Lopez, J. (2018). Field and numerical study of resistance and resilience on a sea breeze dominated beach in Yucatan (Mexico). *Water*, 10, 1806.
- Miedema S.A. and Vlasblom W.J. (1996). “Theory for hopper sedimentation”. 29th Annual Texas A&M Dredging Seminar. New Orleans, June.
- Miedema S.A. (2009). “The effect of the bed rise velocity on the sedimentation process in hopper dredges”. *WEDA Journal of Dredging* 10(1), 10-30.
- Ministry of Environment. (2003). “Environmental impact study: Use of Meca sandbank to Cadiz beach nourishment”. Resolution of the Secretariat of the Environment, BOE 108, 17266–17270 (in Spanish).

Moreno, L., Negro, V., Garrote, L., Muñoz-Pérez, J. J., López, J. S., & Esteban, M. D. (2018). An Engineering Method For The Preliminary Functional Design Of Perched Beaches. Theoretical Approach. *Journal of Coastal Research*, 85(sp1), 1261-1265.

Muñoz-Perez, J.J., Gutierrez, J.M., Naranjo, J.M., Torres, E., Fages, L. (2000). Position and monitoring of anti-trawling reefs in the Cape of Trafalgar (Gulf of Cadiz, SW Spain). *Bulletin of Marine Science*, 67(2), 761-772.

Muñoz-Perez, J.J., Enriquez, J. (1998). Dinámica Litoral de una Unidad Fisiográfica Completa: Sanlúcar-Rota. *Revista de Obras Públicas*, N° 3375, 35-44.

Muñoz-Perez, J.J., Gutierrez-Mas, J.M. (1999). Tipología y eficacia de los espigones de escollera construidos para la mejora de la estabilidad de las playas del litoral atlántico de la provincia de Cádiz. *Boletín Geológico Minero*, 110(1), 53-66.

Muñoz-Perez, J.J., Lopez De San Roman Blanco, B., Gutierrez-Mas, J.M., Moreno, L., Cuenca, G. J. (2001). Cost of beach maintenance in the gulf of Cádiz (SW Spain). *Coastal Engineering*, 42, 143-153.

Muñoz-Perez, J.J., Gutierrez-Mas, J. M., Parrado, J.M., Moreno, L. (1999). “Sediment transport velocity by tracer experiment at Regla Beach (Spain)”. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 125(6), 332-335.

Muñoz-Perez, J.J., Gutierrez-Mas, J.M., Moreno, J., Español, L., Moreno, L. and Bernabeu, A. (2003). “A Portable Meter System for Dry Weight Control in Dredging Hoppers”. *J. of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 129 (2), 79–85.

Muñoz-Perez, J.J., Roman-Sierra, J., Navarro-Pons, M., Neves, M.G., and del Campo, J.M. (2014). Comments on “Confirmation of Beach Accretion by Grain-Size Trend Analysis: Camposoto Beach, Cádiz, SW Spain” by E. Poizot et al. (2013). *Geo-Marine Letters* 34 (1), 75–78.

Negro, V., López-Gutiérrez, J. S., Esteban, M. D., del Campo, J. M., & Luengo, J. (2018). Action Strategy for Studying Marine and Coastal Works with Climate Change on the Horizon. *Journal of Coastal Research*, 506-510.

Nielsen, P., Robert, S., Møller-christiansen, B., Oliva, P. (2001). Infiltration effects on sediment mobility under waves. *Coastal Engineering* 42, 105–114.

Orru, C., Chavarrias, V., Uijtewaal, W. S. J., Blom, A. (2014). Image analysis for measuring the size stratification in sand-gravel laboratory experiments. *Earth Surf. Dynam*, 2, 217-232.

OSPAR Commision. (2014). Guidelines for the management of dredged material at sea. Available at <https://dredging.org/documents/ceda/downloads/environment-ospar-dmguidelines.pdf>

Pettijohn, F.J., Potter, P.E., Siever, R. (1987). *Sand and sandstone*. Ed. Springer – Verlag.

Pope, L. R., Ward, C. W. (1998). *Manual on test sieving methods*.

Poulet, P., Muñoz Pérez, J.J., Poortvliet, G., Mera, J., Contreras, A., López, P. Influence of different sieving methods on estimation of sand size parameters. *Water* 2019 , 11, 879 doi:10.3390/w11050879

Poulet, P., Muñoz Pérez, J.J., López, P., García López, S., Martell, R., Silva, R., Moreno, L. Sand size variability inside the hopper of a trailing suction dredger for beach nourishment purposes. *Geo-Marine Letters*. <https://doi.org/10.1007/s00367-019-00615-w>

Powers, M.C. (1953). A new roundness scale for sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Research*.

Pranzini, E., Wetzel, L., Williams, A. (2015). “Aspects of coastal erosion and protection in Europe”. *J. of Coastal Conservation*. DOI 10.1007/s11852-015-0399-3

Pranzini, E., Anfuso, G., Cinelli, I., Piccardi, M., Vitale, G. (2018). Shore protection structures increase and evolution on the Northern Tuscany Coast (Italy): Influence of tourism industry. *Water*, 10, 1647.

Pranzini, E., Anfuso, G., Muñoz-Perez, J.J. (2018). “A probabilistic approach to borrow sediment selection in beach nourishment projects”. *Coastal Engineering*, 139, 32-35.

Roman-Sierra, J., Navarro, M., Muñoz-Perez, J. J. and Gomez, G. (2011). “Turbidity and other effects resulting from Trafalgar sandbank dredging and Palmar Beach nourishment”. *J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 137 (6), 332-343.

Roman-Sierra, J., Muñoz-Perez, J.J. and Navarro-Pons, M. (2013). “Influence of Sieving Time on the Efficiency and Accuracy of Grain-Size Analysis of Beach and Dune Sands”. *Sedimentology* 60, 1484–1497.

Roman-Sierra, J., Muñoz-Perez, J.J. and Navarro-Pons, M. (2014). “Beach nourishment effects on sand porosity variability”. *Coastal Engineering* 83, 221–232.

Saponieri, A., Valentini, N., Di Risio, M., Pasquali, D., Damiani, L. (2018). Laboratory investigation on the evolution of a sandy beach nourishment protected by mixed soft-hard system. *Water*, 10, 1171.

Shao, D., Gao, W., Purnama, A., and Guo, J. (2015). “Modeling dredging-induced turbidity plumes in the far field under oscillatory tidal currents”. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 143(3), 06016007.

Soulsby, R. L. (1997). *Dynamics of Marine sands*, Thomas Telford, London.

Syvitski J.P.M. (1991). *Principles, Methods, and Application of Particle Size Analysis*, Cambridge University Press, New York, 368 pp.

Trembanis, A.C. and Pilkey, O.H. (1999). “Comparison of beach nourishment along the U.S. Atlantic, Great Lakes, Gulf of Mexico New England shorelines”. *Coastal Management* 27, 329–340.

USACE. (1970). *Laboratory Soils Testing Engineer Manual*.

USACE. (2002). *Coastal Engineering Manual, V-4-24 EM 1110-2-1100. Part III Coastal Sediment Processes*. Webpage <http://www.publications.usace.army.mil/USACE-Publications/Engineer-Manuals/>

Van Ingen, L.W. and Castro, B. (2017). “Towards a green maritime technology”. *Terra et Aqua* 149, 18-27.

Van Rhee, C. (2002). *On the sedimentation process in a trailing suction hopper dredger*. PhD thesis Technische Universiteit Delft (Netherlands).

Velegrakis, A. F., Ballay, A., Poulos, S., Radzevicius, R., Bellec, V. and Manso, F. (2010). “European marine aggregates resources: Origins, usage, prospecting and dredging techniques”. *Journal of Coastal Research* 51, 1-14.

Zingg, T. (1935). Beiträge zur Schotteranalyse: Schweizerische Mineralogische und Petrologische Mitteilungen, 15, 39-140.







## ANEXO I. Publicaciones y ponencias.

### SAND SIZE VARIABILITY INSIDE THE HOPPER OF A TRAILING SUCTION DREDGER IN REGARDS TO BEACH NOURISHMENT PROJECTS

Patricio Poulet, Ministry of Environment, Spain, [ppoulet@magrama.es](mailto:ppoulet@magrama.es)

Juan J. Muñoz-Perez, University of Cadiz (Spain), [juanjose.munoz@uca.es](mailto:juanjose.munoz@uca.es)

Javier Mera, University of Cadiz (Spain), [javier.merabaston@alum.uca.es](mailto:javier.merabaston@alum.uca.es)

Luis Moreno, Technical University of Madrid (Spain), [luisjuan.moreno@upm.es](mailto:luisjuan.moreno@upm.es)

#### INTRODUCTION

Analysis of field data and aerial photographs over the last half century has shown that the coastline has suffered recession at a rate of about 1 m/year in some points of the Gulf of Cadiz (Muñoz-Perez et al., 2001). A protection program based in sand nourishment, therefore, has been performed during the last 25 years (Muñoz-Perez et al., 2014).

Amongst the design parameters for a beach nourishment project, sand size must be highlighted. Sand size is critical not only to compare the suitability of a borrow sand to substitute the eroded native sand, but also to identify the new equilibrium beach profile and to calculate the sediment volume necessary to achieve the projected berm or beach width.

Some researchers have already taken into account the phenomena that change the theoretical volume of sand needed for a beach nourishment project (CUR, 1987; CEM 2002) such as the methodology for the hopper measurements taken on board of the dredger (Muñoz-Perez et al., 2003) or the sand porosity variability (Roman-Sierra et al., 2014). Nevertheless, no investigation has been carried out about the variability of sand size inside the hopper of a trailing suction dredger till nowadays.

There are several reasons to justify this possible heterogeneity of the granulometric parameters inside the hopper. Firstly, there is the intrinsic variability of the sediment characteristics at the sea bottom. On top of that, most of the vessels which dredge nowadays are of the Trailing Suction Hopper Dredgers (TSHD) type and this means that these vessels do not dredge in a stationary way, i.e. at a certain location and vicinity, but along a big stretch of the bottom (Figure 1). Moreover, the fall speed of sand depends directly on the grain diameter (for a given density); i.e. the larger the grain sizes the faster the grain deposits and so, probably, the coarser grains would be at the bottom of the hopper and the finer grains would be at the top. Finally, it is noteworthy a word about the fragments of shells or bioclasts: because of their flat shape, these pieces linger more than the silica grains to decant and, therefore, their percentage will most likely be larger at the surface of the hopper.

#### METHODOLOGY

During the dredging process, for beach nourishment purpose, a large number of samples were taken by using different methodologies:

- During the dredging, in different moments (therefore, at different depths), at bow and stern.
- At the end of the dredging, in different locations distributed across the surface
  - o By using a Van Veen grab sampler.
  - o By introducing tube-corers by percussion and/or vibration.

Sand samples were analyzed following the standard procedure explained in Syvitski (1991) and modified by Roman-Sierra et al. (2013).



Figure 1 Data were taken from the Balder R (left) and the Costa Dorada dredgers (right)

## RESULTS, DISCUSSION AND CONCLUSIONS

The paper will discuss the data gathered altogether with its importance when designing a beach nourishment project. The methodology used will also be explained in detail in order to let anyone apply it generally. Some interesting practical results drawn from the work carried out will be presented.

## REFERENCES

CEM – Coastal Engineering Manual (2002), US Army Corps of Engineers, Part III Coastal Sediment Processes.

CUR (1987), Manual on Artificial Beach Nourishment, Centre for Civil Engineering Research, Codes and Specifications, Report n. 130.

Muñoz-Perez, J.J., Lopez, B., Gutierrez-Mas, J., Moreno, L., and Cuena, G. (2001), Cost of Beach Maintenance in the Gulf of Cadiz (SW Spain), *Coastal Engineering* 42, pp. 143–153.

Muñoz-Perez, J.J., Gutierrez-Mas, J.M., Moreno, J., Español, L., Moreno, L. and Bernabeu, A. (2003), A Portable Meter System for Dry Weight Control in Dredging Hoppers, *Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 129, No.2, pp. 79–85.

Muñoz-Perez, J.J., Roman-Sierra, J., Navarro-Pons, M., Neves, M.G., and del Campo, J.M. (2014), Comments on "Confirmation of Beach Accretion by Grain-Size Trend Analysis: Camposoto Beach, Cádiz, SW Spain" by E. Poizot et al. (2013), *Geo-Marine Letters* 34 (1), pp. 75–78.

Roman-Sierra, J., Muñoz-Perez, J.J., Navarro-Pons, M. (2013), Influence of Sieving Time on the Efficiency and Accuracy of Grain-Size Analysis of Beach and Dune Sands, *Sedimentology* 60, pp. 1484–1497.

Roman-Sierra, J., Muñoz-Perez, J.J., Navarro-Pons, M. (2014), Beach Nourishment Effects on Sand Porosity Variability, *Coastal Engineering* 83, pp. 221–232.

Syvitski J.P.M. (1991) *Principles, Methods, and Application of Particle Size Analysis*, Cambridge University Press, New York, 368 pp.

## ¿QUÉ TAN SIGNIFICATIVA ES UNA MUESTRA DEL TAMAÑO MEDIO DE LA ARENA QUE CONTIENE UNA CÁNTARA?

P. Poulet<sup>1</sup>, J.J. Muñoz<sup>2</sup>, L. Moreno<sup>3</sup>, J. Mera<sup>2</sup>

1. Demarcación de Costas de Andalucía-Atlántico, Marianista Cubillo 7, 11071, Cádiz. [ppoulet@magrama.es](mailto:ppoulet@magrama.es)

2. Universidad de Cádiz, Dpto. Física Aplicada, [juanjose.munoz@uca.es](mailto:juanjose.munoz@uca.es), [javier.merabaston@alum.uca.es](mailto:javier.merabaston@alum.uca.es)

3. Universidad Politécnica de Madrid, [luisjuan.moreno@upc.es](mailto:luisjuan.moreno@upc.es),

### INTRODUCCIÓN

El análisis de datos de campo y fotografías aéreas durante el último medio siglo ha demostrado que la costa ha sufrido una regresión con una tasa de hasta 1 m/año en algunos puntos del Golfo de Cádiz (Muñoz-Perez et al., 2001). Es por ello que, durante los últimos 25 años se ha venido llevando a cabo un programa de realimentaciones de playa (Muñoz-Perez et al., 2014).

Entre los parámetros de diseño para un proyecto de regeneración de playa, el tamaño de la arena juega un papel principal. El tamaño de la arena es crítico no sólo para comparar la idoneidad de una arena de préstamo para sustituir la arena nativa erosionada, sino también para definir el nuevo perfil de playa de equilibrio y calcular el volumen de aporte necesario para alcanzar el ancho de berma proyectado.

Algunos investigadores ya han tenido en cuenta los fenómenos que modifican el volumen teórico de arena necesario para un proyecto de realimentación de playa (CUR, 1987, CEM 2002), como la metodología para las mediciones en cántara tomadas a bordo de la draga (Muñoz-Pérez et al., 2003) o la variabilidad de la porosidad de la arena (Roman-Sierra et al., 2014). Sin embargo, no se ha llevado a cabo hasta ahora ninguna investigación sobre la variabilidad del tamaño de la arena dentro de la cántara de una draga de succión en marcha.

Existen varias razones para justificar esta posible heterogeneidad de los parámetros granulométricos dentro de la cántara. En primer lugar, existe la variabilidad intrínseca de las características de los sedimentos en el fondo marino. Además de eso, la mayoría de las dragas en la actualidad son del tipo de succión en marcha (TSHD) y esto significa que no dragan de manera estacionaria, (es decir, en una cierta ubicación y su entorno), sino a lo largo de una longitud de fondo importante (Figura 1). Además, la velocidad de caída de la arena depende directamente del diámetro del grano (para una densidad dada). Esto es, cuanto más grande sea el tamaño de grano, más rápida será la decantación del mismo y, probablemente, los granos más gruesos estarán en el fondo de la cántara y los granos más finos estarán en la parte superior. Por último, cabe destacar una mención sobre los fragmentos de conchas o bioclastos: debido a su forma plana, estos elementos tardan más que los granos de sílice en decantar y, por lo tanto, su concentración será probablemente mayor en la superficie de la cántara.

### METODOLOGÍA RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante el proceso de dragado, con fines de alimentación de playas, se tomaron un gran número de muestras utilizando diferentes metodologías:

- Durante el dragado, en diferentes momentos (por lo tanto, a diferentes profundidades), en proa y popa.
- Al final del dragado, en diferentes lugares distribuidos en la superficie.
  - + Utilizando una cuchara Van Veen.
  - + Mediante la introducción de tubos corer por percusión y/o vibración.

Las muestras de arena se analizaron siguiendo el procedimiento estándar establecido por Syvitski (1991) y modificado por Roman-Sierra et al. (2013).

En la ponencia se analizarán los datos e información recopilada, y su importancia a la hora de elaborar un proyecto de realimentación de playa. La metodología utilizada también se explicará en detalle, para permitir que cualquiera la aplique de forma generalizada. Asimismo, se presentarán algunos resultados prácticos interesantes derivados del trabajo realizado.



Figura 1. Se tomaron datos de las dragas Balder R (izquierda) y Costa Dorada (derecha)

## REFERENCIAS

- CEM – Coastal Engineering Manual (2002), US Army Corps Engineers, Part III Coastal Sediment Processes.
- CUR (1987), Manual on Artificial Beach Nourishment, Centre for Civil Engineering Research, Codes and Specifications, Report n. 130.
- Muñoz-Perez, J.J., Lopez, B., Gutierrez-Mas, J., Moreno, L., and Cuenca, G. (2001), Cost of Beach Maintenance in the Gulf of Cadiz (SW Spain), *Coastal Engineering* 42, pp. 143–153.
- Muñoz-Perez, J.J., Gutierrez-Mas, J.M., Moreno, J., Español, L., Moreno, L. and Bernabeu, A. (2003), A Portable Meter System for Dry Weight Control in Dredging Hoppers, *Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 129, No.2, pp. 79–85.
- Muñoz-Perez, J.J., Roman-Sierra, J., Navarro-Pons, M., Neves, M.G., and del Campo, J.M. (2014), Comments on "Confirmation of Beach Accretion by Grain-Size Trend Analysis: Camposoto Beach, Cádiz, SW Spain" by E. Poizot et al. (2013), *Geo-Marine Letters* 34 (1), pp. 75–78.
- Roman-Sierra, J., Muñoz-Perez, J.J., Navarro-Pons, M. (2013), Influence of Sieving Time on the Efficiency and Accuracy of Grain-Size Analysis of Beach and Dune Sands, *Sedimentology* 60, pp. 1484–1497.
- Roman-Sierra, J., Muñoz-Perez, J.J., Navarro-Pons, M. (2014), Beach Nourishment Effects on Sand Porosity Variability, *Coastal Engineering* 83, pp. 221–232.
- Syvitski J.P.M. (1991) *Principles, Methods, and Application of Particle Size Analysis*, Cambridge University Press, New York, 368 pp.

## ¿Cambia mucho el tamaño de grano obtenido mediante tamizado manual frente al mecánico?

Poulet, Patricio<sup>a</sup>; Muñoz-Perez, Juan José<sup>b</sup>; Moreno, Luis<sup>c</sup>; Lopez, Patricia<sup>b</sup>; Mera, Javier<sup>b</sup>; Contreras, Antonio<sup>b</sup>; Contreras, Francisco<sup>b</sup> y Gómez-Pina, Gregorio<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Demarcación de Costas Andalucía Atlántico, [ppoulet@mapama.es](mailto:ppoulet@mapama.es), [ggomez@mapama.es](mailto:ggomez@mapama.es); <sup>b</sup>Universidad de Cádiz, [juanjose.munoz@uca.es](mailto:juanjose.munoz@uca.es), [patricia.lopezgarcia@uca.es](mailto:patricia.lopezgarcia@uca.es), [antonio.contreras@uca.es](mailto:antonio.contreras@uca.es), [francisco.contreras@uca.es](mailto:francisco.contreras@uca.es); <sup>c</sup> Universidad Politécnica de Madrid, [luisjuan.moreno@upm.es](mailto:luisjuan.moreno@upm.es)

### 1. Introducción

Los procesos erosivos en el litoral, junto con la importancia económica del turismo (Houston, 2008), hacen que las realimentaciones periódicas de nuestras playas sean sumamente frecuentes. Y el tamaño de la arena es uno de los más importantes parámetros a la hora proyectar este tipo de obras. La media o la desviación típica del tamaño de grano son imprescindibles para comprobar si la arena de préstamo (terrestre o sumergida) es adecuada para sustituir a la transportada previamente por el mar (Pranzini *et al.*, 2018). Además, el conocimiento de la distribución granulométrica del sedimento hace posible prever la reacción del perfil transversal ante una tormenta (Larson y Kraus, 1991), o calcular la cantidad necesaria de arena para abordar una regeneración (USACE, 2002).

Por otra parte, a la hora de tomar decisiones sobre la zona de vertido de una cántara llena de arena, el gestor precisa conocer los parámetros antes mencionados de manera casi inmediata. Eso significa que los análisis del sedimento deben efectuarse a bordo de la draga, mientras se desplaza de la zona de préstamo hacia la costa a regenerar. Sin embargo, debido a la habitual escasez de espacio, a la ausencia de un laboratorio adecuado y al no siempre fiable suministro eléctrico, los tamizados deben hacerse a mano.

Ya se ha estudiado la influencia del tiempo de tamizado a la hora de analizar la distribución granulométrica de una arena de playa o de duna (Roman-Sierra *et al.*, 2013). Sin embargo, hasta este momento no se ha analizado la posible diferencia en la media y la desviación típica de una arena tamizada de manera manual a bordo de una draga frente a una tamizadora mecánica en un laboratorio en tierra. Asimismo, para ahorrar espacio y esfuerzo físico, a bordo de la draga suelen usarse tamices de 10 cm de diámetro frente a los más habituales de 20 cm en laboratorio.

Para dar respuesta a estas preguntas, se aprovechó una regeneración efectuada en Cádiz en el año 2017 para efectuar una serie de pruebas a bordo de la draga Njord. Los extrapolables y más que útiles resultados, así como la influencia y consecuencias que tienen las diferencias observadas en la dirección de obras de regeneración de playas, se expondrán durante la presentación oral.

### Referencias

- HOUSTON J.R. (2008). "The economic value of beaches--A 2008 update". *Shore & Beach* 76 (3): 22-26, [https://itsworkshops.wcu.edu/WebFiles/PDFs/Economic\\_Value\\_of\\_Beaches\\_2008.pdf](https://itsworkshops.wcu.edu/WebFiles/PDFs/Economic_Value_of_Beaches_2008.pdf)
- LARSON M., KRAUS N.C. (1991). "Mathematical modelling of the fate of beach fill". *Coastal Engineering* 16, 83-114.
- PRANZINI E., ANFUSO G., MUÑOZ-PEREZ J.J. (2018). "A probabilistic approach to borrow sediment selection in beach nourishment projects". *Coastal Engineering*, 139, 32-35.
- ROMAN-SIERRA J., MUÑOZ-PEREZ J.J., NAVARRO-PONS M. (2013). "Influence of sieving time on the efficiency and accuracy of grain size analysis of beach and dune sands". *Sedimentology* 60(6): 1484-1497. <http://dx.doi.org/10.1111/sed.12040>
- USACE (2002). *Coastal Engineering Manual*. V-4-24 EM 1110-2-1100. <http://www.publications.usace.army.mil/USACE-Publications/Engineer-Manuals/>





Technical Note

# Influence of Different Sieving Methods on Estimation of Sand Size Parameters

Patricio Poulet\*, Juan J. Muñoz-Perez\*, Gerard Poortvliet, Javier Mera, Antonio Contreras and Patricia Lopez

CASEM (Centro Andaluz Superior de Estudios Marítimos), Universidad de Cádiz, 11510 Cádiz, Spain; poor0023@hz.nl (G.P.); javier.merabaston@hotmail.com (J.M.); antonio.contreras@uca.es (A.C.); patricia.lopezgarcia@uca.es (P.L.)

\* Correspondence: ppoulet@miteco.es (P.P.); juanjose.munoz@uca.es (J.J.M.-P.); Tel.: +34-956-546356 (J.J.M.-P.)

Received: 27 March 2019; Accepted: 23 April 2019; Published: 26 April 2019



**Abstract:** Sieving is one of the most used operational methods to determine sand size parameters which are essential to analyze coastal dynamics. However, the influence of hand versus mechanical shaking methods has not yet been studied. Herein, samples were taken from inside the hopper of a trailing suction dredger and sieved by hand with sieves of 10 and 20 cm diameters on board the dredger. Afterwards, these same samples were sieved with a mechanical shaker in the laboratory on land. The results showed differences for the main size parameters  $D_{50}$ , standard deviation, skewness, and kurtosis. Amongst the main results, it should be noted that the highest values for  $D_{50}$  and kurtosis were given by the small sieves method. On the other hand, the lowest values were given by the mechanical shaker method in the laboratory. Furthermore, standard deviation and skewness did not seem to be affected by the sieving method which means that all the grain size distribution was shifted but the shape remained unchanged. The few samples that do not follow these patterns have a higher percentage of shells. Finally and definitely, the small sieves should be rejected as a sieving method aboard.

**Keywords:**  $D_{50}$ ; sieving; sand size; sand parameters; coastal dynamics

## 1. Introduction

Sand-size parameters are essential to study the coastal dynamics and other geomorphological behaviours of beaches [1–3]. Main parameters must include measure of: average grain size ( $D_{50}$ ), spread of the size around the average (Standard Deviation,  $\sigma$ , or Sorting), degree of asymmetry (Skewness) and degree of peakedness (Kurtosis). Parameters such as  $D_{50}$  and sorting ( $\sigma$ ) are necessary for calculating equilibrium profiles or estimating sediment transport [4,5], to check if the borrowed sand is suitable to substitute the native sand eroded from the beach [6,7] or to calculate the required amount of sand for beach nourishment [8]. Analysis of sand-size distribution also gives essential hints to the origin, depositional environment and movement history [9]. Moreover, sand-size analysis is an indispensable mechanism to subdivide facies and environments [10] and it also makes possible to see how a beach reacts to storms [11]. Different methods to analyse sand-size particles and some comparisons between them were studied by some researchers, such as; laser diffraction [12], laser granulometer and sedigraph [13], microtac [14], comparison of laser grain size with pipette and sieve [15], image analysis [16] and sieving [17]. Due to the simplicity use and economy, the sieving method was chosen to be the method to perform the analysis of sand-size inside a dredger because of the special circumstances on board a ship.

In particular, in order to make decisions about the landfill area, the coastal manager needs to know the size parameters of the dredged sand before it gets dumped onto the beach. This means that

the dredger and the consequent absence of an adequate laboratory, sieving is usually done by hand. However different sieving methods can influence not only the  $D_{50}$  but also all other parameters.

Thus, due to the already established importance of sand size determination, the aim of this paper is to find out the influence of using different sieving methods on the results obtained for sand size parameters. The sieving methods were by hand (shaking manually) with 10-cm diameter sieves versus 20-cm sieves, and mechanical sieving (shaking machine) with 20-cm sieves.

## 2. Area of Study

The samples were taken from inside the hopper of a trailing suction dredger used for two beach nourishments (Costa Ballena and Punta Candor). Sand had been borrowed from the Meca sandbank, located in the Gulf of Cadiz close to the Strait of Gibraltar (Figure 1a). It has a depth of approximately 15–20 m and contains up to 25 millions of  $m^3$  of sand that can be used for beach nourishments (further data can be found in reference [18]). A previous study demonstrated that there was no serious impact to the environment of the area as a result of the sand removal [19].

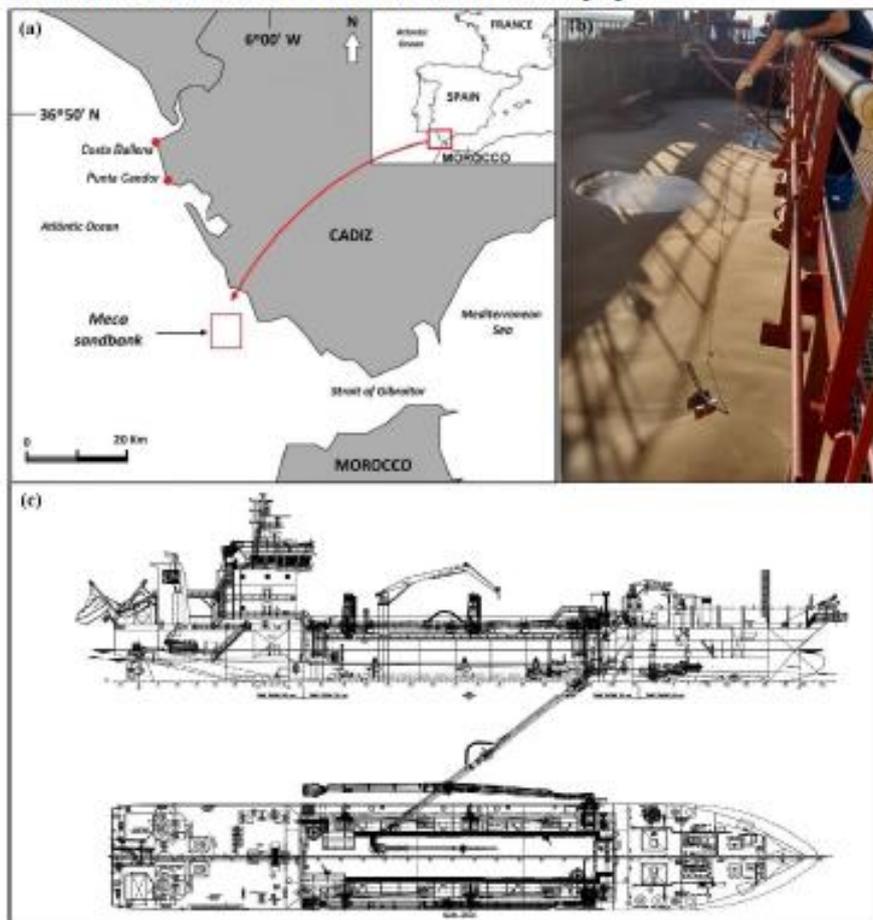


Figure 1. (a) Location of Costa Ballena and Punta Candor nourished beaches and the borrow site named "Placer de Meca" (Meca sandbank) (SW Spain); (b) sampling method aboard the dredger; (c) scheme of Njord dredger (<https://rohde-nielsen.com>).

Moreover, the effects of the turbidity are also negligible due to the limited percentage of fines [10]. Tidal range is mesotidal, varying between 1.10 m and 3.22 m, and has a semidiurnal periodicity. The beaches considered in this study were composed of fine-medium sand, very similar to the borrowed sediment. The average  $D_{50}$  is about 0.25 mm, consisting of 90% quartz and 10% calcium carbonate [20].

### 3. Materials and Methods

Nineteen samples were taken (Figure 1b) from the hopper of the Njord dredger (Figure 1c) on different days once the dredging operations were finished (for security measures). The same sample was sieved on board, by hand, with two different kinds of sieves – small (10 cm diameter) and large (20 cm diameter) – with the same sieving time (10 min in all cases) and saved. Afterwards, the samples were sieved at the laboratory inland with a mechanical shaker and the big sieves. The last method of sieving, the results of which will be taken as a reference, cannot always be performed on the dredger due to several reasons. First of all, a stable energy supply is not easy to get onto the dredger. Moreover, the machine performing the sieving has to deal with the instability and the vertical acceleration induced by waves.

The mesh sizes of the eight sieves required by the Spanish Coastal Administration were: 2 mm, 1 mm, 710 µm, 500 µm, 355 µm, 250 µm, 125 µm and 62.5 µm. Thus, the same sample, about 100 grams, was sieved by the three different methods. The amount of sediment is important because, obviously, a large volume of sediment means a lower chance for the grain to pass through the net.

After the initial weighting, the samples were put in the upper sieve and the sieves were shaken by hand. It should be noted that finger pressing was not allowed. After weighting the sand accumulated in each sieve, required values ( $D_{16}$ ,  $D_{50}$  and  $D_{84}$ ) were obtained (Table 1) as well as the other main parameters [21] as sorting, skewness and kurtosis (though these last two parameters are not used for beach nourishment projects) (Figure 2). They were calculated by using the corresponding equations (see Table 2, [21,22]) which are based on the phi unit scale (Equation (1)), and where to convert from phi units to millimetres, the inverse equation (Equation (2)) is used:

$$\varphi = -\log_2 D \tag{1}$$

$$D = 2^{-\varphi} \tag{2}$$

Table 1. Values of the parameters  $D_{16}$ ,  $D_{50}$  and  $D_{84}$ , obtained by three different methods, for the 19 samples taken from the dredger hopper.

Sample	Manual Shaking						Mechanical Shaking		
	Small Sieves			Large Sieves			Laboratory		
	$D_{16}$	$D_{50}$	$D_{84}$	$D_{16}$	$D_{50}$	$D_{84}$	$D_{16}$	$D_{50}$	$D_{84}$
1	0.217	0.300	0.379	0.201	0.291	0.35	0.177	0.274	0.346
2	0.218	0.300	0.375	0.203	0.297	0.384	0.143	0.281	0.347
3	0.261	0.314	0.418	0.229	0.307	0.422	0.149	0.296	0.383
4	0.220	0.301	0.383	0.179	0.278	0.349	0.138	0.256	0.343
5	0.194	0.290	0.354	0.174	0.269	0.339	0.139	0.263	0.335
6	0.204	0.297	0.385	0.192	0.29	0.377	0.178	0.277	0.35
7	0.179	0.280	0.358	0.171	0.267	0.349	0.171	0.265	0.346
8	0.177	0.280	0.407	0.168	0.261	0.38	0.177	0.277	0.354
9	0.186	0.284	0.351	0.182	0.278	0.344	0.17	0.261	0.335
10	0.193	0.301	0.539	0.177	0.285	0.571	0.141	0.281	0.549
11	0.257	0.314	0.440	0.206	0.298	0.409	0.164	0.307	0.417
12	0.220	0.295	0.349	0.179	0.278	0.348	0.14	0.272	0.346
13	0.255	0.315	0.497	0.205	0.305	0.499	0.151	0.306	0.491
14	0.181	0.284	0.385	0.211	0.297	0.363	0.187	0.286	0.354
15	0.199	0.292	0.354	0.187	0.28	0.339	0.25	0.307	0.417
16	0.182	0.280	0.350	0.163	0.244	0.326	0.137	0.247	0.327
17	0.186	0.288	0.395	0.165	0.251	0.339	0.16	0.235	0.337
18	0.240	0.306	0.448	0.24	0.306	0.448	0.239	0.306	0.45
19	0.226	0.303	0.394	0.141	0.272	0.342	0.17	0.263	0.339

Table 2. Formulae used for calculation of the main granulometric parameters, according to Folk and Ward graphical measures [21,22].

Mean	Standard Deviation or Sorting	Skewness	Kurtosis
$M_{\phi} = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3}$	$\sigma_{\phi} = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6}$	$Sk_{\phi} = \frac{\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)}$	$K_{\phi} = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2.44(\phi_{75} - \phi_{25})}$

#### 4. Results and Discussion

##### 4.1. $D_{50}$ (Median Grain Diameter)

A comparison of the cumulative distribution of the passing percentage for the three methods is shown in Figure 2. Only two samples (13 and 17) have been presented to show an example of the results. Though the 19 samples are not shown, this figure gives a real image of the differences among the methods.

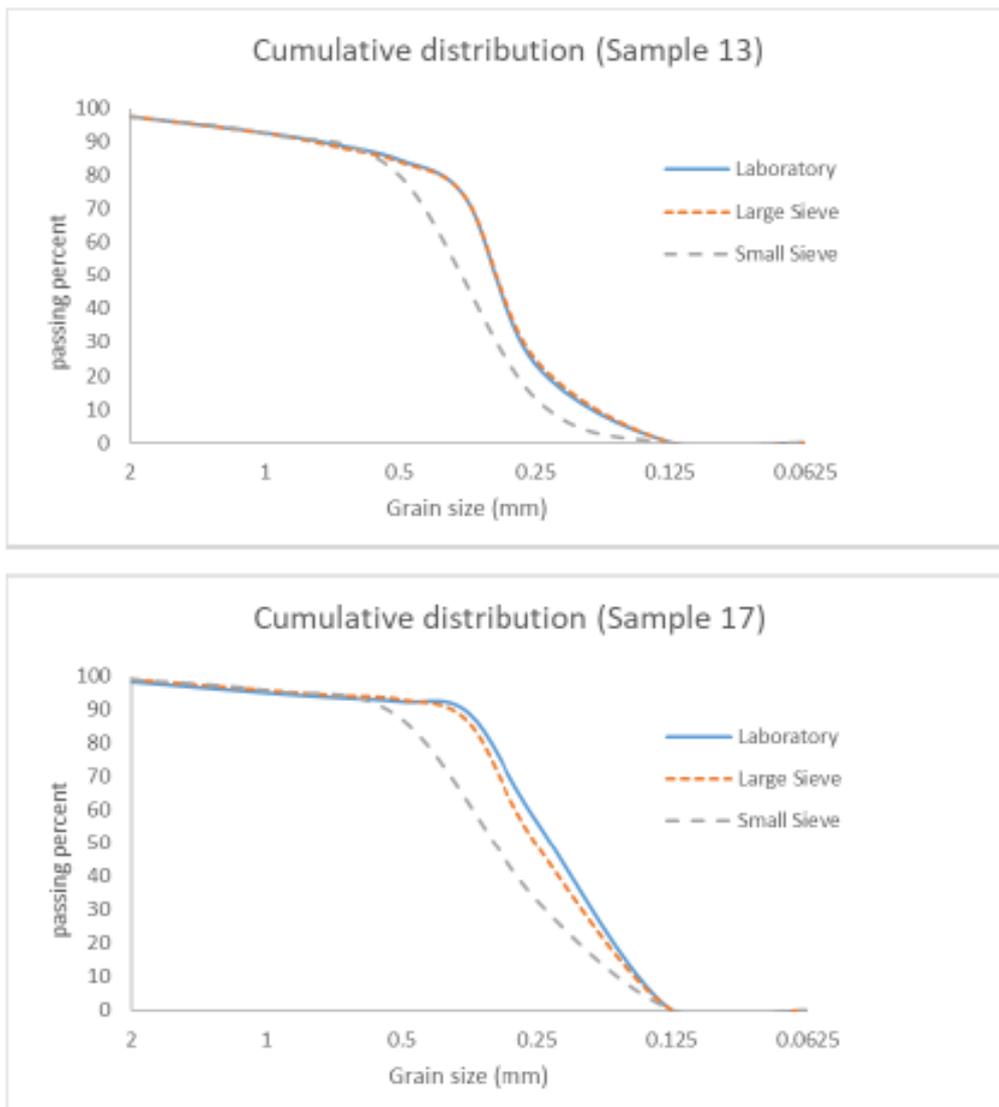


Figure 2. Cumulative distribution of the passing percentage of samples 13 and 17 for the three sieving methods.

On the other hand, Figure 3a shows how  $D_{50}$  ranges from approximately 0.24 mm to 0.32 mm. The values obtained with the automatic sieving, carried out in the laboratory, are always the lowest number. On the other side, the values obtained by hand with the small sieves are always the biggest. Thus, the value of the large sieve is usually between the small sieving and the automatic shaking, values being closer to the latter. A possible explanation is that the surface in the 20 cm sieves is four times bigger than the 10 cm sieves. More holes for the grains to pass through mean more grains passing during the same sieving time (10 min in all cases). This increases the amount of sand in the lower sieves, and thus decreases the  $D_{50}$ .

Further on, we consider as reference those values obtained in the laboratory by the mechanical shaker since it is the standard procedure. Probably, the higher and constant intensity of the mechanical shaker in comparison to the manual sieving is the reason why the values of  $D_{50}$  of the former are smaller than the latter. Furthermore, though the sieving time did remain constant in all cases, the operator on board may get tired during the shaking of the sieves, which would influence the intensity of the sieving. Though the average difference was about 10%, it can be seen how the highest differences between laboratory  $D_{50}$  and small sieve  $D_{50}$ , which coincide with the finest sands (samples 4, 16, 17), can be as high as 20–25%. The manual and consequently less intensity sieving, plus the small diameter of the small sieve, could be the cause of the accumulation of fine sands in the upper sieves.

#### 4.2. *Sorting or Standard Deviation*

Looking at the sorting graph in Figure 3b, the results for all the sieving methods were really close to each other, values ranging from 0.79 to 0.84 phi and averaging 0.82. This information shows us that the method of sieving did not affect the sorting. Moreover, according to Folk [23], this sediment is moderately sorted, being aware that the limit for poor sorted sediment (1 phi) is not close.

#### 4.3. *Skewness*

In general, the same pattern for all three sieving methods can be obtained (Figure 3c). The values of skewness for every individual sample, as in the case of the sorting, did not seem to depend on the sieving method (this means that all the grainsize distribution is shifted but the shape did not change). Most of them were between near-symmetrical (-0.1 to +0.1) and coarse-skewed (-0.3 to +0.3). Again, samples 10, 13 and 18 were the only ones that come out of the pattern, with values larger than 0.3 (very coarse-skewed). Thus, a high percentage of shells may also increase the skewness.

#### 4.4. *Kurtosis*

Looking at Figure 3d, no platykurtic coefficient was observed at all. All the values ranged from mesokurtic (0.90–1.10) to leptokurtic (<1.50) and very leptokurtic (>1.50). No clear pattern could be determined.

#### 4.5. *Percentage of Shells*

The amount of shells per individual sample was determined with the help of a microscope and is shown in Figure 3e. Since the particles of shells are bigger than the particles of sand, the biggest amount of shells were found in the upper sieves. The three samples (10, 13 and 18) with the highest value of shells (above 10%) were also the samples with the highest standard deviation.

#### 4.6. *Summary Table*

Percent Relative Error (%) has been calculated for the main sediment parameters (mean size, sorting, skewness and kurtosis) and results are shown in Table 3. Laboratory sieve results (standard procedure) were taken as a reference to compare the results. It could be verified that the error was greater in all cases for the small sieves as discussed previously. Skewness was the only parameter without a significant difference. Thus, we can assume that the large sieve is the best way to sieve aboard and small sieves should be avoided.

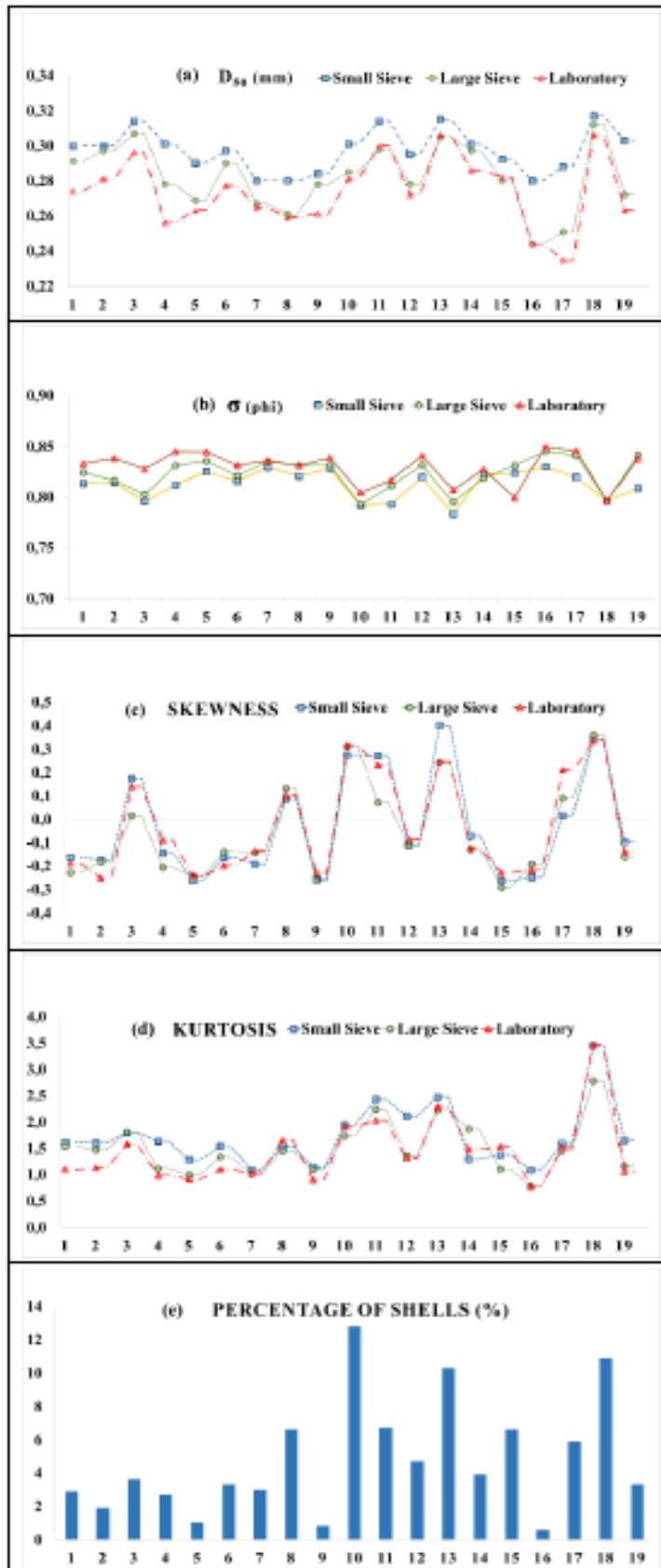


Figure 3. Values of the granulometric parameters obtained with three different types of sieving for the samples taken on board of the dredger: (a)  $D_{50}$ ; (b) sorting; (c) skewness; (d) kurtosis; (e) percentage of shells.

**Table 3.** Percent Relative Error (%) calculated for granulometric parameters obtained with small and large sieves taking as a reference the laboratory sieve results (the standard procedure).  $\sigma$ : Standard deviation.

		D <sub>50</sub>	$\sigma$	Skewness	Kurtosis
Percent Relative Error (%)	Small Sieve	8.8	2.4	28.2	26.5
	Large Sieve	3.2	1.3	29.3	14.6

## 5. Conclusions

The importance of the D<sub>50</sub> (as well as sorting, skewness and kurtosis) in understanding the coastal dynamics and other geomorphological behaviours of beaches is well known. And, nevertheless, the influence of the method of sieving had not yet been considered in the determination of these parameters. For this reason, 19 samples were taken on board while dredging the borrow site named Placer de Meca (Meca sandbank) for a beach nourishment in the Gulf of Cadiz (SW of Spain). They were analysed with three different sieving methods (small vs. big sieves and mechanical shaker vs. manual shaking procedure).

The results showed a pattern for the D<sub>50</sub> value. The biggest values were always obtained with the small sieves. The values with the machine in the laboratory always gave the lowest values.

Variance of sorting values was negligible. Thus the method of sieving does not influence the sorting and, by the way, nor the skewness either. This fact means that all the grainsize distribution was shifted but the shape remained unchanged.

The kurtosis gives a similar pattern as the D<sub>50</sub> parameter: the values for the small sieves were the highest. The bigger sieves gave lower values whereas the sieving with the automatic shaker gave the lowest values in general.

The laboratory method is the standard procedure, the results of which were taken as a reference. But this sieving method cannot always be performed on the dredger. Therefore, looking at the results, we can assume that a large sieve is the best way to manually sieve aboard. Definitely, a small sieve should be rejected as a sieving method during dredging.

**Author Contributions:** Investigation and Conceptualization, P.P., J.J.M.-P., J.M., A.C., P.L.; Data collection, P.P., J.M., G.P., P.L.; methodology, P.P., J.J.M.-P., J.M., G.P.; writing, P.P., J.J.M.-P., G.P., J.M., A.C., P.L.; Review and editing, P.P., J.J.M.-P., A.C., P.L.

**Funding:** This research received no external funding.

**Acknowledgments:** The authors acknowledge the valuable comments and suggestions given by Prof. Dr. Enzo Franzini and two anonymous reviewers, which greatly improved the manuscript.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

## References

- Guillen, J.; Hoekstra, P. The "equilibrium" distribution of grain size fractions and its implications for cross-shore sediment transport: A conceptual model. *Mar. Geol.* **1996**, *135*, 15–33.
- Medellin, G.; Torres-Freyermuth, A.; Tomasicchio, G. R.; Francone, A.; Tereszkievicz, P. A.; Lusito, L.; Palemon-Arcos, L.; Lopez, J. Field and numerical study of resistance and resilience on a sea breeze dominated beach in Yucatan (Mexico). *Water* **2018**, *10*, 1806.
- Franzini, E.; Anfuso, G.; Cinelli, I.; Piccardi, M.; Vitale, G. Shore protection structures increase and evolution on the Northern Tuscany Coast (Italy): Influence of tourism industry. *Water* **2018**, *10*, 1647.
- Gravens, M. B.; Emersole, B. A.; Walton, T. L.; Wise, R. A. Beach Fill Design. In *Coastal Engineering Manual*; Warp, D.L., Ed.; U.S. Army Corps of Engineers: Washington, DC, USA, 2002.
- Giardino, A.; Diamantidou, E.; Pearson, S.; Santinelli, G.; den Heijer, K. A regional application of bayesian modeling for coastal erosion and sand nourishment management. *Water* **2019**, *11*, 61.
- Franzini, E.; Anfuso, G.; Muñoz-Perez, J.J. A probabilistic approach to borrow sediment selection in beach nourishment projects. *Coastal Eng.* **2018**, *139*, 32–35.
- Saponieri, A.; Valentini, N.; Di Risio, M.; Pasquali, D.; Damiani, L. Laboratory investigation on the evolution of a sandy beach nourishment protected by mixed soft-hard system. *Water* **2018**, *10*, 1171.

8. USACE. Coastal Engineering Manual, 2002. V-4-24 EM 1110-2-1100. Part III Coastal Sediment Processes. Available online: <https://www.publications.usace.army.mil/USACE-Publications/Engineer-Manuals> (accessed on 22 December 2018).
9. Bernabeu, A. M.; Medina, R.; Vidal, C. An equilibrium profile model for tidal environments. *Sci. Mar.* 2002, 66, 325–335.
10. Roman-Sierra, J.; Navarro, M.; Muñoz-Perez, J. J.; Gomez-Pina, G. Turbidity and other effects resulting from Trafalgar Sandbank Dredging and Palmar Beach Nourishment. *J. Waterw. Port Coastal Ocean Eng.* 2011, 137, 332–343.
11. Larson, M.; Kraus, N.C. Mathematical modelling of the fate of beach fill. *Coastal Eng.* 1991, 16, 83–114.
12. Blott, S. J.; Pye, K. Particle size distribution analysis of sand-sized particles by laser diffraction: an experimental investigation of instrument sensitivity and the effects of particle shape. *Sedimentology* 2006, 53, 671–685.
13. Magno, M. C.; Venti, F.; Bergamin, L.; Galianone, G.; Pierfranceschi, G.; Romano, E. A comparison between Laser Granulometer and Sedigraph in grain size analysis of marine sediments. *Measurement* 2018, 128, 231–236.
14. Austin, L. G.; Shah, I. A method for inter-conversion of microtrac and sieve size distributions. *Powder Technol.* 1983, 35, 271–278.
15. Konert, M.; Vandenberghe, J. Comparison of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis: a solution for the underestimation of the clay fraction. *Sedimentology* 1997, 44, 523–535.
16. Orru, C.; Chavarrias, V.; Uijttewaal, W. S. J.; Blom, A. Image analysis for measuring the size stratification in sand-gravel laboratory experiments. *Earth Surf. Dyn.* 2014, 2, 217–232.
17. Pope, L.R.; Ward, C.W. *Manual on Test Sieving Methods*; ASTM: West Conshohocken, PA, USA, 1998; Volume 56.
18. Muñoz-Perez, J. J.; Roman-Sierra, J.; Navarro-Pons, M.; Neves, M. G.; del Campo, J. M. Comments on “Confirmation of Beach Accretion by Grain-Size Trend Analysis: Camposoto Beach, Cádiz, SW Spain” by Pizot, E., Anfuso, G., Méar, Y., Bellido, C.; 2013. *Geo-Mar. Lett.* 2014, 34, 75–78.
19. Ministry of Environment. Environmental impact study: Use of Meca sandbank to Cadiz beach nourishment; In *Resolution of the Secretariat of the Environment*; Boletín Oficial del Estado (BOE): Madrid, Spain, 2003; pp. 17266–17270.
20. Muñoz-Perez, J.J.; Gutierrez, J.M.; Naranjo, J.M.; Torres, E.; Fages, L. Position and monitoring of anti-trawling reefs in the Cape of Trafalgar (Gulf of Cadiz, SW Spain). *Bull. Mar. Sci.* 2000, 67, 761–772.
21. Folk R. L.; Ward W. C. A study in the significance of grain size parameters. *J. Sediment. Petrol.* 1957, 27, 3–26.
22. Blott, S. J.; Pye, K. Gradistat: A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surf. Proc. Land* 2001, 26, 1237–1248.
23. Folk, R. L. *Petrology of Sedimentary Rocks*; Hemphill Publishing Company: Austin, TX, USA, 1974.



## Sand size variability inside the hopper of a trailing suction dredger for beach nourishment purposes

P. Poulet<sup>1</sup> · J.J. Muñoz-Perez<sup>2</sup> · P. Lopez<sup>2</sup> · S. García-Lopez<sup>2</sup> · R. Martell<sup>3</sup> · R. Silva<sup>4</sup> · L. Moreno<sup>5</sup>

Received: 1 July 2019 / Accepted: 23 October 2019

© Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2019

### Abstract

Research about the variability of sand size inside the hopper of a trailing suction dredger has yet to be done, despite its importance for beach nourishment projects. In this study, several samples were taken using different methodologies during dredging for a particular case of beach nourishment on board one dredger. Sampling was carried out with a tube core and a Van Veen grab at the surface when the hopper was full of sand. The results showed problems with the Van Veen grab, the standard methodology used for sampling aboard a dredger. This method should be reconsidered in the future because surface samples were not representative of the whole hopper due to the bias of higher percentage of shell pieces. According to the results, the core tubes introduced by percussion were the only useful method in determining average sand parameters closer to the values obtained for the borrow site. Moreover, cores also showed a linear correlation between sand size and depth:  $D_{50}$  increased 20% from the surface to 1 m depth; this is a sixth of the hopper depth of this study case. Regrettably, the manual percussion procedure could not reach depths greater than 1 m.

### Introduction

Beach nourishment has become the preferred strategy for beach restoration (Hanson et al. 2002; Pranzini et al. 2015, 2018) against the problem of coastal erosion in many places around the world (Trembanis and Pilkey 1999; Dean 2003). Furthermore, several studies have addressed the management and economic evaluation of beach nourishment (Hamm et al. 2002; Gomez-Pina et al. 2007) and the improvement in the tourism industry that the nourishment provides (Klein et al. 2004; Houston 2013).

Among the design parameters for a beach nourishment project, sand size is of the most important (Gravens et al. 2002; Gallop et al. 2015). Sand size is critical not only to check the suitability of the borrowed sand to substitute the eroded native sand but also to identify the new equilibrium beach profile (Dean 1991), to understand the beach response to storms (Larson and Kraus 1991), and to calculate the sediment volume necessary to achieve the projected berm or beach width (USACE 2002). Moreover, the grain size of the borrowed sand is also used to assess sediment transport velocity (Muñoz-Perez et al. 1999) and to calibrate numerical models in beach nourishment studies (Karambas and

✉ P. Poulet  
ppoulet@miteco.es

J.J. Muñoz-Perez  
juanjose.munoz@uca.es

P. Lopez  
patricia.lopezgarcia@uca.es

S. García-Lopez  
santiago.garcia@uca.es

R. Martell  
rmartell@conabio.gob.mx

R. Silva  
rsilvac@iingen.unam.mx

L. Moreno  
luisjuan.moreno@upm.es

<sup>1</sup> Coastal Department in Atlantic-Andalucia, Ministry of Environment, Marianista Cubillo No. 7, 11007 Cadiz, Spain

<sup>2</sup> CASEM, University of Cadiz, Pol. Rio San Pedro s/n, 11540 Puerto Real, Spain

<sup>3</sup> Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad, CONABIO, Insurgentes Sur No. 4903, Parques del Pedregal, 14010 Ciudad de México, Tlalpan, Mexico

<sup>4</sup> Instituto Ingeniería, Ciudad Universitaria, 04510 Ciudad de México, Mexico

<sup>5</sup> Universidad Politécnica de Madrid, Prof. Aranguren, 3, 28040 Madrid, Spain

Samaras 2014). Though sediment compatibility for beach nourishment is assessed long before the dredging starts, the variability of the sand characteristics at the borrow site requires monitoring during the dredging process. Therefore, when beach nourishment is performed, it is vital to collect a minimum number of samples from the sea bottom of the borrow site depending on its surface (MARM 2010) or on the amount of sand to be dredged (OSPAR 2014) before the nourishment. Some researchers have already taken into account the phenomena that affect the theoretical volume of sand needed for a beach nourishment project (CUR 1987; USACE 2002), such as the methodology for the hopper measurements taken on board the dredger (Muñoz-Perez et al. 2003) or the variability in sand porosity (Roman-Sierra et al. 2014). Furthermore, some researchers have studied the sedimentation process in a trailing suction hopper dredger: theoretical models (Miedema and Vlasblom 1996) or validation of models by using sedimentation tests in laboratory and some prototype measurements (e.g., van Rhee 2002). An up-to-date review can be found in Miedema (2009). Regarding the beach nourishments, the coastal manager needs to know the size parameters of the dredged sand before it gets dumped onto the beach, in order to make decisions about the landfill area (e.g., emerged or submerged, shallow- or deep-buried, surficial, etc.). The analysis of each sample is done on board the dredger, and thus, the sample must be necessarily representative of the whole sand inside the hopper. However, you should not presume a priori that sand grains are distributed in a homogeneous way because, until now, no data has been collected to study the variability of sand size inside the hopper of a trailing suction dredger.

There are several reasons to justify this possible heterogeneity of the granulometric parameters inside the hopper. First, there is the intrinsic variability of the sediment characteristics at the sea bottom. Second, most dredging vessels are of the Trailing Suction Hopper Dredger type (Shao et al. 2015; van Ingen and Castro 2017). This means that these vessels do not dredge in a stationary way (i.e., at a certain location and vicinity) but continuously along a considerable stretch of the bottom. Third, the settling velocity of sand depends directly on the grain diameter (Jimenez and Madsen 2003) for a given density and shape (i.e., the larger the grain size, the faster the grain is deposited). Therefore, it seems not unlikely that the coarser grains could be at the bottom of the hopper, and the finer grains would be at the top ( $w_s$  = sand settling velocity), per Eq. 1 (Soulsby 1997).

$$w_s = \frac{10.36 \nu}{d} \left[ \left( 1 + 0.156 \frac{(s-1) g d^3}{16 \nu^2} \right)^{0.5} - 1 \right] \quad (1)$$

where  $\nu$  = kinematic viscosity of water,  $d$  = sediment diameter,  $s = \frac{\rho_s}{\rho_w}$ ,  $\rho_w$  = water density,  $\rho_s$  = particle density, and  $g$  = gravity.

 Springer

The current methodology for estimating the sediment parameters for sand characterization usually consists of taking a single sample from the surface with a Van Veen grab (Roman-Sierra et al. 2011; Velegrakis et al. 2010), once the hopper is full. It is also worth considering the fragments of shells or bioclasts. Because of their flat shape, these pieces of shells take longer to settle than the rounded silica grains do, and there usually is a greater percentage of shells at the surface of the hopper too. It is logical to think that this accumulation could also affect the representativeness of this sample, and, thus, the comparison with another sampling method should be considered.

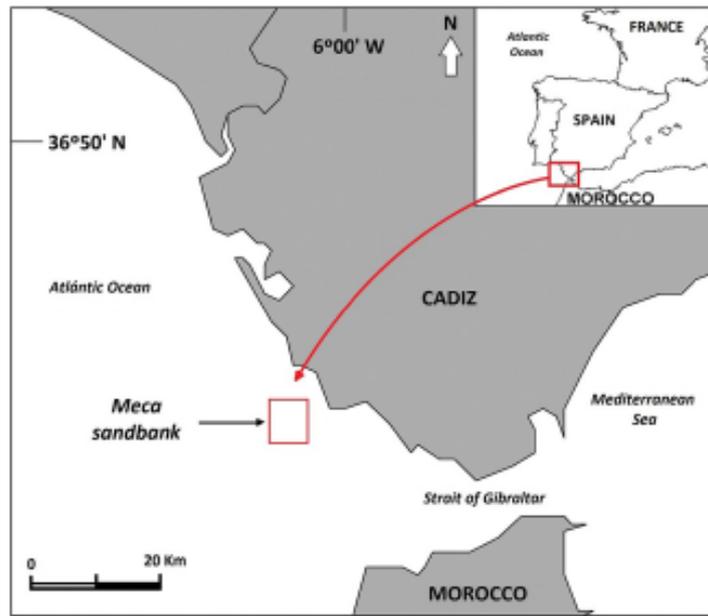
Thus, the aim of this paper is to assess the variability of sand size inside the hopper along the surface and in depth. In addition, some improvements to the current methodology are proposed, exposing what sampling technique is better aboard the dredger, with the results compared and discussed. To achieve this purpose, results obtained from samples of the hopper using two different methodologies are compared to the sand extracted from the sea bottom (in the borrow site chosen for the beach nourishment).

## Study area

The Gulf of Cadiz is a basin delimited by the southwest coasts of the Iberian Peninsula (northern boundaries), the Strait of Gibraltar (eastern boundary), and the Atlantic coast of Morocco (southern limit), as shown in Fig. 1. The tidal range, with semidiurnal periodicity, varies between 3.22 m (spring tides) and 1.10 m (neap tides), classifying the coast as a low mesotidal environment. Nevertheless, the sea level variations due to the wind and the inverted barometer effect must be taken into account (Aboitiz et al. 2008). The dominant winds are the humid Atlantic winds from the WNW and the dry Levante winds that strike land and prevail from the ESE (Anfuso and Benavente 2006).

The study area includes an offshore site of sand borrowing, the Meca sandbank, located near the Strait of Gibraltar, to the west of the Cape of Trafalgar (36°12' N; 6°05' W). The Meca sandbank is at 15–20 m depth, having an estimated usable sand volume of 5 Mm<sup>3</sup>. It is, thus, an important national marine reservoir of medium sands. This dredging area has been used for many years by the Coastal Authority for beach nourishment purposes (Esgemar 1991; Geomytsa 1991). Precise data of the Meca sandbank can be consulted in Muñoz-Perez et al. (2014). According to earlier environmental studies (Ministry of Environment 2003), there was no significant environmental impact to the area as a result of this sand extraction. Most of the beaches in the study area are composed of fine-medium sand (average grain size  $D_{50} = 0.25$  mm), consisting of 85–95% quartz and 5–15% calcium carbonate (Muñoz-Perez et al. 1999).

Fig. 1 Location of the borrow site (Meca sandbank) in the Gulf of Cadiz, SW Spain



### Methodology

Before performing a beach nourishment, it is imperative to sample the sea bottom of the borrow site and check the compatibility of the borrow material versus the native beach sand. For that purpose, a minimum number of samples must be collected depending on the surface of the borrow site (MARM 2010) or on the amount of sand to be dredged (OSPAR 2014). According to the OSPAR Commission, the number of samples that must be taken follows the indication given in Table 1.

As to the MARM (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino), the number of samples can be calculated following Eq. 2.

$$N = \frac{\sqrt{S}}{100} \quad (2)$$

Table 1 Indication of the number of sampling stations required to obtain representative results, assuming a reasonably uniform sediment distribution in the area to be dredged (OSPAR 2014)

Amount dredged (m <sup>3</sup> )	Number of stations
Up to 25,000	3
25,000–100,000	4–6
100,000–500,000	7–15
500,000–2,000,000	16–30
>2,000,000	Extra 10 per million m <sup>3</sup>

where  $N$  = number of samples and  $S$  = borrow site extraction surface (m<sup>2</sup>).

Therefore, knowing that the extraction surface of the Meca sandbank is about  $4 \times 10^6$  m<sup>2</sup>, the number of samples should be at least 20. Similarly, following the OSPAR (2014) recommendation (Table 1), there must be 7–15 samples because the amount dredged was between 100,000 and 500,000 m<sup>3</sup>. Thus, 20 samples were taken with a Van Veen grab from the sea bottom of the borrow site for this beach nourishment.

Afterwards, the samples from the hopper were taken aboard the *Balder R* dredger from the marine dredging contractor Rohde Nielsen. A visual sketch and characteristics of the dredger are shown in Fig. 2 and Table 2. Moreover, the 6000 m<sup>3</sup> capacity hopper, full of sand, can be seen in Fig. 3b. Samples were taken during dredging for beach nourishment purposes by using the two different methodologies explained below. Once the sand samples were taken, they were analyzed following the standard procedure explained in Syvitski (1991) and slightly modified by Roman-Siema et al. (2013). Thus, granulometric parameters such as median diameter ( $D_{50}$ ) and sorting or standard deviation ( $\sigma$ ) were obtained. Moreover, in order to facilitate the physical interpretation of the data, both parameters are presented in millimeters, and, therefore, the log-normal transformation into phi values proposed by Krumbein (1934) was not used.

Sampling was performed with two different techniques at the end of the dredging, when the hopper was full of sand and the excess of water had already been drained. First, the standard methodology uses the Van Veen grab (see Fig. 3a). The

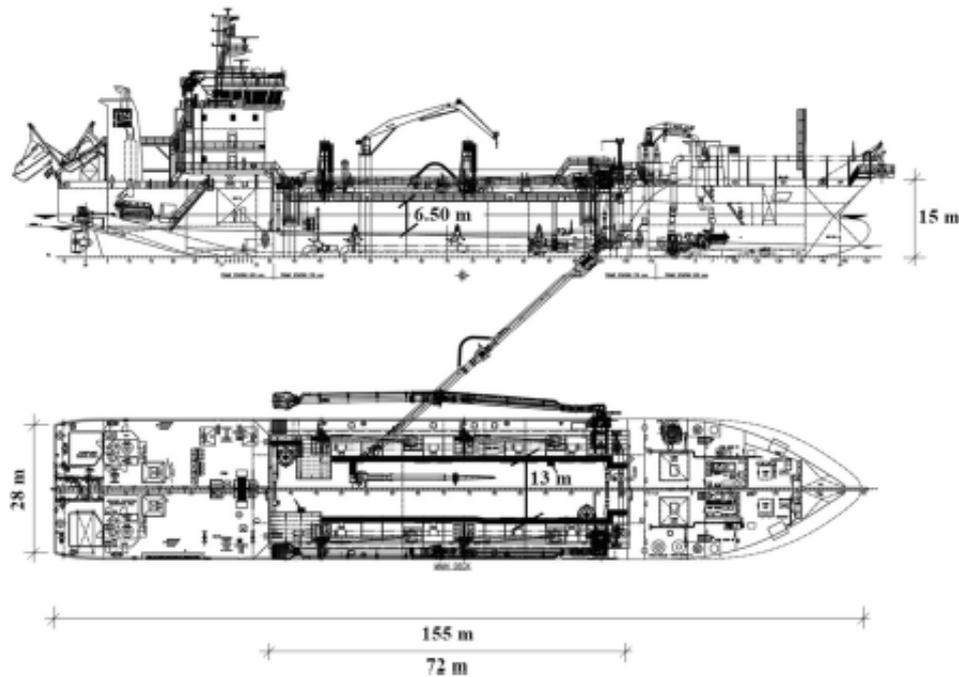


Fig. 2 Visual sketch of the *Baldor R* dredger (from [www.rohde-nielsen.dk](http://www.rohde-nielsen.dk))

grab was used in eight different locations, distributed port and starboard across the surface and separated from each other by about 10 m, in order to check the surficial homogeneity (Fig. 3b).

Second, to closely observe the possible heterogeneity of sand size with depth, two 1-m-long core tubes (Fig. 4) were introduced at the bow and the stern by impacting with a hand-held hammer.

Through experimentation, it was determined that 1 m is the maximum depth attainable for hand-driven cores. The hopper depth of this study case is 6.50 m (Fig. 2). Therefore, it was sampled in a sixth of the hopper depth. The first layer of sediment, 5 cm thick and with a great percentage of shells, was removed from the top of the cores. Then, granulometric analysis was conducted on the samples taken every 10 cm.

The results from the borrow site and aboard were compared in order to test which methodology has results more similar to those of the borrow site and to confirm which one is the best option for sampling aboard.

Table 2 Main characteristics of 'Baldor R' dredger

Gross tonnage	5189 GT
Length overall	111.30 m
Breadth	19.40 m
Draught loaded	7.00 m
Draught unloaded	3.70 m
Hopper capacity	6000 m <sup>3</sup>
Hopper depth	6.50 m
Main engines	2 × 2985 kW
Bow thruster	2 × 450 kW
Pump ashore power	2 × 2117 kW
Total installed power	10,504 kW
Speed empty	15.3 kn
Speed loaded	14.0 kn
Crew	7–14
Flag	Danish
Class	Bureau Veritas

## Results and discussion

### Sampling with the Van Veen grab

Regarding the samples taken with the Van Veen grab sampler at different points along the surface (Fig. 3a, b), it should be noted that  $D_{50}$  is relatively homogenous on the surface (Fig. 5), ranging only from 0.28 to 0.30 mm, with differences of less than 10% among values obtained for the eight samples taken along the surface, while the sorting ( $\sigma$ ) varies more than in the  $D_{50}$  case (0.07 to 0.12). Average values of the borrow site, 0.25 mm and 0.07 mm for  $D_{50}$  and  $\sigma$ , respectively, are also presented in Fig. 5. Finally, percentage of shells was about 25%.



Fig. 3 a. Van Veen grab (spoon) sampler, b. Location of the 8 eight points where superficial samples were taken, named as M1... M8

### Sampling taken with a tube corer

Figure 6 shows data provided from the two 1-m-long core tubes introduced by percussion at the bow and the stem. It is possible to observe heterogeneity of sand size with depth. The surface layer was not used because of the high percentage of bioclasts, and, therefore, sampling started at a depth of 5 cm. As can be seen in Fig. 6, there was no significant difference between the bow and stem results.  $D_{50}$  rises from 0.21 mm or 0.22 mm at the surface, to 0.26 mm at 85 cm depth in the bow case or 95 cm depth in the stem case. Thus, a strong correspondence (a linear correlation) appears between  $D_{50}$  and depth (at least within the first meter from the surface). As previously

expected according to the importance of sand settling velocity (Eq. 1), the results show how the coarser grains were found at the bottom of the cores and the finer grains were found next to the surface. This is obvious, except for the pieces of shell that are the last to descend due to their flat shape. Nevertheless, the sorting or standard deviation remains almost constant, at about 0.08 mm.

On the other hand, a disadvantage of the method is the impossibility of penetrating more than 1 m with a manual percussion procedure, six times bigger than the hopper depth of this study case. So, the linear relationship between  $D_{50}$  and depth within the hopper cannot be confidently applied to depths greater than 1 m without the ability to take deeper core samples.



Fig. 4 Sampling sand from inside the tube corer

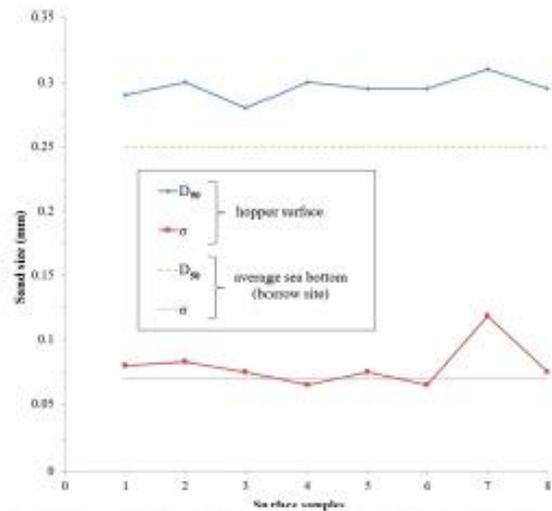


Fig. 5  $D_{50}$  and sorting of the sand samples taken using a Van Veen grab sampler at eight points along the hopper surface (see Fig. 3b). The average of the parameters for the borrow site sand are represented

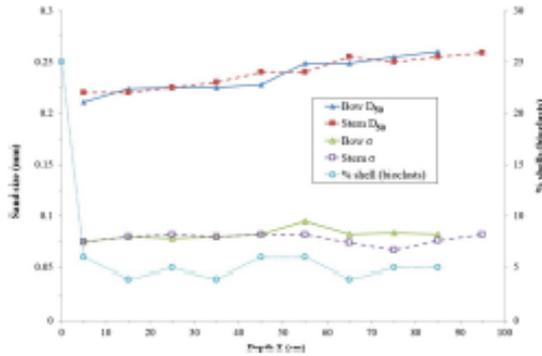


Fig. 6  $D_{50}$  and sorting of the sand samples taken by introducing tube corers about 1 m depth at bow and stern. The right axis shows the percentage of shells of the hopper samples

### Comparison between Van Veen and core results versus the original data from the borrow site

Finally, a comparison between results from the borrow site surface and samples aboard has been carried out. Table 3 shows the average of the results and an error percentage, the borrow site data being the reference value. It can be stated that the core sampling methodology shows a  $D_{50}$  result more similar to those of the borrow site. A lesser error percentage of 4% was found versus a 20% error for the Van Veen grab. Otherwise, standard deviation values appear the same (0.08 mm in both cases).

Moreover, as can be seen in Fig. 6 and Table 3, the percentage of shell fragments was higher on the surface than in the rest of the hopper (25% and 5%, respectively). These bioclasts were concentrated in the first 2–3 cm, which represents a large proportion of the sample taken by the Van Veen grab that captured a layer approximately 5 cm thick from the surface in our tests (although it can capture up to 10 cm depending on the size and weight of the grab; Roman-Sierra et al. 2011). The presence of these bioclasts also affected the grain size, resulting in a difference in  $D_{50}$  of up to 30% more in the surface than immediately below. It can be seen in Fig. 6 how the first centimeters have the higher percentage of shells (about 25%) while the percentage falls to only 4% to 6% in the rest of the samples.

Table 3 Average of the results and error percentage of the two different sampling methods (Van Veen vs. core)

	Borrow site	Hopper				
		Sea bottom	Surface (Van Veen) (0 m)		Core (0.05–1 m)	
			Average	Error percentage	Average	Error percentage
$D_{50}$ (mm)	0.25	0.30	20%	0.24	- 4%	
$\sigma$ (mm)	0.07	0.08	14%	0.08	14%	
% shells	8	25	213%	5	- 38%	

The borrow site data are the reference value

Thus, in summary, the Van Veen grab results determine the homogeneity of the sediment along the hopper, which provide evidence in favor of the methodology of taking a single grab sample. Despite this, and due to the high percentage of shells, surficial samples are neither representative of the rest of the sediment in the hopper nor of the borrow site either. Taking samples that are not representative could cause the coastal manager to make the wrong decision regarding the specific location where the sand is to be poured during beach nourishment. This error could lead to less stability, a negative impact on tourism and, therefore, an economic loss. Therefore, the Van Veen method should be discarded aboard a dredger. Furthermore, core methodology presented herein provides a more accurate determination of the sediment parameters.

One last disquisition should be noted. Samples were taken just from one ship because the *Balder R* was the only dredger that was operative for the beach nourishment. Therefore, results obtained in this experiment cannot be immediately generalized. Nevertheless, due to its speed of execution and its low cost, the same methodology can be implemented easily for other beach nourishments. Thus, it could be checked if the results obtained herein about sand size distribution in the hopper are completely generalizable or could depend on some dredger or sand characteristics.

### Conclusions

Even though the relevant importance of sand size in the design of coastal engineering projects is accepted, the variability of sand size inside the hopper of a trailing suction dredger has not been investigated until now. This is the reason why several samples were taken using two different methodologies during a dredging process performed in the Gulf of Cadiz for beach nourishment.

The results showed problems related to the use of the Van Veen grab, the standard method contemplated in the protocol for sampling aboard a dredger. Surface samples were not representative of the whole hopper because of the higher percentage of shell pieces at the surface. The presence of these bioclasts also affected the grain size, resulting in a difference in  $D_{50}$  of up to 30% more in the surface than immediately

below. These high differences in  $D_{50}$  could result in wrong decisions being made regarding the specific location where the sand is poured during beach nourishment. To accept a  $D_{50}$  that is not representative could lead to less stability, a negative impact on tourism and, therefore, an economic loss. Therefore, the surface samples taken with a Van Veen grab demonstrated that sampling with this device must be rejected from now on. Despite this, the Van Veen grab was used in this study in order to get results to determine the horizontal distribution along the hopper. The results showed a homogeneity of the sediment along the surface of the hopper. Differences among the  $D_{50}$  values obtained for the eight samples taken in the surface were less than 10%.

The core tubes introduced by percussion were the only useful method in determining a linear correlation between sand size and depth. The  $D_{50}$  obtained at bow and stem increased from 0.21 and 0.22 mm at the surface to 0.26 at 0.85 and 0.95 m depth, respectively, very close to the average value of 0.25 mm of the borrow site, while sorting remained almost constant. Thus, no significant difference was found between the bow and stem results, which also contribute to the homogeneity hypothesis. The main disadvantage of this method was that the manual percussion procedure could not reach a depth greater than 1 m. Keeping in mind this disadvantage, sampling with a vibrocoorer should be considered as a basis for further research about the correlation between  $D_{50}$  and depths greater than 1 m. Furthermore, this study was carried out in one dredger, the only one that was operative for the beach nourishment. Therefore, the same methodology can be used for subsequent beach nourishments to check if sand size distribution follows the same tendency described herein or depends on some sand and dredger characteristics. Despite this only-one-dredger test, this methodology can be carried out for other borrow sites and dredgers due to its economic and easy application.

## References

- Aboitiz A, Tejedor B, Muñoz JJ, Abanca JM (2008) Relation between daily variations in sea level and meteorological forcing in Sancti Petri Channel (SW Spain). *Cienc Mar* 34(4):491–501
- Anfuso G, Benavente J (2006) Approximation to the classification and morphodynamic behaviour of the beaches between Chipiona and Rota (Cádiz, SW Spain). *Cienc Mar* 32(4):605–616
- CUR (1987). Manual on Artificial Beach nourishment, Centre for Civil Engineering Research, Codes and Specifications, Report n. 130
- Dean RG (1991) Equilibrium beach profiles: characteristics and applications. *J Coast Res* 7:5–84
- Dean, R.G. (2003). Beach nourishment: theory and practice. Advanced series on ocean engineering. World scientific pub. Co., river edge, New Jersey (399 pp.)
- Egamar (1991). Marine geophysical study between the Cape of Trafalgar and the Camero Promontory. Dirección General de Costas. Ministerio de Obras Públicas y Transportes, Madrid, Ref 00–373, 5 vols
- Gallop, S. L., Collins, M., Pattiaratchi, C. B., Eliot, M. J., Bosserdle, C., Ghisalberti, M., Collins, L.B., Eliot, I., Erlemerjer, P. L. A., Larcombe, P., Marigómez, I., Stul, T. and White, D. J. (2015). Challenges in transferring knowledge between scales in coastal sediment dynamics. *Front Mar Sci* 2 (82)
- Geomysa (1991). Marine geophysical study between the Cape of Trafalgar and the Puerto Tower (Cádiz). Dirección General de Costas. Ministerio de Obras Públicas y Transportes, Madrid, Ref 00–371, 5 vols
- Gomez-Pina, G., Fages, L., Ramirez, J.L., Muñoz-Perez, J.J., Enriquez, J. (2007). A critical review of beach restoration projects in the northern coast of Cadiz (Spain) after thirteen years. *Proc Coast Eng Conf* 4167–4178
- Gruens MB, Emersole BA, Walton TL, Wise RA (2002) Beach fill design. In: Wap DL (ed) Coastal engineering manual, part 5 cap. 4, U.S. Army Corps of Engineers, Washington
- Hamm L, Capobianco M, Dette HH, Lechuga A, Spanhoff R, Stive MJF (2002) A summary of European experience with shore nourishment. *Coast Eng* 47:237–264
- Hanson H, Brampton A, Capobianco M, Dette HH, Hamm L, Laustrup C, Lechuga A, Spanhoff R (2002) Beach nourishment projects, practices, and objectives—a European overview. *Coast Eng* 47:81–111
- Houston JR (2013) The economic value of beaches—a 2013 update. *Shore Beach* 81:3–11
- Jimenez JA, Madsen OS (2003) A simple formula to estimate settling velocity of natural sediments. *J Waterw Port Coast Ocean Eng* 129(2):70–78
- Karambas TV, Samaras AG (2014) Softshore protection methods: the use of advanced numerical models in the evaluation of beach nourishment. *Ocean Eng* 92:129–136
- Klein YL, Osleeb JP, Viola MR (2004) Tourism-generated earnings in the coastal zone: a regional analysis. *J Coast Res* 20:1080–1088
- Krumbein WC (1934) Size frequency distributions of sediments. *J Sediment Petrol* 4:65–77
- Larson M, Knus NC (1991) Mathematical modelling of the fate of beach fill. *Coast Eng* 16:83–114
- MARM (2010). Instrucción Técnica para la Gestión Ambiental de las extracciones marinas para la obtención de arena. Ed. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 30 pp.
- Miedema SA (2009) The effect of the bed rise velocity on the sedimentation process in hopper dredges. *WEDA J Dredg* 10(1):10–30
- Miedema S.A. and Vlasblom W.J. (1996). Theory for hopper sedimentation. 29th Annual Texas A&M Dredging Seminar. New Orleans, June
- Ministry of Environment (2003) Environmental impact study: use of Meca sandbank to Cadiz beach nourishment. Res Secretariat Environ BOE 108:17266–17270 (in Spanish)
- Muñoz-Perez JJ, Gutierrez-Mas JM, Parrado JM, Moreno L (1999) Sediment transport velocity by tracer experiment at Regla Beach (Spain). *J Waterw Port Coast Ocean Eng* 125(6):332–335
- Muñoz-Perez JJ, Gutierrez-Mas JM, Moreno J, Español L, Moreno L, Bernabeu A (2003) A portable meter system for dry weight control in dredging hoppers. *J Waterw Port Coast Ocean Eng* 129(2):79–85
- Muñoz-Perez, J.J., Roman-Sierra, J., Navarro-Pons, M., Neves, M.G., and del Campo, J.M. (2014). Comments on “Confirmation of beach accretion by grain-size trend analysis: Camposoto Beach, Cádiz, SW Spain” by E. Poizat et al. (2013). *Geo-Mar Lett* 34 (1), 75–78
- OSPAR Commission (2014). Guidelines for the management of dredged material at sea. Available at <https://dredging.org/documents/oesd/downloads/environment-ospar-dmg-guidelines.pdf>
- Pranzini E, Wetzel L, Williams A (2015) Aspects of coastal erosion and protection in Europe. *J Coast Conserv* 19:445–459. <https://doi.org/10.1007/s11852-015-0399-3>

- Pranzini E, Anfuso G, Muñoz-Perez JJ (2018) A probabilistic approach to borrow sediment selection in beach nourishment projects. *Coast Eng* 139:32–35
- Roman-Sierra J, Navarro M, Muñoz-Perez JJ, Gomez G (2011) Turbidity and other effects resulting from Tinfalgar sandbank dredging and Palmar Beach nourishment. *J Waterw Port Coast Ocean Eng* 137(6): 332–343
- Roman-Sierra J, Muñoz-Perez JJ, Navarro-Pons M (2013) Influence of sieving time on the efficiency and accuracy of grain-size analysis of beach and dune sands. *Sedimentology* 60:1484–1497
- Roman-Sierra J, Muñoz-Perez JJ, Navarro-Pons M (2014) Beach nourishment effects on sand porosity variability. *Coast Eng* 83:221–232
- Shao D, Gao W, Purnama A, Guo J (2015) Modeling dredging-induced turbidity plumes in the far field under oscillatory tidal currents. *J Waterw Port Coast Ocean Eng* 143(3):06016007
- Soulsby RL (1997) *Dynamics of marine sands*. Thomas Telford, London
- Syvitski JPM (1991) *Principles, methods, and application of particle size analysis*. Cambridge University Press, New York, 368 pp
- Trembanis AC, Pilkey OH (1999) Comparison of beach nourishment along the U.S. Atlantic, Great Lakes, Gulf of Mexico New England shorelines. *Coast Manag* 27:329–340
- USACE (2002). *Coastal engineering manual, V-4-24 EM 1110-2-1100, Part III. Coastal sediment processes*. Webpage <http://www.publications.usace.army.mil/USACE-Publications/Engineer-Manuals/>
- Van Ingen LW, Castro B (2017) Towards a green maritime technology. *Terra et Aqua* 149:18–27
- Van Rhee, C. (2002). *On the sedimentation process in a trailing suction hopper dredger*. PhD thesis, Technische Universiteit Delft (Netherlands)
- Velegnikis AF, Ballay A, Poulos S, Radzevicius R, Bellec V, Manso F (2010) European marine aggregates resources: origins, usage, prospecting and dredging techniques. *J Coast Res* 51:1–14
- Publisher's note** Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

**ANEXO II. Granulometrías tamices diferentes.**

Muestra	Cántara 5			Cántara 8		
	T. Pequeño	T. Grande	Laboratorio	T. Pequeño	T. Grande	Laboratorio
D <sub>95</sub> (mm)=	0,486	0,491	0,484	0,481	0,483	0,458
D <sub>84</sub> (mm)=	0,379	0,350	0,346	0,375	0,384	0,347
D <sub>75</sub> (mm)=	0,344	0,334	0,327	0,343	0,344	0,33
D <sub>50</sub> (mm)=	0,300	0,291	0,274	0,300	0,297	0,281
D <sub>25</sub> (mm)=	0,256	0,243	0,206	0,256	0,248	0,216
D <sub>16</sub> (mm)=	0,217	0,201	0,177	0,218	0,203	0,183
D <sub>5</sub> (mm)=	0,153	0,149	0,141	0,154	0,149	0,143
Media(Ø)	1,850	1,925	1,979	1,856	1,854	1,96
Sorting(Desv.)	0,454	0,461	0,511	0,445	0,487	0,485
Skewness:	-0,163	-0,229	-0,190	-0,174	-0,184	-0,251
Kurtosis:	1,604	1,537	1,095	1,596	1,473	1,124
σ	0,081	0,0745	0,0845	0,0785	0,0905	0,082

Cántara 10			Cántara 16			T. Pequeño
T. Pequeño	T. Grande	Laboratorio	T. Pequeño	T. Grande	Laboratorio	
0,579	0,594	0,527	0,490	0,485	0,477	0,464
0,418	0,422	0,383	0,383	0,349	0,343	0,354
0,352	0,353	0,343	0,344	0,330	0,32	0,337
0,314	0,307	0,296	0,301	0,278	0,256	0,290
0,275	0,261	0,247	0,257	0,210	0,191	0,233
0,261	0,229	0,203	0,220	0,179	0,167	0,194
0,197	0,157	0,149	0,154	0,142	0,138	0,146
1,691	1,760	1,857	1,840	1,964	2,025	1,925
0,406	0,511	0,505	0,453	0,509	0,531	0,470
0,175	0,017	-0,138	-0,145	-0,206	-0,091	-0,262
1,791	1,805	1,580	1,630	1,112	0,985	1,283
0,0785	0,0965	0,09	0,0815	0,085	0,088	0,08

Cántara 18		Cántara 21			Cántara 22	
T. Grande	Laboratorio	T. Pequeño	T. Grande	Laboratorio	T. Pequeño	T. Grande
0,424	0,4	0,499	0,536	0,488	0,494	0,491
0,339	0,335	0,385	0,377	0,35	0,358	0,349
0,320	0,316	0,344	0,341	0,331	0,336	0,328
0,269	0,263	0,297	0,290	0,277	0,280	0,267
0,202	0,196	0,249	0,229	0,208	0,210	0,197
0,174	0,171	0,204	0,192	0,178	0,179	0,171
0,140	0,139	0,149	0,146	0,141	0,141	0,139
2,004	2,025	1,852	1,884	1,966	1,945	1,990
0,483	0,474	0,493	0,528	0,515	0,524	0,533
-0,244	-0,243	-0,163	-0,139	-0,198	-0,192	-0,142
0,987	0,907	1,534	1,337	1,096	1,092	1,014
0,0825	0,082	0,0905	0,0925	0,086	0,0895	0,089

Laboratorio	Cántara 25			Cántara 27		
	T. Pequeño	T. Grande	Laboratorio	T. Pequeño	T. Grande	Laboratorio
0,487	0,934	0,960	0,986	0,455	0,437	0,398
0,346	0,407	0,380	0,354	0,351	0,344	0,335
0,325	0,342	0,333	0,334	0,334	0,326	0,316
0,265	0,280	0,261	0,277	0,284	0,278	0,261
0,196	0,207	0,193	0,206	0,221	0,214	0,195
0,171	0,177	0,168	0,177	0,186	0,182	0,17
0,139	0,141	0,138	0,141	0,144	0,142	0,139
2	1,857	1,945	1,958	1,945	1,973	2,029
0,528	0,713	0,718	0,675	0,481	0,475	0,475
-0,136	0,087	0,132	0,007	-0,257	-0,263	-0,231
1,016	1,544	1,457	1,650	1,141	1,095	0,894
0,0875	0,115	0,106	0,0885	0,0825	0,081	0,0825

Cántara 30			Cántara 32			
T. Pequeño	T. Grande	Laboratorio	T. Pequeño	T. Grande	Laboratorio	T. Pequeño
1,721	1,724	1,771	0,884	0,867	0,898	0,608
0,539	0,571	0,549	0,440	0,409	0,417	0,349
0,391	0,375	0,352	0,357	0,346	0,349	0,334
0,301	0,285	0,281	0,314	0,298	0,307	0,295
0,232	0,207	0,204	0,272	0,251	0,265	0,256
0,193	0,177	0,176	0,257	0,206	0,25	0,220
0,146	0,141	0,141	0,177	0,150	0,164	0,154
1,605	1,589	1,627	1,688	1,808	1,756	1,911
0,909	0,970	0,963	0,546	0,631	0,556	0,466
0,274	0,312	0,316	0,271	0,071	0,230	-0,110
1,937	1,727	1,901	2,426	2,240	2,532	2,114
0,173	0,197	0,1865	0,0915	0,1015	0,0835	0,0645
Cántara 34		Cántara 40			Cántara 18	
T. Grande	Laboratorio	T. Pequeño	T. Grande	Laboratorio	T. Pequeño	T. Grande
0,633	0,633	1,488	1,475	1,462	0,613	0,584
0,348	0,346	0,497	0,499	0,491	0,385	0,363
0,329	0,326	0,388	0,381	0,38	0,340	0,340
0,278	0,272	0,315	0,305	0,306	0,284	0,297
0,210	0,203	0,271	0,250	0,253	0,214	0,253
0,179	0,175	0,255	0,205	0,21	0,181	0,211
0,142	0,14	0,171	0,150	0,151	0,142	0,152
1,966	1,985	1,610	1,653	1,662	1,887	1,885
0,566	0,576	0,713	0,820	0,803	0,592	0,490
-0,112	-0,088	0,402	0,243	0,245	-0,071	-0,129
1,364	1,306	2,469	2,223	2,287	1,295	1,864
0,0845	0,0855	0,121	0,147	0,1405	0,102	0,076
Laboratorio	Cántara 21		Cántara 23			
	T. Pequeño	T. Grande	Laboratorio	T. Pequeño	T. Grande	Laboratorio
0,641	0,463	0,399	0,898	0,450	0,353	0,352
0,354	0,354	0,339	0,417	0,350	0,326	0,327
0,336	0,338	0,323	0,349	0,331	0,304	0,306
0,286	0,292	0,280	0,307	0,280	0,244	0,247
0,222	0,241	0,221	0,265	0,214	0,184	0,186
0,187	0,199	0,187	0,25	0,182	0,163	0,164
0,144	0,148	0,144	0,164	0,142	0,137	0,137
1,936	1,918	1,975	1,756	1,958	2,085	2,077
0,557	0,457	0,437	0,556	0,488	0,457	0,455
-0,125	-0,261	-0,331	0,230	-0,247	-0,192	-0,219
1,476	1,382	1,099	2,532	1,084	0,773	0,776
0,0835	0,0775	0,076	0,0835	0,084	0,0815	0,0815
Cántara 27			Cántara 28			
T. Pequeño	T. Grande	Laboratorio	T. Pequeño	T. Grande	Laboratorio	T. Pequeño
0,805	0,869	0,988	1,736	1,737	1,737	0,500
0,395	0,339	0,337	0,448	0,470	0,45	0,394
0,343	0,316	0,308	0,349	0,377	0,349	0,346
0,288	0,251	0,235	0,306	0,312	0,306	0,303
0,220	0,188	0,18	0,263	0,266	0,263	0,259
0,186	0,165	0,16	0,240	0,247	0,239	0,226
0,144	0,137	0,136	0,161	0,162	0,16	0,156
1,859	2,045	2,083	1,713	1,668	1,712	1,814
0,648	0,663	0,702	0,745	0,751	0,750	0,455
0,017	0,089	0,208	0,340	0,360	0,337	-0,097
1,590	1,458	1,513	3,446	2,783	3,456	1,647
0,1045	0,087	0,0885	0,104	0,1115	0,1055	0,084
Cántara 31						
T. Grande	Laboratorio					
0,522	0,489					
0,342	0,339					
0,324	0,319					
0,272	0,263					
0,204	0,196					
0,175	0,17					
0,141	0,139					
1,990	2,017					
0,528	0,524					
-0,161	-0,139					
1,160	1,058					
0,0835	0,0845					