

## CARACTERIZACIÓN GRANULOMÉTRICA DE LAS ARENAS NEGRAS DE PLAYA BIBIJAGUA POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

## GRANULOMETRIC CHARACTERIZATION OF BLACK SANDS FROM BIBIJAGUA BEACH BY SCANNING ELECTRON MICROSCOPY

Eduardo Valle Luis<sup>1\*</sup>, Oscar Diaz Rizo<sup>2</sup>, Cristhian Morejón Álvarez<sup>3</sup>.

<sup>1</sup>Centro de Investigaciones y Servicios Ambientales ECOVIDA. Pinar del Río, Cuba, CP 20100.

<https://orcid.org/0009-0009-4891-4753>

<sup>2</sup>Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (InSTEC). Universidad de La Habana. La Habana, Cuba.

<https://orcid.org/0000-0002-5705-163X>

<sup>3</sup>Centro de Investigaciones y Servicios Ambientales. ECOVIDA. Pinar del Río, Cuba, CP 20100.

<https://orcid.org/0009-0002-9013-8275>

\*Autor para la correspondencia (e-mail): [eduardovalleluis@gmail.com](mailto:eduardovalleluis@gmail.com)

Recibido para su publicación: 24/11/2023 - Aceptado para su publicación: 26/12/2023

### Resumen

Hoy día las playas atraen el interés de numerosos científicos causado por la relevancia turística, económica, ambiental y geológica de dichos ecosistemas. En Cuba la caracterización granulométrica de las arenas de duna de playa es un campo poco explorado, lo cual trae inconvenientes en su comprensión y restauración. Los objetivos de este estudio fueron establecer las bases metodológicas para el estudio granulométrico por métodos imagenológicos y caracterizar los granulos de las arenas negras de Playa Bibijagua. Las imágenes de las partículas de arena fueron capturadas mediante microscopía electrónica de barrido. Los descriptores de tamaño de grano diámetro del círculo equivalente proyectado, diámetro de Feret máximo y diámetro de Feret mínimo fueron obtenidos analizando las imágenes con el software libre ImageJ. También se obtuvieron los descriptores de forma de grano: relación de aspecto, esfericidad y convexidad. Para interpretar las características de las partículas, y se analizaron las distribuciones de densidades de los descriptores de tamaño y de forma, determinadas utilizando la herramienta "R". Atendiendo al tamaño de grano las arenas de playa Bibijagua se clasificaron como arenas medias.

**Palabras Clave:** Arenas Negras; Arenas de Playa; Microscopía Electrónica de Barrido; Granulometría.

### Abstract

Now a day the beaches attract the interest of numerous scientists caused by the tourist, economic, environmental and geological relevance of these ecosystems. In Cuba, the granulometric characterization of beach dune sands is an unexplored field, which brings problems in its understanding and restoration. The objectives of this study were to establish the methodological bases for the granulometric study by imaging methods and to characterize the granules of the black sands of playa Bibijagua. Images of the sand particles were captured using scanning electron microscopy. The grain size descriptors projected equivalent circle diameter, maximum Feret diameter, and minimum Feret diameter were obtained by analyzing the images with the free software ImageJ. The grain shape descriptors were also obtained: aspect ratio, sphericity and convexity. To interpret the characteristics of the particles, the density distributions of the size and shape descriptors, determined using the "R" tool, were analyzed. Based on the grain size, the Bibijagua beach sands were classified as medium sands.

**Key Words:** Beach Sand, Black Sand, Granulometry, Scanning Electron Microscopy.

## INTRODUCCIÓN

La comprensión de los mecanismos que regulan la evolución de las playas no es un simple ejercicio científico, pero el entendimiento de los mismos tiene un impacto económico y social importante (Moretti *et. al* 2016). En el cual la composición geoquímica de los sedimentos clásticos que la conforman revela información sobre la intensidad climática, distribución y procedencia de los sedimentos y configuración tectónica (Madhavaraju *et. al* 2020).

Los principales aportes de sedimentos a los sistemas de playas se derivan de fuentes terrígenas tales como suministro fluvial y la erosión de acantilados; y fuentes marinas como la erosión del lecho marino y producción biogénica marina. Además, el sedimento suministrado a una playa puede ser dispersado a lo largo de la costa por corrientes laterales y la deriva litoral (Gómez-Pujols *et. al* 2013).

En arenas terrígenas el cuarzo es el mineral más abundante en la playa, a pesar de que los feldespatos son en realidad los minerales formados de rocas ígneas más abundantes. Sin embargo, los feldespatos no duran tanto como el cuarzo en las arenas porque son más susceptibles a los procesos de abrasión y a la intemperie química (Smith 2020). Los sedimentos calcáreos se componen principalmente de carbonato de calcio biógeno clástico proveniente de conchas y esqueletos de macro y microorganismos marinos. Como resultado las arenas calcáreas poseen formas físicas complejas (Li *et. al* 2021).

Las arenas negras son el resultado de la acumulación de minerales pesados, los cuales contienen radionúclidos naturales (ej. Torio, Uranio y productos de sus cadenas de decaimiento radioactivo) (Aboelkhair *et. al* 2013). Las mismas consisten fundamentalmente en los minerales: ilmenita, circón, magnetita, rutilo, granate y monacita (Fares 2017). Por lo cual su caracterización granulométrica y radiológica es crucial para la evaluación del ecosistema como para futuras acciones de rehabilitación.

En Cuba desde la década de 1990 se iniciaron investigaciones en ecosistemas costeros. Existen estudios de  $^{210}\text{Pb}$  en sedimentos de las bahías de La Habana y Cienfuegos y el estuario de Sagua la Grande (García *et. al* 2018), así como caracterización radiológica y de contaminación de metales pesados en numerosas playas del archipiélago cubano. Sin embargo, la caracterización granulométrica de las arenas de duna de playa es un aspecto poco estudiado en Cuba y su desconocimiento crea lagunas en la evaluación de los ecosistemas costeros lo cual incide negativamente en futuras acciones de restauración de los mismos.

Para el análisis granulométrico de sedimentos en la práctica geotécnica se emplean disímiles métodos imagenológicos. "Mediciones tridimensionales (3D) de la forma de las partículas se derivan a partir de dos imágenes ortogonales de rayos X, tomografía micro computada, tomografía microcomputada de sincrotrón, fotografía estéreo, o luz estructurada las cuales proporcionan la representación más precisa de la partícula" (Li *et. al* 2021). No obstante, estos métodos son computacionalmente intensos y costosos, además solo se pueden analizar unos pocos cientos de gránulos. Una alternativa son las técnicas de análisis de imágenes digitales (DIA) en dos dimensiones (2D) las cuales son más económicas y rigurosas científicamente. "Las técnicas (DIA) se han desarrollado bien y se han aplicado para varios propósitos en las ciencias de la tierra, pero raramente se han utilizado para análisis de arena" (Smith 2020).

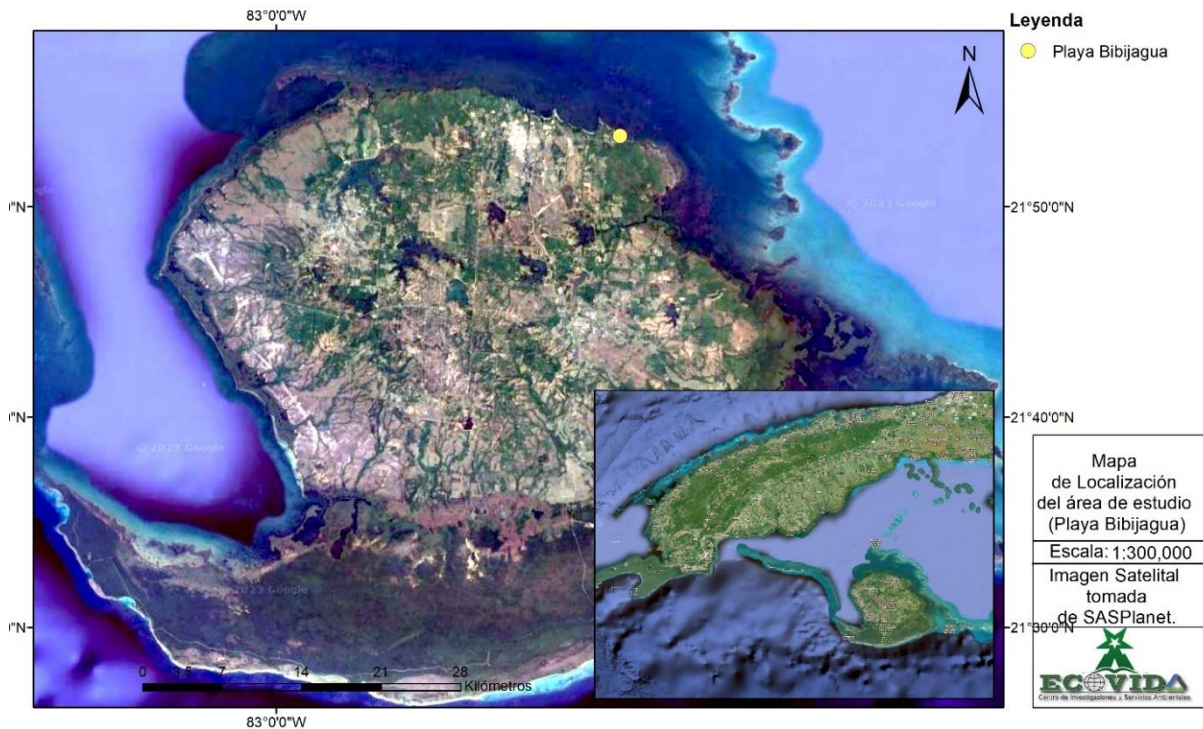
La microscopía electrónica de barrido (SEM) es uno de los instrumentos más versátiles disponibles para el análisis y examen de la morfología de microestructuras. La misma ha sido desarrollada reemplazando a la luz por electrones de alta energía (Zhou *et. al* 2006). Las imágenes obtenidas con SEM poseen mejor resolución que las imágenes obtenidas mediante métodos ópticos convencionales, por lo que este método es mayormente utilizado en las nanociencias, y posee un gran potencial en el estudio de las arenas marinas.

El objetivo de esta investigación es establecer un procedimiento para el estudio granulométrico de las arenas de playas nacionales de interés turístico, económico y ambiental. Y determinar las características granulométricas de las arenas negras de Playa Bibijagua.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área geográfica

Playa Bibijagua (21°53'24" LN; 82°43'48" LW): Ubicada al norte del Municipio Especial Isla de la Juventud, en la Región Occidental del país. Forma parte del Archipiélago de los Canarreos. La vía de acceso es a través de una carretera que se extiende 8 km al este de Nueva Gerona. Se diferencia de las otras playas existentes en Cuba por el color negro de sus arenas, formadas por la acción erosiva de las olas sobre las rocas de mármol.



### Muestreo y preparación de las muestras

Las muestras se tomaron a lo largo de la costa, a una distancia de 5 metros de la línea de marea, en 4 posiciones a 25 metros cada una. La muestra de arena superficial se conformó con las submuestras de entre 100-150 gramos. Estas fueron almacenadas y transportadas en la misma bolsa. La muestra fue envasada en una bolsa de nylon nueva, la cual fue bien cerrada y etiquetada con la identificación de las misma.

### Descripción del equipamiento

Las imágenes fueron obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido, con un voltaje de trabajo de 5,0 kV. Se empleó el Microscopio Electrónico, modelo FE-MIRA3 del fabricante TESCAN de República Checa, que utiliza el software MIRATC, y su número de serie es MI 1121176CU, el mismo pertenece al Centro de Estudios Avanzados (CEA).

### **Descriptores de tamaño y forma de las partículas**

Los métodos que se utilizaron para describir el tamaño y la forma de los gránulos de arena son los expuestos por (Li *et. al* 2021).

#### **Descriptores de tamaño de las partículas**

El tamaño de las partículas con formas no esféricas o irregulares puede ser descrito de múltiples maneras, incluyendo el diámetro de un círculo proyectado equivalente (EPQC) y los diámetros de Feret.

Diámetro EPQC ( $d_e$ ): Es el diámetro de un círculo de igual área a la proyección en 2D de las partículas (Figura 2-a). Desde la perspectiva granulométrica, el diámetro EPQC proporciona una buena representación del volumen de la partícula, pero no de su forma.

Diámetros de Feret ( $d_F$ ): Se refiere a la distancia entre dos tangentes paralelas a la partícula en un ángulo arbitrario (Figura 2-b). De esa manera, para cualquier partícula irregular, se puede calcular un número ilimitado de diámetros de Feret. En el caso de las partículas irregulares, el diámetro de Feret máximo ( $d_{F-max}$ ) y el diámetro de Feret mínimo ( $d_{F-min}$ ) son los mayores y menores valores resultantes de esta operación, respectivamente, correspondientes a las distancias más largas y más cortas entre dos tangentes. Consecuentemente, para cualquier partícula irregular,  $d_{F-max} > d_e > d_{F-min}$ .

#### **Descriptores de la forma de las partículas**

En ingeniería *geotécnica*, la forma de las partículas se define, tradicionalmente, en términos de redondez y relación de aspecto. Para ello existen varios descriptores que ayudan a adquirir una información más completa sobre las características del grano.

Relación de *Aspecto* ( $AR$ ): Es el descriptor morfológico de las partículas más comúnmente utilizado (Figura 2-b). Se define como la relación entre el diámetro de Feret mínimo y el diámetro de Feret máximo ( $AR = d_{F-min}/d_{F-max}$ ). Refleja las variaciones en las proporciones de la partícula. El rango de valores para la Relación de Aspecto ( $AR$ ) está entre 0,0 y 1,0; para un grano con forma simétrica (ej. círculo)  $AR = 1.0$ , mientras que para un grano con una forma muy alargada  $AR \approx 0,0$ .

Esfericidad ( $S$ ) o grado de circularidad: Cuantifica la similitud de la partícula con una esfera perfecta y se utiliza para evaluar la suavidad del perímetro del grano (Figura 2-d). Se define como la relación entre el perímetro equivalente calculado mediante el diámetro EPQC ( $d_e$ ), normalizado al perímetro real ( $P$ ). Por tanto:

$$S = 2\sqrt{\pi A_e}/P$$

Donde:  $A_e = \pi(d_e)^2/4$ ,  $d_e$  es el diámetro EPQC, y  $P$  es el perímetro real de la partícula.

Convexidad ( $Cx$ ): Describe cuán compacta es una partícula, es decir, que tan cerca se puede describir a la partícula como un casco convexo (Figura 2-c).  $Cx$ : Es la relación entre el área de la partícula proyectada ( $A$ ) y el área del perímetro mínimo que circunscribe la partícula, conocida como cáscara convexa ( $Ac$ ).

Redondez: Es uno de los descriptores más comúnmente utilizados para la clasificación de forma de las partículas. Persigue cuantificar la angularidad de las partículas, es decir, las variaciones en las esquinas (Figura 2-e).

Como consecuencia, la redondez puede variar enormemente sin afectar los otros parámetros de forma. La misma está sujeta a las técnicas computacionales empleadas en su determinación. A continuación, les presentamos dos de las definiciones más comunes en la actualidad. Redondez-DIA ( $R$ ): es la relación entre el promedio del radio de curvatura de las esquinas de la partícula y el radio del círculo mínimo circunscrito:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N r_i / N}{r_{cir}}$$

Donde:  $r_i$  es el radio de curvatura de la esquina,  $r_{cir}$  es el radio del círculo mínimo circunscrito y  $N$  es el número de esquinas.

Redondez de Wadell ( $R_u$ ): es la relación entre el promedio del radio de curvatura de las esquinas de la partícula y el radio del círculo máximo inscrito:

$$R_u = \frac{\sum_{i=1}^N r_i / N}{r_{ins}}$$

Donde:  $r_i$  es el radio de curvatura de la esquina,  $r_{ins}$  es el radio del círculo máximo inscrito y  $N$  es el número de esquinas.

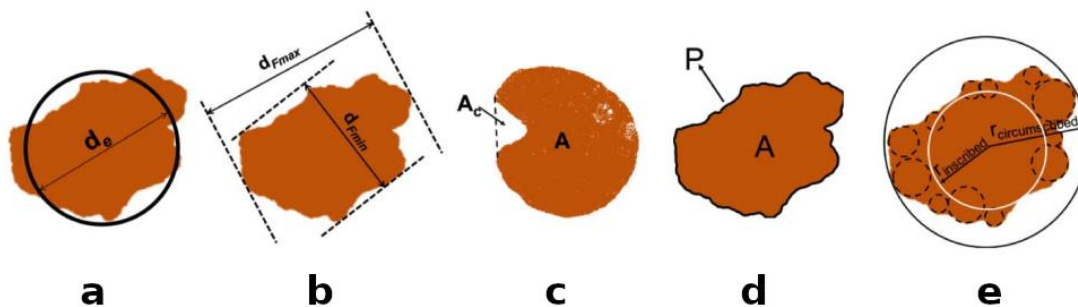


Figura 2: Representación gráfica de los descriptores de tamaño y de forma de las partículas.  
 Figure 2: Graphic representation of the size and shape descriptors of the particles.

Tabla 1: Descriptores de forma y de tamaño de las partículas.  
 Table 1: Shape and size descriptors of the particles.

Descriptor	Fórmula	Descripción
EPQC	$d_e$	Diámetro del círculo equivalente
Valores de Feret	$d_F$	Diámetros de Feret
Relación de Aspecto	$AR = \frac{d_{F-min}}{d_{F-max}}$	Relación entre el Diámetro de Feret Mínimo y el Diámetro de Feret Máximo
Esfericidad	$S = 2\sqrt{\pi A_e} / P$	Medida de la suavidad del perímetro de la forma del grano
Convexidad	$Cx = A / A_c$	Relación entre el área de la partícula y el área de la cáscara convexa
Redondez-DIA	$R = \frac{\sum_{i=1}^N r_i / N}{r_{cir}}$	Una descripción de la presencia de irregularidades
Redondez de Wadell	$R_u = \frac{\sum_{i=1}^N r_i / N}{r_{ins}}$	

**Procesamiento de las imágenes**

Para obtener los valores de los parámetros de tamaño  $d_e$ ,  $d_{F-max}$  y  $d_{F-min}$  y los descriptores de forma  $AR$  y  $S$ ; que fueron los utilizados para describir las partículas de arena, se empleó el procesamiento manual de las imágenes proporcionadas por SEM en el software libre: ImageJ 1.53.

**Distribuciones de tamaños y formas de grano**

Para el estudio de las distribuciones de tamaño y forma de los granos se utilizan diversos métodos. En la Tabla 2 se presenta el método de los momentos aritméticos según se define en (Blott *et. al* 2001). En la Tabla 3 se define la clasificación de las distribuciones según su asimetría ( $Sk$ ) y curtosis ( $K$ ).

Tabla 2: Momentos aritméticos.  
 Table 2: Arithmetic moments.

Media	Desviación Estándar	Asimetría	Curtosis
$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N}$	$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N}}$	$Sk = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^3}{N\sigma^3}$	$K = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^4}{N\sigma^4} - 3$

Tabla 3: Clasificación de las distribuciones de datos según su asimetría ( $Sk$ ) y curtosis ( $K$ ).  
 Table 3: Classification of data distributions according to their skewness ( $Sk$ ) and kurtosis ( $K$ ).

Asimetría ( $Sk$ )		Curtosis ( $K$ )	
Muy asimétrica a la izquierda	< -1,30	Muy platicúrtica	< -1,30
Asimétrica a la izquierda	-1,30 – -0,43	platicúrtica	-1,30 – -0,45
Simétrica	-0,43 – 0,43	Mesocúrtica	-0,45 – 0,70
Asimétrica a la derecha	0,43 – 1,30	Leptocúrtica	0,70 – 4,40
Muy asimétrica a la derecha	> 1,30	Muy Leptocúrtica	> 4,40

Asumir la normalidad de las distribuciones sin verificación puede ocasionar cálculos incorrectos en muchas situaciones. Debido a las innumerables desviaciones de la normalidad, se utilizaron múltiples enfoques para probar la normalidad (Khatun 2021) de las distribuciones de tamaño y forma de grano. Se emplearon las pruebas de normalidad de Pearson, Shapiro-Wilk, Kolmogórov-Smirnov con la corrección de Lilliefors, Cramer-von Mises y Anderson-Darling; para las distribuciones de tamaño y forma de los gránulos. Además, se compararon los valores de Asimetría y Curtosis obtenidos con los ideales de una distribución normal que son de cero. El procesamiento estadístico de los datos fue realizado en R.

**Clasificación de las arenas**

En Tabla 4 se refleja la clasificación de los sedimentos atendiendo al tamaño de sus granos según se define en (Friedman *et. al* 1978).

Tabla 4: Clasificación de la arena según el tamaño del grano.  
 Table 4: Classification of the sand according grain size.

Tamaño de grano (mm)	Clasificación	Sedimento
2,000 – 1,000	Muy Gruesa	Arena
1,000 – 0,500	Gruesa	
5,000 – 0,250	Media	
0,250 – 0,125	Fina	
0,125 – 0,063	Muy Fina	

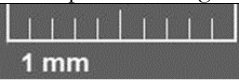




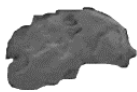
**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

**Morfología de las partículas**

La Tabla 5 muestra cinco granos representativos de las imágenes que fueron capturadas mediante SEM. En un análisis preliminar se determinó, que las partículas tienen formas alargadas, poco cóncavas y con esquinas pequeñas. Además, en las imágenes no se observaron granos con formas complejas originados de organismos biológicos marinos, lo cual es un resultado esperado, ya que las arenas negras están constituidas principalmente por minerales pesados.

Tabla 5: Datos principales de cinco granos de arena representativos.

Table 5: Main data of five representative grains of sand.

Escola					
					
$d_e$ (mm)	0,366	0,248	0,434	0,240	0,412
$d_{F-max}$ (mm)	0,521	0,302	0,808	0,377	0,559
$d_{F-min}$ (mm)	0,330	0,224	0,250	0,182	0,317
$AR$	0,634	0,742	0,309	0,483	0,568
$S$	0,846	0,953	0,751	0,831	0,808
$Cx$	0,920	0,972	0,941	0,927	0,907

**Distribuciones del tamaño de las partículas**

El tamaño de grano fue descrito utilizando los diámetros EQPC, Feret mínimo y Feret máximo. En la Figura 3 se muestra la frecuencia acumulativa para los tres descriptores. De la distancia entre las curvas de Feret máximo y Feret mínimo se dedujo la forma elongada de la mayoría de las partículas. Además, atendiendo a la clasificación de los sedimentos según el tamaño de grano las arenas estudiadas entraron en la categoría de Arenas Medias.

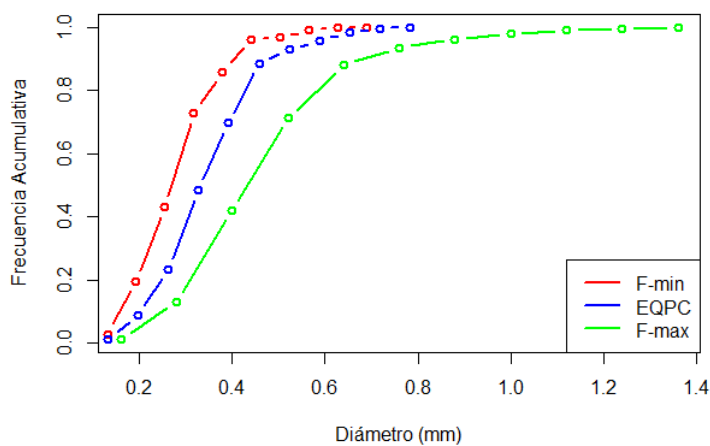


Figura 3: Frecuencia acumulativa de los descriptores de tamaño de grano.  
 Figure 3: Cumulative frequency of grain size descriptors.

En la Tabla 6 se muestran los resultados de la aplicación del método de los momentos aritméticos a las distribuciones de tamaño de grano. Atendiendo a la asimetría y curtosis se determinó que las distribuciones de diámetro EQPC, Feret máximo y Feret mínimo son asimétricas a la derecha y leptocúrticas.

Tabla 6: Momentos aritméticos de las distribuciones de tamaño de grano.

Table 6: Arithmetic moments of grain size distributions.

Descriptor	Media (mm)	Máximo (mm)	Mínimo (mm)	Desviación estándar (mm)	Asimetría	Curtosis
Diámetro EQPC	0,374	0,812	0,103	0,114	0,751	1,142
Feret Máximo	0,520	1,302	0,118	0,189	1,246	2,397
Feret Mínimo	0,307	0,630	0,101	0,093	0,736	1,004

En la Tabla 7 se muestran los resultados de las pruebas de normalidad para las distribuciones de tamaño de grano. Tomando un nivel de aceptación  $\alpha = 0,05$  la mayoría de las pruebas de normalidad rechazaron la hipótesis de que las distribuciones de diámetro EQPC y Feret mínimo sigan una distribución normal, y para el diámetro Feret máximo todas las rechazaron.

Tabla 7: Pruebas de normalidad para las distribuciones de tamaño de grano.

Table 7: Normality tests for grain size distributions.

Test de normalidad \ p-valor	$d_e$	$d_{F-max}$	$d_{F-min}$
Pearson	0,162	$6,917 \cdot 10^{-4}$	0,155
Shapiro-Wilk	$2,104 \cdot 10^{-4}$	$2,336 \cdot 10^{-8}$	$2,384 \cdot 10^{-4}$
Lilliefors	0,133	$1,371 \cdot 10^{-5}$	0,006
Cramer-von Mises	0,018	$4,233 \cdot 10^{-6}$	0,007
Anderson-Darling	0,002	$4,064 \cdot 10^{-8}$	0,003

### **Distribuciones de los parámetros de forma de las partículas**

La forma de grano fue descrita utilizando la Esfericidad ( $S$ ) y la Relación de Aspecto ( $AR$ ) y la convexidad. En la Figura 4 se muestra la frecuencia acumulativa para los tres descriptores. Alrededor 80 % de las partículas tuvieron valores de Relación de Aspecto ( $AR$ ) entre 0,5 y 0,7; más del 80 % de las partículas tuvo valores de Esfericidad ( $S$ ) entre 0,8 y 0,95 y más del 90% de los gránulos tuvieron valores de Convexidad ( $C_x$ ) entre 0,80 y 0,97.

En la Tabla 8 se muestran los resultados en la aplicación del método de los momentos aritméticos a las distribuciones de forma de grano. Atendiendo a la asimetría y curtosis se determinó que la distribución de Relación de Aspecto ( $AR$ ) es simétrica y ligeramente platicúrtica. Se determinó que la distribución de Esfericidad ( $S$ ) es asimétrica a la izquierda y leptocúrtica, y que la distribución de Convexidad ( $C_x$ ) es asimétrica a la izquierda y muy leptocúrtica.



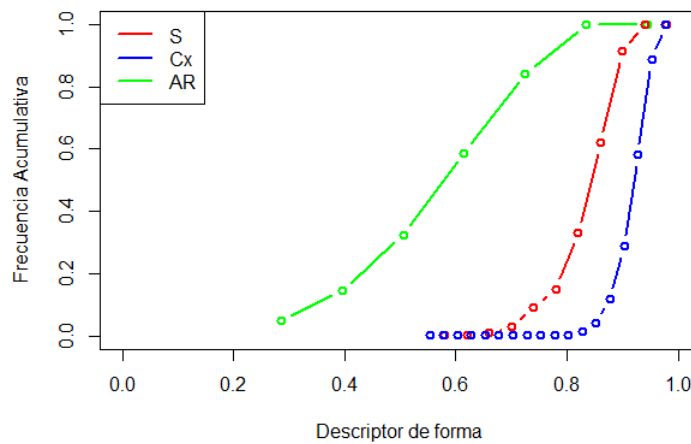


Figura 4: Frecuencia acumulativa de los descriptores de forma de grano de arena.  
 Figure 4: Cumulative frequency of sand grain shape descriptors.

Tabla 8: Momentos aritméticos de las distribuciones de forma de grano.  
 Table 8: Arithmetic moments of grain shape distributions.

Descriptor	Media	Máximo	Mínimo	Desviación estándar	Asimetría	Curtosis
Relación de Aspecto	0,620	0,882	0,241	0,150	-0,454	-0,527
Esfericidad	0,854	0,954	0,569	0,061	-1,199	2,213
Convexidad	0,923	0,987	0,545	0,042	-4,350	36,244

El valor medio de la Relación de Aspecto confirmó la suposición, hecha al analizar la Figura 3, de que las partículas en su mayoría tienen formas elongadas. Esto se puede interpretar como que el ancho de la partícula es aproximadamente 2/3 de su largo. La distribución de densidades de la Esfericidad y su valor medio, reflejaron que la mayoría de los granos de arena poseen formas simples y con esquinas pequeñas y redondeadas. Además del valor medio de la Convexidad ( $C_x$ ) y su distribución reflejaron que las partículas poseen pocas concavidades. Esto significa que el proceso de transporte desde la fuente de sedimentos hasta el depósito (playa) es de alta energía.

En la Tabla 9 se muestran los resultados de las pruebas de normalidad para las distribuciones de forma de grano. Tomando un nivel de aceptación  $\alpha = 0,05$  todas las pruebas rechazaron la hipótesis de que las distribuciones de Esfericidad y Convexidad sigan una distribución normal, y para la Relación de Aspecto la mayoría de las pruebas rechazó la normalidad.

Tabla 9: Pruebas de normalidad para las distribuciones de forma de grano.  
 Table 9: Normality tests for grain shape distributions.

Test de normalidad \ p-valor	AR	S	$C_x$
Pearson	0,035	0,003	$8,264 \cdot 10^{-5}$
Shapiro-Wilk	$4,496 \cdot 10^{-4}$	$4,218 \cdot 10^{-8}$	$2,200 \cdot 10^{-16}$
Lilliefors	0,076	$6,772 \cdot 10^{-4}$	$2,643 \cdot 10^{-6}$
Cramer-von Mises	0,005	$3,280 \cdot 10^{-6}$	$7,643 \cdot 10^{-9}$
Anderson-Darling	0,001	$6,465 \cdot 10^{-8}$	$1,157 \cdot 10^{-13}$

Tabla 10: Parámetros de las distribuciones de partículas ajustadas a la familia de funciones de Johnson.  
 Table 10: Parameters of particle distributions fitted to the Johnson family functions.

Parámetros \ Descriptor	Relación de Aspecto	Esfericidad	Convexidad
$\gamma$	-0,552	0,000	0,000
$\delta$	0,908	-2,152	-3,249
$\xi$	0,179	0,984	1,032
$\lambda$	0,714	-0,117	-0,098

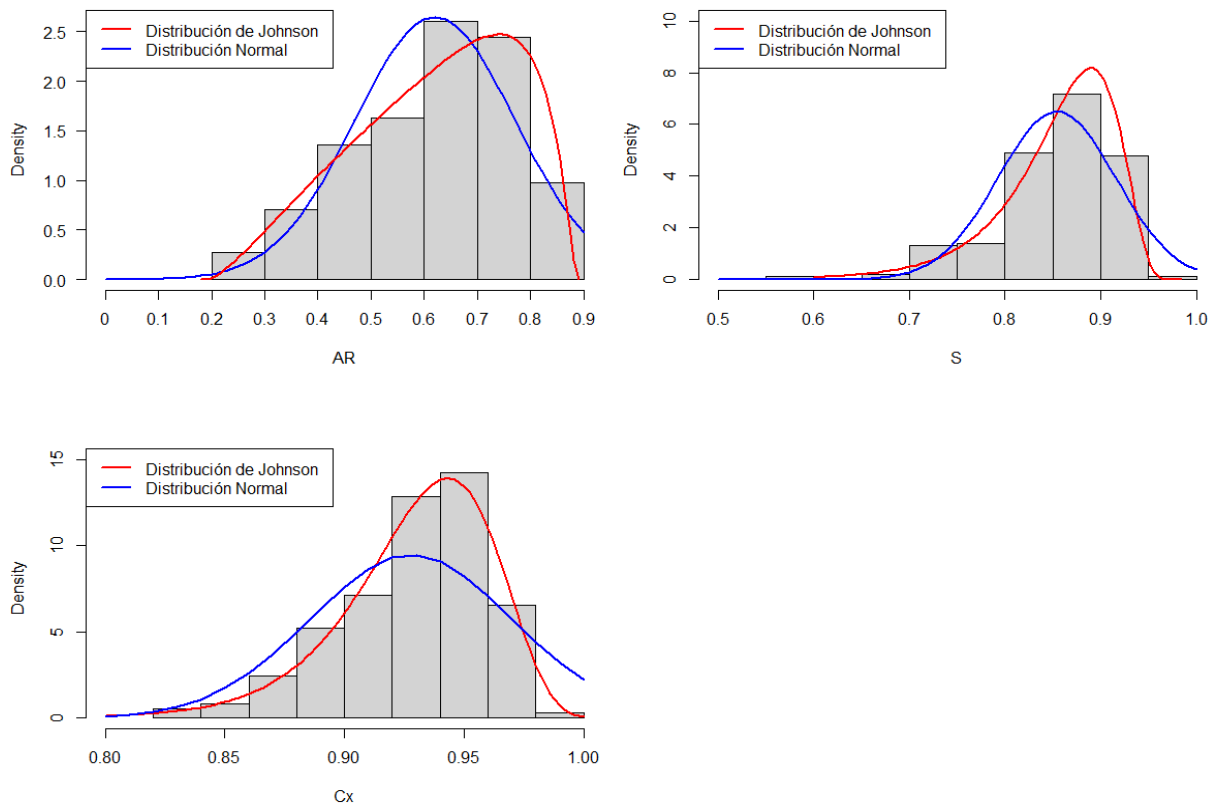


Figura 5: Comparación entre las distribuciones normal y de Johnson para los descriptores de forma.  
 Figure 5: Comparison between normal and Johnson distributions for shape descriptors.

Para una mejor descripción de las distribuciones de forma de utilizó la familia de distribuciones de Johnson planteada por (Johnson 1949) como se muestra en la Figura 5. Los valores de los parámetros gamma ( $\gamma$ ), xi ( $\xi$ ), lambda ( $\lambda$ ) y delta ( $\delta$ ) fueron calculados mediante el método de los cuantiles utilizando "R" como se muestra en la Tabla 10. Las distribuciones de Esfericidad y Convexidad de ajustan a la función de Johnson de tipo:  $z = \gamma + \delta \log\left(\frac{x-\xi}{\lambda}\right)$  y la distribución de Relación de Aspecto se ajusta a la función de Johnson del tipo  $z = \gamma + \delta \log\left(\frac{x-\xi}{\lambda\left(1-\frac{x-\xi}{\lambda}\right)}\right)$ .

## CONCLUSIONES

Los estudios granulométricos que fueron realizados sobre el tamaño y la forma de los granulos de las arenas negras de Playa Bibijagua, mediante el análisis digital de imágenes obtenidas por SEM, nos permitieron arribar a las siguientes conclusiones:

- Las distribuciones de tamaño de grano de las arenas negras de la playa Bibijagua fueron evaluadas utilizando el diámetro equivalente EQPC y los diámetros de Feret máximo y mínimo. Dichas distribuciones son

asimétricas a la derecha y leptocúrticas. Además, no se puede asumir la normalidad de ninguna de las distribuciones.

- Las arenas negras de Playa Bibijagua se clasifican como Arenas Medias, ya que el diámetro de los granos se encuentra entre 0,500 mm y 0,250 mm.
- Las distribuciones de forma de grano de las arenas de Bibijagua fueron evaluadas mediante la Relación de Aspecto, Esfericidad y Convexidad.
  - La distribución de densidades de (AR) es simétrica y platicúrtica; su valor medio refleja que las partículas tienden a tener formas ligeramente elongadas.
  - La distribución de densidades de (S) es asimétrica a la izquierda y leptocúrtica; su valor medio refleja la suavidad del perímetro real de las partículas, descartando a las fuentes biogénicas como repositorios de sedimentos.
  - La distribución de densidades de (Cx) es muy asimétrica a la izquierda y muy leptocúrtica; su valor medio refleja que los gránulos son en su mayoría convexos.
- La familia de distribuciones de Johnson provee un mejor ajuste a las distribuciones de forma de grano que la distribución normal.

#### ÉTICA Y CONFLICTO DE INTERESES

Las personas autores del manuscrito en cuestión, declaran que han cumplido totalmente con todos los requisitos éticos y legales pertinentes, tanto durante el estudio como en la producción del manuscrito; que no hay conflictos de intereses de ningún tipo; que todas las fuentes financieras que se mencionan completa y claramente en la sección de agradecimientos; y que están totalmente de acuerdo con la versión final editada del artículo.

#### REFERENCIAS

- Aboelkhair H. y Zaaeimah M. (2013). Potential of Natural Gamma-Ray Spectrometry for Mapping and Environmental Monitoring of Black-Sand Beach Deposits on The Northern Coast of Sinai, Egypt. *Radiation Protection Dosimetry*. 154 (1):81-94.
- Blott Simon J. y Pye Kenneth (2001). *Gradistat: A Grain Size Distribution and Statistics Package for the Analysis of Unconsolidated Sediments*. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1237-1248.
- ImageJ. 2021. Disponible en: <https://imagej.nih.gov/ij/index.html>
- Fares S. (2017) Measurements of natural radioactivity level in black sand and sediment samples of the Tamsah Lake beach in Suez Canal region in Egypt. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. 10(3):194-203.
- Friedman, G. M., y Sanders, J. E. (1978). *Principles of sedimentology*. Wiley.
- García Batlle M., Navarrete Tejero J. M., Golzarri J.I. y Espinoza G. (2018). *The radiochemical and chemical characterization of marine sediments taken up from Cuba's northern and southern littoral*. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 316:765–774.

- Gomez-Pujol L., Roig-Munar F., Fornós J., Balaguer P. y Mateu J. (2013). Provenance related characteristics of beach sediments around the island of Menorca, Balearic Islands (western Mediterranean). *Geo-Marine Letter.* 33:195-208.
- Johnson, N.L. (1949). *Systems of frequency curves generated by methods of translation.* *Biometrika*, 36. 149-176.
- Khatun, N. (2021). *Applications of normality test in statistical analysis.* *Open Journal of Statistics*, 11(01), 113.
- Li L., Beemer P. y Iskander M. (2021). Granulometry of Two Marine Calcareous Sands. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 147(3). DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943- 5606.0002431.
- Madhavaraju J., Armstrong-Altrin J. S., Pillai R. B. y Pi-Puig T. (2020). *Geochemistry of sands from the Huatabampo and Altata beaches, Gulf of California, Mexico.* *Geological Journal.* 1–20. DOI: 10.1002/gj.3864.
- Moretti M., Tropeano M., van Loon A.J., Acquafredda P., Baldacconi R., Festa V., Lisco S., Mastronuzzi G., Moretti V. y Scotti R. (2016). Texture and composition of the Rosa Marina beach sands (Adriatic coast, southern Italy): a sedimentological/ecological approach. *Geologos.* 22(2):87-103.
- Smith, Molly Elizabeth. Combining Traditional and Image Analysis Techniques for Unconsolidated Exposed Terrigenous Beach Sand Characterization. (2020). Tesis Doctoral. Florida Atlantic University.
- Zhou W., Apkarian R. P., Wang Z. L., y Joy D. (2006). *Fundamentals of Scanning Electron Microscopy* En: Zhou W, Wang Z.L. (eds) *Scanning Microscopy for Nanotechnology.* Springer, New York, 2007.