

# **INFLUENCIA DEL OLEAJE Y DERIVA LITORAL EN LA REGIÓN COSTERA DE CARTAGENA DE INDIAS (SECTOR LA BOQUILLA EL LAGUITO)**

*Guillermo Díaz González*

## **RESUMEN**

El presente trabajo tiene como fin observar el comportamiento que sobre la franja litoral en la región costera de Cartagena de Indias tiene la acción del oleaje a partir de la consideración estacional presente en el grupo de los vientos durante un año calendario, definido en dos épocas climáticas, húmeda y seca principalmente. Se ha establecido, igualmente, tanto para el cálculo de los parámetros del oleaje como para el de transporte de sedimentos, realizarse tan sólo para el sector de costa comprendido entre La Boquilla y El Laguito. Para tal propósito se usó como método de trabajo, y para validarlo como herramienta recomendable en el campo de la oceanografía, los modelos matemáticos HISHWA y SBEACH. El primero de estos métodos se basa en el cálculo de energía del oleaje y su variación en los nodos de una grilla operacional. El segundo involucra la simulación de cambios de perfil de playa para establecer un balance erosión - acrecimiento en el tránsito de partículas de sedimento; arenas finas especialmente. Se pudo comprobar que vientos más fuertes y de mayor persistencia en época seca genera corrientes litorales que ocasionan la construcción de una barra arenosa infralitoral, que luego, durante la época húmeda bajo la influencia de vientos débiles y de variante dirección, migra su material (el constituyente de la barra) buscando albergue en las formas estructurales de mayor favorecimiento de la costa. La región costera al norte de Cartagena de Indias, se puede decir que sufre un fenómeno cíclico ajustado a la influencia de los vientos predominantes en cada época climática del año y al tránsito sedimentario controlado por la acción dinámica del oleaje.

## **INTRODUCCIÓN**

Las zonas costeras constituyen un medio marginal de naturaleza frágil donde interactúan la hidrosfera, la atmósfera y la litosfera provocando variados y complejos procesos. En conjunto, todo está expresado en la geomorfología litoral, pero se hace necesario tanto el estudio de la geología como de la oceanografía, atendiendo que son ciencias que explican la evolución de un fenómeno en particular. Siempre será indispensable, analizar las relaciones que existan entre la batimetría de un lugar y el régimen de olas, como expresión que repercute del viento en superficie, junto al estado de las mareas y las corrientes costeras, para establecer criterios en términos de erosión y sedimentación.

Las costas sobre el litoral Caribe, en especial, presentan ejemplos de como han sido protegidas con obras de infraestructura artificial para resguardarlas del embate a que están sometidas a causa de su dinámica marina. Dentro de muchos factores ambientales que podríamos enumerar, bastará con identificar el régimen de oleaje como el factor principal motriz de los procesos costeros. Es así, bajo esta premisa y como respuesta a un

problema de manejo costero, y además, deseando proporcionar una fuente de información viable y entendible acerca de la línea de costa en el tramo La Boquilla - El Laguito, el objetivo del presente trabajo, es describir los efectos que sobre ésta franja de litoral tiene la acción del oleaje y el transporte de sedimentos a partir del carácter "estacional" que presenta el campo de vientos en toda la región.

## **CONCEPTOS TEÓRICOS FUNDAMENTALES DE LOS MODELOS NUMÉRICOS**

El "Hindcast Shallow Water Waves" (HISHWA), se basa en la noción de un balance espectral de acción en que la ausencia de una corriente principal se reduce a un balance de energía. La aproximación de balance de energía implica que por cada componente del espectro de la ola en el campo de oleaje, el ritmo de cambio de energía es igual al efecto neto por unidad de tiempo del aumento de la intensidad del viento, fricción por fondo, etcétera. En modelos convencionales de olas (al menos en ingeniería de costas), un componente de oleaje se sigue a través del área de estudio a lo largo de su ruta de ola (rayo). Durante este viaje los efectos por el viento, por fondo, etcétera, son determinados y agrupados hasta que el componente de ola llega a la región de interés. En un modelo espectral este proceso podría ser repetido para todos los componentes del espectro (todas las frecuencias y todas las direcciones), así que eventualmente el espectro dimensional completo es determinado en el lugar de estudio. Sin embargo, en HISHWA el proceso es algo diferente. La técnica que utiliza el modelo es similar a la descrita sobre la técnica espectral pero difiere en dos aspectos: el campo de olas no es descrito como un espectro discreto dos dimensional completo y la propagación de la ola no es a lo largo de los rayos de la ola sino por entre una grilla. El espectro es discreto sólo en las direcciones y paramétrico en las frecuencias. Es decir, en cada dirección espectral se propagan dos características: una densidad de energía, integrada con respecto a las frecuencias y una frecuencia media. Ambas cantidades varían a través del área geográfica. El modelo calcula esta variación integrando los efectos locales, mientras estas cantidades se propagan con una velocidad de grupo correspondiente a la frecuencia media (interpretada como una componente unidireccional de las olas) a través de la grilla, en lo largo y ancho, en el área de estudio. Obviamente, el modelo debe considerar tantos componentes de ola como direcciones haya en el espectro discreto. Las bases del modelo son una versión parametrizada del balance de energía de olas. Los conceptos teóricos del modelo se encuentran en detalle en Holthuijsen y otros. (1989) y los puntos más importantes son tratados en el capítulo 2 del manual de operación publicado por Booij N. y L. H. Holthuijsen (1993).

El "Simulating Storm - Induced Beach Change" (SBEACH), es un modelo matemático con un fundamento geomorfológico que tiene apoyo en extensos análisis de cambios de perfil de playa producto de la acción de las olas largas en un depósito de agua en ambiente natural. El rompimiento de las olas y los cambios en el nivel del agua que existen son los mejores agentes conductores del modelo que generan transporte de sedimentos y cambios en el perfil de la costa. Los cambios en el nivel del agua son calculados a partir de olas de tormenta, de las mareas y de los vientos. El modelo no podrá ser utilizado para examinar cambios de perfil con vecindad a diques (espolones, muelles) y estructuras similares que formen barras a causa del transporte de arena a lo largo de la costa; en tal caso, el fuerte cambio del perfil puede ser controlado más por la interrupción del transporte a lo largo de la costa que por procesos que se dan a través de la costa. En ningún momento el

modelo podrá ser utilizado para el análisis a largo plazo del transporte a lo largo de la costa en el cual se presenten factores diferentes a la fuerza hidrodinámica en que exista un rompimiento de olas con los cambios del nivel del agua. El modelo no puede aplicarse a playas con estrato arcilloso o rocoso debajo del arenoso o que se hayan convertido en otro tipo de estrato durante su exposición bajo condiciones de tormenta. En pocas palabras el modelo esta indicado sólo para la predicción y análisis a corto plazo de la erosión inducida por tormentas. Como complemento de ayuda para aquellos que están interesados en operar el modelo existe un manual que contiene por lecciones los principales criterios de estudio. En el Reporte 2 publicado por Larson, M.; Kraus, N. C. y M. R. Byrnes (1990), se encuentra lo aquí expuesto, en cuanto a que contiene una descripción detallada del desarrollo, prueba y aplicación del modelo. En el Reporte 3 publicado por Rosati, J. D.; Wise, R. A.; Kraus, N. C. y M. Larson (1993), proporciona una guía de mano para el usuario en la instalación, corrida y manejo, llevando a cabo varios ejemplos de simulación.

### **CONDICIONES OCÉANO - ATMOSFÉRICAS DE LA REGIÓN DEL CARIBE**

En cuanto a la dirección, el periodo y la altura del oleaje incidente sobre la costa son el reflejo de los vientos dominantes que soplan del N - NE en los meses de verano y de las calmas en los meses de invierno. En consecuencia oleajes con dirección N - NE se presentan en la costa oriental y central del Caribe y oleajes provenientes del N se presentan en el sector occidental del Caribe. En un estudio presentado por J. O. Martínez y otros autores (1992) para el sector de Bocas de Ceniza, registran oleajes de 2.0 m de altura y 10 seg de periodo. Para la región de Cartagena, J. O. Suzunaga y otros investigadores (1990), encontraron que durante el mes de marzo el período del oleaje en mar abierto varió entre 5 y 15 seg con un periodo promedio de 8 seg, lo que corresponde a un oleaje de periodos grandes. De acuerdo con medidas visuales la altura del oleaje varía entre 0.5 y 2 m con un promedio de 1.1 m.

La velocidad del viento muestra una variación bimodal estacional a lo largo de toda la cuenca del Caribe. En general, el viento es fuerte en invierno entre los meses de noviembre y marzo, seguido por una rápida disminución de su velocidad entre los meses de marzo y mayo. Hay un incremento en la intensidad durante junio y septiembre conocido como "veranillo", seguido por una disminución en la intensidad hasta noviembre cuando la estación de vientos comienza nuevamente (Andrade, C. A., 1993). El análisis del campo de los vientos según las estaciones nos permite apreciar dos regiones eólicas definidas: La del Caribe oriental con vientos dominantes al este y la del Caribe occidental con vientos altamente variables (Donoso, M. C., 1990). Durante la época seca (marzo) los vientos alisios de orientación N - NE afecta considerablemente la costa. Son vientos regulares y poderosos que soplan de diciembre a abril. Su velocidad varía entre 2 a 15 m/s, con un promedio de 6.9 m/s. El viento comienza a soplar al final de la mañana y se va incrementando hasta el atardecer donde presenta su expresión máxima para luego disminuir en la noche. En la época de lluvias los vientos se presentan mucho más débiles y con dirección variable (Suzunaga, J. O., Molina, A., Pelgrain, A. y C. Llanos, 1990). El régimen de vientos puede resumirse así: entre los meses de diciembre y abril los vientos dominantes (alisios) provienen del N - NE, siendo la frecuencia de los vientos del sector SE a NW prácticamente nula. De mayo a noviembre, la preponderancia de los vientos provenientes del NE disminuye, aumentando los

de dirección S y W durante los meses de septiembre, octubre y noviembre (Martínez, E., 1989). La costa del Caribe colombiano experimenta tres épocas climáticas diferentes en el año. La primera, una estación seca (verano), la cual comprende los meses de diciembre hasta abril. En esta época los vientos alisios soplan con intensidad proveniente del N y del NE. La segunda época es la de transición (mayo, junio y julio) durante la cual los vientos alisios son suaves, predominando los del sector N y NE, que se incrementan durante el mes de julio (Veranillo de San Juan). La estación húmeda (invierno) como tercera época, opera de agosto a noviembre y se caracteriza por un régimen de vientos variables (Martínez, J. O., 1993). Pero, de acuerdo a un estudio de A. Huguet (1988), quien presenta la precipitación media mensual durante el período 1964 - 1972 medida en cuatro diferentes estaciones meteorológicas, muestra la existencia de un verano de cinco meses y un invierno de siete meses, interrumpido por el mes de julio que presenta menor pluviosidad. El mismo estudio, concluye que el régimen durante todo el año es de aguaceros cortos de alta intensidad y muy local.

### **MORFOLOGÍA LITORAL DEL SECTOR DE COSTA**

La franja litoral de interés en este estudio es desde la parte extremo norte de Crespo, donde se encuentra ubicado el sitio que se conoce como "Blas el Teso"; Longitud 10° 27' 39.9" N, Latitud 75° 30' 42.8" W, denominado sector de La Boquilla; hasta la punta externa de El Laguito, donde se encuentra el último espolón de Bocagrande; Longitud 10° 23' 40.33" N, Latitud 75° 34' 00". Según la configuración de la línea de costa, es decir, las variaciones que presenta la margen de la playa producto de la influencia del oleaje y de las construcciones artificiales que sobre ella se establecen, se pueden distinguir dos amplios sectores separados por la punta de Santo Domingo. A su vez estos dos grandes sectores pueden ser separados por tramos cortos de comportamiento geomorfológico común.

El primer sector, del anillo vial a la punta Santo Domingo, esta subsectorizado por cuatro tramos. De norte a sur, el primer tramo esta limitado por el pueblo de La Boquilla hasta la cabecera de la pista del Aeropuerto "Rafael Núñez", en el extremo norte del barrio Crespo. Este tramo presenta características de playa ancha con un promedio de 85 m. Entre la carretera y el mar hay partes en la cual se ha facilitado el relleno de los lotes que dan frente al mar hasta unirlos con el anillo vial, estos lotes se encuentran rellenos en un 90% por particulares (Martínez, J. O., 1993). Se ha establecido, igualmente, que estas playas se encuentran influenciadas por el aporte de sedimentos provenientes de la Ciénaga de La Virgen, como de la erosión que se presenta en la punta de Los Morros, originando un pico de acreción que se desplaza hacia el sur. Los vientos afectan negativamente estas playas produciendo un retroceso en algunos de 24 m. En épocas de vientos alisios se presenta acreción en este tramo con gradientes mayores a los obtenidos en otras épocas del año. Actualmente, todo el cordón se encuentra estabilizado por la vegetación y por la actividad humana (Suzunaga, J. O., Molina, A., Pelgrain, A. y C. Llanos, 1990). El segundo tramo, esta limitado por la entrada al anillo vial y el club de recreación "Comfenalco", es decir, por los límites que conforman el total emplazamiento del sector residencial de Crespo. Este pequeño tramo presenta características de playa angosta de tendencia rectilínea y con construcciones levantadas en su límite con el terreno consolidado. Las playas de Crespo presentan una regresión debido al alto grado de erosión y que actualmente atacan el sector. El tercer tramo, esta limitado por

las playas de Marbella y El Cabrero, es el área comprendida entre el club "Comfenalco" hasta el último espolón en T frente a las tenazas de la "ciudad amurallada". De Crespo a Marbella, el tramo de playa es bastante ancho con un promedio de 65 m, protegida con una serie de espolones en I en su totalidad. De Marbella al Cabrero, el tramo de playa es angosto protegido con espolones en T. El cuarto tramo, esta limitado por las playas frente al sector El Cabrero a la punta Santo Domingo, lo que abarca desde el último espolón en T frente al Cabrero hasta el primer espolón a la entrada de Bocagrande. Puede decirse que por razones de urbanización está compuesto por rellenos artificiales (antiguamente el mar llegaba al pie de las murallas). Esta situación de costa artificial que busca un equilibrio sedimentario presenta una erosión bastante significativa. Una zona de rompiente que sigue la dirección de la costa indica la presencia de un bajo que resultó de procesos de depositación. En esta punta se está formando una flecha litoral aún sumergida.

El segundo sector, de la punta de Santo Domingo a la punta externa de El Laguito, es un único tramo, prácticamente. El quinto tramo simplemente correspondiente a las playas de Bocagrande; es un tramo caracterizado por una pendiente muy suave donde el oleaje incide paralelo a la costa e impide la sedimentación. Bocagrande es un sitio de tránsito arenoso similar al cordón litoral de La Boquilla. El Laguito está caracterizado porque en la extremidad de la playa el oleaje se refracta alrededor de la punta. Se considera que es una pequeña flecha "parásita" donde el oleaje pierde toda su energía frente a una escollera (muelle sumergido) construida sobre la barrera arenoso infralitoral. Este muro submarino o escollera une a El Laguito con la punta norte de Tierra Bomba (Vernette, G., 1993).

### **DETERMINACIÓN DEL VIENTO EN SUPERFICIE**

Se optó por trabajar tan solo con una estación meteorológica tipo sinóptica del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), ubicada en el Aeropuerto "Rafael Nuñez" de la ciudad de Cartagena, por la presentación del parámetro atmosférico en forma más completa y de mayor continuidad en su observación por años. Como se sabe que la gran mayoría de las olas marinas las produce el viento al soplar sobre el agua y, que, es de especial significado el cambio de marea a determinadas horas del día, entonces, la información útil para realizar la evaluación de la dirección y velocidad del viento, debe ser de la observación horaria del fenómeno con discriminación, especialmente, a las 01:00, 07:00, 13:00 y 19:00 horas, y para los últimos 60 meses, es decir, para el período a partir de enero 1 de 1992 y hasta diciembre 31 de 1996. A pesar que existe una gran confianza al trabajar con datos correspondientes a períodos o series históricas de 10 años, en vista a que el período de tiempo escogido está en un 99% con observaciones continuas y confiables, se estimó suficiente trabajar con información procesada para esos 5 años. Para el "vacío" de información que apenas era del 1%, es decir, que muy pocos datos fueron los faltantes, se originó cada dato faltante a partir del promedio aritmético de los datos disponibles, para la misma hora, día y mes en los otros años disponibles; en ninguno de los casos debe ser menor a 3 el número de datos en promediar. Fue necesario, con anticipación, contemplar la persistencia en cuanto a la dirección del viento, con el fin de poder observar el comportamiento de la variable con respecto a la Rosa de los Vientos escogida; de empleo en el IDEAM lo que permitirá a otros observadores poder comparar estos resultados con los obtenidos en otros estudios de éstas mismas

intenciones. En ningún momento se consideró los valores de rangos de velocidad menores a 0.83 m/s como “calma”, para no provocar confusión. Con el fin de poder manipular en términos de oleaje la información producto de la evaluación horaria de la dirección y velocidad del viento, se seleccionaron los valores representativos horarios tanto en persistencia en dirección del viento (DV) como en rango de velocidad (VV), para las dos principales épocas climáticas del año, considerando su comportamiento principal como secundario de acuerdo al registro porcentual para cada variable.

Dispuestos todos los datos de dirección y velocidad del viento numéricamente y efectivamente completados, se verificó si guardaban lógica continuidad con los existentes tomados por el observador meteorológico. Como resultado se estableció un año base con datos confiables para el análisis del parámetro. Seguidamente, se estimó porcentualmente la frecuencia con que se presentó la persistencia horaria del viento en cada dirección, mes a mes para el año denominado 92/96. Se hizo lo mismo en el caso de la velocidad, para observar el rango de velocidad de mayor predominio en que se comportó el viento. Por último, se totalizó la información horaria y se determinó el comportamiento del viento en dirección para cada mes con el propósito de establecer las épocas climáticas para el año de interés establecido.

Así se establece que: para la época seca existe predominio de un estado del tiempo de “brisas suaves” de intensidad no mayor a los 5.4 m/s, especialmente a las 13:00 horas y de dirección N de viento principal, y a las 19:00 horas y de dirección NE de viento secundario. El comienzo del día principalmente está marcado por un “aire ligero” de débil intensidad, con tendencia a la “calma”, que paulatinamente toma fuerza y al medio día alcanza su mayor expresión como “brisa” y desciende al término del día hasta adquirir un comportamiento de relativa “calma” nuevamente. Pero, también se debe contemplar el hecho de que se puedan presentar mañanas de vientos estables de intensidad media con velocidades entre los 1.5 m/s y 3.3 m/s, que pasado el medio día estos vientos ganen fuerza y alrededor de las 19:00 horas ya comenzando la noche se expresen con velocidades de hasta 5.5 m/s y de dirección NE, para luego al amanecer comportarse con una calma aparente.

La época húmeda, se encuentra influenciada por un viento principal de poca fuerza, muy débil durante todo el día, con mañanas y atardeceres con relativo “aire ligero” y medio día de “brisa ligera” marcada por intensidades que no superan los 3.3 m/s, con persistencia del viento soplando del W, prácticamente durante todas las horas del día, y noches de bastante “calma” ó quietud. Para ésta misma época se encontró que el viento secundario se comportó más variable durante todo el día; de fuerza y dirección más inconstante, pero que a las 13:00 horas tiene su mayor carácter como viento del N con velocidad de 4.4 m/s en promedio.

### **CALCULO DEL OLAJE**

Para determinar el comportamiento del oleaje en su aproximación a la costa, se enfocó el análisis de los componentes de la ola al modelo matemático HISHWA. Se estableció, el ángulo de orientación de la costa con respecto al norte verdadero, el cual fue estimado en 53° y, seguidamente, se considero que de acuerdo a las condiciones costeras, el sector de estudio debería considerar un diseño de la malla batimétrica lo más pequeña

posible, para favorecer la resolución del análisis del oleaje, por lo tanto, se estimo conveniente, eliminar las influencias en la dinámica costera que causan, por un lado, las aguas que desembocan al mar provenientes de la ciénaga de Tesca, como por otro lado, las que se producen en el sector de la punta interna de El Laguito junto a la Bahía interna. Debido a que la propiedad del modelo es calcular los parámetros de las olas en áreas costeras en cada punto de la malla, la orientación de la malla fue preestablecida en la misma orientación de la costa, con un intervalo entre puntos de malla en sentido x (a lo largo de la profundidad del mar), igual a 62.5 metros y, en sentido y (a lo largo de la costa), igual a 125 metros, es decir, de configuración 81 X 87 puntos, respectivamente. La característica batimétrica en el área de estudio esta determinada por una pendiente suave que a los 5000 metros de distancia de la costa no supera profundidades mayores a los 11 metros.

Una vez definidas las dos épocas climáticas a partir del comportamiento del viento para el sector de Cartagena de indias, se estableció que el oleaje esta influenciado por la persistencia de vientos en dirección norte para la época seca y, en dirección oeste para la época húmeda. A partir de la orientación de la malla y de la dirección del viento, para cada época climática, se observo que la dirección de la ola en la frontera superior (en la parte de las olas superiores en aguas profundas) era de  $53^\circ$  para la húmeda y de  $-37^\circ$  para la seca. La altura de la ola significativa fue considerada en 2 metros y el periodo de la ola en 7 segundos, con base a la experiencia en campo que el equipo de investigadores del CIOH, en 1997 pudo establecer, y además, al porcentaje alto de ocurrencia que esta se presenta en las costas del sector de estudio, de acuerdo, igualmente al CIOH.

Con el objeto de establecer para el sector norte de Cartagena de Indias los parámetros de: altura significativa de la ola, dirección media de la ola, longitud de la ola y tensión de la ola, se especificaron los criterios de la grilla de salida bajo los mismos de las grillas de ingreso y operacional, es decir, estas grillas se dejaron idénticas para el cálculo de los parámetros del oleaje. Se orientó la grilla operacional con respecto al norte verdadero de tal manera que el eje X este en sentido de las olas superiores y el eje Y en sentido de la playa, luego observo la inclinación que tiene la grilla según este norte y después determino la dirección y sentido que toma el oleaje cuando entra al área de estudio establecida con respecto a la normal  $90^\circ$  a lado y lado de ésta.

Después de corrido el modelo se pudo observar que el efecto de perdida de altura de la ola por aproximación a la costa, es evidente en las dos épocas climáticas, que existe, marcando la evolución del oleaje, casi un ajuste de la altura de la ola con la batimetría entre las isóbatas de los 3 y 4 m, especialmente para el sector de Santo Domingo a La Boquilla. Puede esto ser a causa de la linealidad de la costa en este sector. En época húmeda hay menos presencia de las olas de más de 2.0 m de altura en aguas intermedias de poca profundidad que en época seca. La longitud de onda se expresa en perfecta relación con la batimetría del sector, dejando ver para la época seca un comportamiento de este parámetro prácticamente bimodal, con longitud de onda menor a 50.0 m hasta la isóbata de los 6.0 m, lo que podríamos llamar en aguas someras, y entre 100.0 y 50.0 m para aguas profundas del sector de estudio.

El caso de la evolución de este parámetro para la época húmeda se ve reflejado en su expresión lenta a través de todo el sector de esta costa, e igualmente muy acorde a la característica batimétrica del mismo, con

longitudes de onda menos pronunciadas no mayores a los 70.0 m. La dirección media de la ola revela la tendencia del campo de vientos soplando del norte en época seca y del oeste en época húmeda. Los grados de residencia son, predominantemente, de -35.0 y 50.0 grados en promedio, respectivamente para las dos épocas climáticas. Desdichadamente y a causa de la escala del mapa base, que no permite apreciar con buen grado de detalle y en dimensión real la línea de costa, no es posible evidenciar el comportamiento del oleaje con mayor exactitud especialmente en los tramos de costa acompañados por espolones o tenazas.

### **CALCULO DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS**

Para la determinación del comportamiento de la carga sedimentaria transportada por la deriva litoral, en el sector de estudio, y con el fin de establecer un balance erosión acrecimiento (depositación), para este tramo de costa durante las dos épocas climáticas del año, se estableció necesario realizar un levantamiento de perfiles perpendiculares a la playa. Este trabajo estuvo a cargo de un equipo de investigadores del CIOH, quienes predeterminaron la ubicación de las estaciones de muestreo, durante salidas a campo en los meses de abril y octubre del año 1997. El establecimiento de la tendencia de la playa a sufrir procesos de erosión y acrecimiento se determinó a partir de la corrida del modelo matemático SBEACH. Este modelo, como ya se dijo, se basa en el cálculo de un perfil característico de la playa, para lo cual, es necesario ingresar al modelo las condiciones iniciales de comportamiento de la franja costera que abarca los cambios ocurridos a partir del “cero” de la costa hasta una distancia de 2500 metros mar afuera; para cada perfil diseñado. La configuración de la batimetría, el aspecto del contorno costero y el ángulo de incidencia del oleaje, principalmente entre otros, conforman los elementos básicos que definen la característica particular de un tramo de costa. Como todo fenómeno natural, estas condiciones características sobre las playas siempre buscarán el equilibrio entre sus factores modificadores, en busca de su preservación, por lo tanto, se podrá estimar que lo ocurrido durante una época climática se vea compensado por las condiciones de la siguiente época.

Como este proyecto, igualmente, exigió la necesidad de establecer cuatro puntos sobre el sector norte de Cartagena de Indias, para hacer el levantamiento de los perfiles de playa con los que se trabajaría en el modelo SBEACH, se aprovecho de la información consignada y levantada en campo por los investigadores en mención, y del bloque total de perfiles levantados, se consideran en este proyecto, los aquí denominados: perfil de playa 1, para el tramo de La Boquilla o estación Blas el Teso; perfil de playa 2, para el tramo de Crespo o estación Calle la Fiscalía; perfil de playa 3, para el tramo de Bocagrande o estación Capilla del Mar; perfil de playa 4, para el tramo de El Laguito o estación El Dorado. Se consideró tener en cuenta para los días 24 de abril y 9 de octubre del año 1997, días en que se realizaron los muestreos y como representativos de cada una de las épocas climáticas, las condiciones meteorológicas para las 07:00, 13:00 y 19:00 horas.

La clasificación del sedimento se basa ésta, en la composición mineralógica como a la textura del material. Algunos de los índices que se tuvieron en cuenta y que están de acuerdo a las formulas y límites de parámetros estadísticos diseñadas por Folk en 1974, para estos casos, son: el tamaño promedio del grano, la desviación estándar gráfica inclusiva, el grado de asimetría gráfica, el índice de arenas y la curtosis ó clasificación del

sedimento, para cada perfil de playa y para cada época climática del año. Se estimó el origen del sedimento o procedencia del mismo (continental o marino), de acuerdo a la cantidad en porcentaje de carbonato de calcio presente en el sedimento. Como resultado de la observación de estos parámetros, se establece que los sedimentos son principalmente de origen continental, y se destaca principalmente el dominio del índice de contenido de arena en el sedimento sobre el de naturaleza lodosa, es decir, que los sedimentos en un 90 a 100% son arenas, con diferencias en el diámetro de grano y en su clasificación; dominante en todo este sector de costa. Por otra parte, se estimó que la tendencia en composición de estos sedimentos se trata de arenas finas bien clasificadas de distribución unimodal y de tipo mesocúrtica, es decir, arenas de tipo normal (con una curtosis entre 0.90 y 1.11), acompañadas de arenas de tipo aplanada y angulosa. En general, se puede anotar que debido al grado bajo de la pendiente (2 a 6), en estas playas, estas se ven favorecidas a resguardar sedimento fino en tránsito de tipo arenoso como ya se indicó, y también, a recuperar la existencia de la berma al disminuir la energía del oleaje, más que todo en la época húmeda del año; en comparación a las condiciones "extremas" de la época seca, que provocan la conformación de una barra submarina, de donde provienen estos sedimentos, posiblemente.

Una comparación de los perfiles de playa para los cuatro puntos de estación entre Crespo y Bocagrande deja ver que existe un comportamiento de ellos en forma cóncava durante la época seca (perfil abril) y de forma convexa durante la época húmeda (perfil octubre). Los cambios que sufre el perfil costero no son más que la respuesta a la pérdida o ganancia de sedimento que para cada período climático se pueden establecer. Así que se aprecia un equilibrio entre ganancia y pérdida de sedimento en el sector de La Boquilla, a diferencia de los tres sectores restantes que evidencian sólo ganancia de sedimento. De las formas geométricas de los perfiles de playa se estima que tales formas se deben principalmente a la energía del oleaje, que en época seca es más influyente sobre el perfil costero con relación a la poca influencia que se presenta en la época húmeda.

Para el análisis morfológico de los perfiles costeros, además del uso del modelo SBEACH, como método llevado a cabo en campo, se levantaron para cada tramo de costa perfiles longitudinales perpendicular a la costa hasta una profundidad aproximada de 1.5 metros. Estos se nivelaron cada 3 metros utilizando el método de las varas de Jacob. De la lectura de los perfiles de playa donde se compara el perfil característico para cada época climática, y en cada estación considerada, se detecta que para todo el sector de Cartagena de Indias predomina el acrecimiento sobre la erosión, en gran volumen, a excepción en el sector de La Boquilla (estación Blas el Teso), donde existe un posible equilibrio entre estos dos factores. Ya anteriormente, se anotó la reconstrucción de la berma en la época húmeda, interpretada como un avance significativo de recuperación de la costa. Las formas convexas de los perfiles en su evolución confirman aún más la ganancia de sedimentos que elevan el índice porcentual de acrecimiento a todo lo largo de este sector de costa. Se puede confirmar que en los sectores de costa donde la playa se encuentra totalmente desprotegida al embate de las olas que arriban frontalmente son esencialmente sectores dominados por la acción erosiva del oleaje, y contrariamente, aquellos sectores protegidos y en donde las olas no arriban frontalmente sino de forma tangencial, son sectores dominados por el acrecimiento producto de la acumulación de sedimento.

## CONCLUSIONES

Del análisis del comportamiento de la dirección y velocidad del viento para el período 1992 - 1996, se destaca su carácter estacional, principalmente definiendo dos épocas climáticas en el año que consecuentemente se convierten en una acción muy influyente sobre los procesos sedimentarios, a todo lo largo de esta franja de costa. Asociado a este evento, se puede decir existe un “engranaje” configurado como un mecanismo de convergencia, donde activamente toman participación el viento (velocidad y dirección), el oleaje (energía), el material sedimentario (partículas de arenas o de limos), las corrientes litorales (tránsito de sedimentos) y la línea costera en su cambio morfológico, como resultante final. Se pudo establecer, bajo los anteriores criterios que, en época seca se presentaron los vientos más fuertes y de mayor persistencia, durante las horas del medio día, con valores promedios en el rango de velocidad de 3.4 a 5.5 m/s, especialmente llegando en dirección norte, responsable de la dinámica costera en toda la región. La influencia ya en época húmeda de vientos menos intensos y más debilitados, en un rango de velocidad de 1.5 a 3.3 m/s y soplando del oeste, es el principal aporte en el restablecimiento del equilibrio a que se ve sujeta la línea de costa; tal vez no sólo por la relativa “calma” en que persiste el viento, sino también, por la variabilidad o irregularidad en su comportamiento durante esta segunda época del año.

Por otra parte, se pudo estimar que a causa de la configuración batimétrica de este tramo de costa, de pendiente suave y más bien nada accidentada, con relativa linealidad de sus isóbatas acomodadas aparentemente paralelas a la línea de costa, como una especie de zona de aguas someras, que no superan los 7.0 metros de profundidad, existe un comportamiento del oleaje a ser oblicuo a la costa pero conformando unos cordones energéticos de olas atacando los frentes de las playas. La ausencia de cambios marcados en la morfología submarina en este trecho de costa, permiten aún más, el desarrollo de un carácter vulnerable de estas playas a sufrir grandes investidas, por parte del oleaje, especialmente en época seca. La región sufre un fenómeno cíclico, ajustado a la influencia de los vientos predominantes en cada época climática del año y al tránsito sedimentario controlado por la acción dinámica del oleaje.

## RECOMENDACIONES

Inicialmente, de significado valor resultaría establecer un documento que sintetice las características de la dinámica costera para el Caribe colombiano, presentado como de apoyo para muchos proyectos, con valores de sus principales variables en forma estacional, por épocas climáticas, y especialmente de la observación horaria de las 01:00, 07:00, 13:00 y 19:00 horas, para los parámetros de más trascendencia, como es por ejemplo el viento en superficie, el oleaje y las mareas, muy concernientes con la evolución de las playas.

La experiencia en la corrida de los modelos HISHWA y SBEACH dejó ver que existe prácticamente un total desconocimiento en cuanto a su uso, posiblemente debido a que se cuenta con un documento tutor de apoyo en lenguaje español y, a que pocas son las personas que se han comprometido tanto a manejarlo como a divulgar su uso, con ello desaprovechando una eficaz herramienta para el oceanógrafo interesado en el estudio

de los parámetros del oleaje en un ambiente natural. Particularmente, para la corrida de HISHWA, es muy recomendable trabajar con sectores cortos de costa, ya que genera mejor calidad en los resultados al diseñar una malla de cálculo de favorable resolución precisamente dependiendo del tamaño del área de estudio.

### REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

**Andrade A., C. A..** Análisis de la velocidad del viento en el mar Caribe. Bol. Cient. CIOH N° 13. Cartagena de Indias. p. 33 - 43. 1993.

**Booij N. y L. H. Holthuijsen.** Hiswa User Manual: Prediction of Stationary, Short - Crested Waves in Shallow Water With Ambient Currents. Version 100.21. Delf University of Technology. Departament of Civil Engineering. Delf. p. 1 - 76. 1993.

**Donoso, M. C..** Circulación de las aguas en el mar Caribe. Seminario Nacional de Ciencias y Tecnologías del Mar (Memorias). Comisión Colombiana de Oceanografía. Santiago de Cali. p. 345 - 356. 1990.

**Franco S., J. V..** Efecto de los fenómenos meteorológicos en la dinámica de las playas de Cartagena (Julio 1987 - Diciembre 1989). VIII Seminario Nacional de Ciencias y Tecnologías del Mar (Memorias). Comisión Colombiana de Oceanografía. Santiago de Cali. p. 132 - 140. 1990.

**Larson, M.; Kraus, N. C. y M. R. Byrnes.** Sbeach: Numerical Model for Simulating Storm Induced Beach Change; Report 2, Numerical Formulation and Model Test. Washington. p. 1 - 121. 1990.

**Martínez, E..** Evolución de los sectores del Laguito y Bocagrande en Cartagena. Bull. Ins. Geol. Bassin d'Aquitaine, N° 45. Bordeaux. p. 189 - 195. 1989.

**Martínez M., J. O..** Geomorfología y amenazas geológicas de la línea de costa del Caribe central colombiano (Sector Cartagena - Bocas de Ceniza). Publ. Geol. Esp. Ingeominas, N 19. Santafé de Bogotá. p. 1 - 62. 1993.

**Rosati, J. D.; Wise, R. A.; Kraus, N. C. y M. Larson.** SBEACH: Numerical Model for Simulating Storm - Induced Beach Change; Report 3, User's Manual. Washington. p. 1 - 51. 1993.

**Suzunaga L., J. O.; Molina M., A.; Pelgrain D., A. y C. Parra LI..** Estudio de la oceanografía costera de la región de Cartagena y sus alrededores aplicando la percepción remota. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas - Misión Técnica Francesa. Cartagena de Indias. p. 2 - 14; 30 - 35. 1990.

**Vernette, G..** Morfología Costera. Primer Curso Seminario Taller de Peritos Navales en Oceanografía Física y Morfología Costera. Escuela Naval "Almirante Padilla" - CIOH. Cartagena de Indias. p. 25 - 70. 1993.