



### El sistema sedimentario de las playas y campos dunares de la costa de Essaouira (Marruecos Atlántico)

*The sedimentary system of beaches and dune fields of the coast of Essaouira (Atlantic Morocco)*

Lharti, S. <sup>(1)</sup>, Flor-Blanco, G. <sup>(2)</sup>, Flor, G. <sup>(2)</sup>

(1) Laboratoire de Géosciences, Eau et Environnement (L-G2E), Faculté des Sciences Agdal-Rabat, Université Mohammed V. Rabat, Maroc. [s.lharti@um5r.ac.ma](mailto:s.lharti@um5r.ac.ma)

(2) Departamento de Geología. Universidad de Oviedo. 33005 Oviedo. [gfb@uniovi.es](mailto:gfb@uniovi.es); [gflor@uniovi.es](mailto:gflor@uniovi.es)

#### Resumen

La costa central atlántica de Marruecos está constituida por playas arenosas disipativas de escala kilométrica y campos dunares asociados, principalmente fijados artificialmente, que puede sectorizarse en tres segmentos desde la ciudad de Essaouira hacia el N y el S. Estos conjuntos de playas y dunas se caracterizan desde la perspectiva sedimentaria mediante los parámetros granulométricos y del componente bioclástico, incluyendo su relación con el tamaño medio de grano, la distribución por fracciones de gruesos a finos y grupos biológicos principales. Con estos datos, se deducen cualitativamente las transferencias arenosas longitudinales y transversales como una parte de la deriva de playa y desde ésta a los campos dunares adyacentes, respectivamente.

**Palabras clave:** playas arenosas; dunas; parámetros granulométricos; bioclastos carbonatados; Essaouira; Marruecos.

#### Abstract

The central Atlantic coast of Morocco is constituted by dissipative kilometer-long sand beaches and associated complex dunes, mainly artificially fixed. It can be sectorized into three segments from the city of Essaouira to the N and to the S. Sediment characterization of beaches and aeolian dune belts is established from the grain-size parameters, and the bioclastic component, including their relation to the average grain size, the distribution through the coarser to finer sizes, and main biological groups. With these data it is possible to deduce qualitatively the longitudinal and transverse sedimentary transfers of sand as part of the littoral drift, and from it to the adjacent dune fields, respectively.

**Keywords:** sand beach; dunes; grain parameters; carbonate bioclasts; Essaouira; Morocco.



## 1. Introducción

La costa de la ciudad de Essaouira está ubicada en el Atlántico marroquí, a 170 km al O de Marrakesh y a 310 km al SO de Casablanca. Es una costa baja arenosa interrumpida por afloramientos rocosos acantilados en el entorno de la ciudad, incluida la isla de Mogador, con desniveles inferiores a 10 m, y el reborde del cabo Sim en posiciones más meridionales con acantilados de hasta 50 m de altura (Fig. 1).

El clima costero es insular moderado ( $M_m < 15^\circ\text{C}$ ) con temperaturas mínimas de  $13,8^\circ\text{C}$  en enero y  $19,6^\circ\text{C}$  en agosto y septiembre, siendo la media anual de  $16,65^\circ\text{C}$  (Allam y Houmimyd, 1990), anormalmente fresca para esa latitud. Las precipitaciones se producen durante 40 días al año, variando de 400 a 800 mm/año, repartidas desde octubre a mayo, con el máximo en noviembre de 53 a 57 mm y una estación seca desde junio a septiembre (Weisrock, 1980). Según la clasificación de Köppen, corresponde al subtipo *Bsh*: estepa de latitudes medias y desértico (<https://www.essaouira.climatemps.com/>).

La alineación costera NE-SO (Fig. 1) se escalona desde Essaouira en diferentes tramos hacia el S, donde el sustrato rocoso aflorante, representado por eolianitas y afloramientos cretácicos, controla esta distribución. Se desarrolla un amplio prisma arenoso que incluye playas mesomareales, generalmente disipativas con amplias terrazas de bajamar, y otros tramos en que toda o una parte del intermareal inferior está ocupado por plataformas de eolianitas.

El sustrato rocoso en esta franja costera está constituido, principalmente, por eolianitas pleistocenas (Flor-Blanco *et al.*, 2013), que enlazan hacia el interior con otras formaciones eólicas más antiguas (Magrebiense: Plioceno).

Inmediatamente por detrás de la playa alta, se generaron dunas embrionarias, que ocu-

pan una franja muy estrecha, desigualmente desarrolladas y de persistencia efímera. Hacia tierra, se construye un cordón dunar artificial de mayor magnitud y extensión con ramales, estacas y entrelazados vegetales y, en el tramo septentrional, algunas dunas activas están desconectadas de la banda funcional playa/dunas, comportándose como dunas continentales. Sulzlee (1963) detalla las labores de fijación que se practicaron sobre las dunas con el objeto de asegurar la protección en este entorno, así como el aprovechamiento forestal.

En los sedimentos arenosos de la costa de Essaouira predominan los siliciclásticos (cuarzo), suministrados por el sistema fluvial del río Tensift (Flor-Blanco *et al.*, 2013), siendo testimoniales los minerales pesados. Le sigue en importancia el componente biogénico utilizado como trazador natural para determinar las pautas de su dispersión, bien incluyendo el conjunto biótico (Flor *et al.*, 1982) o algún grupo determinado (Gao y Collins, 1995; Benavente *et al.*, 2005; Vieira y Manso, 2017).

Los bioclastos son los componentes más jóvenes y renovables del propio medio costero (Bone *et al.*, 2006), que forman parte del sedimento arenoso y derivan de organismos vivos con caparazones, conchas o elementos de protección. Se fragmentan por la acción mecánica del oleaje, principalmente, así como por corrientes y mareas, desgastándose a largo plazo (Bird, 2008). Por su parte, la dureza del cuarzo lo predispone para que tenga un mayor tiempo de residencia en el medio costero.

En una publicación anterior, Flor-Blanco *et al.* (2013) clasificaron, identificaron las tipologías de las dunas costeras y su distribución, y se estimaron los volúmenes arenosos como factor necesario para evaluar las medidas de estabilización de las mismas. En este trabajo se caracterizan sedimentológicamente los depósitos arenosos de playas y campos dunares activos y fijados, particularizadas por los parámetros granulométricos y un mayor énfasis en la composición carbonatada biogé-

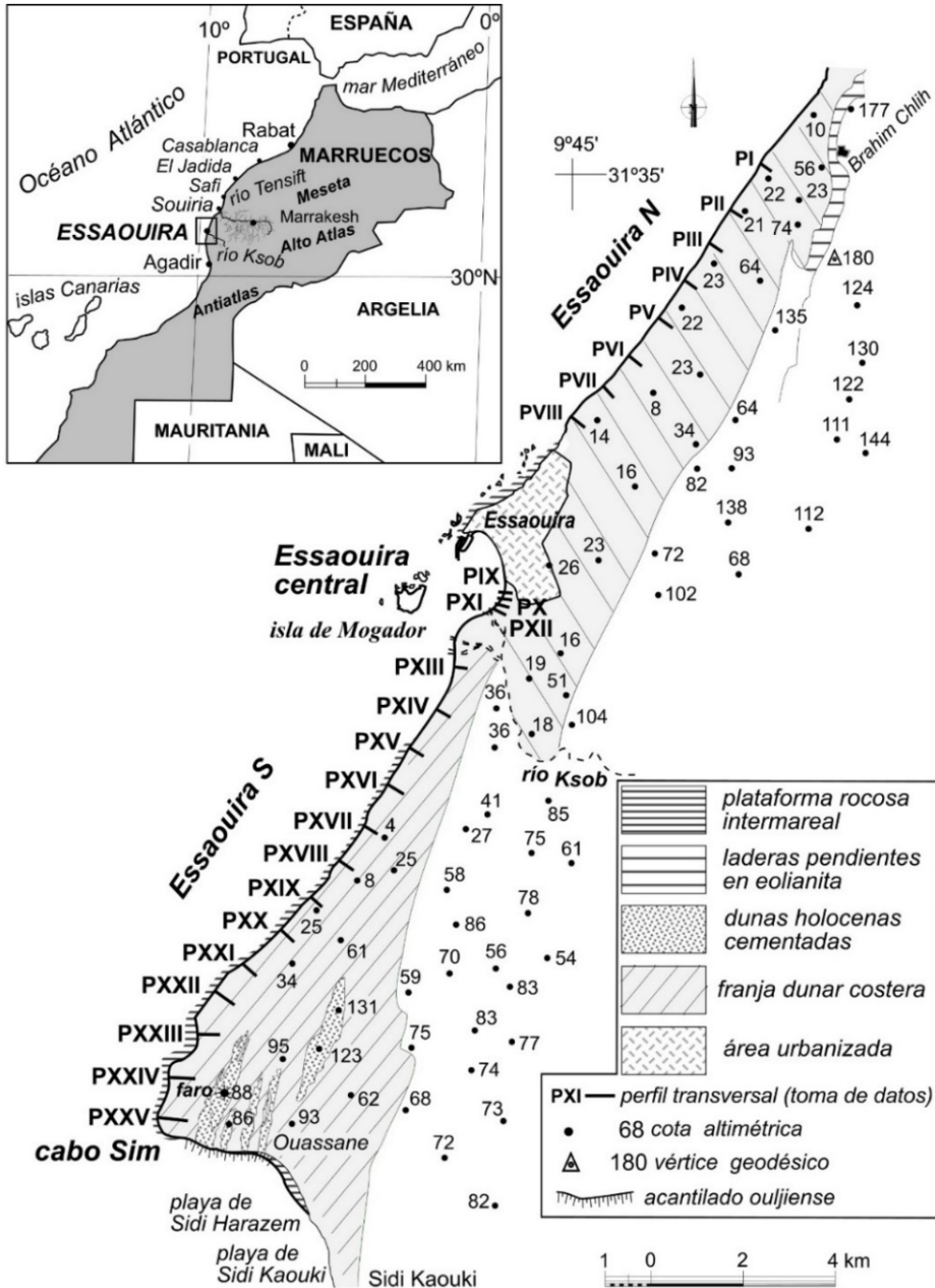


Figura 1. Situación de la costa de Essaouira en la fachada atlántica noroccidental de Marruecos y perfiles de toma de datos, repartidos en tres tramos: Essaouira N (I-VIII), central (IX a XII) y S (XIII a XXV). Se incluyen las alturas de la franja litoral, el amplio conjunto dunar eólico por detrás de las playas y la plataforma rocosa intermareal.

Figure 1. Situation of the Essaouira coast on the northwestern Atlantic coast of Morocco and data collection profiles, divided into three sections: Essaouira N (I-VIII), central (IX a XII) and S (XIII a XXV). The heights of the coastal belt are included, as well as the large aeolian dune complex by behind the beaches and the intertidal rocky platform.

nica: totales y por fracciones, relación con los tamaños medios de grano y grupos biogénicos representados. De sus distribuciones en el amplio segmento costero, se deducen las transferencias sedimentarias longitudinales por deriva litoral, y en las transversales, resultado de la construcción de los depósitos dunares, se detallan los procesos sedimentológicos resultantes.

## 2. Agentes dinámicos

Esta costa está afectada por vientos alisios del NNE y NE más o menos paralelos al perfil costero NE-SO. Los del NNE persisten hasta octubre para girar al NE. (Fig. 2A); desde febrero a marzo, predominan los NE, pero de baja intensidad; en marzo, se sustituyen por los NNE, consecuencia del posicionamiento

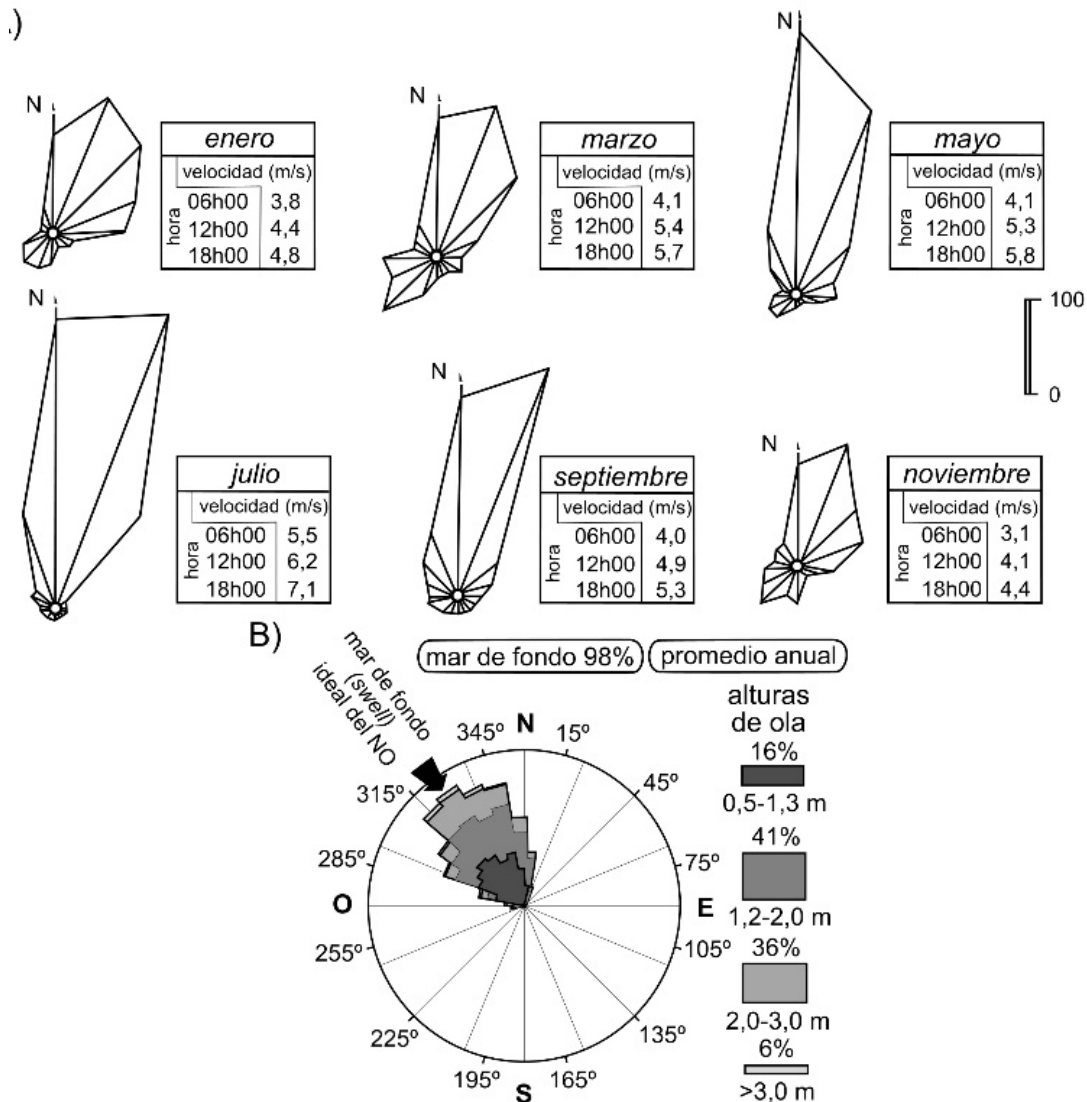


Figura 2. A) Régimen de vientos para cada dos meses, incluyendo el parámetro direccional y las velocidades medias a lo largo del día (Weisrock, 1980). B) Rosa de oleajes de calma (mar de fondo) que se propagan sobre la costa de Essaouira (<https://fr.surf-forecast.com/breaks/Essaouira/surf-stats>).

Figure 2. A) Wind regime for every two months, including the directional parameter and the average speeds throughout the day (Weisrock, 1980). B) Rose of swell waves in Essaouira (<https://fr.surf-forecast.com/breaks/Essaouira/surf-stats>).

del anticiclón de las Azores en una latitud más alta.

Los oleajes dominantes provienen del NNO, seguidos del NO (Fig. 2B) y llegan casi frontalmente a la costa, pero se refractan formando un ángulo con la alineación principal, lo que permite un transporte arenoso neto hacia el S, como corrientes de deriva de playa. El régimen de olas de fondo tiene periodos de 6 a 10 segundos, generado por las tormentas del Atlántico Norte. Las alturas significantes, en periodos de calma, varían de 1 a 3 m, pudiendo superar los 5 m en otoño.

Las mareas son semidiurnas y los rangos mesomareales (Jaffar, 2012), pudiendo las vivas alcanzar casi 4 m y las muertas 0,83 m, siendo la media de 1,58 m. En condiciones de bajas presiones atmosféricas, durante procesos extremos con oleajes de temporal, las pleamares vivas pueden rebasar los 4 m con una sobre elevación de hasta 0,5 m (Jaffar, 2012). También los tsunamis han dejado evidencias en el litoral marroquí, mejor documentados los efectos destructivos sobre algunas ciudades costeras próximas, como Agadir, Safi, Casablanca y El Jadida (Fig. 1), donde se registraron sobre elevaciones de hasta 23 m (Mellas, 2012).

Todo el amplio segmento costero septentrional, representativo de una costa baja, ha construido un prisma arenoso con una cierta continuidad, solo interrumpido por afloramientos rocosos, tanto formando acantilados como plataformas rocosas. El sistema fluvial del río Tensift desemboca en la ciudad de Souiria (Fig. 1), a unos 70 km al N de Essaouira. Tiene una cuenca hidrográfica de 19.850 km<sup>2</sup> y una aportación de 768,8 Mm<sup>3</sup>/año (1970-2002). La degradación específica varía de 200 a más de 3.000 t/km<sup>2</sup>/año (DNS-LE, 2006). Los transportes sólidos medios se han estimado en 200 t/km<sup>2</sup>/año (Haida *et al.*, 1996), deduciéndose que se trata del mayor aportador de fracciones sedimentarias al flujo costero para construir el prisma arenoso, incluyendo las deflacionadas para desarrollar la franja de dunas costeras.

El río Ksob desemboca justo al S de la bahía de Essaouira con una cuenca hidrográfica mucho menor: 1.480 km<sup>2</sup> (Fig. 1), aunque juega un papel importante como suministrador de la carga sólida a la bahía de Essaouira (El Mimiouni, 2009; Lahmadi, 2013).

### 3. Metodología

Se levantaron 25 perfiles topográficos transversales (I-XXV), en dirección N-S (Fig. 1), desde la parte alta de la playa y la franja dunar activa hasta las dunas vegetadas artificialmente para lo que se dispuso de una cinta métrica enrollable Maurer de 30 m y, para detalles mayores, un distanciómetro laser Leica D5 y una brújula Meridian MG-3101 con clinómetro. Las coordenadas geográficas se adquirieron con un GPS portátil (Garmin 76) con una precisión <3.0 m y un altímetro/barómetro manual Thommen tipo 3B4 (precisión ± 5,4 m) para áreas más elevadas. Ante la inexistencia de mapas topográficos de detalle se consultaron las fotos satelitales de Google Earth de gran calidad en esta costa marroquí del año 2007, dentro de cuya década final se llevó cabo esta investigación.

Se han espaciado 1 km, excepto en la playa meridional de Essaouira (Fig. 1) que se muestrearon a intervalos de 200 m, solo donde se habían construido campos dunares efímeros. Se tomaron 284 muestras arenosas superficiales al azar, una o dos de la parte alta de la playa y varias de los campos dunares activos y del cordón dunar artificial, generalmente vegetado (Fig. 3).

Las arenas se lavaron repetidamente con agua dulce para eliminar impurezas, evitando la pérdida de fracción alguna. Se tamizaron mecánicamente en seco, a partir de 100 g de muestra problema, en una vibradora AS 200 (RETSCH), incorporando tamices a intervalos de 0,50  $\phi$ , desde -1,0  $\phi$  (2,0 mm) a +4,0  $\phi$  (0,0625 mm), pesándose las fracciones de cada tamiz.

Se aplicó el programa *GRADISTAT* (Blott y Pye, 2000), obteniendo gráficas acumuladas en



papel probabilístico para extraer los parámetros de rango del centil (1% más grueso) y de relación: media ( $Mz$ ), calibrado ( $\sigma_1$ ), asimetría ( $Sk_1$ ) y angulosidad ( $KG$ ), según Folk y Ward (1957).

Se han aplicado análisis de las relaciones bivariantes, contrastando la media ( $Mz$ ) con los restantes parámetros granulométricos de relación. Este tipo de análisis permitió reconocer ambientes sedimentarios (Martins, 2003) y, en este caso, para determinar las diferentes modalidades de transporte (Tanner, 1991).

Predominan los granos de cuarzo y fragmentos carbonatados biogénicos, apareciendo en las fracciones finas numerosos organismos enteros (foraminíferos) o escasamente rotos (briozoos). La proporción de siliciclastos y carbonatos se ha calculado mediante diferencias de pesada antes y después de ataque con CIH al 30%, referido a los carbonatos. En todas las muestras, se determinó el porcentaje total y, en algunas seleccionadas, sobre la totalidad de las fracciones granulométricas (desde  $0,0 \phi$  a  $4,0 \phi$ ).

En 23 muestras al azar de playas y dunas, se contabilizaron 100 bioclastos bajo la lupa binocular Zeiss (máximo  $50 \times 10$  aumentos), identificando los grupos biogénicos. La mayoría de los fragmentos aparecían muy desgastados e irreconocibles, por lo que se incluyó la clase de indeterminado, en primera instancia y, posteriormente, se realizó el recálculo definitivo.

## 5. Resultados

### 5.1. Playas y dunas costeras

La banda costera estudiada tiene una dirección NE-SO en una longitud de unos 24,5 km, interrumpida por el segmento rocoso de la ciudad de Essaouira (2,75 km). El sector septentrional, muy rectilíneo, tiene 8 km y el meridional, con un perfil algo escalonado en planta, es de 13,5 km. Las anchuras del cordón dunar son muy variables, pero no suelen

rebasar los 175 m, mayor al N de Essaouira y dicho cordón acaba desapareciendo en ambos extremos. También las alturas de las dunas fluctúan, pero siempre dentro de cifras por debajo de los 12 m.

Se distinguen tres grandes conjuntos en sentido longitudinal NE-SO, desde las primeras dunas y su fijación artificial al NO de la localidad de Brahim Chlih, hasta las cercanías del cabo Sim en el extremo meridional. Son *Essaouira N*, *Essaouira central* con una extensión menor y *Essaouira S*; a su vez, la septentrional y meridional se subdividieron en dos tramos (Fig. 1).

- Las playas arenosas son subrectilíneas y de escala kilométrica que, en el S de Essaouira, contienen una plataforma rocosa en la zona intermareal inferior, más extensa hacia el S. Morfodinámicamente, son playas disipativas con desarrollo incipiente de la terraza de bajamar (barra o *ridge* y surco o *runnel*).
- En Essaouira N, sobre la parte alta de la playa, se desarrolla una franja de anchura métrica de dunas embrionarias con geometrías variadas: láminas y tablas horizontales de deflación, dunas longitudinales, barjanes, etc. Las dunas internas activas son transversas, barjanoideas o aklés (barjanes y linguoides) con crestas oblicuas NNE-SSO respecto a la orilla NE-SO. Ambas franjas dunares próximas a la playa se construyen por deflación y destruyen por temporales fuertes, reconstruyéndose posteriormente; los vientos del S las retocan, conformando dunas reversas en el sentido de McKee (1979).
- Cordón dunar artificial, que está situado hacia tierra en la posición más interna, representado por lo que Kilibarda *et al.* (2014) denominan cordón antropogénico. En Essaouira N, se pueden generar hasta dos crestas sucesivas, separadas por un surco laxo y también culminando con una superficie subplana. En la mayor parte de Essaouira S, el borde de barlovento está en

fase de retroceso y algunas dunas activas en este sector se adosan temporalmente como dunas remontantes de tipo tabular.

- Dunas intrusivas activas que llegan, localmente, hasta el cordón fijado, como dunas activas tipo aklé, e incluso remontándolo como dunas tabulares transgresivas.

## 5.2. Granulometrías

Los parámetros de rango y relación, y el contenido carbonatado bioclástico se han promediado (Fig. 3) para cada unidad morfosedimentaria y dinámica: playa emergida y dunas activas, fijadas, intrusivas y continentales. Estas últimas son muy activas en el extremo meridional donde los volúmenes sedimentarios son los menores de todo el conjunto (Flor-Blanco *et al.*, 2013).

Desde las inmediaciones de Brahim Chlih (Fig. 1), el campo dunar artificial se ensancha hacia Essaouira, favorecido por las labores de fijación dunar con ramaje, estacado y plantación vegetal. La banda septentrional de la playa de Essaouira N está representada por arena fina: 2,71  $\phi$  (0,15 mm), que disminuye hacia los campos dunares, sin contrastes netos (Fig. 3). En el tramo meridional, el tamaño de grano de la playa aumenta ligeramente a 2,66  $\phi$  (0,16 mm), manteniendo las arenas dunares la misma cifra. También los calibrados son muy similares en ambas zonas N y S, dentro de la categoría de excelentes (0,24  $\phi$  y 0,25  $\phi$ ), mejorando desde la playa cuanto más hacia el interior, más evidente en la mitad septentrional de Essaouira N. Las asimetrías, siempre negativas son parecidas (-0,15 y -0,20), lo mismo que las angulosidades medias y los carbonatos (24,2 y 24,45%, respectivamente. Fig. 3).

En Essaouira central, los parámetros siguen pautas similares (Fig. 3). Las arenas son finas (2,48  $\phi$ ), ya que la configuración acantilada del contorno urbano de Essaouira, al N, determina la aparición de un sector protegido por los oleajes que se propagan hacia el S (Fig.

2B). Los calibrados son muy buenos (0,35  $\phi$ ) y excelentes (0,29  $\phi$ ). Los porcentajes carbonatados son mínimos del 13%, como respuesta a la deflación más efectiva sobre las fracciones finas, menos carbonatadas, y aportaciones siliciclásticas del río Ksob.

En el amplio sector de Essaouira S (Fig. 3), los tamaños medios son algo superiores al segmento central, aumentando de N a S, desde 2,48  $\phi$  a 2,29  $\phi$  (0,18 a 0,21 mm) (arena fina), probablemente por el alto porcentaje de los carbonatos biogénicos, que llegan a superar el 50%; además, el flujo arenoso selecciona estos componentes hacia el S. Apenas si existen variaciones hacia los campos dunares y dentro de ellos. Los calibrados de la playa empeoran hacia el S desde muy buenos (0,36  $\phi$ ) a buenos (0,53  $\phi$ ), y desde la playa a las dunas empeoran, salvo en las dunas intrusivas, siempre muy bien calibradas, quizá debido al mayor poder selectivo del viento en esta área. En la franja meridional, las dunas tienen calibrados buenos en contacto con la playa y moderadamente calibradas en las fijadas (0,96  $\phi$ ) y activas continentales (0,73  $\phi$ ).

## 5.3. Relaciones bivariantes Mz-calibrado/asimetría/kurtosis

En las gráficas (Fig. 4), se configuran nubes de puntos alabeadas, simples o complejas, que se subdividen en tramos inclinados con diferentes puntos de inflexión, bien sea culminando en codos en V o en A (Martínez Cedrún *et al.*, 2014). Se subdividen convencionalmente en cargas de fondo y en suspensión (Allen, 1984); el primero se considera como un movimiento continuo sobre el fondo que se reparte, según tamaños más gruesos a más finos (mayor a menor energía), entre las modalidades de transporte por arrastre, rodamiento, saltación (limitado), éste referido como suspensión intermitente (Middleton, 1976), y suspensión (carga en suspensión). Otros proponen la reptación en ámbitos eólicos (Ungar y Haff, 1987; Clemmensen, 1993) en que los granos mayores de 1,0 mm (Sharp, 1966) pueden colisionar con las partículas de

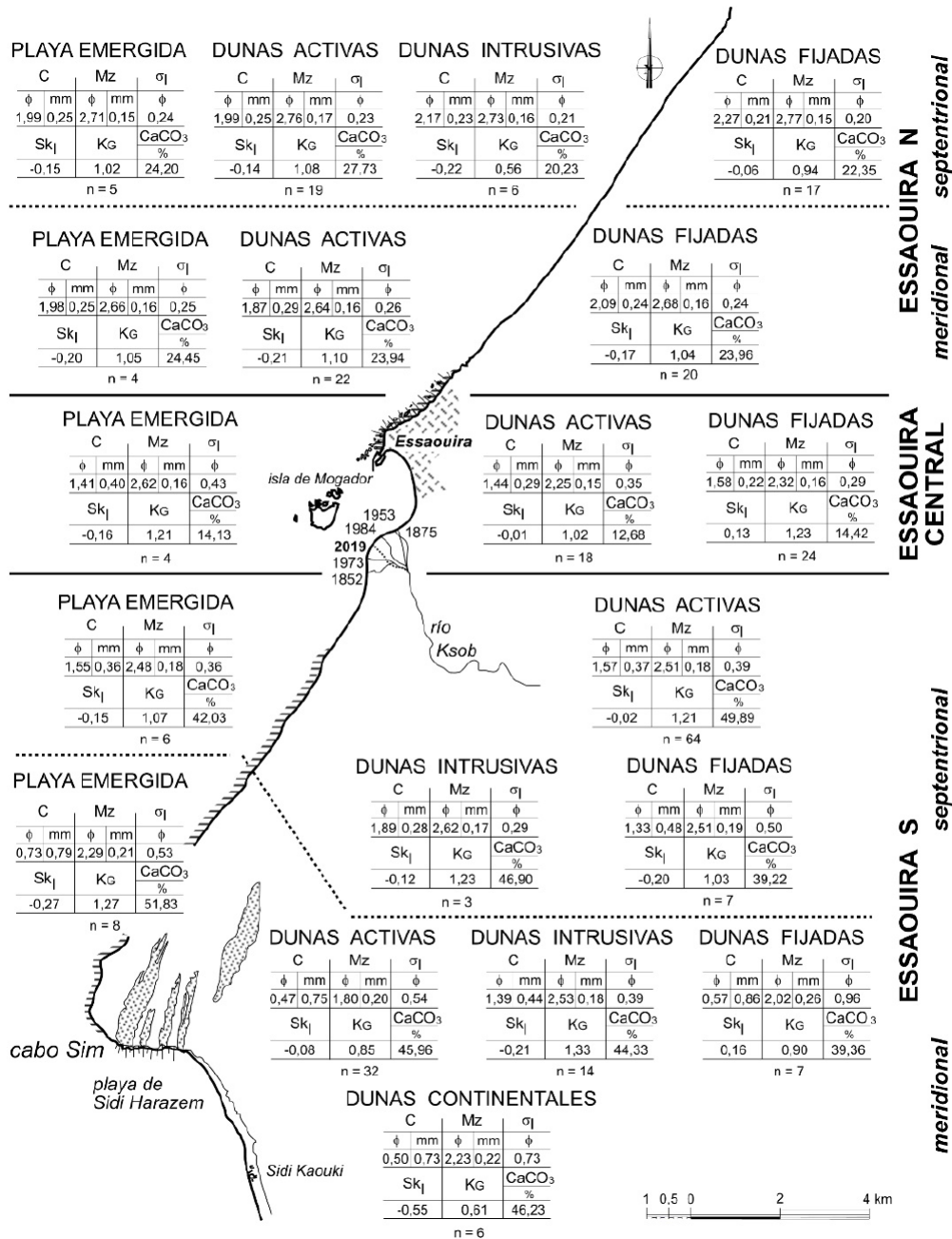


Figura 3. Promedios de los parámetros granulométricos de rango (C) y relación (Mz,  $\sigma$ , Sk<sub>I</sub> y KG) y del contenido carbonatado (%), que se reparten por las tres franjas costeras de Essaouira N, central y S; y, en la primera y última, subdividiéndolas en sus correspondientes mitades septentrional y meridional. Se consignan las muestras representativas (n). La desembocadura del río Ksob (S de la ciudad de Essaouira) ha experimentado numerosas posiciones registradas desde finales del siglo XIX (El Mimouni et al., 2014).

Figure 3. Averages of the granulometric parameters of range (C) and relation (Mz,  $\sigma$ , Sk<sub>I</sub> and KG) and of the carbonate content (%), which are distributed by the three coastal belts of N, central and S Essaouira, in the first and last areas, subdividing them into their corresponding northern and southern sectors. Representative samples (n) are reported. The mouth of the Ksob river (S of the city of Essaouira) has experienced numerous recorded positions since the end of the 19th century (El Mimouni et al., 2014).



la superficie para desplazarse a velocidades inferiores a las que se requiere para moverlas solamente por el viento.

Se deducen las tendencias lineales según la modalidad del transporte, a partir del tamaño de la velocidad crítica, donde la banda cambia de pendiente ( $V_{s-r}$  y  $V_{r-s}$ ), entre arrastre sobre el fondo (poco representado) y rodamiento ( $V_{s-r}=1,4 \phi$ ). El redondeamiento y la suspensión uniforme, marcada por el tamaño  $V_{r-s}=2,4 \phi$ , propio de la saltación, es el más importante en ambientes eólicos (Bagnold, 1941; van Rijn, 2018).

En Essaouira N y central, el transporte dominante, incluida la transferencia al conti-

nente para construir depósitos dunares, se lleva cabo por suspensión. Se trata de un sedimento arenoso muy homogeneizado, que ha experimentado un largo transporte y una selección muy intensa que se traduce en fracciones finas y calibrados muy buenos ( $\sigma_1 < 0,40 \phi$ ).

En Essaouira S, se incorporan fracciones más gruesas con un abanico más amplio de tamaños y calibrados. Las fracciones medias más finas siguen tendencias a curvas cada vez más positivas a medida que se reduce el tamaño medio de grano. Esta tendencia es similar cuando la modalidad de transporte es por saltación o suspensión uniforme en la cual, desde el tamaño crítico de  $2,40 \phi$  hasta el de

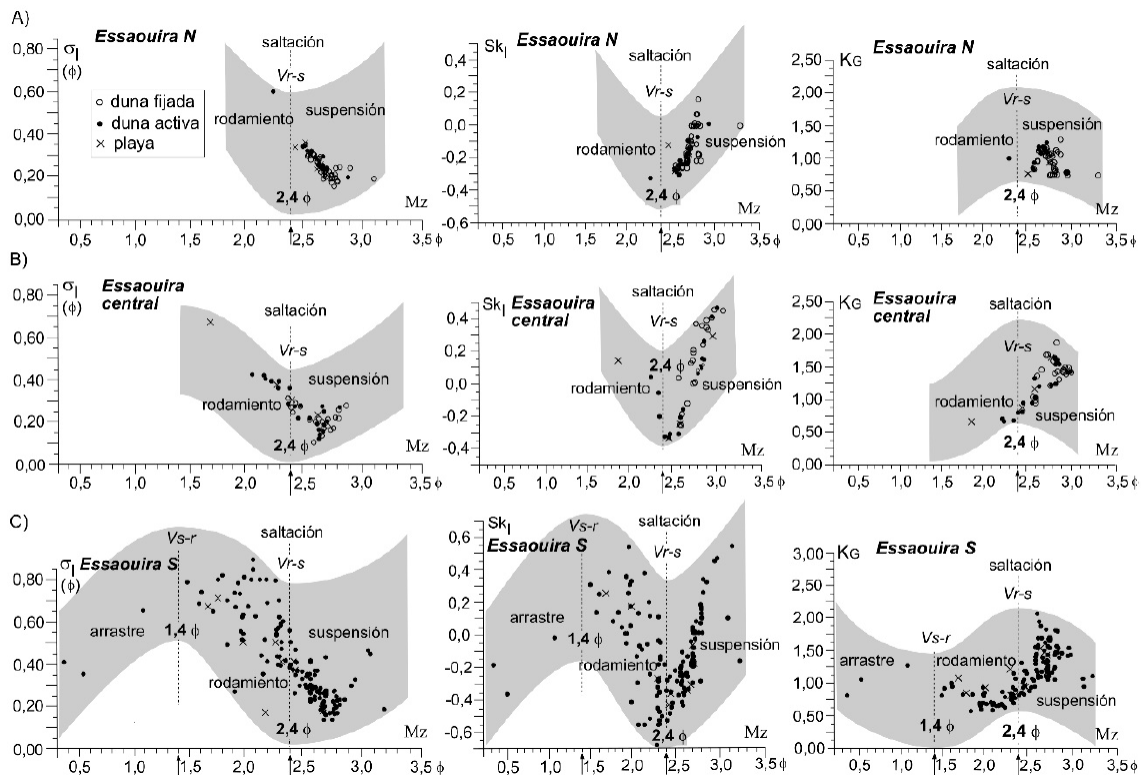


Figura 4. Contrastes de la media ( $M_z$ ) con los restantes parámetros de relación: A)  $\sigma_1$ , B)  $Sk_1$  y C)  $K_G$  en cada uno de los sectores costeros de Essaouira. Se deducen los tamaños representativos ( $M_z$ ), que limitan las modalidades de transporte suspensión-rodamiento ( $2,40 \phi$ ) y rodamiento-arrastre por el fondo ( $1,40 \phi$ ).

Figure 4. Simple bivariate correlations between the mean ( $M_z$ ) and the other granulometric parameters of relation: A)  $\sigma_1$ , B)  $Sk_1$ , and C)  $K_G$  in each coastal sector of Essaouira. The representative sizes ( $M_z$ ) are deduced, which the transport limit of suspension-rolling ( $2.40 \phi$ ) and rolling-gliding drag ( $1.40 \phi$ ).

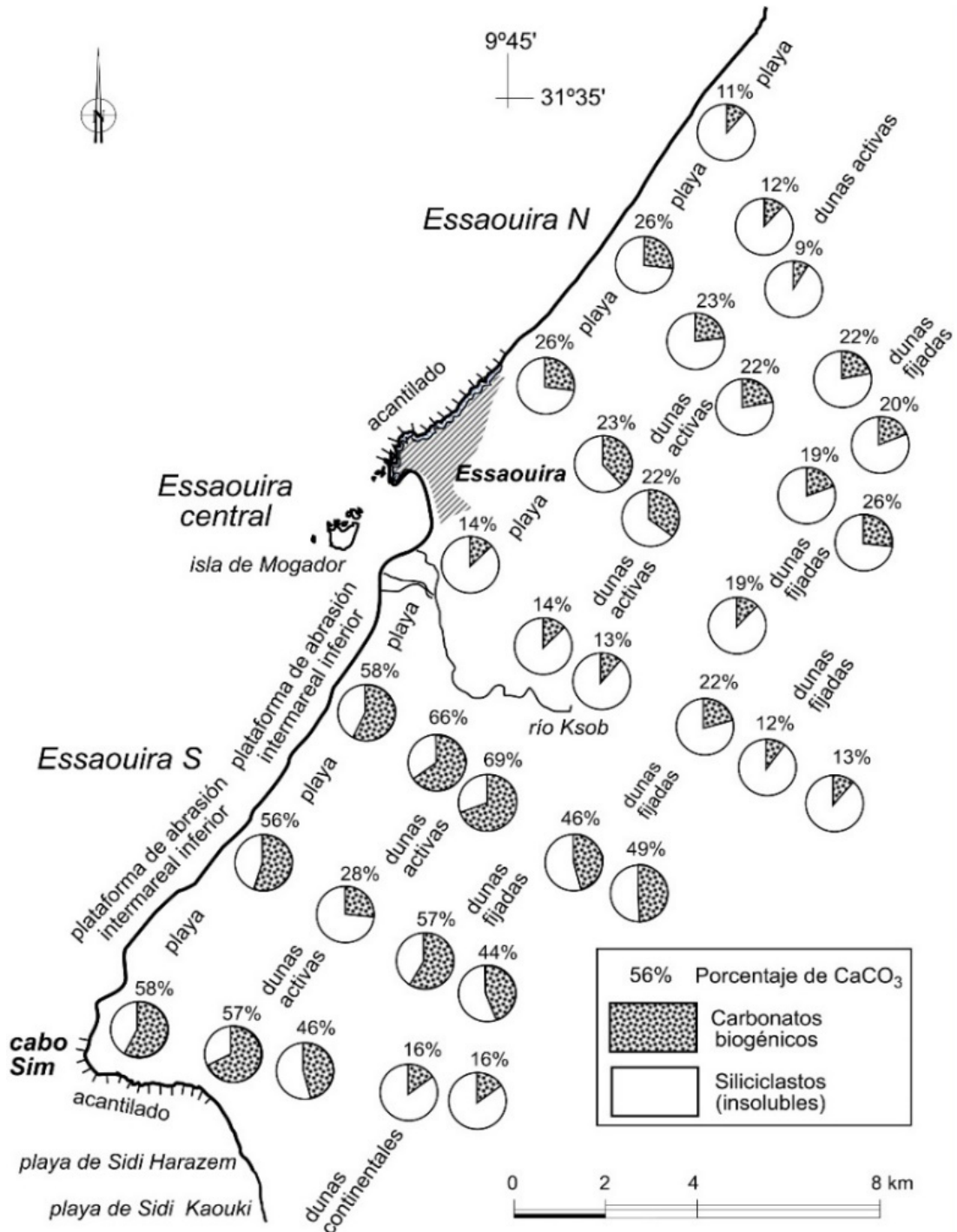


Figura 5. Porcentajes carbonatados promediados en perfiles transversales, desde la playa emergida al interior del campo dunar, en los sectores de la costa de Essaouira. Cada círculo representa una muestra del total para cada unidad más representativa: playa, dunas activas, dunas fijadas y las continentales del extremo meridional.

Figure 5. Average carbonate percentages in cross-sectional profiles, from the emerged beach to the inner dune field, along the sectors of the Essaouira coast. Each circle represents a sample of the total for each most representative unit: beach, active dunes, fixed dunes, and the southernmost continental ones.

1,40  $\phi$ , cuanto más grosero se hace el tamaño medio, las curvas tienden a más positivas. La modalidad del transporte dominante es por rodamiento al incrementarse el tamaño medio de grano, y las curvas se hacen progresivamente más negativas. Las nubes representativas del transporte en suspensión uniforme están representadas desde el tamaño de 2,40  $\phi$  hacia los más finos, lo mismo que entre este valor y el superior de 1,40  $\phi$  que, al incrementarse el tamaño, las curvas se hacen más chatas.

#### 5.4. El componente carbonatado biogénico

En Essaouira N, los porcentajes carbonatados son inferiores al 25% y la tendencia, aunque irregular, es a disminuir desde la playa a las dunas más internas (Fig. 5). En Essaouira central, son mínimos del 13%, pero con algún máximo (22%) en áreas internas. En el amplio segmento de Essaouira S, los carbonatos biogénicos son los más elevados, superando el 50%; se incrementa localmente donde hay mayor exposición o energía del oleaje incidente; los menores contenidos ocupan zonas de calma y abrigadas (Flor, 1978; Aouiche, 2016), así como en las dunas activas continentales (16%) de la costa meridional. En este tramo, la existencia de una superficie intermareal inferior de naturaleza rocosa se constituye como área suministradora de bioclastos. Puede intervenir el proceso de *upwelling* por vientos alisios, debido al efecto Ekman, por el cual las aguas costeras se mueven mar afuera, siendo sustituidas por aguas frías, cuyos elevados contenidos nutrientes benefician una mayor productividad biótica en la plataforma rocosa.

Existe una cierta tendencia a disminuir los contenidos carbonatados en los campos dunares y tierra adentro, así como hacia el S (mínimo del 16%), con variaciones irregulares dentro de los más internos (Figs. 3, 5). El carbonato en muestras dunares de Essaouira tiene una procedencia eólica a partir de los bioclastos marinos (Simone, 2000), que forman parte del sedimento arenoso de la playa.

#### 5.4.1. Porcentajes carbonatados por fracciones

Las distribuciones de los porcentajes carbonatados biogénicos en las fracciones granulométricas de cada muestra seleccionada (Fig. 6) revelan una distribución bimodal: máximos en los tamaños más gruesos (1,0 y 1,5  $\phi$ ) y más finos (3,5 y 4,0  $\phi$ ) de la distribución. Se deducen tendencias en ciertos casos por las cuales disminuye el contenido carbonatado hacia las fracciones finas.

Tomando como referencia los tamaños en que una misma muestra alcanza el mínimo o si es bimodal, se detecta que, en Essaouira N septentrional y meridional, las distribuciones del porcentaje carbonatado son simples y los mínimos dominantes lo hacen en 3,0  $\phi$ . En Essaouira central, disminuye el porcentaje casi continuamente hasta 3,5  $\phi$ , para incrementarse hacia la más fina (4,0  $\phi$ ). En Essaouira S septentrional, es similar a Essaouira N septentrional, mientras que, en la S meridional, disminuye hasta 2,0  $\phi$  y 3,0  $\phi$ , para disminuir hasta 4,0  $\phi$ .

#### 5.4.2. Relación bivalente Mz-CaCO<sub>3</sub> biogénico

Este contraste relaciona el grado de homogeneización de los fragmentos de organismos calcáreos, junto con el componente siliciclástico, a través del tamaño medio de grano (Fig. 6). Pueden ser utilizados como parámetros energéticos, puesto que existe una tendencia a incrementarse su porcentaje cuanto mayor es el tamaño medio de grano. El tamaño medio de los componentes carbonatados biogénicos es mayor que el del residuo insoluble, que está constituido principalmente cuarzo, como encontraron Pilkey *et al.* (1967) en la costa de Georgia (USA).

También, para sopesar el grado de afinidad de ambos componentes, se ha analizado bajo la perspectiva de la correlación lineal (Fig. 7), la cual está menos definida en los tramos de Essaouira N ( $r = 0,32391$ ) y algo peor en Essaoui-

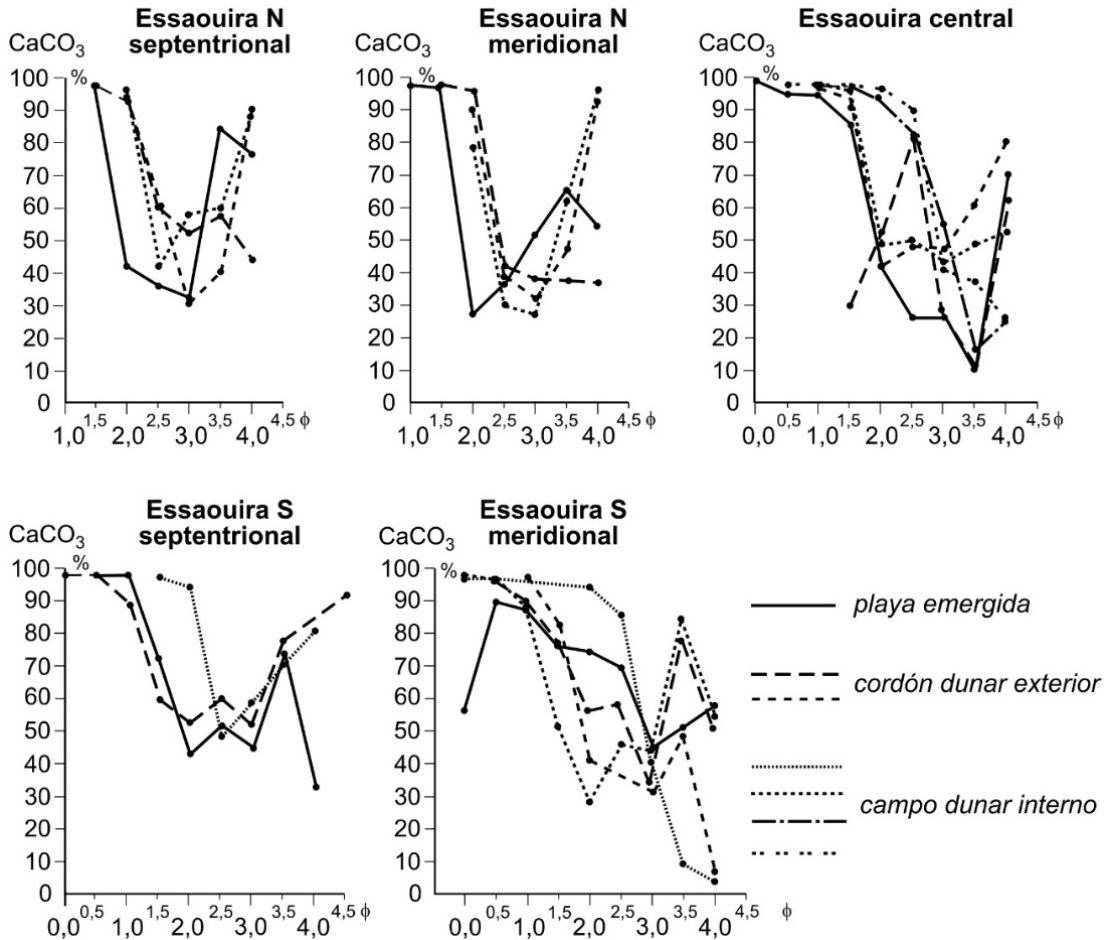


Figura 6. Porcentajes carbonatados promediados en las fracciones arenosas, sobre la misma muestra, desde gruesas a más finas. Son representativas de la playa emergida (1 muestra), el cordón dunar externo (2 muestras) y cordón dunar interno (4 muestras) en cada segmento costero de Essaouira. Reflejan las variaciones desde la playa septentrional a la meridional y desde la playa hasta las dunas internas.

Figure 6. Averaged carbonate percentages in the sandy fractions, on the same sample, from coarser to finer sizes. They are representative of the emerged beach (1 sample), the external foredune cordon (2 samples) and the internal foredune (4 samples) in each coastal segment of Essaouira. They reflect the variations from the northern to the southern beach and from the beach to the inner dunes.

ra central ( $r = 0,29019$ ), cuyo índice de relación es inverso. Contrariamente, hay cierta relación lineal (mejor) en el tramo de Essaouira S ( $r = 0,4470$ ) y en el cómputo global ( $r = 0,50508$ ), con una relación directa (cuanto mayor es el tamaño medio de grano, el porcentaje carbonatado es superior), como se ha constatado en otros sistemas de playas/dunas costeras (Flor, 1981; Martínez Cedrún *et al.*, 2014).

Es decir, los componentes siliciclásticos de origen fluvial están en equilibrio con los carbonatados bioclásticos provenientes del medio costero, después de que ambos hayan tenido una evolución suficiente dilatada, primero para constituir las playas y, de manera definitiva, como depósitos dunares, excepto los campos dunares efímeros justo situados por detrás de la playa.

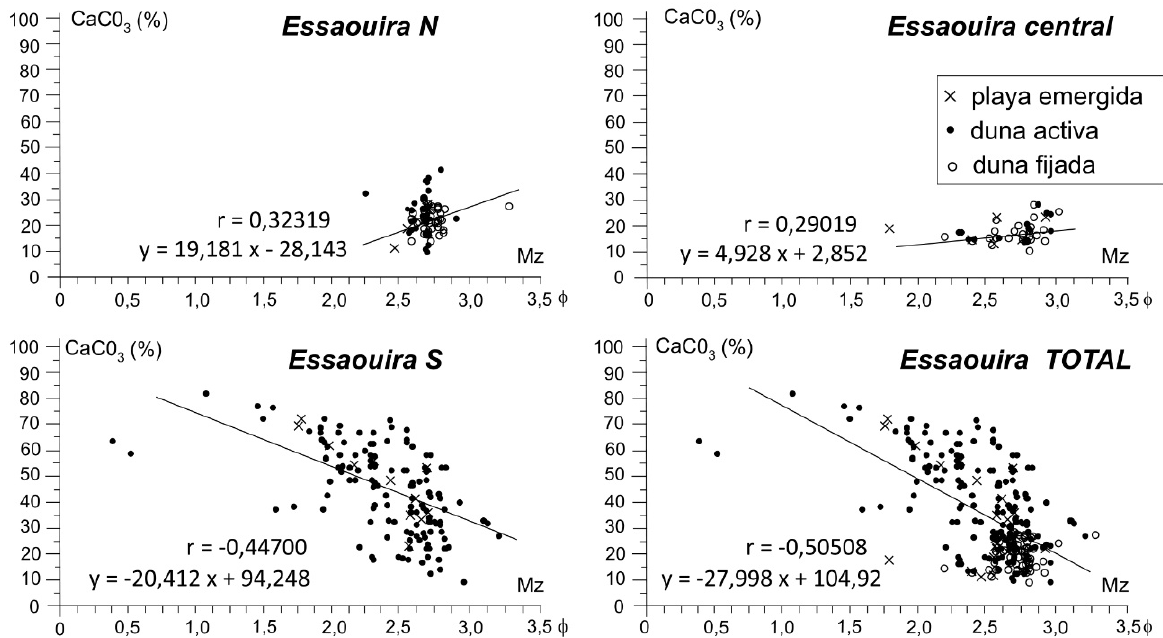


Figura 7. Contraste de los valores granulométricos entre la media (Mz) y los carbonatos biogénicos (%) para cada sector costero de Essaouira y totales carbonatados (TOTAL), separando los representativos de la playa emergida y las dunas activas y fijadas.

Figure 7. Contrast between the granulometric values of the mean (Mz) and biogenic carbonates (%) for each coastal sector of Essaouira and total carbonates (TOTAL), separating the representative ones from the emerged beach and the active and fixed dunes.

Esta dualidad estaría relacionada con un desequilibrio entre los componentes carbonatados y los tamaños medios en Essaouira N y central, esta última una zona de sombra, además, afectada por los aportes siliciclásticos del río Ksob. El tramo de Essaouira S es un segmento que recibe las aportaciones arenosas por la deriva litoral y constituye un contribuyente neto de bioclastos carbonatados. Altos porcentajes están estrechamente relacionados con el suministro de organismos que habitan la plataforma rocosa intermareal, aflorante en la casi totalidad de este segmento.

En los segmentos de Essaouira N y S, no se advierten a simple vista correlaciones lineales buenas, dadas las dispersiones de las nubes de puntos, pero no ocurre lo mismo cuando se aborda el tramo de Essaouira S o el global de todas las muestras (Fig.7) cuyos índices de correlación son mayores ( $r = 0,50508$ ).

#### 5.4.3. Grupos biogénicos

Los bioclastos carbonatados, que forman parte de la mineralogía arenosa de esta costa marroquí, se incorporan mayoritariamente desde los tramos acantilados, como son el entorno de la ciudad de Essaouira y las plataformas rocosas afectadas por la ciclicidad mareal del tramo de Essaouira S. Los fondos rocosos se continúan por el reborde del cabo Sim en una franja con anchuras de hasta 300 m, pero forman parte de otro sector costero meridional, que se alimenta del estudiado en Essaouira.

Son mayoritarios los organismos de la infauna que habitan la franja intermareal de las playas, incluyendo los que ocupan el hábitat supramareal (Tabla 1). Son testimoniales las algas calcáreas, que solo aparecen en Essaouira S, las espículas de esponjas y los ostrácodos.



El tamaño de grano controla la distribución de los grupos de organismos (Tabla 1). Así, en las fracciones superiores (0,0 a 1,0  $\phi$ ), se encuentran los individuos macro: lamelibranquios, que predominan, gasterópodos y balanos, incorporándose otros, como equinodermos en 1,5  $\phi$  y, a medida que decrece el tamaño, lo hacen los organismos micro: foraminíferos, briozoos, ostrácodos y espículas de esponjas; en las fracciones finas (<2,5  $\phi$  = 0,18 mm). también en estas poblaciones se concentran abundantes restos macro con formas aciculares, difícilmente identificables, producto de la rotura y desgaste prolongados.

En fracciones mayores (>2,0  $\phi$ ), apenas varían los tipos de macrofauna desde la playa a las dunas traseras, mientras que, en las inferiores, las dunas tienden a concentrar mayor proporción de organismos micro, pero sin tendencias definidas.

### 5.6. Tendencias

Para un mejor análisis, se tienen en cuenta los sectores de la costa de Essaouira: N, central

y S, subdividiéndose en dos conjuntos (Fig. 3). Tanto los datos de los parámetros granulométricos en primera instancia, como los promediados, son poco contrastados, representando fracciones arenosas muy homogeneizadas, aunque se pueden deducir algunas tendencias claras (Tabla 2A, B). El sedimento conserva sus características en segmentos amplios, tanto en lo que se refiere al transporte longitudinal por la deriva de playa, como por la transferencia transversal, debida a la deflación del viento sobre la playa y construcción de las dunas (Fig. 3).

En el tramo de Essaouira N, las cifras originales de las playas son algo más variadas en la porción septentrional (Tabla 2A), que se hacen cada vez más finas hacia el S. Si se tienen en cuenta los promedios, hay mayor homogeneidad en el ámbito meridional de Essaouira N; así, el tamaño de grano se mantiene de N a S ( $C = 1,99 \phi$  y  $Mz = 2,66 \phi$ ), lo mismo que los calibrados excelentes (0,24 a 0,25  $\phi$ ), las curvas son algo más negativas y se mantienen las angulosidades (1,05) y los carbonatos biogénicos (algo inferior a 25%). En el área meridional, son más homogéneas (Tabla 2A) como

Tabla 1. Concentraciones de los organismos (grupos) principales, constituyentes de los bioclastos carbonatados en las distintas poblaciones granulométricas desde 0,50 a 3,50  $\phi$ , simplificadas en las playas N (pN) y S (pS) de Essaouira y sus correspondientes dunas asociadas (n = número de muestras estudiadas; datos promediados en %).

Table 1. Concentrations of the main organisms (groups), constituents of the carbonate bioclasts in the different granulometric populations from 0.50 to 3.50  $\phi$ , simplified on the N (pN) and S (pS) beaches of Essaouira and their associated dunes (n = number of studied samples; average data in%).

		0,5 $\phi$ = 0,71 mm	1,0 $\phi$ = 0,50 mm	1,5 $\phi$ = 0,35 mm				2,0 $\phi$ = 0,25 mm				
Lamelibránquios	<b>L</b>	80 pS	79 pS	77 dS	73 pN	79 dN	74 pS	80 dS	81 pN	87 dN	78 pS	81 dS
Gasterópodos	<b>G</b>	10 pS	19 pS	23 pS	15 pN	14 dN	12 pS	9 dS	9 pN	3 dN	11 pS	7 dS
Equinoideos	<b>E</b>	5 pS				3 dN	4 pS	3 dS	6 pN	6 dN	4 pS	1 dS
Balanos	<b>B</b>	3 pS	2 pS		12 pN	2 dN	7 pS	4 dS	3 pN	3 dN	4 pS	7 dS
Foraminíferos	<b>F</b>	1 pS				2 dN	3 pS	4 dS	1 pN	1 dN	3 pS	4 dS
Briozoos	<b>Br</b>	1 pS										

Essaouira N	playa pN n = 3	2,5 $\phi$ = 0,18 mm				3,0 $\phi$ = 0,125 mm				3,5 $\phi$ = 0,09 mm				
		<b>L</b>	64 pN	73 dN	52 pS	58 dS	86 pN	73 dN	69 pS	65 dS	81 pN	74 dN	80 pS	67 dS
Essaouira S	duna dN n = 11	<b>G</b>	9 pN	10 dN	14 pS	11 dS	5 pN	10 dN	10 pS	11 dS	8 pN	6 dN	9 pS	13 dS
		<b>E</b>	16 pN	6 dN	20 pS	9 dS	4 pN	8 dN	9 pS	9 dS	3 pN	1 dN	4 pS	6 dS
Essaouira S	playa pS n = 4	<b>B</b>	7 pN	3 dN	6 pS	5 dS	0,5 pN	1 dN	5 pS	5 dS	0,5 pN	- dN	- pS	- dS
		<b>F</b>	3 pN	6 dN	6 pS	13 dS	3,5 pN	6 dN	6 pS	7 dS	0,5 pN	13 dN	3 pS	3 dS
		<b>Br</b>	1 pN	2 dN	2 pS	4 dS	1 pN	2 dN	1 pS	3 dS	7 pN	6 dN	4 pS	11 dS

Tabla 2. A) Cifras originales de los parámetros granulométricos y carbonatos bioclásticos a lo largo del tramo de playas de Essaouira N (perfiles I a IV y VI a IX), que permiten comprobar las diferencias reales de los sedimentos arenosos en sentido N-S. B) Promedios de los parámetros anteriores en cada uno de los segmentos de las playas de Essaouira.

Tabla 2. A) Former data of the granulometric parameters and bioclastic carbonates along the sector of beaches of N Essaouira (profiles I to IV, and VI to IX), which allows to verify the real differences of the sandy sediments in the N-S direction. B) Average data of the above parameters in each of the Essaouira beach segments.

A)

PLAYA DE ESSAOUIRA N									
PERFIL	C		Mz		$\sigma_1$	$Sk_1$	KG	CaCO <sub>3</sub>	
	$\phi$	mm	$\phi$	mm	$\phi$		%		
I	1,83	0,28	2,95	0,13	0,24	-0,20	1,32	38,0	N ↓ septentrional ..... meridional ↓ S
II	1,81	0,29	2,49	0,18	0,32	-0,12	0,75	11,0	
III	2,13	0,23	2,69	0,16	0,22	-0,16	1,09	21,8	
IV	2,20	0,22	2,72	0,15	0,19	-0,10	0,93	26,0	
.....									
VI	2,08	0,24	2,69	0,16	0,22	-0,17	1,10	26,0	
VII	2,08	0,24	2,70	0,15	0,22	-0,16	1,09	25,4	
VIII	2,05	0,24	2,69	0,16	0,22	-0,17	1,11	27,6	
IX	1,70	0,31	2,55	0,17	0,33	-0,28	0,89	18,8	

B)

PLAYA DE ESSAOUIRA N							PLAYA DE ESSAOUIRA CENTRAL							PLAYA DE ESSAOUIRA S						
C	Mz	$\sigma_1$	$Sk_1$	KG	CaCO <sub>3</sub>		C	Mz	$\sigma_1$	$Sk_1$	KG	CaCO <sub>3</sub>		C	Mz	$\sigma_1$	$Sk_1$	KG	CaCO <sub>3</sub>	
$\phi$	$\phi$	$\phi$			%		$\phi$	$\phi$	$\phi$			%		$\phi$	$\phi$	$\phi$			%	
1,99	2,66	0,24	-0,15	1,05	24,76	N	1,41	2,62	0,43	-0,16	1,21	14,13		1,55	2,48	0,36	-0,15	1,07	42,03	N
1,99	2,66	0,25	-0,20	1,05	24,45	S								0,73	2,29	0,53	-0,27	1,27	51,83	S

resultado de un transporte más prolongado, que promueve una mayor estabilización de las variables sedimentológicas a medida que el transporte actúa en un sentido determinado. Además, se advierten diferencias netas en Essaouira central y S (Tabla 2B).

Las dunas septentrionales de Essaouira N (Fig. 3) disminuyen su tamaño medio de grano (activas e intrusivas), los calibrados mejoran hacia el interior (0,23 → 0,21 → 0,20  $\phi$ ) y las curvas tienden a achatarse tierra adentro. En las dunas meridionales, las tendencias son más irregulares. Los carbonatos se mantienen (24,76% y 24,45%).

El tramo de Essaouira central representa una zona de sombra energética, que se traduce en tamaños máximos elevados (C= 1,41  $\phi$ ), mientras que los medios son similares a Essaouira N (Mz = 2,62  $\phi$ ) y los porcentajes de carbonatos son mínimos (Tabla 2B). Hacia las dunas, disminuyen muy ligeramente. Los calibrados mejoran desde la playa, donde son buenos (0,43  $\phi$ ) a excelentes (0,29  $\phi$ ) y las asimetrías pasan de negativas (-0,16), en la playa (medias relativamente groseras), a -0,01 en las dunas activas y a positivas (+0,13) en las dunas fijadas (predominio de finos).

Tabla 3. Tendencias cualitativas de los parámetros granulométricos y carbonatos bioclásticos promediados longitudinalmente a lo largo de las playas y transversalmente desde éstas a las dunas asociadas. Para ello se refieren los diferentes parámetros granulométricos y los porcentajes carbonatados (según esquema de leyenda), que ilustran las variaciones a lo largo de las playas de Essaouira, separando los tres segmentos de la costa de N a S.

Table 3. Qualitative trends of the average granulometric parameters and bioclastic carbonates along the beaches and transversely from those to the associated dunes. The granulometric parameters and the carbonate percentages (following legend scheme) are detailed, illustrating the variations of the sandy sediment along the three segments of Essaouira beaches from north to south.

<b>ESSAOUIRA N</b>		<b>ESSAOUIRA N</b>				<b>LEYENDA</b>	
<b>TENDENCIA LONGITUDINAL</b> transferencias sedimentarias		<b>TENDENCIA TRANSVERSAL</b> transferencias sedimentarias				<b>C</b>	<b>Mz</b>
<b>PLAYAS N → S</b>		<b>PLAYAS</b>		<b>DUNAS ASOCIADAS</b>		$\sigma_1$	$Sk_1$
invariable	invariable	mayor	mayor	algo menor	algo menor	Kg	$CaCO_3$
similar (excelente)	más negativa	excelente	negativa	más excelente	variable		
invariable	invariable (bajo)	media	bajo	chata	algo menor		
<b>ESSAOUIRA CENTRAL</b>		<b>ESSAOUIRA CENTRAL</b>					
<b>TENDENCIA LONGITUDINAL</b> transferencias sedimentarias		<b>TENDENCIA TRANSVERSAL</b> transferencias sedimentarias					
<b>PLAYAS N → S</b>		<b>PLAYAS</b>		<b>DUNAS ASOCIADAS</b>			
mayor	algo mayor	mayor	mayor	algo menor	algo menor		
bueno	menos negativa	bueno	negativa	muy bueno/excelente	positiva		
más aguda	menor (mínimo)	variable	muy bajo	media/aguda	variable (mínimo)		
<b>ESSAOUIRA S</b>		<b>ESSAOUIRA S</b>					
<b>TENDENCIA LONGITUDINAL</b> transferencias sedimentarias		<b>TENDENCIA TRANSVERSAL</b> transferencias sedimentarias					
<b>PLAYAS N → S</b>		<b>PLAYAS</b>		<b>DUNAS ASOCIADAS</b>			
mayor	mayor	mayor	mayor	variable	menor		
muy bueno a bueno	más negativa	bueno	negativa	variable	variable		
media a aguda	menor a mayor (máximo)	media a picuda	alto	variable	menor		

Las tendencias cualitativas de cambio en las playas, de carácter longitudinal por la corriente de deriva, y en sección transversal desde la playa a las dunas asociadas activas por el viento y, de éstas a las más distales, se reflejan en la Tabla 3. En una primera aproximación, apenas se dejan sentir en Essaouira N, pero en el área central los centiles son mayores (Fig. 3 y Tabla 3), el calibrado es bueno, pero peor en el subsector septentrional, las asimetrías son menos negativas, las curvas algo más agudas y los carbonatos son mínimos.

En Essaouira S, los contrastes son netos de N a S, incrementándose el tamaño de grano hacia el cabo Sim, los calibrados varían de muy buenos a buenos, las curvas son más negati-

vas y de chatas a picudas y los carbonatos se hacen máximos hacia el S. La fracción carbonatada inicial en la mayor parte de los restos de organismos es más gruesa, incluso en las primeras fases de rotura y desgaste del bioclasto y la forma es subplana; consecuentemente está peor calibrada que los individuos de cuarzo, tendentes a un tamaño comparativamente menor y a una geometría subsférica debido al desgaste en el transporte. El tamaño medio carbonatado es mayor que el de los residuos insolubles (en este caso cuarzo) y en la muestra total, como apuntaron Pilkey *et al.* (1967) lo que permite deducirse en un aumento del tamaño medio en el tramo de Essaouira S. El mayor porcentaje de bioclastos determina que las playas contengan tamaños

medios superiores a los de las zonas descritas que, incluso, se incrementan hacia el extremo meridional, más evidente en los promedios del centil (Fig. 3. Tabla 3). Los calibrados son peores hacia el S, variando en los diferentes tipos de dunas a mejores y peores, éstos en las dunas más meridionales: fijadas y continentales (0,96 y 0,73, respectivamente).

## 6. Discusión

Los parámetros granulométricos y en particular el tamaño medio de grano y los componentes mineralógicos de los sedimentos playeros proporcionan información valiosa sobre la procedencia de los sedimentos, la historia del transporte, las tasas de erosión, la deriva sedimentaria a largo de la costa y los procesos deposicionales (Kwarteng *et al.*, 2016).

En el caso concreto del componente biogénico, su análisis mejora el conocimiento sedimentológico de los conjuntos de playas y dunas costeras asociadas: relación del tamaño medio de grano y porcentaje carbonatado, distribución de los bioclastos por fracciones de tamaños, grupos biológicos (Flor *et al.*, 1982), etc. Los organismos enteros se incorporan al sedimento en el borde costero, que primero se fragmentan, principalmente por la mecánica del oleaje, produciéndose gran cantidad de finos y escasas fracciones intermedias con la consiguiente distribución bimodal (Chave, 1960), como se constata en este trabajo (Fig. 6). También el oleaje los redistribuye por las playas hasta su homogeneización con otros componentes, principalmente siliciclastos, que se incorporan a la deriva longitudinal, y los excedentes arenosos, por vientos de mar a tierra que permiten la deflación eólica para formar parte del sedimento como dunas costeras en una transferencia transversal.

Altos porcentajes de bioclastos macro representan mejor a playas expuestas al oleaje incidente, donde las arenas son gruesas y medias y, localmente, se concentran en las alineaciones superiores de vaivén (“swash marks”). Los micro tienden a concentrarse en

áreas protegidas o de sombra, favoreciendo que ocupen las fracciones más finas de la distribución granulométrica.

En costas templadas acantiladas, las aportaciones más importantes derivan de organismos colonizadores del borde rocoso perimareal, como es este caso marroquí, similar a las costas cantábricas (Flor *et al.*, 1982). En costas mediterráneas, los restos biogénicos pueden derivar de praderas de angiospermas hasta fondos menores a 50 m, que juegan un papel importante soportando una biodiversidad muy alta (Hemminga y Duarte, 2000); las praderas de *Posidonia oceanica* son contribuyentes netos (Gómez-Pujol *et al.*, 2013; De Muro *et al.*, 2016), sobre las que se han establecido normas legales de protección.

Las distribuciones granulométricas responden a las pautas conocidas de acuerdo con la evolución del transporte sedimentario hasta las áreas deposicionales. Para identificar las variaciones espaciales de los parámetros granulométricos, se han propuesto “tendencias del tamaño de grano” (McLaren, 1981) o un modelo simple (McLaren y Bowles, 1985), utilizando la media de grano, el calibrado y la asimetría cuyos cambios están vinculados a las distribuciones del sedimento transportado y a su área fuente. También las aproximaciones bidimensionales de Gao y Collins (1992) y Rojas y Le Roux (2003) han sido aplicadas ampliamente en playas (Pedreros *et al.* 1996; Flor y Flor-Blanco, 2009; Du *et al.*, 2015) para determinar dichas tendencias. El factor viento puede mejorar el calibrado, porque tiende a transportar las fracciones más finas de la distribución granulométrica en las arenas de la playa suministradora, en lo que constituye un neto proceso selectivo.

El centil, a pesar de representar el 1% más grueso de la distribución, se revela como un dato adicional de gran interés en auxilio de la media Mz cuando ésta varía muy sutilmente, en ocasiones a escala centesimal (Fig. 3). Así, se admite, con las lógicas discrepancias en otras regiones por fluctuaciones locales, que los tamaños medios de grano decrecen paula-

tinamente en la dirección del transporte. Pero también se deduce un mejor calibrado corriente abajo, dada la estrecha dependencia con aquél. En este caso, es particularmente útil la inclusión del componente bioclástico, tanto por su relación directa con el tamaño medio de grano (Fig. 7), como por tratarse de un componente esencial de la fracción arenosa.

Los valores promediados de los parámetros granulométricos y de los bioclastos carbonatados se agrupan en los ambientes de playa emergida, dunas activas y dunas fijadas artificialmente por ramaje, estacado y plantación vegetal; también se tienen en cuenta las dunas intrusivas, activadas recientemente y, en la franja más meridional hacia el cabo Sim, dunas cuyos componentes arenosos se han desligado del flujo costero, como dunas continentales. Éstas incorporan el flujo arenoso rebasado el cabo Sim; son barjanas migradores que pueden llegar al borde acantilado al E del cabo y resolverse como dunas descendentes e incorporarse el sedimento arenoso a la playa durante temporales.

La corriente de deriva litoral juega el papel fundamental en el transporte de sedimentos arenosos a lo largo de toda la costa, especialmente si el borde está representado por una playa baja arenosa; esta circunstancia determina que los flujos de sedimento se hagan bajo condiciones libres. Los procesos de vaivén del oleaje rompiente (Guza *et al.*, 1984; Puleo y Torres-Freyemurth, 2016), cuyos componentes principales proceden del NO (Fig. 2B), constituyen el mecanismo de transporte fundamental en el corto y largo plazo.

De acuerdo con lo anterior, se propone un modelo dinamo-sedimentario (Fig. 8) en el que se involucran datos de volúmenes obtenidos anteriormente para las dunas activas (Flor-Blanco *et al.*, 2013), que se incorporan restando flujo arenoso a la corriente de deriva de playa.

Los oleajes incidentes y los componentes de vientos desencadenan el transporte longi-

tudinal y transversal, respectivamente, para constituir el sistema de playas y dunas del litoral de Essaouira. Asimismo, los trenes de dunas móviles, típicamente transversas de tipología aklé, considerando la dirección de las crestas y los frentes de barlovento y sotavento, informan de la migración arenosa eólica con un transporte oblicuo generalizado hacia el SSO. Los temporales cíclicos y estacionales de ola erosionan las dunas adyacentes y se encargan de transferir volúmenes importantes de nuevo a la playa en lo que supone una autorrecarga; en el tramo meridional, con una franja activa de dunas paulatinamente más estrecha hacia el cabo Sim, las dunas tienen componentes longitudinales bien desarrolladas, incluso aunque estén controladas por la fijación artificial; también es aplicable al tramo más meridional donde los montículos vegetados conviven con formas longitudinales incipientes.

Los flujos arenosos se desplazan longitudinalmente desde el N con una contribución voluminosa del río Tensift al que se incorpora el componente bioclástico en una proporción de alrededor del 25%. Varios tramos de playas/dunas y segmentos rocosos pueden ser identificados, pero desde Brahim Chilh hacia el S, culminando en el cabo Sim, comienza la sedimentación eólica cuya anchura se incrementa paulatinamente, alcanzando máximos volúmenes en el área media del tramo que termina en la ciudad de Essaouira. Estas arenas han tenido un largo transporte que determina unas características sedimentológicas muy homogéneas en las playas; las dunas adyacentes muestran ciertas diferencias propias del proceso de deflación como la disminución del tamaño medio, mejora del calibrado, curvas chatas y carbonatos inferiores. La mayor acumulación arenosa, que es muy voluminosa en este tramo, representada por las dunas activas, se ubica en la mitad de este tramo (Fig. 8), con un máximo de 477.626 m<sup>3</sup> (Flor-Blanco *et al.*, 2013).

El conjunto rocoso de la ciudad de Essaouira y, probablemente, la isla de Mogador permiten desarrollar una playa arqueada al S, protegida





Figura 8. Síntesis del transporte y sedimentación en sentido longitudinal (playas de Essaouira de N a S) y transversal (de playas a dunas adyacentes), deducidas de los parámetros granulométricos y contenido carbonatado biogénico originales y promediados (Tablas 2 y 3). Los volúmenes representan las acumulaciones arenosas de las dunas activas (Flor-Blanco et al., 2013), que permiten completar el esquema de los flujos arenosos en esta costa baja atlántica de Marruecos.

Figure 8. Synthesis of the transport and sedimentation in the longitudinal direction (beaches of Essaouira from the N to the S) and transversal (from beaches to adjacent dunes), deduced from the original and average biogenic carbonate content and granulometric parameters (Tables 2 and 3). The volumes represent the sandy accumulations of the active dunes (Flor-Blanco et al., 2013), which allow to complete the knowledge of the sandy flows on this low Atlantic coast of Morocco.

de los oleajes de mar abierta, en cuya mitad occidental se forma el campo dunar de aklés (sector Essaouira central). Los tamaños son similares al tramo N, pero el centil es mucho más grosero, lo cual induce a pensar en un lavado de finos, improbable por la condición de sombra energética, o una aportación de gruesos por las descargas ocasionales del río Ksob, que son redistribuidas por las corrientes, de modo que las fracciones arenosas tienden a moverse hacia el S (El Mimouni y Daoudi, 2012). Es una zona indicativa de una tasa de sedimentación muy baja, en buena parte debida a la condición de zona de sombra (Fig. 8), donde la acumulación eólica también es reducida, unos 55.099 m<sup>3</sup> (Flor-Blanco *et al.*, 2013).

A partir del río Ksob, hacia el S, el campo dunar por detrás de la playa se reduce paulatinamente y el cordón dunar artificial está en fase de retroceso, siendo sustituido por dunas más o menos vegetadas al N de cabo Sim en un intento de construir un cordón embrionario, el cual es discontinua y tiene anchuras métricas (Flor-Blanco *et al.*, 2013). Esto representa un déficit de sedimento arenoso en el flujo de deriva. Hacia tierra y hacia el S, las dunas vegetadas efímeras y embrionarias se sustituyen por dunas continentales migrantes (barjanes y mantos eólicos), reincorporándose el volumen arenoso circulante al pie del acantilado del cabo Sim y a la playa meridional de Sidi Harazem (Fig. 8).

Las playas de Essaouira S contienen plataformas rocosas en la mitad intermareal inferior relativamente extensas, debido a la disminución de volumen arenoso en lo que representa un déficit arenoso generalizado desde la ciudad de Essaouira hacia el S; esto es también indicativo de la escasa aportación arenosa de carga de fondo por el río Ksob. Las plataformas están colonizadas por organismos conchíferos que suministran carbonatos biogénicos al sedimento arenoso; por esto, los bioclastos alcanzan porcentajes máximos en este sector, más aún en el extremo S (51,83%) por la deriva litoral (Tabla 2B) donde los tamaños son más gruesos, peor calibrados y altos porcentaje carbonatados.

La tendencia desde el máximo del área central de Essaouira N con un valor de 477.626 m<sup>3</sup> (Flor-Blanco *et al.*, 2013) marca una disminución, solamente interrumpida por la franja rocosa acantilada de la ciudad de Essaouira. Las dunas activas acumulan volúmenes máximos justo al S de la desembocadura del río Ksob, unos 350.399 m<sup>3</sup> (Flor-Blanco *et al.*, 2013), disminuyendo paulatinamente hasta cifras mínimas de 9.103 m<sup>3</sup> (Flor-Blanco *et al.*, 2013) algo al N de cabo Sim.

Las transferencias desde las playas a los campos dunares cumplen con las tendencias generales apuntadas de pérdida de tamaño de grano, mejores calibrados y disminución de carbonatos biogénicos. La complejidad de interferencias de los aportes eólicos directamente desde la playa y las dunas de barján y de tipo aklé, que migran como continentales hacia el S, complican estas tendencias en Essaouira S.

## 7. Conclusiones

Los conjuntos de playas bajas disipativas y dunas asociadas, tanto activas como fijadas artificialmente e intrusivas, forman parte de la costa arenosa de Essaouira. Se articulan en tres sectores cuyas características sedimentológicas dependen de la interacción de la deriva de playa de N a S y el transporte de las arenas deflacionadas en la playa a las posplayas para generar dunas eólicas con una componente oblicua de las geometrías, marcada por las crestas.

Se caracterizan a partir de los parámetros granulométricos y contenidos carbonatados total y por fracciones de forma promediada. Los tamaños de los límites de transporte sedimentario son 2,4  $\phi$  (suspensión-rodamiento) y 1,4  $\phi$  (rodamiento-arrastre), que marcan el nivel energético de esta costa, parámetros que servirán para correlacionarla con otras costas. El tamaño medio de grano y el contenido carbonatado tienen una relación directa por la cual, cuanto mayor es el tamaño medio, mayor es el porcentaje carbonatado bioclástico,

particularmente evidente en Essaouira S y en cómputo total, indicativo de la homogeneización de estos componentes mineralógicos en los que el cuarzo es mayoritario.

Los componentes biogénicos a nivel de grupo se reparten como macro: lamelibranquios, que predominan, gasterópodos, balanos y equinoideos y micro: foraminíferos, briozoos y espículas de esponjas, que se concentran mayoritariamente en la fracción de  $2,0 \phi = 0,25 \text{ mm}$ .

Se deduce un transporte muy activo por deriva de playa, persistentemente hacia el S, bien a partir de los datos originales, y más generalizada y simple de los promedios del tamaño medio, calibrado y porcentajes carbonatados. El tramo de Essaouira N contiene arenas finas, bien calibradas y bajos contenidos bioclásticos, almacenando gran volumen de arenas dunares, muchas fijadas artificialmente. Se deduce la deriva litoral hacia el S, principalmente por la disminución del tamaño medio.

El sector de Essaouira central es un área de sombra energética, resultando tamaños medios finos, peor calibrados y mínimos contenidos bioclásticos. La franja dunar es escasa, incrementándose hacia el S. Supone un tramo relativamente independiente del resto al interrumpirse el flujo sedimentario desde Essaouira N hacia Essaouira S por la presencia de un tramo rocoso acantilado y, en parte, por la desembocadura del río Ksob.

En Essaouira S, las playas contienen una franja intermareal rocosa inferior, ante el menor flujo arenoso desde el N, que impide el desarrollo completo de la playa, desde el punto de vista sedimentario. Esta plataforma rocosa suministra gran cantidad de organismos calcáreos, que se manifiestan en las características sedimentológicas, con mayores tamaños medios, peores calibrados y altos porcentajes bioclásticos, según la propia deriva litoral hacia el S en este sector meridional de Essaouira, muy diferente al sector de Essaouira N. La franja dunar de la posplaya disminuye paulatinamente la anchura media hacia el S, siendo

sustituida por cordones dunares embrionarios y, hacia el interior, por dunas de carácter continental, desligadas de las anteriores, que migran como trenes de barjanes y mantos eólicos tabulares.

## **Bibliografía**

- Allam, M., Houmimyd, M. (1990). Étude de la protection contre l'ensablement de la liaison routière entre Moulay Bouzarkoun et Essaouira. Rapport du Service Forestière d'Essaouira, 65 p.
- Allen, J.R.L. (1984). Modes of sediment transport and particle motion. Sedimentary structures, their character and physical basis. *Developments in Sedimentology*, 30, 88-95. Elsevier.
- Aouiche, I. (2016). Dynamique morphosedimentaire de la baie d'Agadir. Approche multi-méthodes et préconisations pour une gestion intégrée de la zone côtière. Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences, Université Cadi Ayyad, Marrakech, 238 p.
- Bagnold, R.A. (1941). The physics of blown sand and desert dunes. William Morrow and Co N.Y., 265 p.
- Benavente, J., Gracia, F.J., Anfuso, G., Lopez-Aguayo, F. (2005). Temporal assessment of sediment transport from beach nourishments by using foraminifera as a natural tracer. *Coastal Engineering*, 52, 205-219. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.12.002>
- Bird, E.C. (2008). Coastal geomorphology: an introduction. New York, John Wiley & Sons, 436 p.
- Blott, S.J., Pye, K. (2000). A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediment's. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25, 1473-1477.
- Bone, Y., Deer, L., Edwards, S. A., Campbell, E. (2006). Adelaide Coastal Waters Study-Sediment Budget. ACWS Technical Report No. 16. Adelaide Coastal Waters Study Steering Committee, March 2007. Adelaide University, Department of Geology, 86 p.
- Chave, K.E. (1960). Carbonate skeletons to limestones: problems, *Transactions of the New York Academy of Science*, 23, 14-24. <https://doi.org/10.1111/j.2164-0947.1960.tb01341.x>
- Clemmensen, L.B. (1993). Short Course Notes. Copenhagen, Denmark: Geologisk Institut, Kobenhavns Universitet, 48 p.

- De Muro, S., Ibba, A., Kalb, C. (2016). Morphosedimentology of a Mediterranean microtidal embayed wave dominated beach system and related inner shelf with *Posidonia oceánica* meadows: the SE Sardinian coast. *Journal of Maps*, 12, 3, 558-572. <https://doi.org/10.1080/17445647.2015.1051599>
- DNSLE (2006). Débat national sur l'eau. Bassin hydraulique du Tensift. Agence du Bassin Hydraulique du Tensift, Royaume de Maroc, 24 pp. (<http://www.matee.gov.ma/dne/documents/doc%20bassins/Tensift.pdf>). P-51.
- Du, X., Gama, C., Liu, J.T., Baptista, P. (2015). Sediment sources and transport pathway identification based on grain-size distributions on the SW Coast of Portugal. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Science*, 26 (4), 397-409. [https://doi.org/10.3319/TAO.2015.03.30.01\(TT\)](https://doi.org/10.3319/TAO.2015.03.30.01(TT))
- El Mimouni, A. (2009). Approche expérimentale de suivi de la dynamique morphosédimentaire du littoral d'Essaouira, Maroc: Implication pour un aménagement raisonné. Thèse de Doctorat, Université du Littoral, Côte d'Opale, Dunkerque, France, 259 p.
- El Mimouni, A., Daoudi, L. (2012). Evolution à moyen terme du contexte hydrodynamique et morphosédimentaire la baie d'Essaouira (Maroc atlantique). *Actas XIIèmes. Jour. Nat. Génie Côtier-Génie Civil, Cherbourg*, 273-280. Editions Paralia CFL. <https://doi.org/10.5150/jngcgc.2012.028-E>
- El Mimouni, A., Daoudi, L., Anthony, E. (2014). Morphological change on a wadi-influenced beach: Essaouira, Morocco. *Les littoraux méditerranéens: états passés, actuels et futurs*, 20 (3), 243-250. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.10682>
- Flor, G. (1978). Relación entre la distribución de sedimentos y la circulación costera en la región del Cabo Peñas. *Trabajos de Geología*, 10, Univ. Oviedo, 183-194.
- Flor, G. (1981). Las dunas eólicas costeras de la playa de Xagó (Asturias). *Trabajos de Geología*, 11, Univ. Oviedo, 61-71.
- Flor, G., Flor Blanco, G. (2009). Sedimentología de los depósitos arenosos superficiales de la playa de Vega (Concejo de Ribadesella, Asturias). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 22 (1-2), 105-121.
- Flor, G., Llera, E. M<sup>a</sup>, Ortea, J.A. (1982). Los carbonatos biogénicos de los sedimentos de las playas arenosas de Asturias y Cantabria: su origen y significado dinámico. *Cuaderno del CRINAS*, 2, 77 p.
- Flor-Blanco, G., Flor, G., Lharti, S., Pando, L. (2013). Morphological characteristics and sand volumes of different coastal dune types in Essaouira Province, Atlantic Morocco. *Geo-Marine Letters*, 33 (2-3), 101-115. <https://doi.org/10.1007/s00367-012-0318-7>
- Folk, R.L., Ward, W.C. (1957). Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27, 3-26. <https://doi.org/10.1306/74D70646-2B21-11D7-8648000102C1865D>
- Gao, S., Collins, M. (1992). Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of "transport vectors". *Sedimentary Geology*, 81, 47-60. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(92\)90055-V](https://doi.org/10.1016/0037-0738(92)90055-V)
- Gao, S., Collins, M. (1995). Net sand transport direction in a tidal inlet, using foraminiferal tests as natural tracers. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 40, 681-697. <https://doi.org/10.1006/ecss.1995.0046>
- Gómez-Pujol, L., Roig-Munar, F.X., Fornós, J.J., Bala-guer, P., Mateu, J. (2013). Provenance-related characteristics of beach sediments around the island of Menorca, Balearic Islands (western Mediterranean). *Geo-Marine Letters*, 33, 195-208. <https://doi.org/10.1007/s00367-012-0314-y>
- Guza, R.T., Thornton, E.B., Holman, R.A. (1984). Swash on steep and shallow beaches. *Coastal Engineering*, 1 (19), 48, 708-723. <https://doi.org/10.9753/icce.v19.48>
- Haida, S., Snoussi, M., Latouche, C., Probst, J.-L. (1996). Géodynamique actuelle du bassin versant de l'Oued Tensift (Maroc): érosion mécanique et bilan des transports solides fluviaux. *Sciences Géologiques Bulletin*, 49 (1-4), 7-23. <https://doi.org/10.3406/sgeol.1996.1933>
- Hemminga, M.A., Duarte, C.M. (2000). *Seagrass Ecology*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 298 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511525551>
- Jaffar, M. (2012). Caractérisation des différents aspects de dégradation du réseau d'assainissement à Essaouira «Maroc»: analyse des contraintes naturelles et anthropiques imposées au réseau. *Mémoire de Stage de Fin d'Études, Master Sciences et Techniques, Faculté des Sciences et Techniques, Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc*, 126 p.
- Kilibarda, Z., Venturelli, R., Goble, R. (2014). Late Holocene dune development and shift in dune-building winds along southern Lake Michigan. En: T.G. Fisher, E.C. Hansen, (Eds.), *Coastline and dune evolution along the Great Lakes*. The Geological Society of Ame-



- rica, Special Paper 508, 47-64. [https://doi.org/10.1130/2014.2508\(04\)](https://doi.org/10.1130/2014.2508(04))
- Kwarteng, A.Y., Al-Hatrushy, S.M., Illenberger, W.K., McLachlan, A. (2016). Grain size and mineralogy of Al Batinah beach sediments, Sultanate of Oman. *Arabian Journal of Geoscience*, 9, 557. <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2583-7>
- Lahmadi, L. (2013). Rôle des crues de l'Oued Ksob dans le maintien de l'équilibre dynamique et morphosédimentaire du littoral d'Essaouira (Maroc). Mémoire de Stage de Fin d'Étude, Faculté des Sciences et Techniques, Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc, 126 p.
- Martínez Cedrún, P., Flor, G., Flor-Blanco, G., Fernández Maroto, G. (2014). Composición mineralógica de los sistemas de playa/duna en una costa rocosa: caso de Cantabria (NO de España). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 27 (2), 13-27.
- Martins, L.R. (2003). Recent sediments and grain-size analysis. *Gravel*, 1, 90-105.
- Mckee, E.D. (1979). Introduction to a study of global sand seas. En: E.D. Mckee, (Ed.), *A Study of Global Sand Seas*. U.S. Geological Survey Professional Paper 1052, 1-19. <https://doi.org/10.3133/pp1052>
- McLaren, P. (1981). An interpretation of trends in grain size measures. *Journal of Sedimentary Research*, 51, 611-624. <https://doi.org/10.1306/212F7CF2-2B24-11D7-8648000102C1865D>
- McLaren, P., Bowles, D. (1985). The effects of sediment transport on grain-size distributions. *Journal Sedimentary Research*, 55, 457-470. <https://doi.org/10.1306/212F86FC-2B24-11D7-8648000102C1865D>
- Mellas, S. (2012). Evaluation du risque de tsunami sur le littoral atlantique marocain. Histoire. Thèse de Doctorat d'État. Université Paul Valéry - Montpellier III. Francia et Université Chouaib Doukkali El Jadida. 264 p. [https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00826963/file/2012\\_mellas\\_1\\_these.pdf](https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00826963/file/2012_mellas_1_these.pdf)
- Middleton, G.V. (1976). Hydraulic interpretation of sand size distributions. *Journal Geology*, 84, 405-426. <https://doi.org/10.1086/628208>
- Pedreiros, R., Howa, H.L., Michel, D. (1996). Application of grain size trend analysis for the determination of sediment transport pathways in intertidal areas. *Marine Geology*, 135, 35-49. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(96\)00042-4](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(96)00042-4)
- Pilkey O., Morton, R.W., Luternauer, J. (1967). The carbonate fraction of beach and dune sands. *Sedimentology*, 8, 311-327. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1967.tb01330.x>
- Puleo, J.A., Torres-Freyermurth, A. (2016). The second international workshop on swash-zone processes. En: G. Ruessink, (Ed.), *Swash-zone Processes*. Coastal Engineering, 115, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.09.007>
- Rojas, E.M., Le Roux, J.P. (2003). Determinación de vectores de transporte, utilizando información granulométrica: Aplicación al delta tipo Gilbert, del río Pescado, Lago Llanquihue, X Región, Chile. X Congreso Geológico Chileno, Sociedad Geológica de Chile, Comunicaciones, Santiago (CD-ROM). [https://biblioteca.sernageomin.cl/opac/DataFiles/RojasE\\_y\\_LeRouxJ.pdf](https://biblioteca.sernageomin.cl/opac/DataFiles/RojasE_y_LeRouxJ.pdf)
- Sharp, R.P. (1966). Kelso dunes, Mojave Desert, California. *Geological Society of America Bulletin*, 77 (10), 1045-1073. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1966\)77\[1045:KDMDC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1966)77[1045:KDMDC]2.0.CO;2)
- Simone, C. (2000). Le géosystème dunaire dunaire anthropisé d'Essaouira-est (Maroc Atlantique). Dynamique et paléoenvironnements. Thèse de Doctorat, Université Aix-Marseille, France, 204 p.
- Sulzlee, C. (1963). Les dunes de Essaouira. *Revue Forestière Française*, 5, 401-418. <https://doi.org/10.4267/2042/24550>
- Tanner, W.F. (1991). Suite statistics: the hydrodynamic evolution of the sediment pool. En: J.P.E. Syvitski, (Ed.), *Principles, Methods and Application of Particle Size Analysis*, 225-236. Cambridge University Press, N.Y. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511626142.021>
- Ungar, J.E., Haff, P.K. (1987). Steady state saltation in air. *Sedimentology*, 34, 289-299. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1987.tb00778.x>
- van Rijn, L.C. (2018). Aeolian Transport over a Flat Sediment Surface. 33 p. [www.leovanrijn-sediment.com](http://www.leovanrijn-sediment.com).
- Vieira, L.R.S., Manso, C.L.C. (2017). Textural and compositional variations in beach sands along south Alagoas coast, Brazil. *Revista da Gestão Costeira Integrada*, 17(2), 139-149. <https://doi.org/10.5894/rgci-n99>
- Weisrock, A. (1980). Géomorphologie et paléo-environnements de l'Atlas atlantique (Maroc). Thèse Doctorat d'État, Univ. Paris I, 931 p.

*Recibido el 20 de septiembre de 2021*

*Aceptado el 31 de mayo de 2022*