

# **INFLUENCIA DE LOS PROCESOS COSTEROS EN LAS CARACTERÍSTICAS GRANULOMÉTRICAS DE LOS SEDIMENTOS**

Influence of coastal processes on grain-size features of sediments

Luís Parente Maia <sup>1</sup>, José A. Jimenéz <sup>2</sup> e Jordi Serra Raventos <sup>3</sup>

## **RESUMEN**

El presente artículo analiza las variaciones longitudinales y transversales de las características granulométricas de los sedimentos en la región costera de Fortaleza (NE-Brazil). El análisis comprende la caracterización de la zona costera y la identificación, caracterización y cuantificación de los agentes impulsores y la respuesta del sistema costero asociado. En relación con la influencia de los procesos costeros en la granulometría de los sedimentos de las playas, se observa que en el litoral noroeste y en algunos puntos del sudeste, el tamaño del grano es proporcional a la energía transmitida por el oleaje. Para el resto de zonas, la granulometría viene asociada a factores locales como la presencia de discontinuidades morfológicas. Las tendencias granocrecientes negativas estarían asociadas a las barreras formadas por los promontorios, desembocaduras y espigones. La tendencia inversa se encuentra en presencia de beach-rocks, cuya influencia domina sobre la del resto de estructuras. La variación temporal de las características texturales de los sedimentos muestra una correlación directa con el clima de oleaje y puede ser encuadrada en cinco etapas distintas: sedimentos unimodales con predominio de partículas finas; sedimentos bimodales con el pico mayor centrado en los finos; sedimentos bimodales con dos picos equivalentes; sedimentos bimodales con el pico mayor centrado en las partículas gruesas; sedimentos unimodales con predominio de partículas gruesas. Las únicas fuentes posibles de material para la deriva litoral son los sedimentos del perfil de playa, incluyendo la berma y el material proveniente de la erosión de la Formación Barreiras. La aportación directa de material desde el zócalo y la plataforma es muy poco probable debido a la baja capacidad de transporte de los cauces principales y a la dirección del transporte transversal que se produce principalmente hacia mar.

**Palabras-claves:** sedimentos, granulometría, morfodinámica costera, clima de oleaje.

## **ABSTRACT**

In this work, field observations of changes on the beach sediment characteristics (considering the whole grain size distribution) of Fortaleza City, Brazil are presented. The studied area is a sandy-rich environment with very well developed dune fields (heights up to 50 m) and long, straight beaches. It is a mesotidal environment (tidal range up to 3.2 m) and it is subjected to the persistent action of eastern waves. This dominant wave climate generates a very intense longshore sediment transport directed towards the NW (potential transport capacity of about 800,000 m<sup>3</sup>.yr<sup>-1</sup>). Field data obtained show a time variation in the sediment grain size parameters (e.g. mean, standard deviation) as well as in the shape of the distribution, i.e. cyclic changes from unimodal to bimodal distributions and vice versa. These changes are related not only to the winnowing of finer fractions but also to a surplus of coarser fractions not previously detected. Moreover, the described changes are not constant across the profile neither in the alongshore direction. Samples taken at different locations (vertically with respect to the MWL as well as alongshore) show a specific behaviour that can be related to beach profile changes (generation of swash bars under high energy waves and subsequent welding during mild conditions), which are of great interest to understand and to model coastal morphodynamics. Thus, most of the time when a morphodynamic model is used, uniform sediment characteristics are assumed. In some cases, spatial variations in the sediment characteristics are considered but as a general rule, the sediment distribution is assumed steady. Due to this, the analysed processes can be used as a field validation case for models considering the concept of "sediment mixtures", i.e. non-uniform sediment.

**Key words:** sediments, granulometry, coastal morphodynamics, wave climate.

<sup>1</sup> Professor Adjunto, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Fortaleza, Ceará, Brasil.

<sup>2</sup> Professor Associado, Laboratori d'Enginyeria Marítima, ETSECCPB, Universitat Politècnica de Catalunya, c/Jordi Girona 1-3, Campus Nord, 08034 Barcelona, Espanha. jimenez@etseccpb.upc.es

<sup>3</sup> Professor, Departamento de Geologia, Universitat de Barcelona, Espanha.

## INTRODUCCIÓN

Las características y distribución del material en la zona costera son el principal condicionante para la determinación de los procesos costeros, siendo su conocimiento necesario para la definición de cualquier tipo de intervención futura. Entre las características principales de los materiales de las formaciones costeras, destaca el tamaño de grano, su composición y otras propiedades físicas, que constituirán la fuente primaria de material para la línea costera, sea a través de la aportación fluvial o por la erosión directa de los afloramientos costeros (Inman, 1949). La fuente primaria da lugar con el tiempo, a la formación de playas, dunas y otros tipos de depósitos costeros, que pueden, en función de la evolución de los procesos, constituir fuentes secundarias de material para la zona costera, generando un proceso de autofagia (*feedback*).

La distribución espacial de las formaciones influirá en las características generales de la morfología costera (promontorios), y sobre el patrón de distribución sedimentaria, siendo el estudio de su evolución en el tiempo, a través del registro geológico, fundamental para comprender las relaciones entre la magnitud e importancia de los diferentes procesos y las posibles respuestas de la costa. Hay que resaltar que, una vez conocida la evolución del sistema bajo diferentes escalas de tiempo, se pueden determinar los factores de mayor influencia y delimitar las zonas de mayor vulnerabilidad y, en caso necesario, definir el tipo de intervención más apropiada para cada sector.

Los procesos costeros son responsables del estadio evolutivo en que se encuentran las unidades fisiográficas de la zona costera, luego es previsible que su efecto se extienda a los sedimentos de las playas, ya que las variaciones en el tiempo y el espacio de las características granulométricas de los sedimentos del perfil litoral está en función de los cambios naturales de las playas y zona de *surf*, debido a los cambios del clima de oleaje y/o de las condiciones ambientales

(Johnson, 1952). Las variaciones temporales y espaciales pueden ser de gran magnitud, incluyendo diferencias en la morfología deposicional (perfiles), el comportamiento hidrodinámico y los procesos de redistribución de los sedimentos, que alteran los movimientos de avance y retroceso de la línea de playa y barras asociadas (Kato & Yanagishima, 1995).

## ENCUADRE GEOLÓGICO

El origen de la llanura costera de la región en estudio está asociada directamente con las fluctuaciones del nivel relativo del mar durante el cuaternario, ya que estas variaciones controlaron la distribución del aporte de arenas, la posición e

intensidad de la deriva litoral, como consecuencia del nivel de erosión/deposición y, finalmente, la disponibilidad de material para la formación de los depósitos eólicos (Maia, 1998).

La llanura arenosa litoral es relativamente estrecha, variando entre 1.000 y 3.000 m, pudiendo diferenciarse la presencia de varios rasgos morfológicos. Las principales unidades con relación a su participación espacial son las playas actuales, las terrazas marinas holocenas y las sucesivas generaciones de dunas. En segundo lugar, debemos considerar los depósitos asociados a los cauces fluviales y los *beachrocks*.

Las terrazas marinas consisten en depósitos y superficies de playa formados durante el ciclo regresivo posterior a la última transgresión (5.100 años). Están formados por arenas en las que predomina la fracción de arena media, con granos subredondeados pulidos y esfericidad media entre 0,55 y 0,60. Presentan una distribución paralela a la costa, con anchura variable entre 400 y 800 m. Las mayores formaciones de este tipo están presentes en las llanuras costeras con ausencia de dunas actuales y, en este caso, están limitadas hacia el continente por los paleoacantilados de la Formación Barreiras.

A lo largo de la costa del estado de Ceará están presentes varias generaciones de dunas y, aunque sea bastante difícil determinar si fueron construidas en uno o varios episodios de formación, se pueden diferenciar en función de una serie de variables: la forma, el nivel de alteración (color), su grado de cementación y el tipo de vegetación. A partir de las relaciones estratigráficas se han diferenciado hasta tres generaciones de dunas y, en algunos puntos, principalmente en el litoral oeste, la presencia de una cuarta generación (Maia *et al.*, 1999).

La zona de la desembocadura de los principales cauces fluviales está influida por las interacciones entre las fluctuaciones de las mareas y el flujo fluvial, que controlan la presencia de una serie de depósitos característicos de estos medios, siendo los más destacados los depósitos de manglares que forman la llanura de inundación, las barras de desembocadura y los *beachrocks*, en la zona de dominio de las mareas, además de los depósitos aluviales, barras y depósitos marginales en la zona de dominio fluvial.

El canal principal de los ríos presenta un patrón meandriforme, con la región de la desembocadura controlada por la migración de las dunas. Los sedimentos de fondo están formados por arenas cuarzosas, con tamaño variable entre arenas finas en las regiones más internas a arenas groseras con elevado contenido de conchas en la región de la desembocadura y que comprueba el aporte de material marino hacia el interior del estuario. Durante el periodo de mayor pluviosidad, cuando aumenta la capacidad de

transporte, se puede observar la presencia de bloques fangosos originados por la erosión de los márgenes y el transporte de la vegetación.

## CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS

La característica de los vientos en la región nordeste del Brasil es la presencia de un fuerte ciclo estacional definido por un periodo anual. Los vientos son controlados por el movimiento de la zona de convergencia intertropical (ZCIT), que emigra meridionalmente con las estaciones. Normalmente, la ZCIT migra estacionalmente de su posición más al norte, en el Atlántico, hacia posiciones más al sur durante el verano en el Hemisferio Sur. Los vientos alisios del sudeste son más intensos cuando la ZCIT esta al norte (agosto a octubre), disminuyendo progresivamente con su migración hacia el ecuador, hasta alcanzar los mínimos valores anuales durante los meses de marzo y abril, cuando los vientos de sudeste son más flojos.

La velocidad media del viento para el periodo de 1993-1996 ha variado entre 4,6 y 8,1 m.s<sup>-1</sup>, con los menores valores ocurriendo en el periodo de febrero a mayo y los mayores de agosto a noviembre. La dirección principal de aproximación es ESE, apareciendo secundariamente las direcciones SSE, E y ENE.

El régimen de pluviosidad de la región se puede definir como de tipo tropical con estación de lluvias concentradas en cuatro meses consecutivos y con un ciclo de variación anual. Generalmente la estación lluviosa empieza en el mes de febrero, con un máximo en el mes de marzo, el resto del año disminuye progresivamente, hasta alcanzar los valores mínimos en los meses de septiembre a noviembre. La precipitación media anual se sitúa en 1.440 mm, pudiendo observarse meses con valores máximos de hasta 765 mm (marzo/86). El primer semestre acumula el 93% del total de la precipitación anual.

Según Maia *et al.* (1998) el clima de oleaje es caracterizado por una altura significativa Hs con frecuencia relativa de 33% para valores entre 1.0 y 1.1 m. El periodo medio Tz, presenta una frecuencia relativa del 65% para valores entre 5 y 6 segundos. El histograma de las direcciones D de las olas presenta una concentración de frecuencia de 95% entre las direcciones 75° y 105°. El ancho espectral presento concentraciones de frecuencia relativa de 88% mayor que 0.6 y menor que 1, caracterizando las olas como del tipo sea. El diagrama de dispersión entre Hs y Tz presenta una frecuencia de 92% para los periodos entre 4 y 6 segundos y 70% para Hs entre 0.9 y 1.3 m. La probabilidad conjunta mas frecuente fue de 8.37%, correspondiendo a un periodo de 5s y altura significativa de 1.1 m.

La región es caracterizada por mesomareas del tipo semi-diurnas con amplitudes desiguales (pleamar

1.7 m y cuadratura 3m) presentando periodo de 12.4 horas y nivel medio de 1.55 m. Las mareas tienen un rango máximo de 3.2 m con media de 2.8 m, aun que lo mayor valor observado llega a 3.87 m. Los menores valores son de (-0.2 m).

Las corrientes costeras presentan dos componentes importantes. La principal es en la dirección de los vientos dominantes con resultantes orientadas en la dirección noroeste. La segunda componente es causada por los movimientos de mareas y que son mejores observadas en la región de las bahías y en mayores profundidades. En la región cercana a la costa la corriente varia en el periodo de estiaje entre 0,22 y 0,68 m.s<sup>-1</sup>, con valor medio de 0,34 m.s<sup>-1</sup>, mientras que en el periodo de lluvias la velocidad media es ligeramente inferior 0,25 m.s<sup>-1</sup> y presenta un mayor rango de variación (0,08 a 0,58 m.s<sup>-1</sup>).

## RESULTADOS

### Variaciones longitudinales

El estudio de las características granulométricas fue realizada a lo largo de la región metropolitana de Fortaleza (Figura 1), junto a las observaciones de campo de los estados de la playa se recogieron muestras de los sedimentos superficiales en perfiles transversales a la playa, desde el sistema de barra/surco sumergido hacia el continente, hasta las dunas o acantilados de la Formación Barreiras.

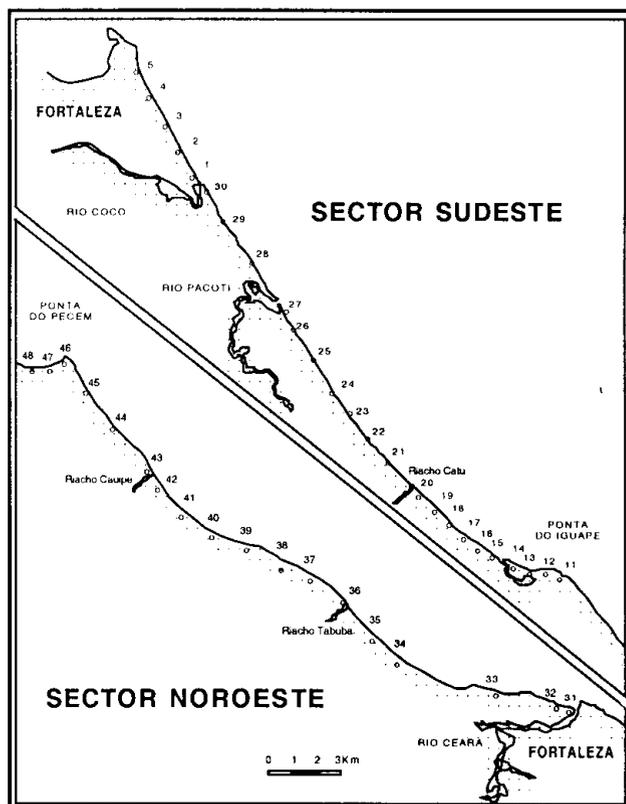


Figura 1 - Localización de los perfiles de playa.

Los sedimentos de las playas reflejan las características de la hidrodinámica local. En ellas domina la arena media, predominantemente cuarzosa, con granos subredondeados pulidos y de esfericidad media entre 0,55 y 0,60. Se observa que las características granulométricas presentan modificaciones espaciales y temporales, con el diámetro medio variando de arenas gruesas a arenas muy finas.

El coeficiente de selección presenta poca variación, estando presentes en mayor proporción las arenas moderadamente seleccionadas y en algunos puntos específicos las arenas bien seleccionadas. Un factor interesante es la variación del grado de selección entre los diferentes niveles de la superficie de playa, que aumenta hacia el continente, debido a una menor diferencia de energía de la marea o a la influencia del transporte eólico, que es un agente de selección más eficaz.

Los componentes secundarios de las arenas de las playas están formados por fragmentos de conchas y minerales pesados. El contenido de carbonato de calcio se sitúa entre 1 y 5%, con un valor medio de 2,5%, y una variación influenciada por los parámetros oceanográficos, ya que su contenido es proporcional a la presencia de material más fino. El carbonato proviene de las conchas y algas calcáreas, presentes en la plataforma continental. Estos componentes por presentar una menor resistencia al desgaste, se degradan hasta formar partículas finas tamaño limo/arcilla, que son incorporadas a la deriva litoral y transportadas en suspensión hasta su deposición en regiones abrigadas o de menor energía, o hasta su exportación hacia la zona del talud.

Los contenidos de minerales pesados varían entre 4 y 10%, con predominio de la ilmenita a lo largo de toda la costa, con un porcentaje relativo medio de un 40 %. La asociación de minerales pesados predominante es Ilmenita-Hornblenda-Epidota. La ilmenita tiene su origen asociado a las rocas ultrabásicas y gneises, la hornblenda a rocas ácidas (granitos) y la epidota a rocas eruptivas ricas en elementos ferromagnésicos. La asociación de minerales pesados dominante en los sedimentos de playa indica que el origen del material está relacionado directa o indirectamente con las rocas del zócalo, o con la Formación Barreiras, ya que la Formación Barreiras también consiste en material procedente de la erosión del zócalo.

La distribución de los parámetros granulométricos (mediana y desviación estándar) para las muestras de la zona de *swash* en los dos sectores en estudio se presenta en la (Figura 2). Los sedimentos del sector sudeste, incluyendo las zonas de las desembocaduras y el espigón de retención de sedimentos del final de la playa del Futuro, muestran un predominio de la fracción arena media, con presencia de arenas finas aguas abajo de la punta de Iguape y aguas arriba de la desembocadura del río Pacoti y del espigón de retención de la playa del Futuro (perfiles 12, 27 y 5). Las arenas gruesas se encuentran antes de la punta de Iguape y delante de las desembocaduras del riachuelo Catu y del río Coco.

La distribución del tamaño de grano presenta dos secuencias bien definidas, marcadas inicialmente por una granocrecencia, seguida de una tendencia decreciente. La primera se inicia después de la punta

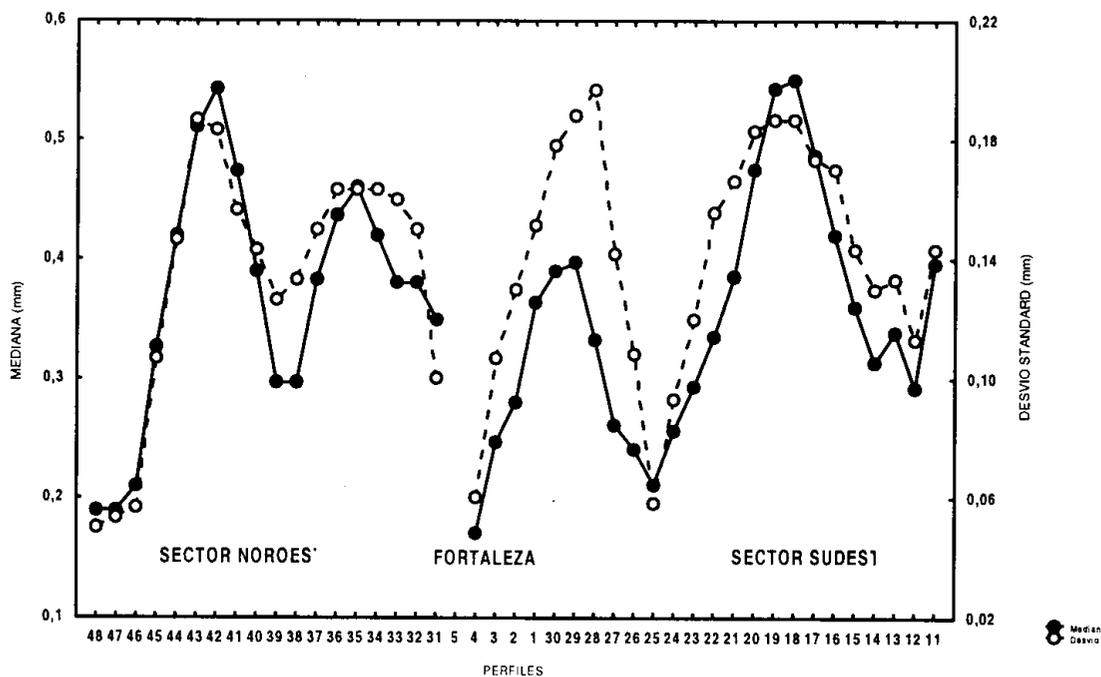


Figura 2 - Distribución de los valores de D50 y desviación estándar para la zona de *swash* de los perfiles de recogida de muestras.

de Iguape, creciendo hasta el riachuelo Catu (perfil 20) y disminuyendo hasta la desembocadura del río Pacoti. Pasado el río empieza la segunda secuencia, que crece hasta el río Coco y disminuye hacia el espigón al final de la playa del Futuro.

En el sector noroeste también predomina la fracción arena media, con arenas gruesas delante de los riachuelos Tabuba y Cauipe, y arenas finas en la zona cercana a la punta de Pecem. Este sector, como el anterior, presenta dos secuencias de distribución: la primera tendencia granocreciente empieza en la desembocadura del río Ceara, crece hasta el riachuelo de Tabuba y disminuye hasta el perfil 38-39. A partir de estos perfiles la granulometría crece hasta el riachuelo Cauipe y decrece hacia la punta de Pecem.

La variación del desvío estándar (grado de selección) de los sedimentos muestra una estrecha relación con el diámetro medio. El coeficiente de correlación es de 0,86, indicando que cuanto mayor es el tamaño del sedimento, mayor es el desvío y menor el grado de selección. Las arenas bien seleccionadas aparecen aguas abajo de la punta de Iguape (perfil 12); aguas arriba de la desembocadura del río Pacoti (25, 26, 27) y del espigón de la playa del Futuro (5); y en las inmediaciones de la punta de Pecém (45, 46, 47, 48). Las clasificaciones más bajas se encuentran en los picos de arena gruesa y corresponden al perfil 11 antes de la punta del Iguape, la desembocadura del riachuelo Catu (20), la desembocadura del río Coco (30), el riachuelo Tabuba (36) y la desembocadura del riachuelo Cauipe (43).

La distribución de los valores de asimetría presenta un amplio espectro de variación y no presenta una relación bien marcada con la mediana. El valor del coeficiente de correlación (-0,59), estadísticamente aceptable, a efectos de comparación es muy bajo ( $R^2 = 0,35$ ). Los valores extremos se encuentran entre asimetrías negativas (-0,43), que en el sistema utilizado (Culter 100) corresponde a un exceso de la fracción fina, y asimetrías positivas (1,43), con mayor concentración de materiales gruesos. Los valores más bajos de asimetría corresponden a las arenas con las mayores medianas, lo que no significa que tenga partículas finas y sí que los valores más frecuentes (moda) son inferiores a la media, pero siempre dentro del campo de arenas medias a medias gruesas. La mayor parte de las muestras presentan asimetría positiva, indicando que en la zona de *swash* predominan las distribuciones con exceso de material grueso.

Las variaciones en la textura del sedimento a lo largo de una dirección de transporte están directamente asociadas a la energía del medio y a la resultante de los procesos actuantes (erosión, transporte y deposición) sobre el sedimento local. Según Russel (1939), estos dos factores, actuando conjuntamente, pueden generar dos tipos de selección: una

progresiva, que consiste en la selección en la dirección del transporte, y una local, que incluye la selección de los sedimentos en una unidad particular. Utilizando estos tipos de selección, se han propuesto varias explicaciones para relacionar el tamaño del grano y el tipo de selección, como por ejemplo (McLaren, 1981; McLaren y Bowles, 1985), que propone un método para derivar el esquema de transporte en función de la distribución longitudinal del D50.

La energía inducida por el oleaje a lo largo del litoral viene determinada por la altura de la ola en la zona de rompiente, y la tasa con que esta energía es transmitida hacia la playa ( $P_{pb}$ ) depende de la dirección de avance de la ola o ángulo con la zona de rotura. Para una misma altura de ola en aguas profundas, la altura y dirección del oleaje en la zona de rompiente vendrán determinadas por los cambios sufridos durante su propagación y, en consecuencia, de la batimetría existente.

En el caso de la zona estudiada, que presenta un amplio rango para las alturas de la ola en la zona de rompiente (0,1 a 1 m), determinado por las variaciones en la orientación de la playa ( $265^\circ$  a  $331^\circ$  az) y de la pendiente (1: 40 a 1:500). La altura del oleaje en la zona de rompiente fue estimada utilizando el programa Mike21 y comprobada por observaciones visuales. La orientación de la playa y la pendiente fueron determinadas por mediciones de campo y utilizando cartas batimétricas.

El análisis entre el flujo de energía transmitida, calculado para las condiciones medias del oleaje ( $H_s=1,1m$ ;  $T = 5s$ ;  $D=90^\circ$ ) por medio de la ecuación general del flujo de energía (CERC, 1984), y el D50 muestra que en el litoral noroeste y en algunos segmentos del litoral sudeste, el tamaño del sedimento es proporcional a la energía, es decir, que la presencia de arenas gruesas en las zonas de alta energía debido a la mayor capacidad de transporte de las partículas menores, y arenas más finas en las zonas con disminución de la energía, donde se depositan las partículas en transporte.

Así, se observa que las arenas finas están asociadas a las zonas protegidas del oleaje, como es el caso de las zonas aguas abajo de las puntas de Iguape y Pecem (perfiles 13 y 46-48) y antes del espigón de contención de la playa del Futuro (perfil 5). Las arenas gruesas están asociadas a las zonas de mayor energía de los dos sectores, que corresponden a los perfiles 19-20 en el litoral este y 42-43 en el oeste (Figura 3). Este tipo de comportamiento ha sido observado en otras costas, como en el delta del Ebro (Guillén & Jimenez, 1995).

La distribución de energía no presenta ninguna tendencia significativa en el sector sudeste, aunque se puedan diferenciar dos niveles distintos: el primero, de baja energía, empieza en el perfil 12 y sigue hasta el perfil 15, y el segundo, con alta energía, comprende el

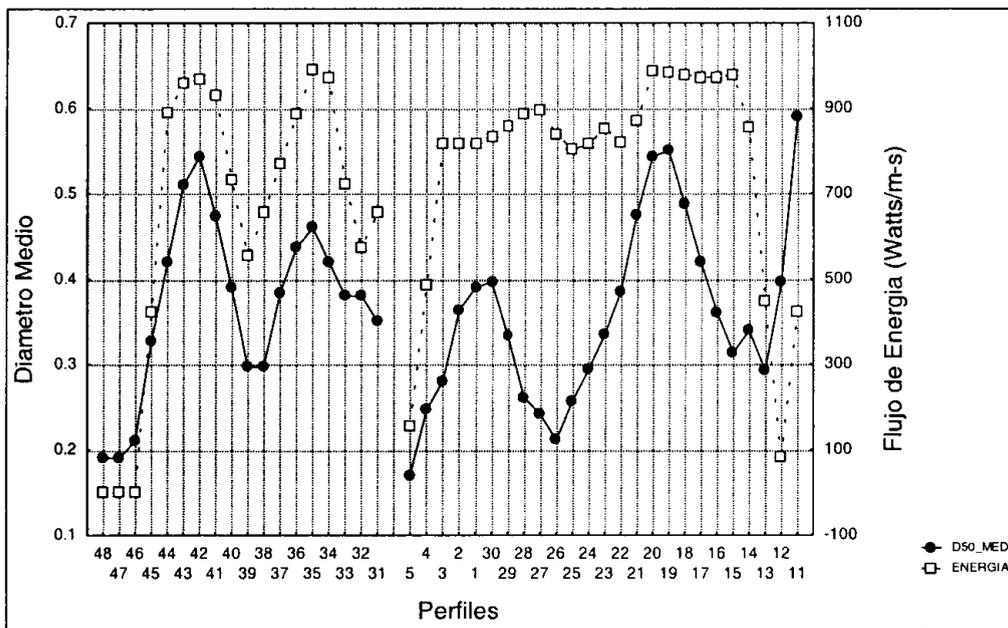


Figura 3 - Relación entre la energía transmitida a playa por el oleaje y el diámetro medio de los sedimentos de la zona de *swash*.

*inlets* de las lagunas costeras formadas por el cierre de la desembocadura de los riachuelos por la deriva litoral y/o migración de las dunas (Catu, Tabuba y Cauipe), puntas rocosas (Iguaape, Mucuripe y Pecém), inflexiones de la línea de costa en función de una morfología relictica y la presencia de franjas de *beachrocks*, y como discontinuidad artificial tenemos la barrera formada por los espigones (Figura 4). La relación entre el tipo de discontinuidad y el tamaño del grano se discute a continuación:

sector que va del perfil 16 al 4. A pesar de que el sector sudeste presenta una distribución longitudinalmente cuasi-uniforme de energía, por ser un tramo rectilíneo con características morfológicas semejantes, se observan variaciones significativas del D50 que deben ser originadas por otros factores de carácter local. Las variaciones de las características texturales de los sedimentos también pueden estar asociadas a cambios longitudinales debidos a modificaciones del flujo en presencia de obstáculos, discontinuidades o la existencia de varias celdas litorales de transporte (Stone *et al.*, 1992).

En el sector noroeste se observa una relación directa entre la energía y el diámetro, con las dos curvas presentando la misma forma y concordancia entre los picos, que define un coeficiente de correlación entre los puntos de este sector de (0,88) que confirma esta relación. De esta forma, se observa que las fluctuaciones en el tamaño de grano para el litoral noroeste pueden ser explicadas por la variación de la energía transmitida por el oleaje, mientras que en el sudeste sólo justifica los valores extremos (arenas finas y gruesas).

Para explicar las variaciones de las características texturales observadas en el sector sudeste, se ha hecho un análisis de detalle utilizando los mismos límites aplicados para las celdas costeras, o sea pequeños tramos limitados por discontinuidades o puntos singulares, buscando relacionar las variaciones del D50, no definidas por la relación con la energía transmitida del oleaje, a condicionantes locales.

Las principales discontinuidades naturales determinadas en la zona de estudio están formadas por las desembocaduras de los ríos (Pacoti, Coco y Ceara),

#### a) Influencia de las desembocaduras

Una de las discontinuidades más importantes desde el punto de vista de los procesos litorales son las desembocaduras, clasificadas como estuarios, que tienen un flujo fluvial importante, que es el caso de los ríos e *inlets*, y con flujo de pequeña importancia asociado a los riachuelos. Desde el punto de vista de la dinámica, el flujo mareal de los *inlets* se comporta como un espigón hidráulico (Swift *et al.*, 1991; Domínguez *et al.*, 1992), pues funciona como una barrera para la corriente litoral que disminuye la energía aguas arriba de la desembocadura. Otra característica de los *inlets* es su comportamiento como zonas de sustracción de sedimentos de la deriva litoral que puede alcanzar valores del orden del 10 % del total de material transportado (Taney, 1961) dependiendo de las características morfológicas y del rango mareal. Este comportamiento puede ser observado en los estuarios de la región durante el segundo semestre, cuando los caudales fluviales son menores y donde se estima la existencia de un transporte dominante hacia el interior de la desembocadura.

El balance entre la capacidad de transporte de la deriva litoral y del flujo mareal en los *inlets* y estuarios influye en las características texturales de los sedimentos adyacentes. Según Olsen (1980), el material encontrado en los depósitos asociados a la vaciante (*ebb-tidal delta*) de los *inlets* es más grueso que el material de las playas adyacentes.

#### b) Influencia de los *beachrocks*

Las franjas de *beachrocks*, en función de su mayor cohesión y resistencia a la erosión respecto a los sedimentos de playa, funcionan como un sistema natural

de protección de la línea de costa, con un comportamiento similar a un muro (*sea wall*) expuesto directamente a la dinámica litoral. Según Johnson (1952), que describe las características del transporte de partículas de diversos tamaños, en presencia de un *sea wall* las partículas finas son puestas en suspensión en función de que la reflexión del oleaje genere mayor turbulencia, y en presencia de una corriente de deriva son transportadas aguas abajo. Como resultado, tendríamos una concentración de partículas más gruesas, sin generar necesariamente erosión.

La formación de los *beachrocks* en el litoral del estado de Ceará está asociada a la presencia de desembocaduras de ríos actuales o antiguos, pues son los únicos lugares donde se encuentran las condiciones físico-químicas para su formación, con la distribución y potencia de los *beachrocks* asociada a la evolución de la paleo-desembocadura durante el registro geológico. La asociación (desembocadura x *beachrocks*) hace que una o más discontinuidades se puedan presentar conjuntamente, dificultando la separación de la influencia de cada estructura.

### c) Influencia de las puntas y espigones

Los promontorios funcionan como espigones naturales; aguas arriba de la deriva actúan como una barrera al transporte longitudinal, lo que genera la acumulación de sedimentos que hace progradar la línea de costa hasta alcanzar una posición de equilibrio normal a la dirección del oleaje dominante. Los espigones aguas abajo de la deriva causan erosión y, en consecuencia, el aumento del tamaño de grano, ya que los promontorios, debido a la difracción del oleaje y otros efectos asociados generan, aguas abajo, una zona de protección al oleaje donde se depositan los sedimentos más finos.

### d) Influencia de los cambios de orientación de la costa

Las inflexiones de la línea de costa en función de una morfología relictas afectan al patrón de distribución granulométrica en la medida que alteran la dirección del oleaje en la rompiente y, en consecuencia, la energía del oleaje, con un efecto indirecto sobre el sedimento.

Analizando los cambios longitudinales de los sedimentos desde el punto de vista de los procesos inducidos por los condicionantes locales, se observa que la comparación entre las discontinuidades presentes en la costa y la variación del D50 presenta una buena concordancia, sugiriendo que el tamaño del grano también varía en función del tipo de discontinuidad. Según esta comparación, las tendencias

con granodecrecencia (disminución) en la dirección de la deriva litoral serían los estuarios, espigones y puntas, y las tendencias inversas (aumento) estarían asociadas a los *inlets* y principalmente a las franjas de *beachrocks* (Figura 4).

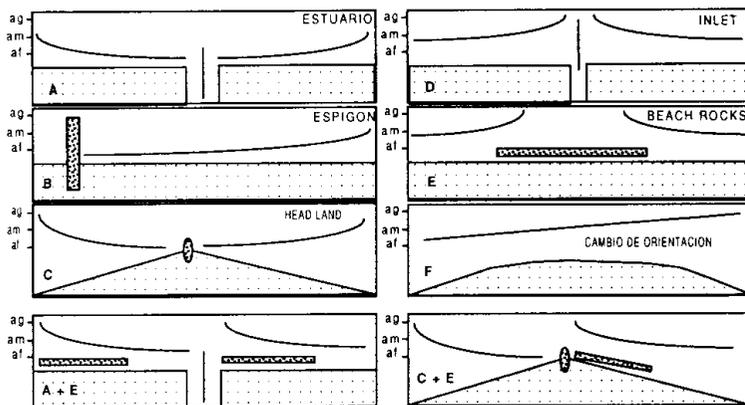


Figura 4 - Tendencias del tamaño de grano en función del tipo de discontinuidad (ag - arena gruesa; am - arena media; af - arena fina).

Se observa pues, que la utilización del principio de las discontinuidades naturales puede servir de base para describir los mecanismos físicos de las variaciones texturales. Las tendencias granocrecientes negativas estarían asociadas a mecanismos de disminución de la energía del oleaje y deposición de sedimentos finos en presencia de barreras, que pueden ser duras, tipo espigón y puntas, o blandas, tipo espigón hidráulico formado por el flujo mareal de los estuarios.

Las desembocaduras de los riachuelos y de los ríos durante periodo de menor caudal, funcionan como trampas de sedimentos finos que son transportados hacia su interior durante las mareas vivas, generando un proceso de lavado del sedimento de playa y un aumento de la granulometría. De todas las discontinuidades, los *beachrocks* se presentan como el elemento morfológico más activo en términos de alteración de las características texturales de los sedimentos. Las alteraciones de la granulometría inducidas por la presencia de esta discontinuidad predominan sobre las demás.

### a) Variaciones transversales

Además de la variación longitudinal, los sedimentos de playa también presentan variaciones transversales debido a las variaciones de energía a que están sometidos los diferentes puntos del perfil de playa y al intercambio de material entre los elementos morfológicos de los perfiles, y, en este caso, el D50 final será el resultado de las interacciones entre el transporte longitudinal, transversal y eólico. A continuación se presenta una breve descripción de las características granulométricas y del rango de variación de los parámetros texturales de los elementos morfológicos que

componen el perfil de playa (Tabla I). Las explicaciones de los posibles mecanismos de intercambio de material serán presentadas junto con las variaciones temporales.

Tabla I - Rango de variación de las características texturales de los elementos morfológicos de los perfiles transversales a la playa.

Elemento Morfológico	D50 medio (mm)	D50 (mm)	Desvío (mm)	Asimetría
Dunas	0,25	0,24 - 0,45	0,074 - 0,170	(-0,365) - (-0,110)
Berma	0,39	0,24 - 0,57	0,059 - 0,213	(-0,770) - (-0,058)
Swash	0,35	0,16 - 0,62	0,041 - 0,220	(-0,430) - (1,430)
Surco	0,33	0,32 - 0,43	0,174 - 0,235	(-0,445) - (0,088)
Barra	0,44	0,21 - 0,67	0,067 - 0,300	(-0,680) - (0,690)

De tierra a mar nos encontramos con los siguientes ambientes: dunas, berma, *swash* y sistema de surco y barra. Las dunas presentan un rango de variación del tamaño de grano dentro de las arenas medias, con un valor del d50 más frecuente del orden de 0,25 mm y desvío estándar inferior a 0,1 mm, caracterizando el ambiente como bien clasificado. La asimetría presenta el menor rango de variación (0,254), lo que confirma el grado de selección del ambiente y corresponde a distribuciones con asimetría negativa.

En la berma, que en el caso de Fortaleza puede alcanzar hasta 600 m de longitud, por englobar la berma propiamente dicha y la superficie de las terrazas marinas holocénicas, predominan las arenas medias y, de una manera general, las muestras están bien seleccionadas, con asimetría negativa. Las muestras con los mayores valores de mediana y desvío estándar se presentan en el sector sudeste, en una zona sometida a intensa deflación eólica. En este caso, el viento actúa como elemento movilizador, transportando las partículas más finas, lo que genera un depósito residual más grueso y con características de distribución bimodal.

Las muestras del surco corresponden a arenas medias no seleccionadas y con asimetría variando de negativa a positiva. Este ambiente presenta el mejor grado de selección. Las muestras recogidas en las barras varían de arena fina a gruesa y están, en general, mal seleccionadas. La asimetría varía de negativa a positiva.

El análisis de los parámetros texturales de la zona supralitoral (duna y berma), muestra una buena concordancia, arenas medias seleccionadas con asimetría negativa, entre los dos elementos morfológicos. Este resultado, ya esperado, confirma la contribución del transporte eólico a la formación de la berma y su característica como elemento seleccionador.

Para el resto de los elementos morfológicos (*swash*, surco y barra), los parámetros texturales presentan mayor rango de variación, principalmente la asimetría, debido a las características del sistema litoral, que presenta una gran complejidad de interacciones y, en consecuencia, de distribución de energía, luego es previsible que se produzcan variaciones transversales de los parámetros texturales entre la zona de *swash* y los sistemas de barras y surco, de gran movilidad (Sonu, 1973).

### b) Variación temporal

Para el análisis de las variaciones temporales se seleccionó como área piloto los perfiles de 1 a 5 (Figura 1), donde se realizaron mensualmente perfiles topográficos y recogida de muestras. Las muestras se tomaron siempre en el mismo punto, con un total de 4 por perfil, distribuidas dentro de la zona intermareal. El periodo de recogida empezó en 1994 y en este análisis utilizaremos la secuencia de junio de 1995 a mayo de 1996, ya que el año 1994 puede ser considerado anómalo, debido a la gran cantidad de lluvias.

Los sedimentos recogidos en los perfiles presentan un rango de variación entre arenas finas a gruesas, con predominio de las arenas medias (Tabla II). El perfil 1, próximo a la desembocadura del río Coco, presenta las mayores variaciones, desde arenas finas hasta arenas muy gruesas. El mayor valor para el D50 (1,243 mm) se da en el mes marzo, que es el periodo de mayores lluvias, ya que bajo estas condiciones se producen los mayores caudales y el material que estaba almacenado en el estuario es transportado y depositado en la playa. La contribución de material grueso afecta solamente al perfil 1 y está restringido al corto espacio de tiempo de la avenida, ya que en la muestra del mes posterior retoma los valores de arenas medias.

Tabla II - Rango de variación del D50 de las muestras recogidas en los perfiles de control.

Punto	P1	P2	P3	P4	P5
1	0,243 - 0,539	0,135 - 0,591	0,169 - 0,472	0,183 - 0,580	0,132 - 0,176
2	0,187 - 1,243	0,172 - 0,663	0,168 - 0,494	0,158 - 0,407	0,133 - 0,170
3	0,173 - 0,542	0,154 - 0,320	0,185 - 0,527	0,174 - 0,316	0,137 - 0,172
4	0,138 - 0,497	0,123 - 0,325	0,154 - 0,435	0,143 - 0,420	0,137 - 0,167

El perfil 5, localizado en el otro extremo del área piloto dentro de la zona de influencia del espigón, presenta las menores variaciones para el tamaño del grano, el mayor rango de variación, del orden de 0,04 mm, puede ser considerado insignificante, lo que nos hace considerar las muestras como homogéneas en todo el periodo. La ausencia de variación textural refleja que el efecto barrera producido por el espigón adyacente al perfil ejerce una protección para la playa que impide el intercambio de sedimentos.

El análisis conjunto de los sedimentos recogidos en los perfiles refleja una buena relación con las características de erosión/recuperación, pues se observa que la granulometría crece hasta septiembre y disminuye hasta mayo, lo que reforzaría la idea de variación en un ciclo anual.

Además de variar el tamaño de grano, se observa que los sedimentos también varían en cuanto a la forma de distribución (Sonu, 1973). La representación conjunta entre el grado de selección  $x$  mediana, resaltando el tipo de curva (uni o bimodal) viene presentada en la (Figura 5).

En la gráfica se pueden diferenciar cinco etapas texturales, numeradas de I a V y que corresponden a los estadios de variación de los sedimentos dentro de un ciclo de erosión o de aumento de energía. El ciclo completo estaría formado por:

I - Sedimentos Unimodales con predominio de partículas finas.

II - Sedimentos Bimodales con el pico mayor centrado en los finos.

III - Sedimentos Bimodales con dos picos equivalentes.

IV - Sedimentos Bimodales con el pico mayor centrado en las partículas gruesas.

V - Sedimentos Unimodales con predominio de partículas gruesas.

La Figura 6 representa una secuencia característica de aumento de la energía del oleaje observado en el perfil de control 2 durante el periodo de julio a septiembre. Se observa que la curva de distribución granulométrica evoluciona en el primer mes de una curva bimodal con predominio de partículas finas (II) a una bimodal con los dos picos equivalentes (III), y en

el mes posterior a una unimodal con predominio de partículas gruesas (V).

El retorno a las condiciones energéticas iniciales se hace también de forma gradual. La secuencia completa de variación de los sedimentos no puede ser observada en los perfiles debido a la baja frecuencia de recogida de muestras o a la velocidad de cambio de las condiciones energéticas.

Las distribución según los mayores índices de presencia de las olas en la región del estudio, según el *Atlas Ocean Wave Statistics*, viene presentada en la Tabla III. Se observa que, durante el periodo de un año, el oleaje presenta un ciclo de variación con valores máximos durante el periodo de junio-agosto, disminuyendo gradualmente hasta diciembre, cuando se estabiliza y se mantiene con la misma distribución hasta mayo. Los datos locales (boya de Mucuripe) muestran el mismo comportamiento, donde la variación de la altura significativa presenta un ciclo anual asociado a la variación de la velocidad del viento.

Tabla III - Límites de variación de la altura de ola más frecuente y su distribución a lo largo del año.

Periodo	Mar - May	Jun - Ago	Sep - Nov	Dez - Fev
Hs (m)	0,75 - 1,25	1,25 - 1,75	0,75 - 1,5	0,75 - 1,25

La comparación entre el clima de oleaje y las tendencias presentadas por las variaciones de volumen de los perfiles y las características texturales de los sedimentos de la zona de *swash*, muestra una correlación directa, reflejando que los cambios en los perfiles y sedimentos pueden estar asociados a las variaciones de las condiciones del oleaje.

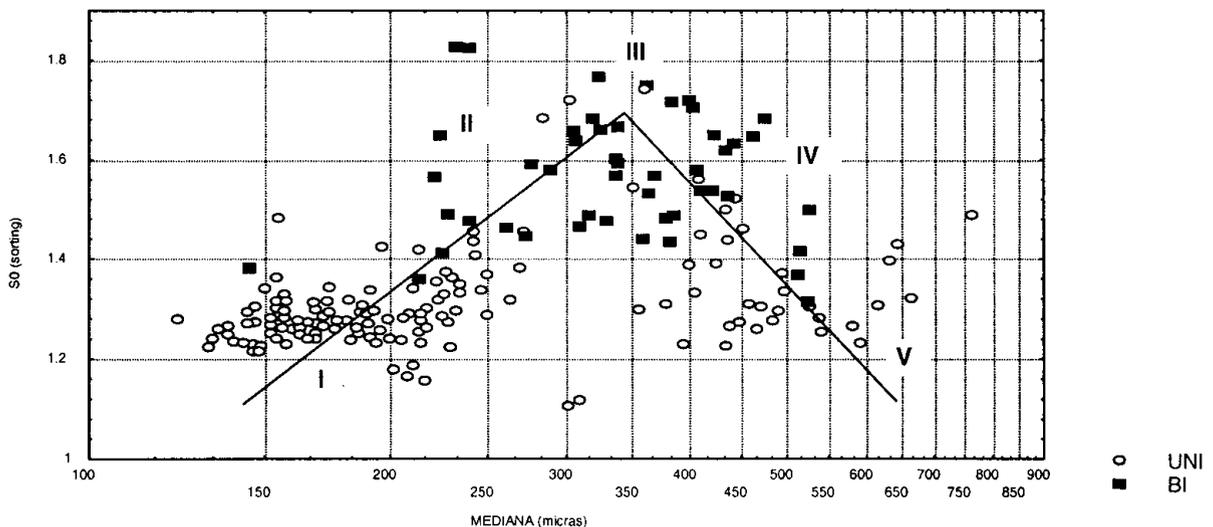


Figura 5 - Distribución conjunta entre la mediana (D50) y desvío estándar.

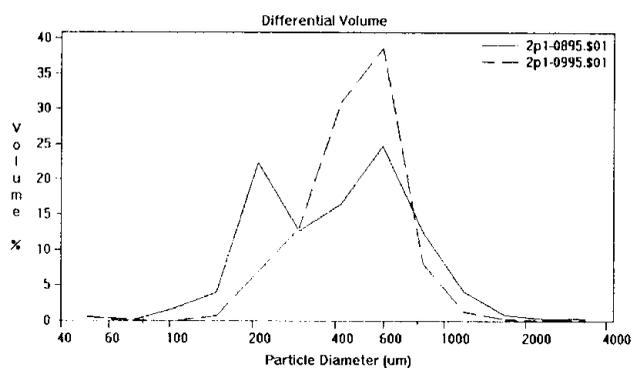
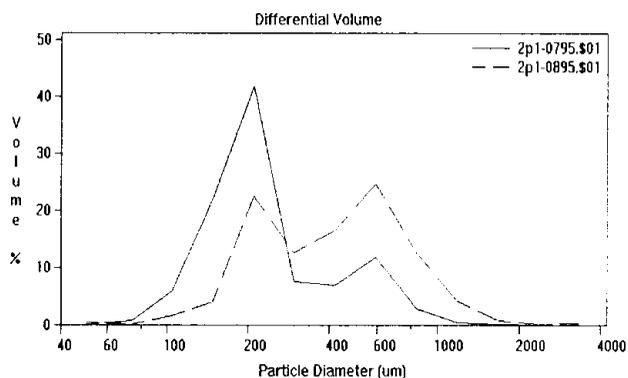


Figura 6 – Evolución de las etapas texturales en presencia de un aumento de la energía del oleaje, para el perfil 2 en el periodo de julio a septiembre de 1995.

## CONCLUSIONES

La distribución del tamaño medio de los sedimentos del perfil de playa es el resultado de las interacciones entre los diversos procesos costeros, cuya resultante y grado de variación influenciará las variaciones del tamaño de grano y el intercambio de material entre los elementos morfológicos que componen el perfil costero (Figura 7). Los procesos asociados al oleaje, principalmente el transporte longitudinal, y al viento son los elementos más importantes para la evolución de la costa y, en consecuencia, del D50. Hay que resaltar que en esta región, con predominio del transporte longitudinal sobre los demás actores, el material de recubrimiento de la zona de playa está influenciado por el tipo de sedimento que entra en la celda por la deriva litoral. Para sistematizar las discusiones, se han dividido los cambios a medio plazo en los periodos de erosión y recuperación a que están sometidos anualmente los perfiles de playa. Secundariamente se abordarán los cambios episódicos de forma integrada.

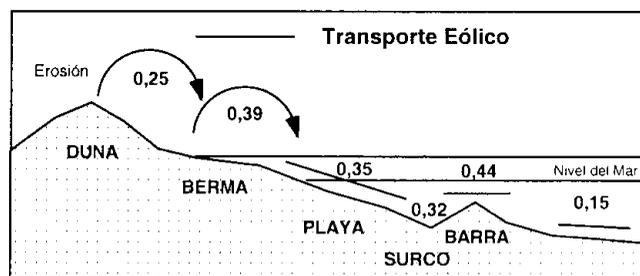


Figura 7 - Perfil típico de la distribución del D50 para los elementos morfológicos analizados, indicando la dirección del transporte de sedimentos. (\*) para zonas de aporte eólico.

### Recuperación

Las condiciones de recuperación de las playas están presentes al inicio del año, cuando la energía de los vientos y oleaje es menor y coincide con el periodo

de mayores precipitaciones y, por tanto, en presencia de aporte fluvial. Bajo estas condiciones, el material que entra en cada sector por la deriva litoral está formado por material más fino, con un tamaño que varía entre 0,1 y 0,3 mm, a excepción de las zonas próximas a las desembocaduras, donde el tamaño puede alcanzar hasta 1,2 mm. El transporte transversal, debido a las características del oleaje, presenta una resultante hacia la playa, haciendo que el material más fino de la zona sumergida sea incorporado al perfil.

La menor velocidad del viento, y en presencia de una mayor humedad, hace que el transporte eólico no esté activo. Se observa pues que existe una confluencia de los procesos asociados al oleaje en la adición de material a la playa y una inactividad del transporte eólico, principal elemento sumidero, haciendo que predomine la progradación de la línea de costa, con aumento de volumen de los perfiles y disminución de la pendiente de playa, ya que el material de la cara de playa es más fino.

### Erosión

En el segundo semestre se observa un cambio de las condiciones de equilibrio de la playa, que pasa a presentar características erosivas debido al aumento de la energía del viento y oleaje. De esta forma, el transporte inducido por un oleaje con mayor energía hace que la componente longitudinal del transporte aumente su capacidad de arrastre, que pasa a transportar partículas más gruesas, con diámetro entre 0,2 y 0,6 mm, y la resultante de la componente transversal cambia hacia mar, transportando el material de la playa a aguas más profundas. No existe aportación fluvial y el transporte eólico alcanza su mayor capacidad generando la deflación y la erosión del material más fino del perfil de playa.

La integración de estos factores genera el retroceso de la línea de costa y la formación de un pequeño escarpe en el límite interno de la playa por erosión de la berma y, en algunos casos, de las dunas adyacentes,

que pasan a actuar como fuentes de sedimento para la deriva. En general, se observa una disminución del volumen de los perfiles de playa y un aumento de la pendiente.

### Cambios episódicos

Los cambios a corto plazo están asociados a los cambios de las características del oleaje y a las fluctuaciones del nivel del mar inducidas por el movimiento de las mareas, incluyendo desde alteraciones del estado morfológico de la playa hasta la migración de las barras. Estos cambios presentan una gran variación lateral y de difícil cuantificación, ya que el estado morfológico depende en gran parte de las interacciones entre el oleaje y las características del perfil de playa (pendiente + recubrimiento), y el movimiento de las barras, aunque dependiendo del estadio de la marea, su formación y migración hacia la playa no se hace de forma uniforme.

En conclusión, se observa que la complejidad de las interacciones entre procesos a diferentes escalas, que pueden presentarse al mismo tiempo, hace que no sea posible una estimación exacta del tamaño del grano, aunque se pueda predecir el comportamiento general del sistema y, en consecuencia, la tendencia de variación del D50.

La última cuestión a resolver es cuál es realmente el origen y fuente de la gran cantidad de material que aparentemente se mueve a lo largo de la costa, tanto debido al transporte longitudinal como al eólico.

Las características de las rocas y depósitos sedimentarios se puede expresar en términos mineralógicos o químicos y, dependiendo del objetivo que se desea alcanzar, se utiliza uno u otro método de descripción. Para la determinación del origen, grado de alteración y posibles correlaciones, normalmente se utiliza la composición mineralógica, principalmente en relación al contenido y tipo de minerales pesados. Utilizando los procedimientos y materiales recogidos para la descripción de las características de las formaciones costeras y el recubrimiento sedimentario, se ha determinado y clasificado el contenido de minerales pesados de cada ambiente sedimentario (Figura 8).

El porcentaje relativo medio de cada mineral en los 5 ambientes muestra que, en general, los ambientes emergidos presentan la misma asociación de minerales pesados, caracterizada por 9 minerales principales: ilmenita, turmalina, epidota, estauroлита, silimanita, hornblenda, topacio, circonio y clorita, que corresponden a minerales con diversos grados de

estabilidad, variando desde la turmalina, ultra-estable, hasta la hornblenda, inestable.

En la plataforma la asociación se reduce a los 5 primeros, predominando en general los minerales estables a ultra-estables. La presencia de minerales pesados poco estables o inestables en los ambientes emergidos indica que la roca fuente está muy próxima, siendo el tipo de asociación de todos los ambientes característica de las rocas del zócalo.

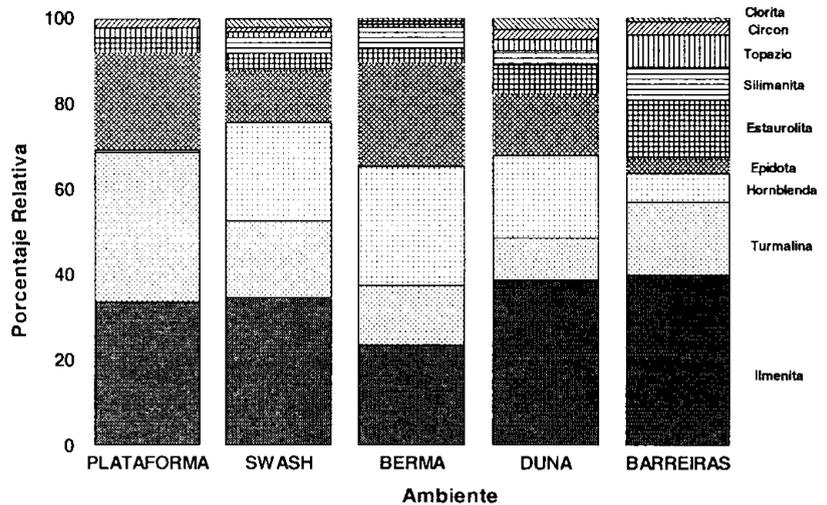


Figura 8 - Distribución del porcentaje relativo de minerales pesados para los diferentes ambientes sedimentarios de la zona costera.

Utilizando el contenido de minerales pesados para correlacionar los diversos ambientes y considerando que los mayores índices representan la dirección del transporte dentro de las secuencias probables, tendríamos que el material que proviene del zócalo es la única fuente de material para la Formación Barreiras, pudiendo, en una condición de nivel del mar más bajo que el actual y en condiciones climáticas más húmedas, alimentar directamente la plataforma. Considerando la condición actual del nivel del mar y clima, la aportación directa a la playa y plataforma es poco probable debido a la baja capacidad de transporte de los ríos de la región. Utilizando los resultados de la evaluación del transporte transversal, que en la mayoría de casos se produce hacia mar, se observa que los sedimentos de la Formación Barreiras pueden ser una de las fuentes actuales para la plataforma, siempre que la erosión se produzca directamente en estos sedimentos y, en caso contrario, la fuente sería la playa (Figura 9).

A partir de los mismos resultados del transporte transversal y considerando las dos asociaciones de minerales pesados características de cada ambiente (zona emergida y plataforma), se observa que la Formación Barreiras es la principal fuente de material para las playas y que éstas pueden ser la fuente para la plataforma. El movimiento inverso es muy poco

probable, o sea, la plataforma no es fuente para los sedimentos de las playas. Esta conclusión viene reforzada por la diferencia en el contenido de carbonatos, que en la plataforma interna es del orden de un 20 % y en la playa no alcanza el 5 %.

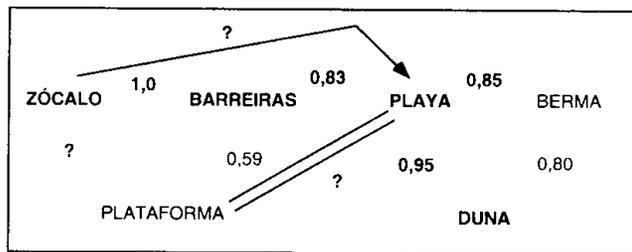


Figura 9 – Relación entre las posibles fuentes de sedimentos para los diversos ambientes a partir del contenido y tipo de minerales pesados. Los valores se refieren al coeficiente de correlación entre los ambientes.

De la playa hacia el continente se observa que puede existir un intercambio bidireccional de material entre la playa y la berma, aquí considerada en “senso lato” que incluye la berma propiamente dicha y la superficie de las terrazas marinas, donde una puede ser fuente de la otra dependiendo del estado de equilibrio de la playa; en condiciones de erosión y retroceso de la línea de costa, la berma es la fuente y, en caso contrario, avance de la línea de costa, la playa es fuente de material para la construcción de la berma. Las dunas, dependiendo del tipo de perfil, pueden tener como fuente tanto los sedimentos de las playas como de la berma.

De la discusión anterior se deduce que las únicas fuentes posibles de material para la deriva litoral son los sedimentos del perfil de playa, incluyendo la berma, y el material que proviene de la erosión de la Formación Barreiras. La aportación directa de material del zócalo y de la plataforma es muy poco probable, debido, en el primer caso, a la baja capacidad de transporte de los cauces principales y, en el segundo, a la dirección del transporte transversal, principalmente hacia mar.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CERC (Coastal Engineering Reserch Center). *Shore protection manual. Vol. 1.* Departament of Army of USA, Vicksburg.
- Dominguez, J. M. L.; Bittencourt, A. C. S. P. & Martin, L. Controls on Quaternary coastal evolution of the east-northeastern coast of Brazil: roles of sea-level history, trade winds and climate. *Sedim. Geol.*, v. 80, p.217-232, 1992.
- Guillen, J. & Jimenez, J. A. Processes behind the longshore variation of the sediment grain size in the Ebro delta coast. *J. Coastal Res.*, v.11, n.1, p. 205-218, 1995.
- Inman, D. L. Sorting of sediments in the light of fluid mechanics. *J. Sedim. Petrol.*, v.19, n.2, p.51-60, 1949.
- Johnson, J. W. *Sand transport by littoral current.* Wave Research Laboratory, University of California, Technical Report, Series 3, 1952.
- Katoh, K. & Yanagishima, S. Changes of sand grain distribution in the surf zone. *Coast. Dynam.*, v.95, p. 639-650, 1995.
- Maia, L. P. *Procesos costeros y balance sedimentario a lo largo de Fortaleza (NE Brasil): Implicaciones para una gestión adecuada de la zona litoral.* Ph.D. Thesis, University of Barcelona, 1998.
- Maia, L. P.; Jiménez, J. A.; Serra, J. & Morais, J. O. The Fortaleza (NE Brazil) waterfront: port versus coastal management. *J. Coastal Res.*, v.14, n.4, p.1284-1292, 1998.
- Maia, L. P.; Jiménez, J. A.; Freire, G. S. S. & Morais, J. O. Dune migration and aeolian transport along Ceará (NE Brazil): downscaling and upscaling aeolian induced processes. *Coastal Sediments'99 ASCE*, 1220-1232, 1999.
- McLaren, P. An interpretation of trend in grain size measures. *J.Sedim.Petrol.*, v.51, p.611-624, 1981.
- McLaren, P. & Bowles, D. The effect of sediment transport on grain-size distributions. *J.Sedim.Petrol.*, v. 55, p.457-470, 1985.
- Olsen, E. J. Beach nourishment project report for Captiva Island, Florida. *Tetra Tech. Rep.*, Pasadena, 1980.
- Russel, R. D. Effects of transportation on sedimentary particles, p.32-47, in Trask, P. D. (ed.), *Recent marine sediments.* AAPG, Tulsa, 1939.
- Sonu, C. J. Three-dimensional beach changes. *J. Geol.*, v. 81, p. 42-46, 1973.
- Stone, W. G.; Stapor, F. W.; May, J. P. & Morgan, J. P. Multiple sediment sources and cellular, non-integrated, longshore drift system: northwest Florida and south coast Alabama coast, USA. *Mar. Geol.*, v.105, p. 141-154, 1992.
- Swift, D. J. P.; Oertel, G. F.; Tillman, R. W. & Thorne, J. A. (eds.). *Shelf sand and sandstone bodies.* Blackwell Scientific Publications, Special Publication n°14, 532 p., Oxford, 1991.
- Taney, N. E. Geomorphology of the south shore of Long Island, New York. *Tech. Mem. U.S. Army Corps of Engs.* n. 128, p. 1-60, 1961.