

# OPTIMIZACIÓN DEL ANÁLISIS DEL TAMAÑO DE GRANO DE ARENAS COSTERAS

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

<sup>1</sup> Dpto. Física Aplicada, Centro Andaluz Superior de Estudios Marinos (Universidad de Cádiz). Pol. Río San Pedro, s/n. 11510 Pto. Real (Cádiz). [jorge.roman@uca.es](mailto:jorge.roman@uca.es)

<sup>2</sup> Demarcación de Costas Andalucía-Atlántico, D.G. de Sostenibilidad de la Costa y del Mar (MAGRAMA). Avda. Marianista Cubillo, 7. 11008 Cádiz.

## INTRODUCCIÓN

El análisis métrico del sedimento es conocido comúnmente como análisis granulométrico. El tamaño de grano es una propiedad fundamental del sedimento, siendo muy usada para describir diferentes facies sedimentarias y clasificar ambientes sedimentarios (Shepard, 1954) puesto que juega un papel principal en el transporte y deposición de material granular. En este contexto, el tamaño de grano proporciona aspectos importantes de la procedencia del sedimento, de su transporte histórico y de las condiciones de sedimentación (Folk y Ward, 1957; Friedman, 1979; Bui et al., 1990; USACE, 2002; Gómez-Pina et al., 2006). Actualmente, las técnicas empleadas en la determinación del tamaño de grano incluyen la medida directa, el tamizado por vía seca y/o húmeda, la sedimentación, y la medición mediante laser, rayos-X, y el Coulter counter (Blott y Pye, 2001).

Existen varias revisiones de las técnicas convencionales usadas en el análisis de tamaños de partículas geológicamente modernas (Syvitski et. al, 1991; Barbanti y Bothner, 1993; Beuselinck et. al, 1998), consistiendo principalmente en una división de la muestra de sedimento en un número definido de fracciones de tamaño, consiguiendo una distribución del tamaño de grano a partir del porcentaje del peso o volumen de cada fracción de sedimento (Blott y Pye, 2001). Las granulometrías matemáticas fueron propuestas originariamente por Matheron (1975) para caracterizar procesos de cribado en diferentes tamices, obteniendo una clasificación comprensible del material dependiendo del grano y la textura, ofreciendo así un análisis estadístico del tamaño de grano (Chen y Dougherty, 1994).

Los sedimentos son normalmente clasificados en función de su proporción de contenido en arenas, fangos y limos (Shepard, 1954). Con el objetivo de comparar distintas arenas, las distribuciones del tamaño de grano se describen frecuentemente por su desviación respecto a una distribución ideal pre-establecida (distribución normal o Gaussiana). La escala geométrica se utiliza normalmente para tratar de otorgar la misma importancia a las pequeñas diferencias existentes entre las partículas finas, que a las grandes diferencias entre partículas gruesas. No obstante, la mayoría de ingenieros de costas y sedimentólogos han adoptado la escala logarítmica graduada de Wentworth (1922), donde los límites entre las sucesivas clases de sedimentos difieren por un factor de dos. Para facilitar una representación gráfica y manipulación estadística de los datos de las diferentes frecuencias del tamaño de grano, Krumbein (1934) propuso posteriormente que los límites de la escala de grado deberían ser transformados logarítmicamente en unidades phi ( $\phi$ ), usando las expresiones (1) y (2):

$$D(\phi) = -\log_2 d \text{ (mm)} \quad (1)$$

e inversamente:

$$d \text{ (mm)} = 2^{-D(\phi)} \quad (2)$$

donde:

D es el diámetro de grano en unidades phi.

d es el tamaño de grano en unidades milimétricas.

Otros autores han sido partidarios de comparaciones con distribuciones alternativas, consiguiendo que la frecuencia de escalas y los diferentes tamaños de grano sean logarítmicamente transformadas (Bagnold y Barndorff-Nielsen, 1980). Sin embargo, esto no ha convencido a la mayoría de los autores en cuanto a que estas distribuciones

logarítmicas-hiperbólicas ofrezcan una mayor comprensión respecto a los procesos que envuelven el proceso de sedimentación, por lo que la mayoría de los autores aún utilizan la distribución logarítmica-normal.

Los parámetros estadísticos que describen una distribución de tamaños de grano suelen ser: el tamaño medio de grano ( $D_{50}$ ); la desviación típica (sorting), la simetría (skewness) y el apuntamiento o achatamiento (kurtosis). Debido al gran número de muestras que normalmente se deben analizar, el cálculo de estos parámetros puede ser un proceso laborioso dependiendo de la metodología utilizada. No obstante, estos parámetros pueden ser fácilmente calculados utilizando los métodos matemáticos de diferentes momentos estadísticos (Krumbein y Pettijohn, 1938; Folk, 1974; Friedman y Johnson, 1982; Blott y Pye, 2001 y USACE, 2002) o a través de los métodos gráficos (Folk y Ward, 1957). Además, estos parámetros se utilizan como efectivos descriptores de la textura y la forma del grano (Batman y Dougherty, 1997). En este sentido, se han propuesto muchas fórmulas para el cálculo de estos parámetros estadísticos (Krumbein, 1934), aunque las más utilizadas son las propuestas por Folk (1974) y USACE (2002). Estos métodos describen ampliamente los diferentes aspectos del tamaño de grano y están influenciados en menor o mayor medida por variaciones en la forma de grano, su densidad y propiedades ópticas. Debido a ello, los resultados obtenidos utilizando diferentes metodologías no pueden ser comparados directamente entre sí (Pye, 1994), siendo entonces fundamental definir una metodología de análisis estándar.

Diversos estudios previos han comparado los resultados estadísticos derivados de las diferentes metodologías gráficas o matemáticas empleadas, incluso variando el tiempo de tamizado (Syvitski et al., 1991), pero hasta la fecha, no se ha propuesto un tiempo común de tamizado que consiga un análisis granulométrico eficiente, asumiendo un mínimo error conocido. La hipótesis principal es que cuanto mayor sea el tiempo de tamizado, mayor será la probabilidad de que los granos de arena vayan pasando a lo largo de los diferentes tamices hasta alcanzar la luz de malla mínima que los contenga. En este sentido, algunos autores han propuesto diferentes tiempos mínimos de tamizado de 20 minutos (Syvitski, 1991) o 15 minutos (USACE, 2002), pero no han evaluado la confianza de dichos análisis. Además, aún no se ha estudiado en profundidad la eficiencia del análisis granulométrico en diferentes ambientes deposicionales y en tiempos inferiores a 15 minutos.

El presente estudio se ha realizado con el propósito de optimizar el tiempo de tamizado para análisis granulométricos de arenas de playas y dunas costeras estableciendo un tiempo mínimo de tamizado con el fin de obtener resultados precisos, asumiendo errores despreciables asociados al muestreo en campo y a la propia metodología del análisis.

## **METODOLOGÍA**

Para llevar a cabo el estudio, se recogieron diez muestras de diferentes ambientes sedimentarios en el litoral de la provincia de Cádiz (Fig. 1): En la playa urbana Victoria (en la ciudad de Cádiz), que corresponde a un ambiente mesomareal (Muñoz-Pérez, 1996), así como en la playa de Valdevaqueros (T.M. Tarifa), sujeta a un ambiente micromareal, donde alberga un sistema dunar con una de las capacidades de transporte eólico más altas de Europa (Navarro et al., 2011).

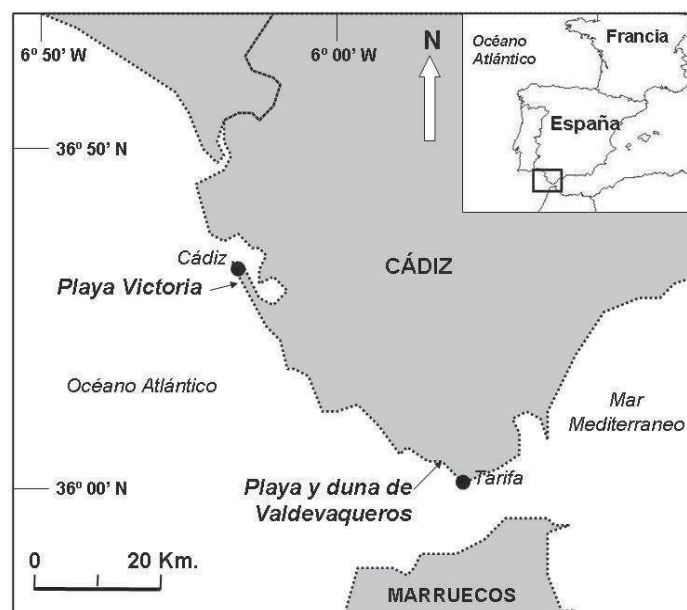


Figura 1. Localización de las playas en el litoral de la provincia de Cádiz.

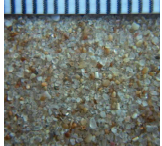
La metodología seguida para el muestreo en campo y el procedimiento de laboratorio para los análisis de arenas, fue el establecido según las recomendaciones propuestas por los principios, métodos y aplicaciones de análisis de partículas de sedimento (Syvitski, 1991); USACE (2002) y Román-Sierra et al. (2013). En primer lugar, se procedió a un calibrado y precisión de la metodología de muestreo (se tomaron varias muestras en el mismo punto) y de análisis en laboratorio (se analizó la misma muestra varias veces). Asimismo, se calcularon los errores relativos cometidos para cada parámetro en todas las muestras, en función del tiempo de tamizado empleado. Para los análisis de la arena se ha escogido un total de nueve tamices (entre los tamaños 2 mm y 0,074 mm) para los diferentes tamaños de sedimento (USACE, 2002). Ver Tabla 1.

Tabla 1. Tamices escogidos y diferentes clasificaciones de tamaños de las partículas.

Wentworth (1922)	Clasificación de la ASTM	Tamaño (mm)	Tamaño (phi)	U.S. Std. Sieve
Grava	Arena gruesa	> 2	< -1,00	< 10
Arenas muy gruesas	Arenas medias	2 – 1	0,00	10 – 40
Arenas gruesas		1 -- 0,71	0,50	
		0,71 -- 0,5	1,00	
Arenas medias	Arena fina	0,5 -- 0,355	1,50	40 -- 200
		0,355 -- 0,25	2,00	
Arenas finas		0,25 -- 0,125	3,00	
Arenas muy finas		0,125 -- 0,074	3,74	
Limo grueso	Finos	< 0,074	> 3,74	> 200

A lo largo de esta investigación se ha adaptado una hoja de cálculo mediante la aplicación Microsoft Excel® para los cálculos matemáticos y representación gráfica de los datos granulométricos (Fig. 2). Tras la introducción de los datos del tamizado y pesado, el programa desarrollado por los autores proporciona variables como: el peso de cada tamiz, el porcentaje retenido, el porcentaje que pasa, el peso inicial y final, la fiabilidad del análisis, una curva granulométrica, histograma con línea de tendencia para cada una de las fracciones del sedimento, así como un completo apartado con los principales parámetros que definen la distribución granulométrica (mediana, media, moda, desviación típica,

simetría, apuntamiento), así como los percentiles  $D_{95}$ ,  $D_{84}$ ,  $D_{75}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{25}$ ,  $D_{16}$ ,  $D_5$ , tanto en unidades milimétricas como en unidades phi.

TÍTULO: Perfil Valdevaqueros				Coordenadas UTM ED50		X: Y:		ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO			
MUESTRA:	PLAYA ALTA 10 min.	Julio 2008		Tamaño (mm)	(%) Retenido	(%) Retenido Acumulado	(%) Que Pasa	Variable	Valor	Variable	Valor
Peso inicial muestra	161,73	gr.		2	1,17	1,17	98,83	D50 (mm)	0,27	$\Phi_{50}$	1,90
>2 mm	1,9	gr.	1,9	1	1,05	2,23	97,77	D84 (mm)	0,39	$\Phi_{84}$	1,36
2--1	1,7	gr.	1,7	0,71	0,86	3,09	96,91	D16 (mm)	0,17	$\Phi_{16}$	2,56
1--0,71	1,39	gr.	1,39	0,5	2,85	5,94	94,06	D95 (mm)	0,50	$\Phi_{95}$	1,00
0,71--0,5	4,61	gr.	4,61	0,25	11,98	17,92	82,08	D5 (mm)	0,14	$\Phi_5$	2,84
0,5--0,355	19,38	gr.	19,38	0,125	37,66	55,58	44,42	D75 (mm)	0,33	$\Phi_{75}$	1,60
0,355--0,250	60,91	gr.	60,91	0,075	40,99	96,57	3,43	D25 (mm)	0,18	$\Phi_{25}$	2,47
0,250--0,125	66,29	gr.	66,29	0	2,91	99,47	0,53	Moda (mm)	0,25	$M(\Phi)$	1,94
0,125--0,075	4,7	gr.	4,7		0,33	99,81	0,19	% Gruesos	1,17	$\Theta\Phi$ (sorting)	0,61
<0,075 mm	0,54	gr.	0,54					% Arenas	98,30	$\alpha\Phi$ (skewness)	-0,09
			161,42		99,81			% Finos	0,33	$\kappa\Phi$ (kurtosis)	0,86
Peso final muestra	161,42	gr.		<b>Observaciones:</b> Muestra de arena del perfil de la playa Victoria en su parte seca, tamizada durante 10 minutos. Arenas medias y finas moderadamente bien clasificadas, de distribución casi simétrica y platicúrtica.							
% FIABILIDAD	99,81										
<b>Fotografía:</b> 											

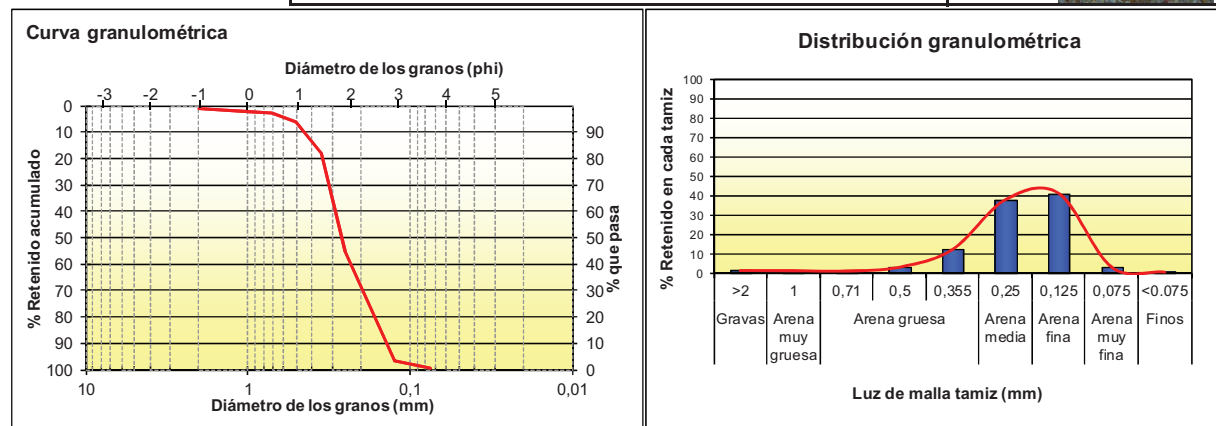


Figura 2. Plantilla con los principales resultados del estudio granulométrico de una muestra de arena.

Se han analizado varias muestras de 100 gramos de arena de diversos ambientes deposicionales durante distintos tiempos de tamizado, concretamente 2, 5, 10, 15 y 20 minutos. Asimismo, se han calculado los errores relativos y absolutos para cada tamiz. La diferencia de porcentaje retenido en el mismo tamiz para cada uno de los tiempos ofrece una estimación del error absoluto que se comete en cada momento. El error relativo se calcula al tomar como numerador el error absoluto y como denominador común el valor teóricamente más preciso, correspondiente al mayor tiempo de tamizado de 20 minutos. Este valor permite descubrir el error en cada intervalo de tiempo. Con el fin de calcular estos errores, se ha generado una muestra maestra representativa de cada ambiente. Para ello se han sumado todas las muestras de arena tomadas del perfil de playa y duna. Como ya demostraron Medina et al. (1995): "la distribución granulométrica maestra correspondiente a un perfil de playa, obtenida mediante la adición de varias muestras tomadas a lo largo de un perfil activo, siendo representativa y no varía en el tiempo".

Tras los cálculos de precisión se obtuvieron los principales parámetros ( $D_{50}$ , sorting, skewness y kurtosis) para cada uno de los tiempos de tamizado estudiados en cada muestra. Todos los resultados fueron cotejados con el fin de establecer un tiempo óptimo de tamizado (asociado a la mayor precisión posible), en cada uno de los ambientes estudiados.

Concretamente, se han analizado 4 muestras de un perfil transversal de la duna de Valdevaqueros: cara de sotavento, cresta de la duna, cara de barlovento y pie de duna. También se han analizado 2 muestras de la playa contigua: playa seca, e intermareal.

Asimismo, se han evaluado los resultados granulométricos correspondientes a 3 muestras de un perfil transversal completo de la Playa Victoria: playa seca, intermareal y submareal (Fig. 3).

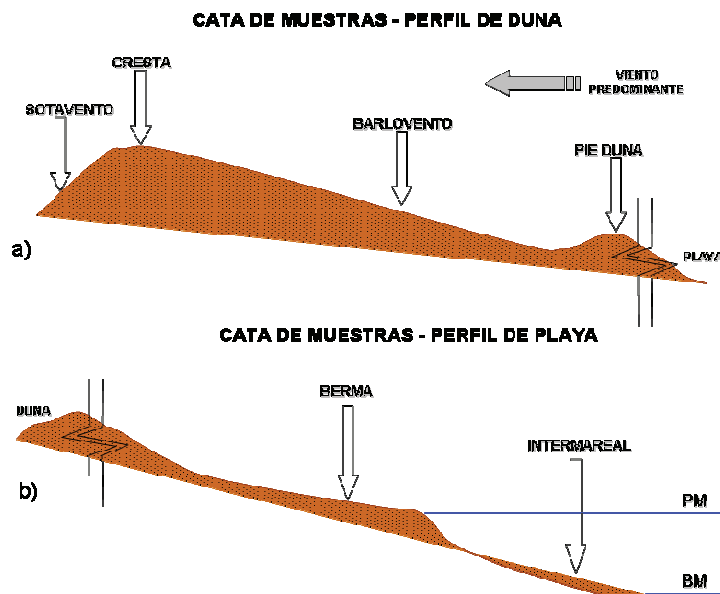


Figura 3. Localización de las zonas de muestreo en el perfil transversal de playa y duna.

Adicionalmente, y con la finalidad de conocer los posibles errores cometidos de índole instrumental y técnica, se ha procedido a realizar una calibración y validación propia de la metodología de análisis. Para calcular el error cometido durante la recogida de la muestra, se han tomado 3 muestras en el mismo punto con la misma metodología de cata y análisis. Posteriormente se ha analizado cada muestra por triplicado con el fin de calcular el error instrumental cometido durante el análisis.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Calibración y cálculo del error metodológico.

Con el fin de calibrar y estimar el error cometido por la propia metodología utilizada, en la Tabla 2, se muestran los resultados obtenidos tras un análisis realizado por triplicado a la misma muestra (intermareal de la playa Victoria), durante 5 minutos de tamizado. El error máximo aceptado por pérdida de arena entre los 3 análisis consecutivos ha sido de un 0,01%.

Tabla 2: Resultados del análisis realizado por triplicado a la muestra intermareal de la playa Victoria.

Tamiz (mm)	% Retenido (I)	% Retenido (II)	% Retenido (III)	Media	Desv. Típica
2,000	0,10	0,10	0,11	0,10	0,00
1,000	0,46	0,46	0,45	0,46	0,00
0,710	1,14	1,09	1,09	1,11	0,03
0,500	4,46	4,47	4,44	4,45	0,02
0,350	13,34	13,35	13,35	13,34	0,00
0,250	39,33	39,60	39,86	39,60	0,27
0,125	39,56	39,36	39,22	39,38	0,17
0,075	1,57	1,51	1,42	1,50	0,08
0,000	0,06	0,06	0,06	0,06	0,00

El error cometido por la propia metodología utilizada se expresa como la desviación estándar de la muestra retenida en cada tamiz. La desviación estándar se considera prácticamente cero en todos los tamices. Tras esta comprobación, se concluye que el error debido a la propia metodología analítica no se considera significativo.

Además, se ha estimado el error cometido durante el muestreo en campo. Se han tomado 3 muestras diferentes en el mismo punto, y se han analizado siguiendo la misma metodología. La tabla 3 muestra los resultados obtenidos tras los análisis realizados.

Tabla 3: Resultados de los análisis realizados a 3 muestras tomadas en el mismo punto de la playa Victoria.

Tamiz (mm)	% Retenido (I)	% Retenido (II)	% Retenido (III)	Media	Desv. Típica
2,000	1,14	1,10	1,23	1,16	0,07
1,000	1,01	0,96	0,93	0,97	0,04
0,710	0,98	0,99	0,79	0,92	0,11
0,500	2,92	2,90	2,59	2,80	0,19
0,350	12,14	12,09	12,20	12,14	0,06
0,250	37,27	37,22	37,36	37,28	0,07
0,125	41,36	41,50	41,59	41,48	0,12
0,075	2,83	2,91	2,91	2,88	0,05
0,000	0,33	0,31	0,38	0,34	0,04

Los resultados obtenidos muestran un porcentaje de retención muy similar para cada uno de los tamices. La desviación estándar calculada para cada uno de los tamices indica valores cercanos a cero. Tras esta comprobación, se aprecia que los errores cometidos durante el muestreo y el análisis, son insignificantes.

### Análisis de las muestras de la playa y duna de Valdevaqueros.

Una vez tomadas todas las muestras, se realizó un análisis granulométrico según lo dispuesto en el apartado de metodología. La Fig. 4 muestra la  $D_{50}$  para cada una de las muestras según el tiempo de tamizado. El rango de valores oscila entre los 0,27 y los 0,34 mm. Este diámetro de sedimento corresponde a arenas medias (Wentworth, 1922). Se puede comprobar que en líneas generales, a medida que aumentamos el tiempo de tamizado, disminuye la  $D_{50}$ . A partir de los 10 minutos de tamizado, el valor de la  $D_{50}$  es estable en todas las muestras excepto en el pie de duna que necesita 15 minutos.

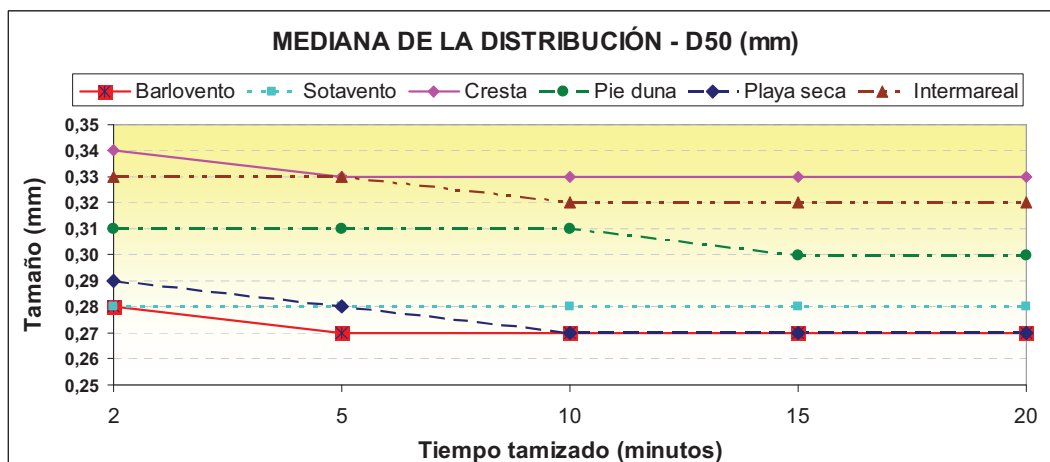


Figura 4: Evolución de la  $D_{50}$  de la arena de la playa y duna de Valdevaqueros en diferentes tiempos.

Para el caso de la muestra de barlovento, la  $D_{50}$  mantiene su valor constante en 0,28 mm a partir de los 5 minutos de tamizado. La muestra de sotavento se mantiene constante

durante todo el periodo de estudio independientemente del tiempo de tamizado. Esto es posible gracias a una muestra muy bien clasificada. En el caso de la Cresta, la  $D_{50}$  se estandariza en 0,33 mm a partir de 5 minutos, mientras que la muestra del pie de duna se estandariza en 0,30 mm a partir de los 15 minutos (arena peor clasificada). Para el caso de las arenas de la playa de Valdevaqueros, tanto la arena de la playa alta, como la arena del intermareal, se estandarizan a partir de los 10 minutos de tamizado, estando ambas muestras bien clasificadas. Una buena clasificación indica una muestra compuesta mayoritariamente por un tamaño patrón de sedimento, cercano al valor ofrecido por la  $D_{50}$ , por lo que necesitará menos tiempo de tamizado para un análisis preciso.

En la Fig. 5, a modo de ejemplo se representa la distribución granulométrica de la muestra de la zona de Barlovento del perfil de la duna de Valdevaqueros. Este tipo de sedimento corresponde a una relación de arenas medias y finas. Relativamente al resto de la muestra, la fracción muy fina representa un escaso porcentaje de retención. Ello parece indicar que dicha fracción no es lo suficientemente significativa como para determinar cambios importantes en la  $D_{50}$  en función del tiempo.

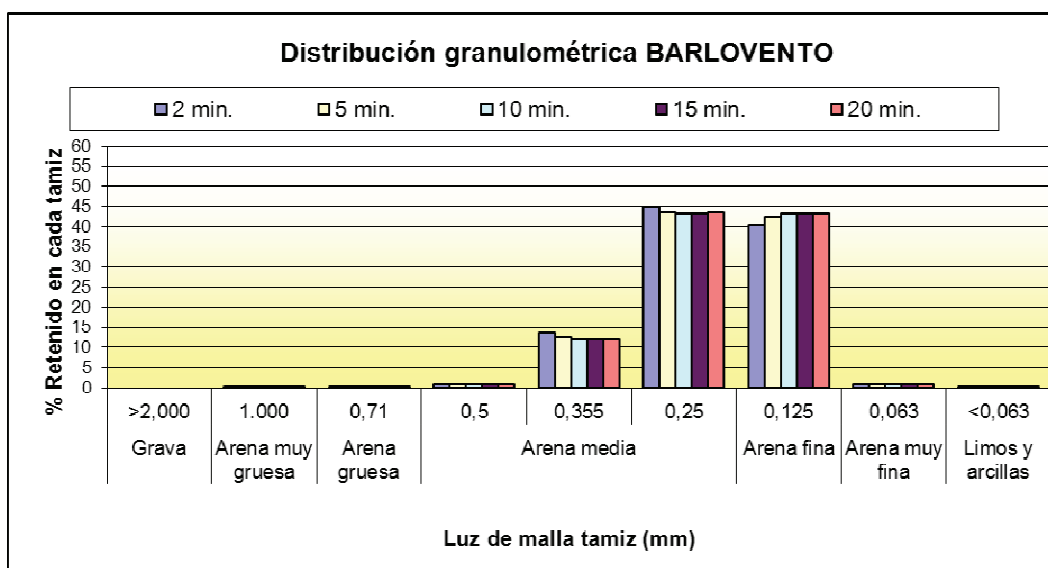


Figura 5: Distribución granulométrica de la muestra de barlovento del perfil dunar.

Los tamices de 0,355 mm, 0,250 mm y 0,125 mm presentan los mayores porcentajes retenidos (12%, 44% y 43% respectivamente tras 20 minutos). Ello es debido a que la mayor parte del sedimento está compuesto por arenas medias y finas. El porcentaje retenido disminuye con el tiempo de tamizado en los tamices 0,355 y 0,250 mm. A medida que aumenta el tiempo de análisis, aumenta la probabilidad de que los granos pasen al tamiz inferior (Syvitski et al., 1991) y aumente la eficiencia del análisis granulométrico hasta el punto que por más que aumentemos el tiempo, los granos están en su tamiz correspondiente. De esta manera, en el tamiz de 0,125 mm existe un cambio de tendencia o punto de inflexión, aumentando el porcentaje retenido con el tiempo de tamizado. En esta fracción de tamaño, el error relativo es estable a partir de los 10 minutos, pasando de un 6,97% (2 minutos) a 0,05% (10 minutos).

Asimismo, se ha realizado un estudio del error absoluto y relativo cometido en los tamices con mayor retención de arenas (0,71 – 0,125 mm) mediante la composición de las muestras maestras de la playa y duna de Valdevaqueros (Tablas 4 y 5, respectivamente).

Tabla 4: Error cometido para diferentes tiempos en los tamices con mayor retención de arena de la muestra maestra de la playa de Valdevaqueros.

		TIEMPO DE TAMIZADO					
MUESTRA MAESTRA PLAYA VALDEVAQUEROS		2 min.	5 min.	10 min.	15 min.	20 min.	Gráficos
0,71 - 0,5 mm	% Retenido	17,42	15,96	15,15	14,62	<b>14,27</b>	
	Error abs.	3,15	1,69	0,88	0,35	-	
	%Error rel.	22,07	11,84	6,17	2,45	-	
0,5 - 0,355 mm	% Retenido	28,24	28,68	28,77	28,91	<b>29,16</b>	
	Error abs.	0,92	0,48	0,39	0,25	-	
	%Error rel.	3,16	1,65	1,34	0,86	-	
0,355 - 0,25 mm	% Retenido	24,85	25,18	25,37	25,56	<b>25,67</b>	
	Error abs.	0,82	0,49	0,30	0,11	-	
	%Error rel.	3,19	1,91	1,17	0,43	-	
0,25 - 0,125 mm	% Retenido	24,61	25,66	26,30	26,59	<b>26,66</b>	
	Error abs.	2,05	1,00	0,36	0,07	-	
	%Error rel.	7,69	3,75	1,35	0,26	-	

Tabla 5: Error cometido para diferentes tiempos en los tamices con mayor retención de arena de la muestra maestra de la duna de Valdevaqueros.

		TIEMPO DE TAMIZADO					
MUESTRA MAESTRA DUNA VALDEVAQUEROS		2 min.	5 min.	10 min.	15 min.	20 min.	Gráficos
0,71 - 0,5 mm	% Retenido	5,54	5,23	4,88	4,76	<b>4,73</b>	
	Error abs.	0,82	0,51	0,16	0,03	-	
	%Error rel.	17,27	10,72	3,29	0,70	-	
0,5 - 0,355 mm	% Retenido	22,96	22,46	22,23	22,02	<b>21,80</b>	
	Error abs.	1,16	0,66	0,43	0,22	-	
	%Error rel.	5,33	3,02	1,97	1,02	-	
0,355 - 0,25 mm	% Retenido	36,89	36,55	36,37	36,44	<b>36,40</b>	
	Error abs.	0,49	0,16	0,03	0,04	-	
	%Error rel.	1,34	0,43	0,08	0,11	-	
0,25 - 0,125 mm	% Retenido	34,20	35,35	36,07	36,33	<b>36,62</b>	
	Error abs.	2,42	1,27	0,55	0,29	-	
	%Error rel.	6,60	3,46	1,50	0,79	-	



Buscando una relación óptima entre el error cometido y tiempo de tamizado para las muestras maestras de la playa y duna de Valdevaqueros, se obtiene que generalmente a partir de los 10 minutos de tamizado, la curva del error relativo se estabiliza por debajo del 2% en los principales tamices que retienen el 95% de las arenas medias. Estos resultados confirman una gran efectividad del proceso de tamizado con tan solo 10 minutos de tamizado. Se constata la existencia de un tiempo límite a partir del cual el error relativo es despreciable. Además del tiempo de tamizado, parece ser que intervienen otro tipo de factores, como la forma y tamaño del grano, que incrementan levemente el error cometido. De esta manera parece ser que el tiempo de tamizado no es condición suficiente, pero sí necesaria, para minimizar el error cometido. Asimismo, se demuestra que el escaso porcentaje retenido de arenas gruesas y finas (5%) no es suficiente para mostrar cambios importantes en los análisis realizados.

### Análisis de las muestras de la Playa Victoria.

Tras los análisis granulométricos de las muestras de la playa Victoria, se han obtenido valores de  $D_{50}$  correspondientes a arenas medias. La Fig. 6 muestra la evolución del  $D_{50}$  para cada muestra según aumentamos el tiempo de tamizado. La muestra de la playa seca presenta un  $D_{50}$  entre 0,27 y 0,28 mm. La muestra intermareal presenta un  $D_{50}$  entre 0,27 y 0,29 mm y la submareal entre 0,31 y 0,32 mm. Generalmente, a medida que aumenta el tiempo de tamizado, disminuye el  $D_{50}$ , hasta llegar al valor máximo de 15 minutos, donde el  $D_{50}$  se estabiliza para todas las muestras de la playa Victoria, salvo la arena de la playa seca que se estabiliza a partir de los 5 minutos al estar mejor clasificada.

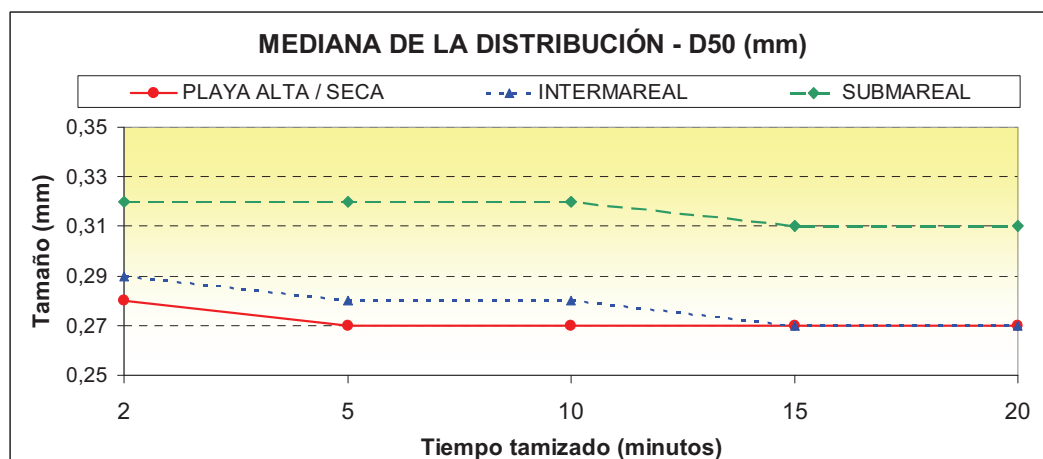


Figura 6: Evolución del diámetro medio de las muestras de la Playa Victoria en diferentes tiempos.

Para el caso de la muestra del intermareal de la playa Victoria, el  $D_{50}$  disminuye su valor de 0,29 mm hasta 0,27 mm en 15 minutos. El  $D_{84}$  adopta un valor constante de 0,38 mm tras 10 minutos. El  $D_{16}$  mantiene un valor constante de 0,17 mm tras 2 minutos. La desviación típica o sorting varía entre 0,65 y 0,66 mm, lo que indica que se trata de una muestra moderadamente bien clasificada. La simetría de la distribución o skewness disminuye de 1,25 a 1,10 en 15 minutos. Estos valores indican que la tendencia general de la muestra tiende a desplazarse hacia el material de tamaño medio y fino. Estos valores junto con la disminución del  $D_{50}$ , indica que según aumenta el tiempo de tamizado, el análisis es más preciso.

En la Fig. 7, a modo de ejemplo se representa un histograma con la distribución granulométrica de la muestra intermareal del perfil de la playa Victoria. Este tipo de sedimento corresponde a una relación de arenas medias y finas.

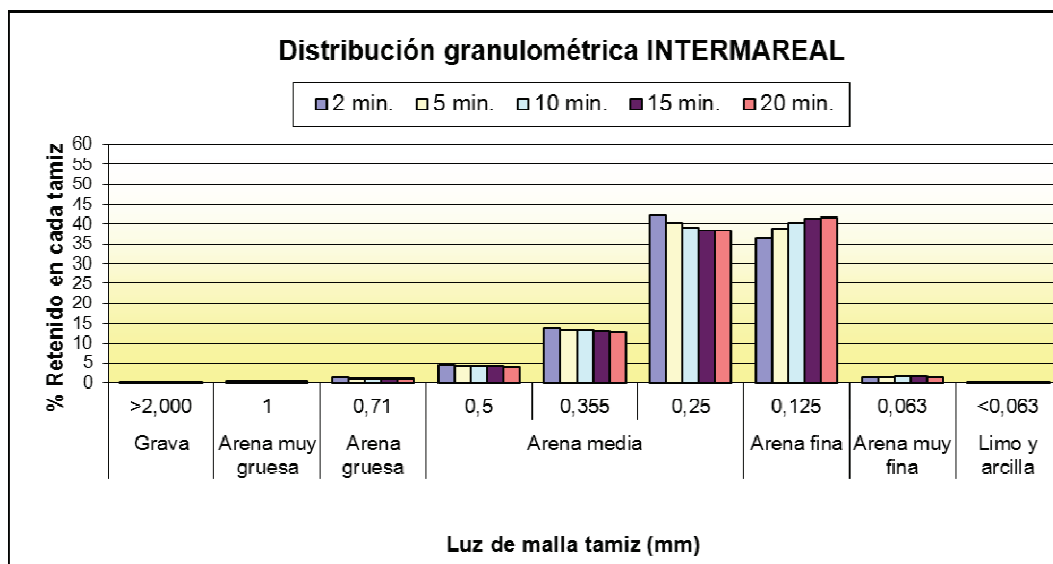


Figura 7: Distribución granulométrica de la muestra intermareal del perfil de la playa Victoria.

En el caso de los análisis granulométricos efectuados en el intermareal de la playa Victoria, los tamices de 0,355 mm, 0,25 mm y 0,125 mm presentan un porcentaje medio de retención en torno al 93%. En estos tamices es donde se sitúa la mayor variabilidad de los datos en función del tiempo de tamizado. La retención en el tamiz de 0,25 mm disminuye durante los 10 primeros minutos, estabilizándose a partir de los 15 minutos. En este caso, en el tamiz de 0,125 mm también se reconoce un punto de inflexión donde cambia esta tendencia, aumentando el porcentaje retenido con el tiempo de tamizado. Asimismo, se ha realizado un estudio del error absoluto y relativo cometido en los tamices con mayor retención de arenas de la muestra maestra del perfil de playa Victoria (Tabla 6).

Tabla 6: Error cometido para diferentes tiempos en los tamices con mayor retención de arena de la muestra maestra de la playa Victoria.

MUESTRA MAESTRA PLAYA VICTORIA		TIEMPO DE TAMIZADO					Gráficos
		2 min.	5 min.	10 min.	15 min.	20 min.	
0,71 - 0,5 mm	% Retenido	4,49	4,40	4,28	4,29	<b>4,23</b>	
	Error abs.	0,27	0,18	0,05	0,07	-	
	% Error rel.	6,32	4,15	1,21	1,57	-	
0,5 - 0,355 mm	% Retenido	11,19	10,76	10,59	10,40	<b>10,39</b>	
	Error abs.	0,80	0,37	0,20	0,01	-	
	% Error rel.	7,67	3,55	1,90	0,07	-	
0,355 - 0,25 mm	% Retenido	31,14	29,81	29,19	28,97	<b>28,98</b>	
	Error abs.	2,16	0,83	0,21	0,01	-	
	% Error rel.	7,46	2,86	0,72	0,02	-	
0,25 - 0,125 mm	% Retenido	36,37	38,28	39,08	39,69	<b>39,81</b>	
	Error abs.	3,44	1,53	0,73	0,12	-	
	% Error rel.	8,64	3,85	1,84	0,30	-	

Buscando una relación óptima entre el error y tiempo de tamizado, de nuevo a partir de los 10 minutos de tamizado, el error relativo es despreciable (<2%) en los tamices que retienen el mayor porcentaje de arena en la muestra maestra. Si comparamos los resultados de la arena de la muestra maestra del perfil de la playa Victoria con las de los perfiles de la playa y duna de Valdevaqueros se confirma que de forma general, el error es despreciable aproximadamente tras 10 minutos de tamizado. No obstante, estos resultados están directamente relacionados con el grado de clasificación (sorting) que tenga el material, llegando a alcanzarse en algunas muestras de playa pobremente clasificadas, tiempos críticos de hasta 15 minutos. Cuanto mejor clasificado esté el sedimento (menor desviación típica), menor tiempo de tamizado habrá que emplear para conseguir un error relativo casi nulo.

## CONCLUSIONES

Las muestras de los sistemas estudiados corresponden generalmente a arenas medias y finas, donde las fracciones muy gruesas y muy finas representan un porcentaje muy pequeño de retención.

Se ha demostrado que el error relativo cometido durante el tamizado de arenas medias y finas similares a las del sistema de playa y duna de Valdevaqueros y playa Victoria, se considera despreciable generalmente con un tiempo de tamizado de 10 minutos, aunque las muestras de arena peor clasificadas necesitaron hasta 15 minutos para estabilizarse.

El error metodológico asociado al muestreo en campo y análisis en laboratorio fue poco significativo, con desviaciones típicas prácticamente nulas. Este dato incrementa la confianza en los resultados obtenidos en este estudio para cada tiempo de tamizado.

Tras la discusión de los resultados obtenidos, se concluye que gran parte de la fiabilidad de los resultados analíticos de una granulometría para arenas medias litorales se debe al tiempo de tamizado. No obstante, parece ser que intervienen otro tipo de factores, como la clasificación, la forma y el tamaño del grano, que incrementan levemente el error cometido.

Los tiempos de tamizado obtenidos en este estudio tienen una elevada importancia a nivel técnico y económico puesto que se ha alcanzado una excelente eficiencia sin sacrificar la precisión del análisis. Este valor temporal es de especial importancia en la actual ingeniería de costas dada la precisión y eficiencia requerida en obras de regeneraciones de playa.

Sería recomendable llevar a cabo similares líneas de investigación en otro tipo de ambientes donde se realicen análisis granulométricos con el fin de ampliar los conocimientos incluidos en este estudio.

## REFERENCIAS

- Bagnold, R.A. y Barndorff-Nielsen, O. (1980). The pattern of natural size distributions. *Sedimentology*, 27 (2), 199-207.
- Batman, S., y Dougherty, E. R. (1997). Size distributions for multivariate morphological granulometries: texture classification and statistical properties. *Optical Engineering* 36, 1518-1529.
- Beuselinck, L., Govers, G., Poesen, J., Degraer, G., y Froyen, L. (1998). Grain-size analysis by laser diffractometry: comparison with the sieve-pipette method. *Catena* 32, 193-208.
- Barbanti, A., y Bothner, M. H. (1993). A procedure for partitioning bulk sediments into distinct grain-size fractions for geochemical analysis. *Environmental Geology* 21, 3-13.
- Blott, S.J. y Pye, K. (2001). Gradistat: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, 1237-1248.
- Bui, E.N., Mazullo, J. y Wilding, L.P. (1990). Using quartz grain size and shape analysis to distinguish between aeolian and fluvial deposits in the Dallol Bosso of Niger (West Africa). *Earth Surface Processes and Landforms*, 14, 157-166.
- Chen, Y., y Dougherty, E. R. (1994). Gray-scale morphological texture classification. *Optical Engineering* 33, 2713-2722.
- Folk, R. L., y Ward, W. C. (1957). Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27, 3-26.
- Folk, R.L. (1974). *Petrology of Sedimentary Rocks*. Hemphill Publishing Company, Austin, TX.
- Friedman, G.M. (1979). Differences in size distributions of populations of particles among sands of various origins. *Sedimentology* 26: 3-32.

- Friedman, G.M. y Johnson, K.G. (1982). *Exercises in Sedimentology*. Wiley: New York.
- Gómez-Pina, G., Fages, L., Ramírez, J.L., Muñoz-Pérez, J.J. y Enríquez, J. (2006). A critical review of beach restoration projects in the northern coast of Cadiz (Spain) after thirteen years. *ICCE*, 30 (4), 4167-4178.
- Krumbein, W.C. (1934). Size frequency distributions of sediments. *Journal of Sedimentary Research*, 4(2), 65–77.
- Krumbein, W.C. and Pettijohn, F.J. (1938). *Manual of Sedimentary Petrography*. Appleton-Century-Crofts, New York.
- Matheron, G. (1975). *Random sets and integral geometry*. New York, NY: Wiley. pp. 1–261.
- Medina, R., Losada, I., Losada, M.A. y Vidal, C. (1995). Variabilidad de los perfiles de playa: forma y distribución granulométrica. *Proyectos y construcción de playas artificiales y regeneración de playas. Proyecto y Cálculo (III)*. Ingeniería del Agua, 2, 133-142.
- Muñoz-Pérez, J.J. (1996): *Análisis de la morfología y variabilidad de playas apoyadas en lajas rocosas*. Tesis Doctoral. Universidad de Cádiz. 150 pp.
- Navarro, M., Muñoz-Perez, J.J., Roman-Sierra, J., Tsoar, H., Rodriguez, I. y Gomez-Pina, G. (2011). Assessment of highly active dune mobility in the medium, short and very short term. *Geomorphology*, 129 (1-2), 14–28.
- Pye, K. (1994). Properties of sediment particles. In *Sediment Transport and Depositional Processes*, Pye K (ed.). Blackwell: Oxford, 1–24.
- Román-Sierra, J.; Muñoz-Perez, Juan J. y Navarro-Pons, M. (2013). Influence of sieving time on the efficiency and accuracy of grain size analysis of beach and dune sands. *Sedimentology* (in press). doi: 10.1111/sed.12040.
- Shepard, F. P. (1954). Nomenclature based on sand–silt–clay ratios. *Journal of Sedimentary Petrology*, 24, 151–154.
- Syvitski, J.P.M. (1991). *Principles, methods, and application of particle size analysis*. Cambridge University Press, 368 pp.
- USACE (2002). *Coastal sediment properties*. US Army Corps of Engineers. Coastal Engineering Manual – Part III. EM 1110-2-1100.
- Wentworth, C.K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, 30, 377–392.