

CAPACIDAD DE TRANSPORTE POTENCIAL LONGITUDINAL DE SEDIMENTOS A ESCALA INTRA- ANUAL EN PUNTA YARUMAL, DELTA DEL RÍO TURBO, GOLFO DE URABÁ, A PARTIR DE LA SIMULACIÓN DE UN CLIMA MARÍTIMO

Luis Gabriel Molina Flórez¹, Andrés Fernando Osorio Arias¹ y Luis Jesús Otero Díaz^{2,3}

- 1 Universidad Nacional de Colombia, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Grupo de Investigación en Oceanografía e Ingeniería Costera (Océánicos). Carrera 80 No. 65-223 Núcleo Robledo, Medellín, Colombia. lgmolinaf@unal.edu.co, afosorioar@unal.edu.co*
- 2 Escuela Naval Almirante Padilla, Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH), Isla de Manzanillo, Cartagena, Bolívar, Colombia.*
- 3 Universidad del Norte, Departamento de Física. Kilómetro 5 vía a Puerto Colombia, Barranquilla, Colombia (dirección actual). ljotero@uninorte.edu.co*

RESUMEN

Se estiman las tasas de transporte potencial longitudinal de sedimentos (TPLS) a escala intra-anual y anual, influenciado por el oleaje en la zona de delta formada por la desembocadura del río Turbo, ubicada sobre la margen oriental del golfo de Urabá, específicamente en Punta Yarumal, a partir de tres ecuaciones propuestas por varios autores. El artículo contiene una descripción general de la zona de interés, posteriormente se realiza un resumen de la metodología llevada a cabo para el desarrollo de este estudio y, finalmente, se estiman las tasas de TPLS con las tres ecuaciones propuestas.

PALABRAS CLAVES: Transporte potencial longitudinal de sedimentos, clima marítimo, SWAN, CERC, ecuaciones de Kamphuis y Bayram *et al.*

ABSTRACT

Potential longitudinal transport capacity of sediments at the intra-annual scale, in the coastal area of Punta Yarumal, Gulf of Urabá, from the simulation of a maritime climate. In this article we estimate the rate of intra-annual and annual longshore sediment transport, influenced by waves in the delta formed by the mouth of the Turbo river, located on the eastern margin of the Gulf of Urabá, specifically Punta Yarumal, from three equations proposed by various authors. The article contains an overview of the area of interest, a summary of the chosen methodology to develop this study, and finally, once the estimated longshore transport rates are calculated, the results, discussion and conclusions are presented.

KEYWORDS: Potential longitudinal transport of sediments, maritime climate, SWAN, CERC, Kamphuis and Bayram *et al.* equations.



INTRODUCCIÓN

La acumulación de sedimentos arrastrados por la corriente de los ríos forman en su desembocadura geoformas costeras llamadas deltas, cuya geometría varía de acuerdo al tipo, capacidad de acumulación y transporte de sedimentos del río y a su interacción con el oleaje, la corriente de marea, el régimen de los vientos y el sistema de corrientes que dominan la zona de influencia. La dinámica de los deltas está definida por el tipo de transporte de sedimentos, el cual puede ser de forma transversal o longitudinal. El primer tipo se caracteriza por presentar cambios en el perfil y variaciones estacionales reversibles de tipo natural que ocurren en el corto plazo. Caso contrario ocurre con el transporte longitudinal de sedimentos, el cual se caracteriza por presentar cambios en planta y variaciones permanentes irreversibles de tipo natural que ocurren en el mediano y largo plazo. Dado el caso de interés, el análisis específico del transporte potencial longitudinal de sedimentos (TPLS) permite identificar que la ocurrencia de esta condición hidrodinámica está sujeta a la presencia de un tipo de corriente generada por la incidencia oblicua del oleaje en rotura y el gradiente de altura de ola. El presente artículo está orientado a analizar y estimar el TPLS a escala anual e intra-anual, influenciado por el oleaje en la zona de delta formada por la desembocadura del río Turbo, llamada Punta Yarumal.

ÁREA DE ESTUDIO

Punta Yarumal se encuentra ubicada sobre la margen sur de la desembocadura del río Turbo, en el municipio de Turbo, región conocida como el Urabá antioqueño. El municipio de Turbo hace parte del golfo de Urabá y limita al norte con el mar Caribe y el municipio de Necoclí, al oriente con los municipios San Pedro de Urabá, Apartadó y el departamento de Córdoba, al sur con los municipios Carepa, Chigorodó y Mutatá, y al occidente con el departamento de Chocó (Figura 1). Tiene una extensión de 3090 km², es el municipio con mayor representatividad en área en la zona costera y es centro de comercio y transporte para toda la región del golfo (DNP *et al.*, 2006).

La evolución de Punta Yarumal ha sido controlada principalmente por tres factores: el transporte de una fracción importante de los sedimentos acumulados y acarreados por el río Turbo, la interrupción del transporte de sedimentos litorales a lo largo de la costa, debida a la formación y avance del delta del río Turbo, y a la interacción de la incidencia del oleaje con la descarga de caudal del río Turbo y la formación del delta, ya que genera la refracción y difracción del oleaje justo en la desembocadura, trayendo consigo procesos de erosión y sedimentación a lo largo de Punta Yarumal, asociados a este proceso de transformación del oleaje por la interacción ola-corriente-caudal-delta (Invemar y Corpourabá, 2003). Punta Yarumal tiene una

longitud aproximada de 3 km y un ancho promedio de 90 m hacia el final de la misma. La nueva espiga del delta del río Turbo, al norte, tiene una longitud aproximada de 400 m y un ancho promedio de 35 m y actúa como un espolón, interrumpiendo el transporte litoral de los sedimentos que vienen del norte. Al sur del delta, la antigua espiga de Turbo está experimentando un proceso de erosión debido al déficit de sedimentos que se quedan atrapados en el delta y a la fuerte incidencia oblicua del oleaje en la zona. Los sedimentos erosionados en la parte norte de la espiga son depositados en su extremo sur (García-Valencia, 2007). Son numerosos los estudios que se han realizado referentes al tema de balances sedimentarios y la identificación de las áreas de erosión y sedimentación a lo largo de toda la línea de costa del golfo de Urabá. Los estudios más reciente son los elaborados por Velásquez (2000), Correa y Vernet (2004), Bernal *et al.* (2005) y Correa y Alcántara (2005), en los cuales se ha aportado información valiosa sobre los procesos costeros de varios de los sectores en el golfo durante los últimos años (García-Valencia, 2007). En el mapa de erosión-acumulación del borde litoral del golfo de Urabá, modificado de Velásquez (2000), Correa y Vernet (2004) y Bernal *et al.* (2005), se puede apreciar que Punta Yarumal presenta sedimentación por un valor de + 40 m/año.

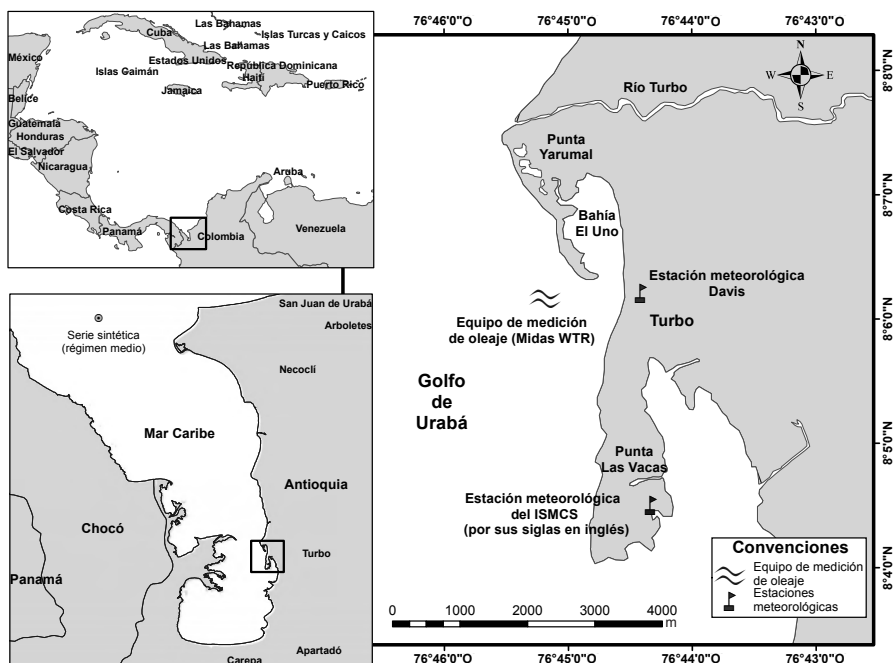


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio.

La región de Urabá presenta una climatología influenciada por la migración latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) (Poveda, 2004). Dicha migración determina la existencia de dos épocas climáticas muy marcadas a lo largo del año en el litoral Caribe colombiano. Una época seca identificada entre diciembre y marzo, y una época húmeda entre abril y noviembre (Andrade, 1993).

En el golfo de Urabá, la temperatura media es 27 °C, con máximos y mínimos de 40 y 19 °C (Correa y Vernet, 2004; Roldán, 2008); la humedad relativa presenta valores medios mensuales que fluctúan, siendo 86% en noviembre y 80% en febrero (García-Valencia, 2007). Se registra un total de precipitación anual de 2500 mm aproximadamente; la distribución de la precipitación mensual es monomodal, con un período lluvioso que por lo general se establece entre mayo y noviembre (250 mm en noviembre) y un período seco desde diciembre hasta mediados de abril (100 mm en febrero). A mediados del año se presenta una etapa de transición, reflejada en una leve disminución de los niveles pluviométricos, especialmente en los meses de junio y julio respecto a los registrados de mayo a noviembre (García-Valencia, 2007); y presenta un régimen micromareal con amplitudes máximas de 0.4 m (Correa y Vernet, 2004). En general, la climatología del golfo está influenciada por una época seca marcada, la cual se caracteriza por el predominio de los vientos alisios del Norte y Noreste (velocidades medias de 4 m/s y máximas de 9.4 m/s en febrero) y una época húmeda significativa, que se presenta durante agosto y noviembre, cuando las lluvias alcanzan 300 mm/mes, con un promedio multianual de precipitación de 3000 mm en el sector de Turbo y vientos predominantes del Sur (Corporación y Universidad Nacional, 1998).

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología aplicada para el desarrollo de este estudio se basó en seis etapas fundamentales las cuales fueron: 1. Recopilación de información secundaria para definir las condiciones de contorno y alimentar el modelo hidrodinámico a utilizar. 2. Realización de una campaña de campo para determinar los procesos dominantes del área de estudio y poder contar con la información necesaria para calibrar y validar el modelo hidrodinámico. 3. Modelación numérica de los procesos físicos de generación, propagación y transformación del oleaje, con el fin de poder caracterizar la hidrodinámica anual e intra-anual de la zona de estudio. 4. Determinación de los regímenes medios de oleaje y viento de la zona de estudio a partir de la información secundaria recopilada. 5. Generación de series de oleaje en los puntos de control ubicados a lo largo de la zona de rotura. 6. Estimación del transporte potencial longitudinal de sedimentos a partir de la aplicación de las formulaciones de CERC (1984), Kamphuis (1991) y Bayram *et al.* (2007).

Recopilación de información secundaria

Fue necesario adquirir una base de datos para poder caracterizar la climatología de la zona y definir las condiciones de contorno para la simulación de los modelos físicos. La información recopilada fue principalmente la de los perfiles de playa medidos durante la campaña de campo en Punta Yarumal por Estrada y Gil (2005). Para la definición de la condición de contorno de batimetría de todo el golfo de Urabá se utilizó la información de las cartas náuticas elaboradas por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH), complementada y actualizada con batimetrías de detalle elaboradas en zonas específicas del golfo durante la campaña de campo. Así mismo, se tuvo acceso a levantamientos batimétricos realizados por la empresa Buceos Industriales y Dragados de Urabá. Como condición de contorno de vientos superficiales, se utilizó la información registrada por la estación Turbo, propiedad del International Station Meteorological Climate Summary (ISMCS), que cuenta con una longitud de registro de 35 años entre enero de 1949 y mayo de 1984; esta estación, estuvo ubicada en las coordenadas $8^{\circ}04'30''\text{N}$ - $76^{\circ}44'20''\text{O}$, en el sector de Punta Las Vacas en Turbo. Finalmente, para definir las características del oleaje en las fronteras abiertas, se utilizó la serie sintética de oleaje de 27 años (desde enero de 1979 hasta diciembre de 2006) con resolución horaria generada por Ortega *et al.* (2010) en el punto de coordenadas $8^{\circ}36'0''\text{N}$ - $77^{\circ}6'0''\text{O}$ mediante la propagación del oleaje a partir de datos de vientos del reanálisis NARR y batimetrías del Caribe con el modelo SWAN (Simulating Waves Near Shore) desarrollado por la Universidad de Delft (Booij *et al.*, 1999) (Figura 1). Las series del modelo fueron corregidas mediante el ajuste de las mismas a partir de los datos de dos boyas pertenecientes a la Dirección General Marítima, ubicadas en Barranquilla y Puerto Bolívar (Ortega *et al.*, 2010).

Campaña de campo

Para contar con la información necesaria para calibrar y validar el modelo, se realizó una campaña de campo durante la época climática seca característica del área de estudio. La campaña se llevó a cabo entre 23 y 27 de marzo de 2009. Durante la campaña de campo se registró simultáneamente el forzador climático de magnitud y dirección del viento con una estación meteorológica Davis Vantage Pro, ubicada en tierra en un punto cercano a Punta Yarumal, situado en las coordenadas $8^{\circ}5'10.44''\text{N}$ - $76^{\circ}44'33.63''\text{O}$. Los registros de oleaje se tomaron con un sensor de presión Midas WTR, ubicado a 660 m de la línea de costa de Punta Yarumal en las coordenadas $8^{\circ}22'19.08''\text{N}$ - $76^{\circ}48'13.89''\text{O}$ y a una profundidad de 5.82 m (Figura 1). Como apoyo para la calibración del modelo, se contó con los datos de campo que utilizó Álvarez-Silva (2010), para calibrar y validar el modelo SWAN para la

bahía Colombia. En la campaña de campo también se realizaron levantamientos batimétricos de detalle del área de estudio con una ecosonda Hummingbird Fishfinder 525, para complementar las batimetrías de las cartas náuticas, y dos levantamientos de líneas de costa (una durante la época seca, 25 de marzo de 2009, y una segunda durante la época húmeda, 19 de noviembre de 2009). Finalmente se tomaron nueve muestreos de sedimentos de toda la playa húmeda de la zona expuesta al oleaje de Punta Yarumal, cubriendo toda el área de estudio y se midieron nueve perfiles de playa a lo largo de la línea de costa cada 60 m a partir de la zona media de Punta Yarumal, hasta su extremo sur, extendiéndose hasta 100 m o hasta encontrar una profundidad de 2 m. Para complementar y tener una relación de la pendiente media de la playa de esta zona, y poder aplicar las ecuaciones de transporte de sedimentos, se trabajó con los perfiles medidos en Punta Yarumal por Estrada y Gil (2005), quienes midieron 30 perfiles batimétricos a lo largo de la línea de costa cada 100 m, medidos a partir de la actual desembocadura para cada época climática, extendiéndose hasta 30 m o hasta encontrar profundidades de 3 m. En la Figura 2 se ilustran los muestreos y perfiles de playa levantados durante la campaña de campo y los de Estrada y Gil (2005).

Modelación numérica

Las simulaciones numéricas se realizaron con el modelo de oleaje SWAN (Booij *et al.*, 1999). Este modelo de tercera generación incluye ecuaciones que propagan el oleaje de fondo (*Swell*), generan oleaje local (*Sea*) producido por el viento local, tiene en cuenta los efectos de la fricción por el fondo y representa adecuadamente los procesos de transformación del oleaje (refracción, difracción, asomeramiento y disipación por rotura).

El modelo SWAN resuelve la ecuación de balance de acción de la onda:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial C_{g,x} N}{\partial x} + \frac{\partial C_{g,y} N}{\partial y} + \frac{\partial C_{g,\sigma} N}{\partial \sigma} + \frac{\partial C_{g,\theta} N}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad [1]$$

donde $N(\sigma, \theta)$ es la densidad de acción de la onda y está definida como $N = E(\sigma, \theta) / \sigma$ donde E es el espectro de densidad de energía y σ es la frecuencia angular en la cual se distribuye la energía del oleaje, C_g es velocidad de grupo en el espacio, θ es la dirección de propagación de la onda y S son la fuente y sumideros de energía:

$$S = S_{in} + S_{ds,w} + S_{ds,b} + S_{nl4} + S_{nl3} \quad [2]$$

Los términos en el lado derecho de la ecuación son: viento (S_{in}), *whitecapping* ($S_{ds,w}$), fricción por fondo ($S_{ds,b}$), interacciones cuádruples onda-onda (S_{n14}) e interacciones triples de onda-onda (S_{n13}). Antes de la aplicación del modelo en la predicción del comportamiento del oleaje en el golfo y en especial de Punta Yarumal, se realizaron análisis de sensibilidad a varios parámetros físicos y numéricos.

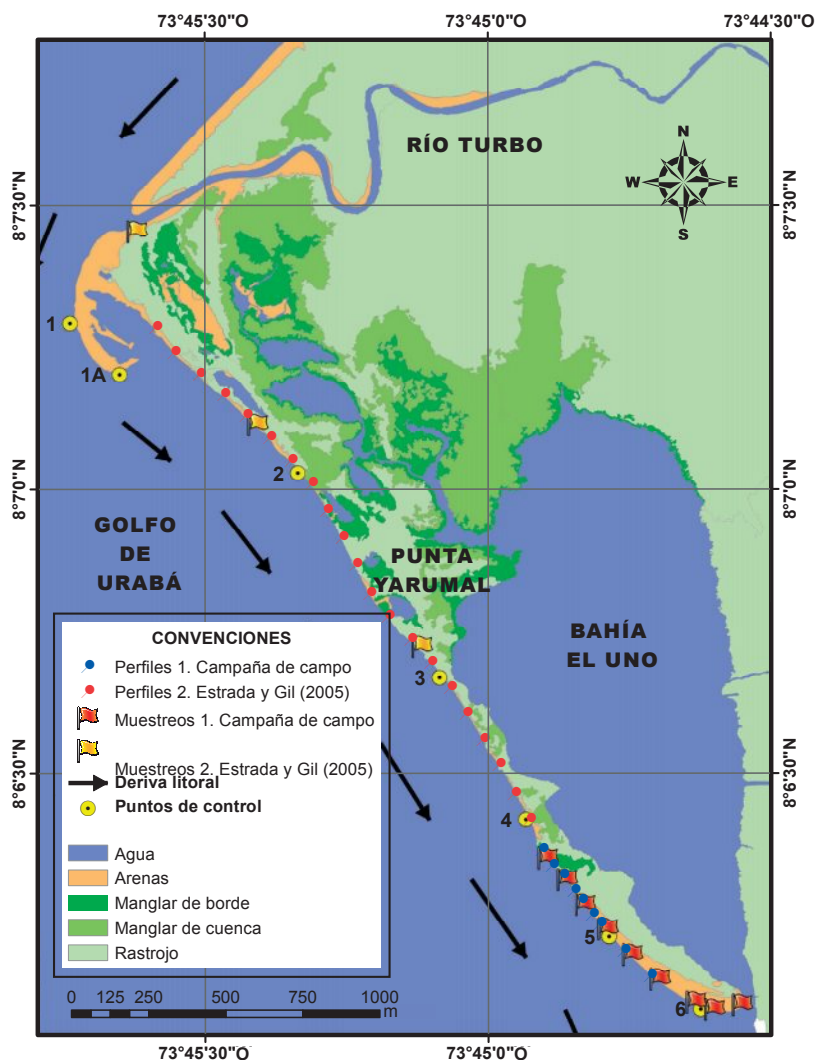


Figura 2. Localización de los muestreos y perfiles de playa levantados durante la campaña de campo y los de Estrada y Gil (2005) en Punta Yarumal. Localización de los muestreos realizados y los perfiles medios. Fuente: Ortofotomapa construido por Expedición Estuarina, golfo de Urabá, fase 1.

Determinación de los regímenes de oleaje y viento

Para la determinación de los regímenes medios de oleaje y viento en el golfo de Urabá: 1. Se implementó el modelo numérico SWAN en el golfo, donde se llevaron a cabo los análisis de sensibilidad al tamaño de celda y la posibilidad de bajar de escala mediante el uso de mallas anidadas debido al nivel de detalle al que se quiere llegar. 2. Se efectuó la calibración y validación del modelo SWAN con el objetivo de verificar que el modelo representara adecuadamente el oleaje medido durante la campaña de campo. 3. Posteriormente se determinó el régimen medio de viento con la información de la estación Turbo; de estos regímenes se seleccionaron los casos de simulación de viento que definen los regímenes medios de oleaje local. 4. Luego se utilizó la serie sintética de 30 años de oleaje en la entrada del golfo generada por Ortega *et al.* (2010) para reconstruir el régimen medio de oleaje de fondo en el golfo de Urabá. 5. Se propagaron los casos de régimen medio de oleaje y viento reconstruidos mediante la anidación de mallas hasta la escala de detalle del sitio de interés.

Generación de series de oleaje

Para estimar el potencial de transporte longitudinal sobre una costa, independiente de la ecuación que se adopte, es indispensable conocer las alturas de las olas en rotura, su ángulo de incidencia con respecto a la línea de costa y las respectivas frecuencias a lo largo de un período. De acuerdo con lo anterior, fue fundamental generar las series de oleaje para estimar el transporte potencial longitudinal de sedimento en la línea costera de Punta Yarumal, asociado a la corriente longitudinal o deriva litoral del área de estudio, causada por la incidencia oblicua del oleaje (Figura 2).

Para la generación de las series de oleaje sintéticas justo en la zona de rotura, se seleccionaron los puntos críticos de erosión-sedimentación a lo largo de la línea de costa, teniendo en cuenta la superposición de las dos líneas de costa levantadas en las dos fechas antes mencionadas. Finalmente se procedió a generar la series para cada uno de los puntos de control identificados, a partir de los casos de simulación del régimen medio de oleaje y viento registrados mediante el análisis estadístico de las series, donde se hallaron los promedios mensuales multianuales de las variables de la serie sintética de oleaje y de las variables de la series de estadísticos de vientos de la serie de Turbo. Los puntos de control escogidos fueron siete en total y su distribución se ilustra en la Figura 2.

Transporte potencial longitudinal de sedimentos

Para estimar el transporte potencial longitudinal de sedimentos en este estudio, se emplearon las siguientes tres fórmulas: Coastal Engineering Research Center-Shore Protection Manual (CERC; Shore Protection Manual, 1984), Kamphuis (1991) y

Bayram *et al.* (2007). Todas las fórmulas tienen en cuenta como parámetro inicial la altura de ola en rotura. Las formulaciones simplificadas se presentan a continuación.

Fórmula CERC (Shore Protection Manual, 1984) o “Método del flujo de energía”

Parte de la hipótesis que el transporte de sedimentos es directamente proporcional al flujo medio de energía de la ola en la zona de rompientes. Para la predicción de la tasa de transporte de sedimentos tiene en cuenta la tasa de transporte de peso sumergido (I_l), y la tasa potencial de transporte volumétrica (Q_l). Esta fórmula es la más aplicada para la estimación cuantitativa del transporte longitudinal de sedimentos.

$$I_l = KP_l = K(EC_g)_b \text{ sen} \alpha_b \text{ cos} \alpha_b \quad [3]$$

La tasa de transporte potencial de sedimentos sumergidos se define como:

$$I_l = (\rho_s - \rho)g(1-n) Q_l \quad [4]$$

La ecuación de CERC relaciona la tasa de transporte de peso sumergido con la componente longitudinal del flujo de energía por unidad longitudinal de playa, P_l :

$$P_l = (EC_g)_b \text{ sen} \alpha_b \text{ cos} \alpha_b \quad [5]$$

$$E_b = \frac{\rho g H_b^2}{8} \quad [6]$$

$$C_s \cong C = \sqrt{gh_b} = \sqrt{\frac{gH_b}{k}}, \text{ con } k = \frac{H_b}{h_b}, \text{ índice de rotura} \quad [7]$$

donde K es un coeficiente de proporcionalidad adimensional que, según CERC, es una de las ventajas de utilizar I_l en lugar de Q_l ; E , es la energía evaluada en la línea de rotura (aguas someras); C_g , es la celeridad de grupo en la línea de rotura, relacionada con la celeridad C utilizando la teoría de onda lineal para aguas someras. El flujo de energía del oleaje está representado por el término $(EC_g)b$, evaluado en la zona de rotura y; H_b y α_b son la altura de ola en rotura y el ángulo de rotura del oleaje respecto a la línea de costa. Para la aplicación de la fórmula CERC, se han considerado tres valores de K , de acuerdo con varios autores: el propuesto por Kamphuis *et al.* (1986), en donde propone una nueva fórmula en la que K es inversamente proporcional al diámetro medio del sedimento (D_{50}); Komar e Inman (1970) introducen un valor

de diseño recomendado de $K = 0.77$ para su utilización con la altura de ola media cuadrática (H_{msb}), valor usado comúnmente en los cálculos de tasas de transporte longitudinal de sedimentos costero; Shore Protection Manual (1984) propone un valor constante de $K = 0.39$, basado en cálculos donde se utiliza la altura de ola significativa. Finalmente a partir de la relación entre Q_l y Q_b , se obtiene la expresión de la tasa potencial de transporte de sedimentos en términos de volumen:

$$C_l = \frac{I_l}{(\rho_s - \rho)g(1 - n)} = K \left(\frac{\rho \sqrt{g}}{16k^{1/2}(\rho_s - \rho)(1 - n)} \right) H_b^{5/2} \sin(2\alpha_b) \quad [8]$$

donde,

ρ_s = Densidad del sedimento

ρ = Densidad del agua de mar

g = Aceleración gravitacional

n = Porosidad

$(1-n)Q_l$ = Volumen sólido de transporte

K = Índice de rotura

Fórmula Kamphius (1991) o “Método del análisis dimensional”

Fue propuesta por Kamphius después de muchas experimentaciones usando datos de campo y de laboratorio y está basada en el análisis dimensional debido a que muchos de los procesos físicos y sus interacciones no son bien conocidos. Con base en esto Kamphuis concluyó que el transporte de sedimentos a lo largo de la costa como masa sumergida expresada en kg/s, está dado por la siguiente fórmula:

$$Q_l = 2.27 H_b^2 T_p^{1.5} m_b^{0.75} D_{50}^{-0.25} \sin^{0.6}(2\alpha_b) \quad [9]$$

donde H_b , es la altura de ola en rotura; T_p , el período de pico; m_b , es la pendiente de la playa; D_{50} , es el diámetro medio y α_b , es el ángulo de rotura del oleaje respecto a la línea de costa.

Fórmula Bayram *et al.* (2007)

Propusieron una nueva fórmula para predecir el transporte longitudinal de sedimentos litorales a partir de los principios físicos del transporte de sedimentos, asumiendo que la rotura de las olas moviliza el sedimento; el cual subsecuentemente es movido por una corriente media. Utilizó datos de alta calidad medidos en campo y en laboratorio para evaluar la capacidad predictiva de la fórmula. Su gran aporte, a

diferencia de las demás fórmulas, es la inclusión de un parámetro principal llamado “coeficiente de transporte” ε , el cual representa la eficiencia de las olas para mantener los granos de arena en suspensión y se expresó a través de un número de Dean sobre la base de un análisis dimensional. La nueva fórmula es útil para aplicaciones prácticas en las zonas costeras, así como para la elaboración de modelos numéricos de transporte de sedimentos y cambios en la morfología de las playas. La fórmula propuesta es la siguiente:

$$Q_{lst} = \frac{\varepsilon}{(\rho_s - \rho)(1 - a)g w_s} F \bar{V} \quad [10]$$

$$\varepsilon = \left(9.0 + 4.0 \frac{H_{s,b}}{w_s T_p} \right) 10^{-5} \quad [11]$$

donde,

ε = Coeficiente de transporte

$\bar{V}$ = Velocidad Media de la corriente a lo largo de la costa en la zona de rompientes

ρ_s = Densidad del sedimento

ρ = Densidad del agua de mar

g = Aceleración gravitacional

a = Porosidad

$H_{(s,b)}/(w_s T_p) = \text{Número de Dean}$

En la Tabla 1 se ilustran los valores de las constantes utilizadas para la obtención de las tasas media anual y media mensual multianual de transporte potencial longitudinal de sedimentos para cada uno de los siete puntos a lo largo de la línea de costa de Punta Yarumal con cada una de las formulaciones. Los valores ilustrados en la Tabla 1 corresponden a constantes comúnmente utilizadas y recomendadas para el cálculo del TPLS en algunos textos y artículos (pagua de mar, $\rho_{\text{sedimento}}$, n = porosidad), fue asumida de acuerdo con la literatura, w_f = velocidad de caída del sedimento fue estimada a partir de Dean (1987), cf = coeficiente de fricción, es una constante que fue asumida de Larson y Kraus (1991), A = factor de forma del sedimento, fue estimada a partir de Dean (1987), y t = tiempo en el cual se va a evaluar el TPLS. Las demás variables necesarias para estimar la capacidad de transporte potencial longitudinal de sedimentos se describirán más adelante.

Tabla 1. Resumen de valores de las constantes utilizados para calcular las tasas de transporte potencial longitudinal de sedimentos, medias mensuales multianuales y medias anuales para los siete puntos de control para cada una de las fórmulas sugeridas. * El tiempo para cada mes se calculó de acuerdo con el número de días respectivo llevándolo a su equivalencia en horas. Para el caso ilustrado es para los meses con 31 días.

Variables	Mensuales	Anuales
ρ (kg/m ³)	1025	1025
ρ_s (kg/m ³)	2650	2650
poro (adim)	0.35	0.35
cf (adim)	0.005	0.005
A (adim)	0.1	0.1
t (s)	744*	8760

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Campaña de campo

Los registros de oleaje y viento de la Figura 3, en la época seca, muestran que las mayores alturas de ola no coinciden con los picos máximos de las velocidades de los vientos, evidenciando posiblemente una mayor influencia en esta zona de oleaje de fondo (*Swell*) que oleaje por viento local (*Sea*), en esta época del año. Con relación a los vientos, se observó que la dirección predominante durante la campaña de campo fue del noroeste, coincidiendo con la dirección de la configuración y alineación que tiene el golfo.

A los nueve muestreos realizados en campo, se les practicaron análisis granulométricos con el fin de determinar el diámetro medio del sedimento (D_{50}) presente a lo largo de Punta Yarumal. En la Figura 4, se ilustra la curva granulométrica de una de las muestras tomadas durante la campaña de campo. Esta distribución granulométrica característica es similar en las demás muestras analizadas.

De acuerdo con la Figura 4, el D_{50} del sedimento analizado es 0.2 mm. Ahora, basado en la clasificación de Wentworth (1922), se nota que el valor del tamaño medio del sedimento está dentro del ámbito de tamaño entre 0.25 y 0.125 mm, clasificándolo como una arena fina. Por lo tanto, para efectos del cálculo de las series de transporte potencial longitudinal de sedimentos, el valor de D_{50} medio que se asumirá para las playas de Punta Yarumal es de 0.2 mm. Como se hizo mención anteriormente, a partir de los nueve perfiles de playa levantados durante la campaña de campo, se determinaron las respectivas pendientes de playas (*mb*) en el área de influencia de los puntos de control 4, 5 y 6 (Figura 2), donde se van generar las series de oleaje y transporte potencial longitudinal de sedimento medio mensual

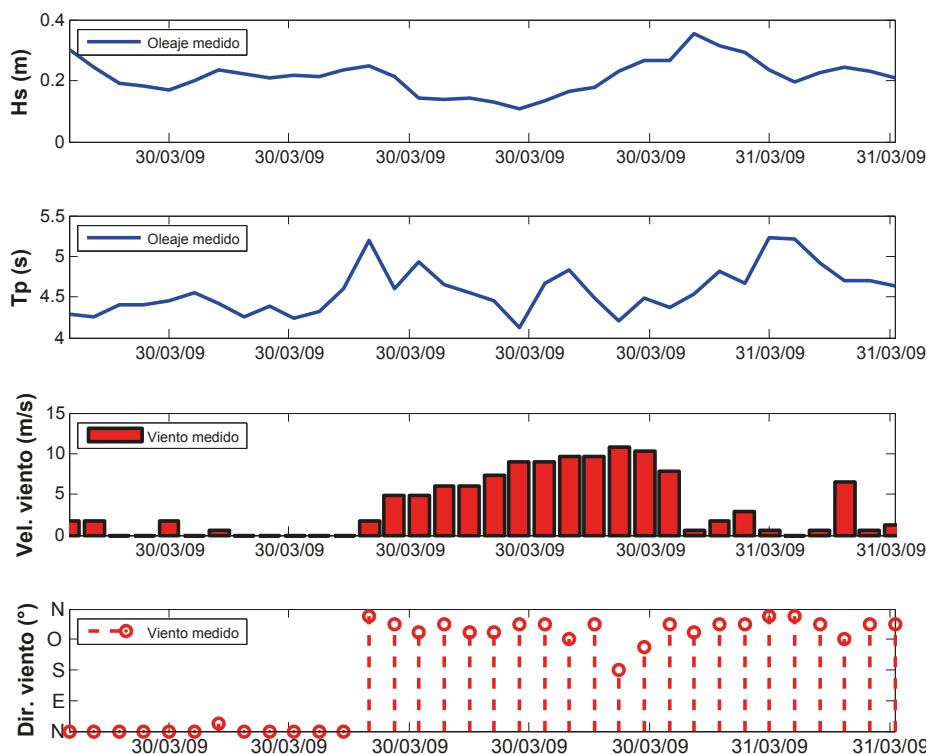


Figura 3. Mediciones de campo simultáneas de la series de oleaje [alturas de olas significantes (Hs) y período de pico (Tp)] y viento (magnitud y dirección).

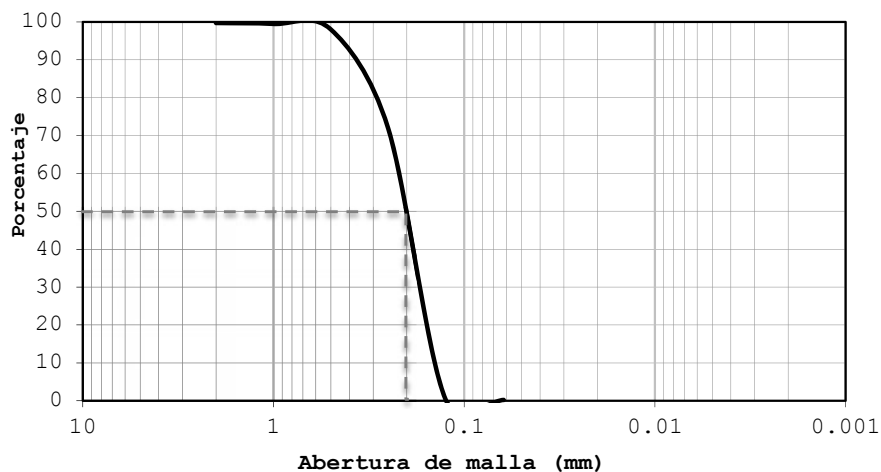


Figura 4. Curva granulométrica de sedimentos característica de la zona de estudio.

multianual y anual. Para definir las pendientes de playa para los puntos de control 1, 1A, 2 y 3 (Figura 2), se asumieron las pendientes de acuerdo con los perfiles realizados por Estrada y Gil (2005). La pendiente media aferente para cada uno de los puntos de control y los ángulos de incidencia del oleaje sobre los mismos se encuentran ilustradas en la Tabla 2.

Tabla 2. Pendientes medias de las playas aferentes a los siete puntos de control y ángulos de incidencia de las olas sobre los mismos.

Variable	P1	P1A	P2	P3	P4	P5	P6
mb (adim)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.02	0.05	0.07
db (°)	33	90	48	22	25	58	70

Análisis de sensibilidad del modelo de oleaje

El proceso de calibración consistió en ajustar el modelo de simulación numérico (SWAN) para reproducir matemáticamente los datos de oleaje medidos en campo. Para ello se realizaron algunos análisis de sensibilidad con el fin de definir el tamaño de las celdas que conforman la malla de cálculo, de modo que los tiempos de simulación y la precisión de los resultados fueran óptimos. Debido a la falta de registros de oleaje en el golfo de Urabá, para alimentar el modelo fue necesario extender el dominio de simulación hasta un punto donde se tuviera dicha información. La coordenada del punto más cercano al área de estudio donde se cuenta con información de oleaje es 8.6°N-77.10°O, punto en el cual se tiene la serie sintética de 30 años de registro generada por Ortega *et al.* (2010). Por estas razones, se tomó la decisión de hacer una ejecución general del golfo de Urabá, y luego bajar de escala hasta el sitio de interés (Punta Yarumal) mediante el uso de mallas anidadas. De esta manera se conservan condiciones realistas en los contornos de las mallas, lo cual se podría ver reflejado en resultados más acordes con la realidad. Basado en lo anterior, se optó por trabajar las simulaciones posteriores, con celdas cuadradas de 200 x 200 m para la malla de cálculo de todo el golfo y celdas cuadradas de 70 x 70 m para la malla anidada de detalle de Punta Yarumal. En la Figura 5, se ilustran las batimetrías de las mallas computacionales utilizadas para las simulaciones realizadas en este estudio.

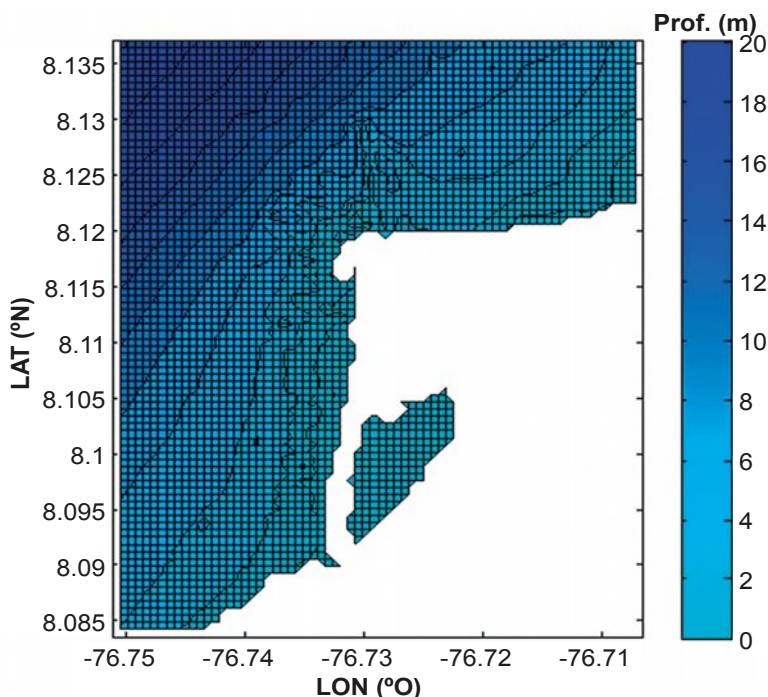


Figura 5. Batimetría de la malla anidada de Punta Yarumal.

Calibración y validación del modelo

Para calibrar el modelo se usó como condición de frontera (representando el oleaje de fondo) para el modelo SWAN, un contorno de espectros de oleaje generado por el grupo Oceánicos en el Caribe colombiano cercano al golfo de Urabá, a partir de vientos del reanálisis del NARR con el modelo SWAN (Ortega *et al.*, 2010). Debido a que este contorno se encontraba a una escala oceánica [a una resolución de malla computacional de 3 min (5500 x 5500 m)], fue necesario generar varias mallas anidadas para bajar de la escala oceánica hasta llegar a la escala local de Punta Yarumal, donde la simulación anterior creaba la condición de contorno para una subsiguiente simulación en una malla anidada más detallada. Cabe resaltar que el modelo SWAN permite el uso de estas mallas anidadas, pero exige que el factor de escala de la resolución de una malla a la de otra sea máximo de 3 (SWAN Team, 2009). Con base en lo anterior, se requirió el uso de cinco mallas en total (3 min, 1 min, 600 x 600 m, 200 x 200 m y 70 x 70 m). La primera es una malla general del Caribe donde se encuentra incluido el golfo de Urabá y abarca un área que va desde el límite de 7.9 a 9.5°N hasta 77.5 a 76.2°O. Las mallas anidadas subsiguientes son aproximaciones hasta llegar al detalle de Punta Yarumal. Como condiciones de

contorno de viento para representar el oleaje local en el modelo, se utilizaron dos campos de vientos de la siguiente manera: para las mallas de 3 min, 1 min, 600 x 600 m y 200 x 200 m las simulaciones fueron llevadas a cabo a partir de los mismos campos de vientos del reanálisis NARR, que se usaron para generar las condiciones de contorno en la frontera de la malla de cálculo; y para la malla de 70 x 70 m se utilizó la serie de vientos medida durante la campaña de campo, ajustada con la serie de vientos del reanálisis NARR para el periodo de medición de la campaña (ver línea punteada negra en la Figura 6). Este procedimiento se efectuó porque los vientos medidos durante la campaña de campo no fueron constantes y la longitud de registro no fue lo suficientemente larga (ver línea continua negra en la Figura 6) como para calentar el modelo.

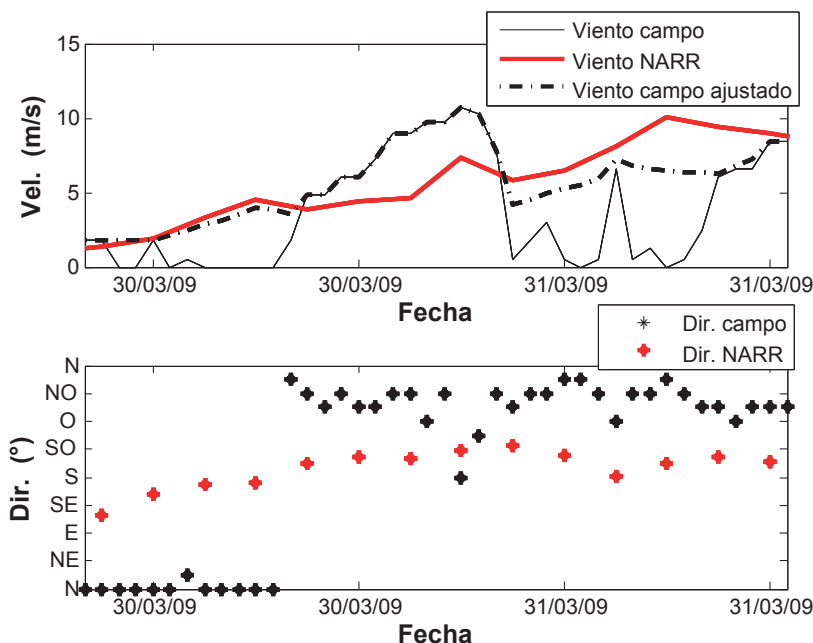


Figura 6. Serie de viento de campo ajustada con los vientos del NARR.

Las Figuras 7 y 8 ilustran los resultados de la calibración para Punta Yarumal y la bahía Colombia respectivamente. Los resultados muestran que el modelo SWAN es capaz de reproducir la tendencia de la serie de oleaje medida en campo, es decir, logra representar la variación de altura de ola significativa (H_s) en el área de estudio, a pesar de que existen diferencias entre los datos medidos y los modelados con errores cuadráticos medios (ECM) de 0.13 (es decir 0.13 m de altura de ola) en Punta Yarumal y la bahía Colombia. Esta diferencia en cuanto a magnitud de las olas (H_s),

para el caso de bahía Colombia no es tan significativas y se demuestra con el valor de correlación calculado de $R^2 = 0.82$ (correlación positiva fuerte), mientras que para el caso de Punta Yarumal esta diferencia es muy significativa. Sin embargo, arrojó un valor de correlación $R^2 = -0.51$ (correlación negativa débil) siendo significativo con un nivel de confiabilidad del 95%, incluso después de realizar un exhaustivo análisis de sensibilidad a los parámetros físicos del modelo para ajustar la serie modelada a la medida en campo. Esta situación se debió a que la magnitud del viento medido durante la campaña no fue constante y la longitud de registro no fue lo suficientemente larga (caso de Punta Yarumal, ver línea continua negra en la Figura 6) como para calentar el modelo; además las parametrizaciones usadas en el modelo SWAN (SWAN Team, 2009) no permiten altos gradientes en la magnitud del viento y tampoco que la magnitud del viento llegue a velocidades de 0 m/s ya que esto hace que el modelo espectral pierda la energía generada en los instantes anteriores de tiempo. Por último, vale la pena resaltar que esta área [transición entre los deltas del río Atrato y del río Turbo y el límite del extremo final de punta de las Vacas (Figura 9)] puede estar afectada por oleajes de *Swell* (o fondo) y la influencia del Atrato, esta configuración compleja hace difícil entender y modelar todos los procesos de crecimiento, transformación y disipación del oleaje presentes en la zona de estudio; sin embargo, esta evidencia abre una línea de investigación en este tipo de zonas costeras (bahías y estuarios) donde el viento es muy variable y con zonas de calma.

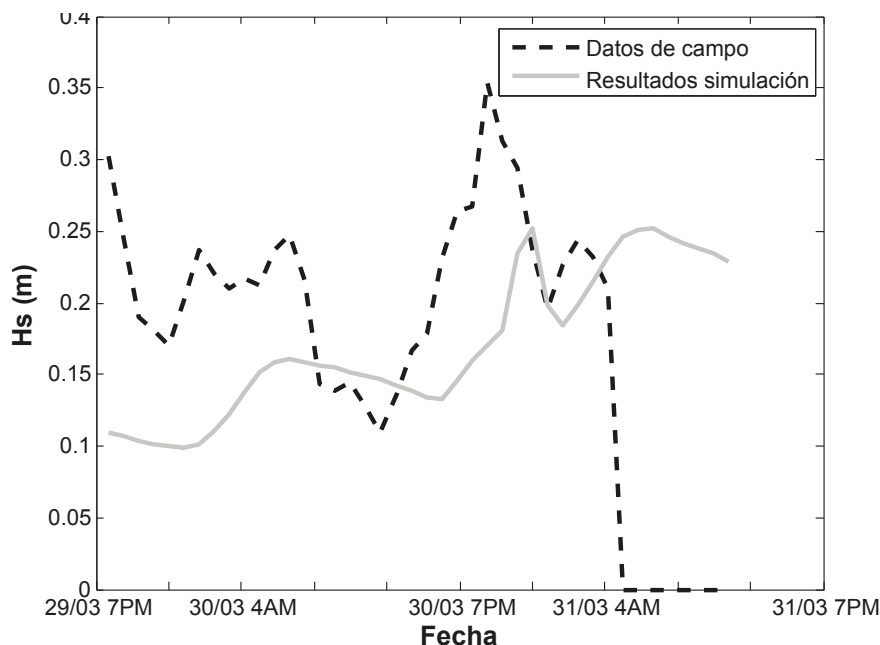


Figura 7. Serie de altura de ola significativa medida durante la campaña de campo en Punta Yarumal comparada con la serie simulada con el modelo SWAN en la etapa de calibración.

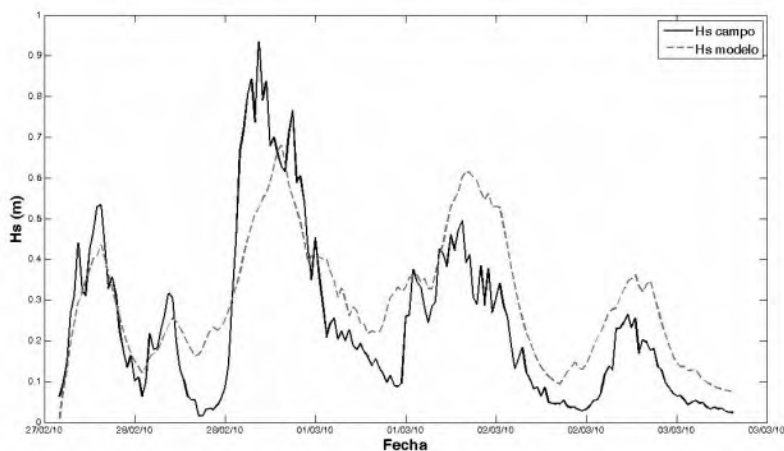


Figura 8. Serie de altura de ola significativa medida durante la época seca (febrero-marzo de 2010) en la bahía Colombia (línea punteada) en comparación con la serie simulada con el modelo SWAN en la etapa de calibración (línea continua) (Álvarez-Silva *et al.*, 2010).

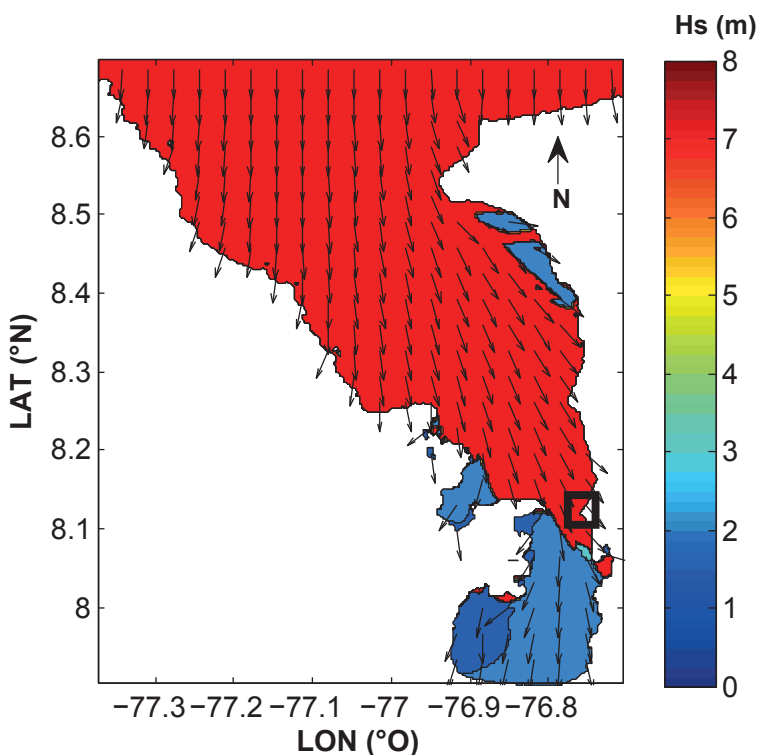


Figura 9. Resultados de períodos pico a partir de la simulación del mes de febrero (época seca), para el golfo de Urabá con las siguientes características: altura de ola significativa media (H_{sm}) = 0.81 m, período medio de la ola (T_m) = 7.0 s, y dirección media de la ola (D_{irm}) = Norte y oleaje local con vientos con velocidad media (V_{elm}) = 5.6 m/s y dirección media (D_{irm}) = Norte.

No obstante, la buena tendencia del modelo en el caso de la bahía Colombia, donde el oleaje generado localmente está totalmente dominado por los vientos locales, indica que el modelo numérico es una buena herramienta para reproducir la climatología de olas en el área. De otra parte, para reforzar el concepto de la zona de transición expuesta anteriormente y poder ajustar la calibración del modelo y entender los resultados obtenidos de la misma, fue necesario conocer la influencia del oleaje de fondo (*Swell*) y oleaje local (*Sea*) a lo largo del golfo de Urabá. En la Figura 9 se ilustra cómo en el golfo de Urabá se presentan dos sectores dominados por diferentes tipos de oleaje y uno de transición, gracias a sus características físicas y los vientos presentes en la zona de estudio

En la Figura 9 también se puede apreciar que existe un área 1, donde los períodos pico (T_p) son de 7 a 8 seg, evidenciando una influencia del oleaje de fondo (*Swell*). Este primer sector comprende el área entre Capurganá y la punta Caribaná y se extiende hasta los límites del delta del río Atrato y una poco más al sur de la punta Las Vacas; y un área 2, con períodos pico (T_p) de 1 a 3.5 seg, dominada notoriamente por oleaje local (*Sea*) y comprende toda la bahía Colombia. Con base en el análisis anterior, el área de estudio está influenciada por las condiciones del oleaje tipo *Swell* y *Sea*, ya que se encuentra en la zona de transición, por lo tanto el oleaje presente va a responder a oleajes que vienen desde el Caribe y a medida que este va hacia el interior del golfo de Urabá, va a estar sometido a procesos de transformación, tales como la refracción, difracción, asomeramiento, entre otros, los cuales dependen principalmente de las características geomorfológicas y batimétricas del golfo. Además los vientos locales (estación de Turbo) permiten ver la influencia del oleaje de *Swell* combinado con el oleaje de *Sea* generado localmente en el área de estudio. Las características geomorfológicas más representativas que juegan un papel fundamental en la transformación del oleaje del golfo son: la punta Caribaná, ubicada en el extremo norte del golfo; el delta del río Atrato, ubicado al extremo suroccidental del mismo; y el delta del río Turbo, ubicado al extremo suroriental. Por lo tanto, para una primera aproximación a la modelación del oleaje propagado al interior del golfo hasta el área de estudio (Punta Yarumal), los parámetros encontrados para el área de la bahía Colombia y las condiciones de contorno en la entrada del golfo permitirán modelar el oleaje combinado (*Sea* y *Swell*). En conclusión, estos resultados de calibración son suficientes de cara al objetivo fundamental de este estudio, ya que se está tratando de determinar cuáles son las tasas de transporte longitudinal de sedimentos a lo largo de Punta Yarumal en los puntos de control identificados.

Determinación del régimen medio de oleaje

Para la escogencia de los casos de simulación de oleaje que representan el régimen medio y poder caracterizar las tasas de transporte de sedimento longitudinal intra-anales en el área de Punta Yarumal, fue necesario realizar un análisis estadístico a toda la serie sintética generada por Ortega *et al.* (2010), en el punto de coordenadas 77.10°N-8.6°O, con el fin de tener el ciclo promedio mensual multianual de oleaje en el golfo de Urabá. En la Figura 10, se ilustra el ciclo medio mensual multianual de la serie sintética de oleaje; allí se observa claramente que las mayores alturas de olas significantes medias se presentan durante la época de verano comprendida entre diciembre y marzo y el período de “transición” comprendido entre junio y agosto. Estas alturas de olas están asociadas a unos períodos medios de 6.7 a 7.2 seg y entre 6.5 y 6.6 seg, respectivamente. En cuanto a la dirección del oleaje se nota que su condición media es norte, coincidiendo las direcciones del análisis anterior realizado para las dos épocas climáticas por separado.

Determinación del régimen medio de vientos

Para seleccionar los casos de propagación del régimen medio de vientos, se seleccionaron las direcciones del viento con mayor probabilidad de ocurrencia para

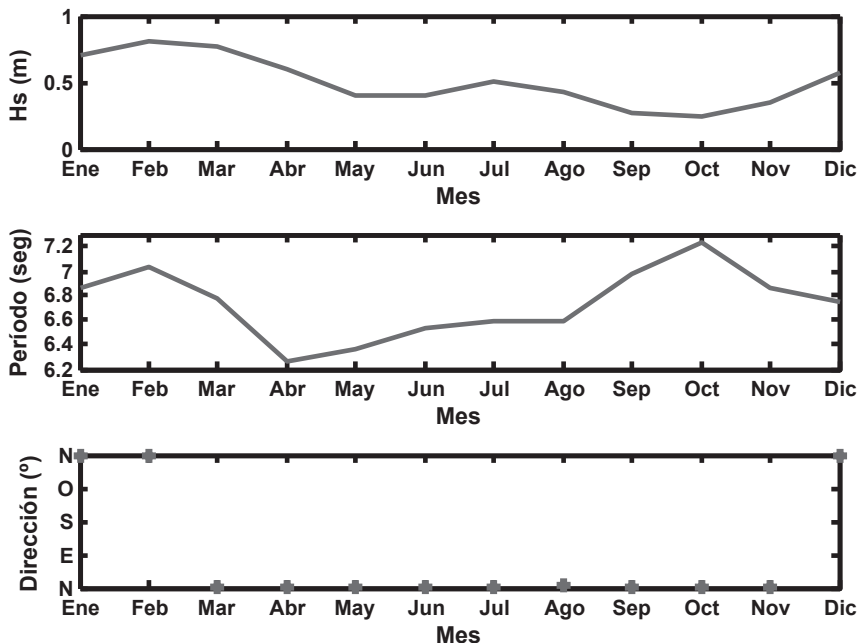


Figura 10. Ciclo medio mensual multianual de la serie sintética de oleaje. Las direcciones que se ilustran en la tercera ventana tienen como base el cero cartesiano el Este.

cada mes, de tal forma que dicho conjunto de direcciones representará adecuadamente la variabilidad del viento de todo el año. De esta manera se obtuvo el ciclo medio mensual multianual de los vientos. En la Figura 11 se ilustra el ciclo medio mensual multianual de la serie de vientos de la estación de Turbo; allí se puede evidenciar que la época seca (diciembre a abril) se caracteriza por vientos fuertes y constantes provenientes del norte (alisios del Norte) y la época húmeda (los demás meses) se caracteriza por vientos variables aunque con predominio de dirección sur. Se puede concluir que las direcciones de los vientos con mayor probabilidad de ocurrencia para la época seca y húmeda son norte y sur, respectivamente.

Modelaciones del régimen medio de oleaje y viento

Con base en los resultados de las Figuras 10 y 11, se escogieron los parámetros medios de oleaje [altura de ola significativa (H_s), período de pico (T_p), dirección (θ); y de viento [magnitud ($Vel.$) y dirección ($Dir.$)] para los 12 casos de modelación del régimen medio identificados. Estos casos se presentan en la Tabla 3.

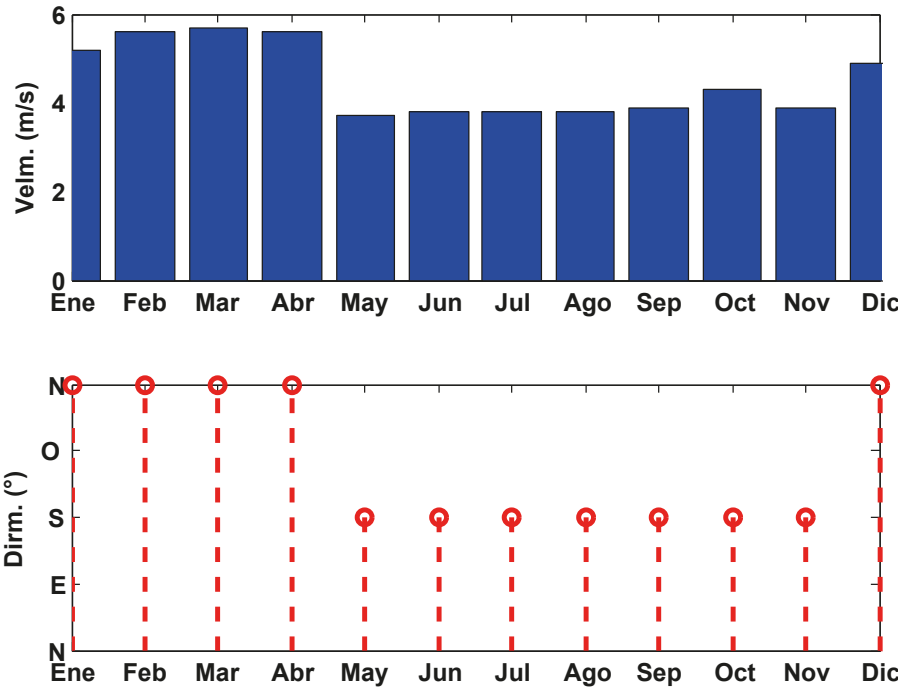


Figura 11. Ciclo medio mensual multianual de la serie de estadísticos de vientos de la estación Turbo.
Velm: Velocidad media. Dirm: Dirección media de la ola.

Tabla 3. Casos más probables del régimen medio de oleaje y viento para el golfo de Urabá. Las negritas indican los dos casos más representativos de cada época (Caso 2: época seca; Caso 5: época húmeda).

Modelaciones de régimen medio						
Caso	Mes	Oleaje		Dir	Viento	
		Hs (m)	Tp (s)		Vel (m/s)	Dir
1	Enero	0.71	6.86	N	5.2	N
2	Febrero	0.81	7.03	N	5.6	N
3	Marzo	0.77	6.77	N	5.7	N
4	Abril	0.60	6.26	N	5.6	N
5	Mayo	0.40	6.37	N	3.7	S
6	Junio	0.41	6.54	N	3.8	S
7	Julio	0.51	6.59	N	3.8	S
8	Agosto	0.42	6.59	N	3.8	S
9	Septiembre	0.27	6.98	N	3.9	S
10	Octubre	0.24	7.23	N	4.3	S
11	Noviembre	0.34	6.86	N	3.9	S
12	Diciembre	0.58	6.74	N	4.9	N

Como se definió anteriormente, fue necesario hacer 12 ejecuciones para todo el golfo de Urabá de acuerdo con los casos de modelación del régimen medio de oleaje y viento, y luego se bajó de escala hasta el sitio de interés (Punta Yarumal) mediante el uso de una sola malla anidada. Para este caso se realizó el mismo procedimiento teniendo en cuenta que ya se contaba con las condiciones de contorno (las cuales fueron generadas por la ejecuciones anteriores de todo el golfo) para cada una de la mallas anidadas para las 12 ejecuciones subsecuentes. En la Figura 12 se presentan los resultados obtenidos para los dos casos más representativos de cada época ilustrados en la Tabla 3, para la malla computacional de 200 x 200 m de todo el golfo de Urabá y la malla anidada de detalles de 70 x 70 m de Punta Yarumal.

Generación de las series de oleaje

Con base en lo anterior se generaron las siete series de oleaje para cada uno de los puntos de control identificados. Estas series se generaron a partir de los 12 casos de simulación de régimen medio de oleaje y viento identificados mediante un análisis estadístico donde se hallaron los promedios mensuales multianuales de las variables de la serie sintética de oleaje y de las variables de la series de estadísticos de vientos de la estación de Turbo. Las series generadas para cada uno de los siete puntos de control escogidos se ilustran en la Figura 13.

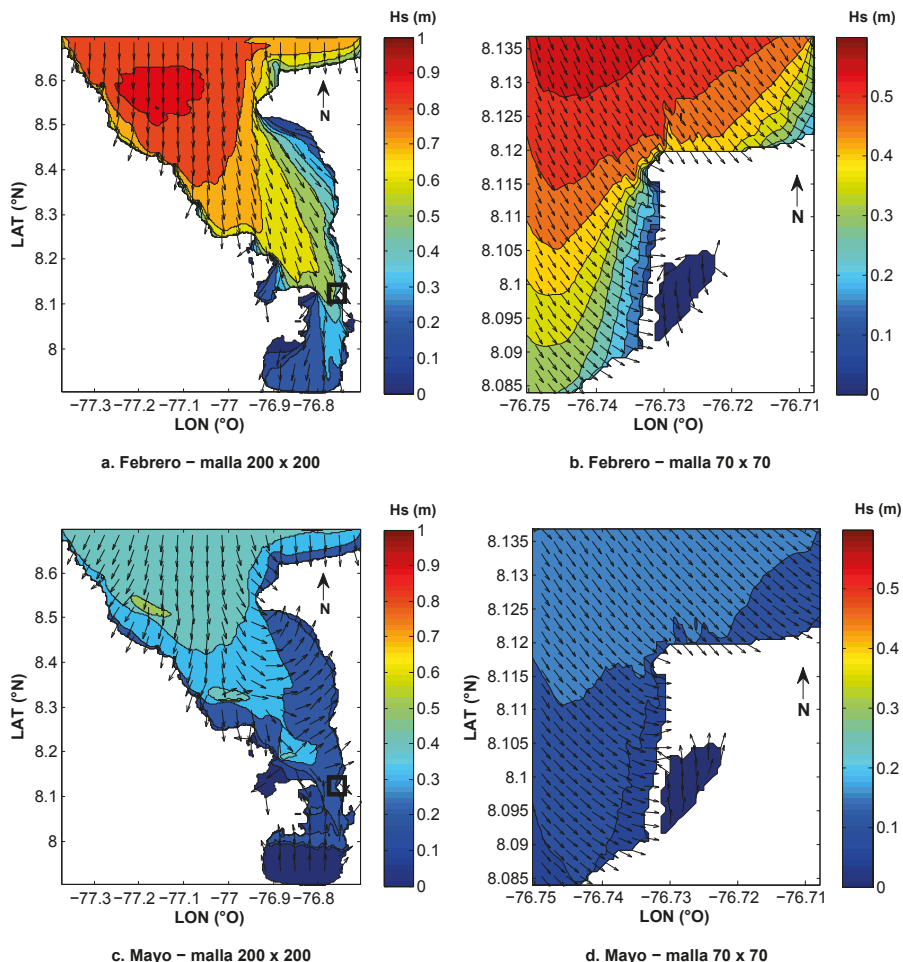


Figura 12. Resultados de los casos seleccionados para el régimen medio. **a.** Caso 2: Mes de febrero, época seca, malla 200 x 200 m, con oleaje de fondo con las siguientes características: altura de ola significativa media (H_{sm}) = 0.81 m, período medio de la ola (T_m) = 7.0 s, y dirección media de la ola (D_{irm}) = Norte y oleaje local con vientos con velocidad media (V_{elm}) = 5.6 m/s y dirección media (D_{irm}) = Norte. **b.** Caso 2: Mes de febrero, malla 70 x 70 m, con oleaje de fondo con las siguientes características: altura de ola significativa media (H_{sm}) = 0.81 m, período medio de la ola (T_m) = 7.0 s, y dirección media de la ola (D_{irm}) = Norte y oleaje local con vientos con velocidad media (V_{elm}) = 5.6 m/s y dirección media (D_{irm}) = Norte. **c.** Caso 5: Mes de mayo, época húmeda, malla 200 x 200 m, con oleaje de fondo con las siguientes características: altura de ola significativa media (H_{sm}) = 0.40 m, período medio de la ola (T_m) = 6.0 s, y dirección media de la ola (D_{irm}) = Norte y oleaje local con vientos con velocidad media (V_{elm}) = 3.7 m/s y dirección media (D_{irm}) = Sur. **d.** Caso 5: Mes de mayo, época húmeda, malla 70 x 70 m, con oleaje de fondo con las siguientes características: altura de ola significativa media (H_{sm}) = 0.40 m, período medio de la ola (T_m) = 6.0 s, y dirección media de la ola (D_{irm}) = Norte y oleaje local con vientos con velocidad media (V_{elm}) = 3.7 m/s y dirección media (D_{irm}) = Sur.

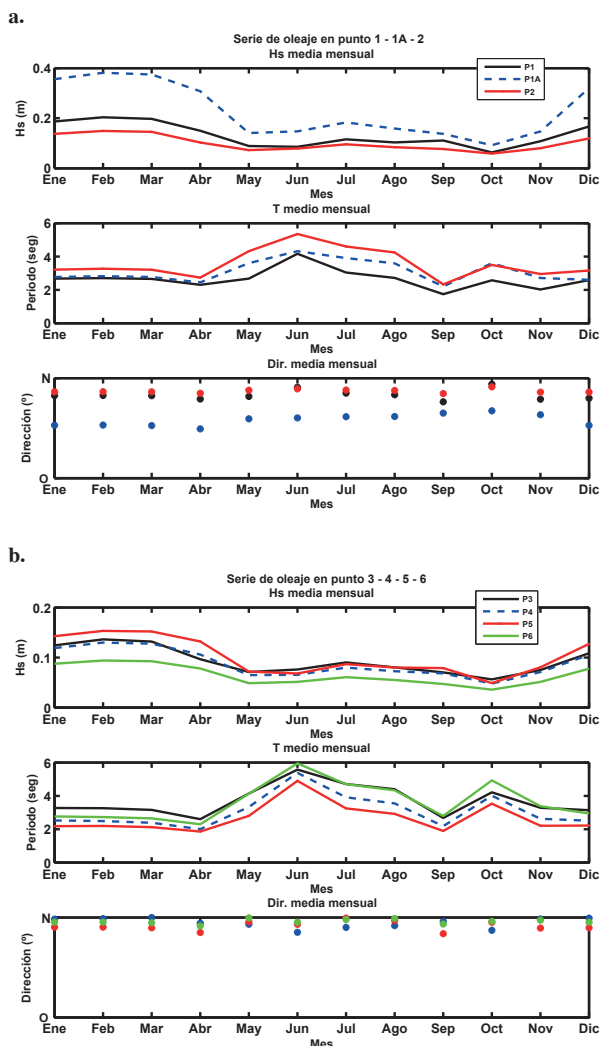


Figura 13. Series de oleaje medio mensual multianual para cada uno de los puntos de control ubicados a lo largo de Punta Yarumal. **a.** Series de oleaje en los puntos 1, 1A y 2. **b.** Series de oleaje en los puntos 3, 4, 5 y 6.

Cada una de las series generadas evidencia que las mayores alturas de ola significativa media (H_{sm}) se presentan entre enero y marzo, asociadas a períodos medio (T_m) de 3 s y dirección media (Dir_m) del norte. Con base en estas series de oleaje medio mensual multianual, también se calculó una serie de oleaje medio anual para cada uno de los siete puntos con el fin de, a la hora de calcular las tasas de transporte de sedimentos, tener un valor medio anual. Dicha serie se ilustra en la Figura 14.

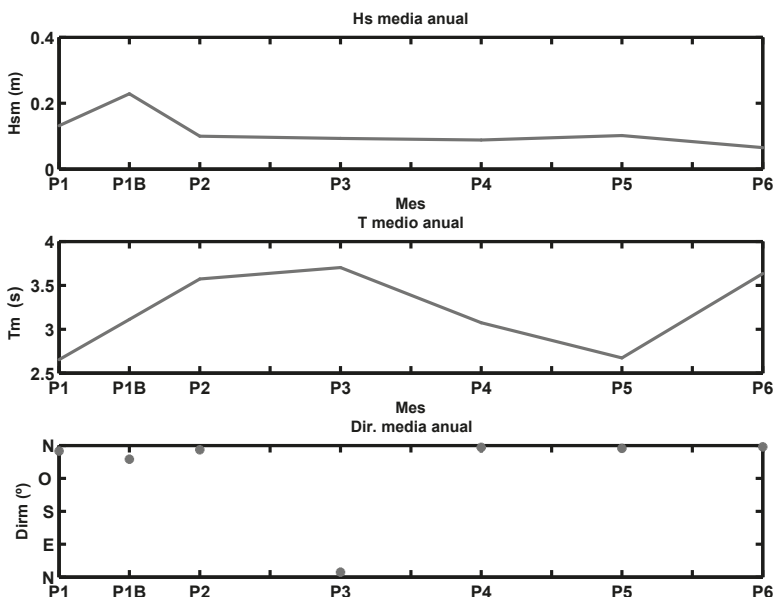


Figura 14. Series de oleaje medio anual para cada uno de los puntos de control ubicados a lo largo de Punta Yarumal.

Capacidad del transporte potencial longitudinal de sedimento (TPLS)

A partir de estas series de oleaje medio mensual multianual y medio anual se calculó el TPLS medio mensual multianual y medio anual, para cada uno de los puntos de control a lo largo de la costa de Punta Yarumal. En las Figuras 15, 16, 17 y 18 se ilustran los resultados de las tasas de TPLS para cada punto de control.

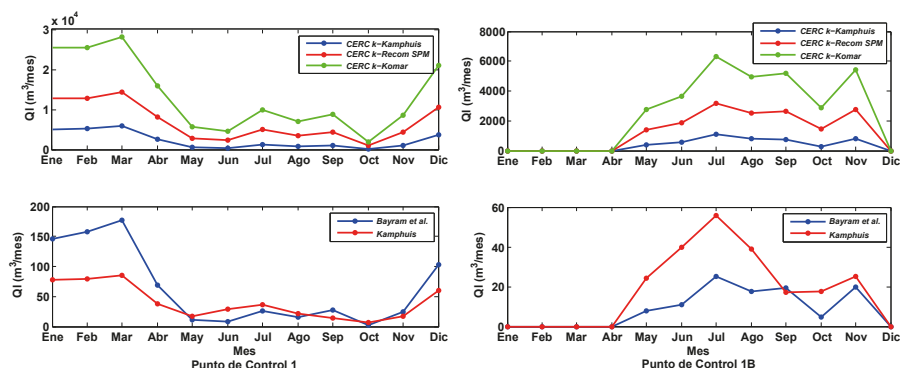


Figura 15. Series de transporte potencial longitudinal de sedimento medio mensual multianual de acuerdo con las diferentes ecuaciones propuestas para el punto de control P1 y P1B.

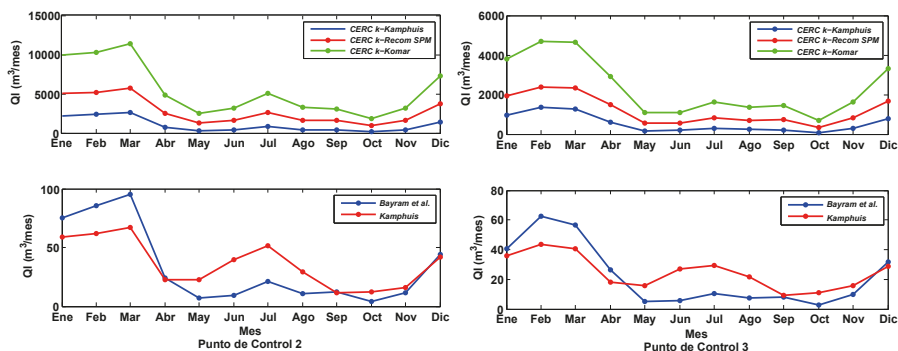


Figura 16. Series de transporte potencial longitudinal de sedimento medio mensual multianual de acuerdo con las diferentes ecuaciones propuestas para el punto de control P2 y P3.

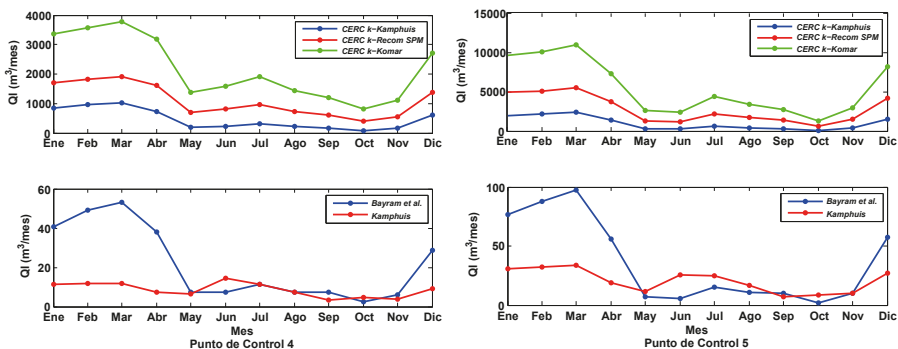


Figura 17. Series de transporte potencial longitudinal de sedimento medio mensual multianual de acuerdo con las diferentes ecuaciones propuestas para el punto de control P4 y P5.

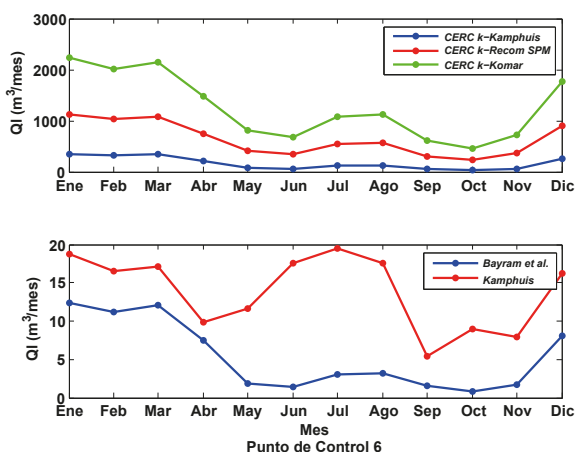


Figura 18. Series de TPLS medio mensual multianual de acuerdo con las diferentes ecuaciones propuestas para el punto de control P6.

Con base en los resultados anteriores se puede decir que la ecuación presentada por CERC con K de Komar ($K = 0.77$ constante), es la que genera mayor tasa de TPLS, evidenciando una alta sensibilidad al valor del parámetro adimensional K seleccionado. Al comparar las tres aplicaciones de la ecuación de CERC vs la ecuación de Bayram *et al.*, se nota cierta similitud en la tendencia de las series de TPLS.

Otro aspecto importante es que las tasas de transporte calculadas por las tres aplicaciones de la ecuación de CERC arrojan valores muy altos que puedan estar sobrestimados y en desacuerdo con la realidad del área de estudio. Al parecer una vez más, la formulación de CERC (con diferentes valores de K) sobrestima las tasas de TPLS calculadas a lo largo de Punta Yarumal. Esta afirmación está basada en estudios anteriores donde se ha indicado que la fórmula de CERC sobredimensiona la tasa de transporte longitudinal (Vera, 2007). Por otro lado, con las ecuaciones de Kamphuis (E4) y Bayram *et al.* (E5) al parecer ocurre todo lo contrario, ya que se pueden estar subestimando las tasas de TPLS calculadas.

Ahora, las ecuaciones de CERC con relación a E4 y E5 no presentan alguna relación significativa debido a que tienen como parámetro sensible el coeficiente adimensional K , mientras que las otras dos ecuaciones, no tienen dependencia alguna de dicho parámetro, su sensibilidades radican en parámetros como el coeficiente de transporte ε , la altura de ola en rotura H_b , el período de pico T_p , la pendiente de la playa m_b , el diámetro medio D_{50} y α_b , el ángulo de rotura del oleaje respecto a la línea de costa.

Las figuras de las series de oleaje (Figuras 13 y 14) y las de las series de transporte de sedimentos generadas en este estudio (Figuras 15, 16, 17, 18 y 19), indican que las series de las tasas de TPLS calculadas por las tres aplicaciones de la ecuación de CERC y la ecuación planteada por Bayram *et al.*, siguen la misma tendencia de las series de oleajes respectivas para cada punto de control. Los resultados de las series de las tasas de TPLS con la ecuación planteada por Kamphuis sigue la tendencia pero no tan en fase como las otras dos ecuaciones (CERC y Bayram *et al.*).

Otro punto importante indicado por las figuras anteriores y en especial la 19, es que los puntos que presentan tasas de TPLS de mayor a menor magnitud son P5, P2, P4, P3, P6, P1 y PIB, respectivamente. Comparando los resultados de las tasas de transporte potencial longitudinal media anual de sedimento con la ubicación de los puntos de control en donde se evidenció la mayor actividad de erosión y sedimentación a lo largo de la espiga (Punta Yarumal), de acuerdo con la superposición de las dos líneas de costa levantadas (una durante la época seca: 25 de marzo de 2009, otra durante la húmeda: 19 de noviembre de 2009), se encontró que el comportamiento de las series de TPLS halladas coinciden significativamente con la evolución que presentó el sistema durante aproximadamente ocho meses, tiempo de diferencia entre el levantamiento de las dos líneas de costa. En la Figura 20 se ilustra la evolución geomorfológica intra-anual de la espiga de Punta Yarumal durante 2009.

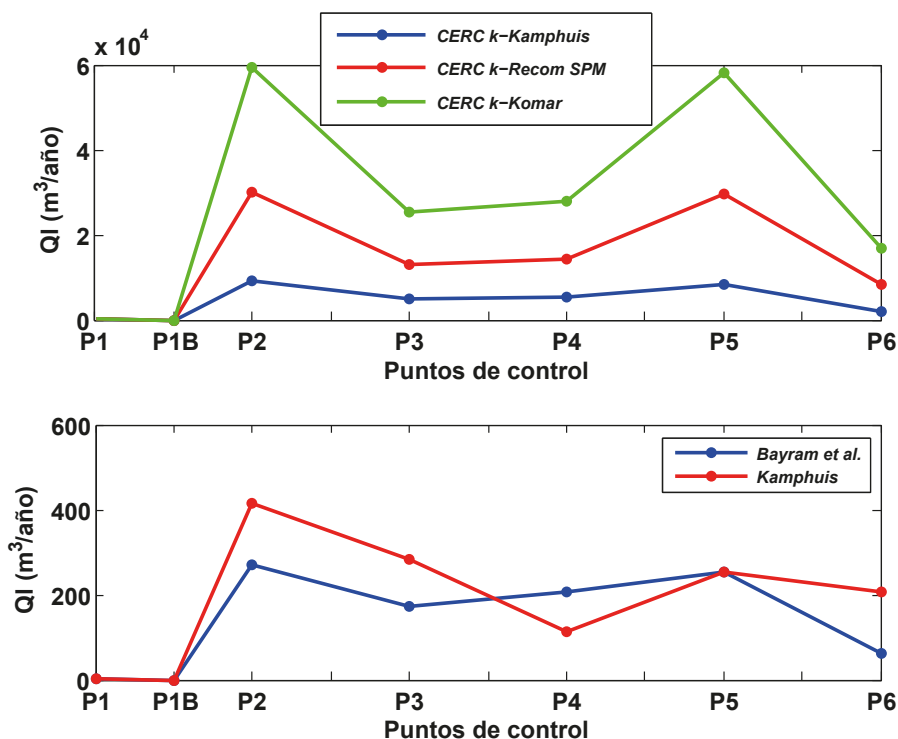


Figura 19. Series de transporte potencial longitudinal de sedimento medio anual por las diferentes fórmulas utilizadas para cada uno de los puntos de control.

Apoyándose en el ortofotomapa y los levantamientos de líneas de costa realizados para este estudio, las cuales están superpuestas en la Figura 20, se observa que durante 2009, la tendencia geomorfológica ha sido la evolución de la espiga, manteniendo un equilibrio dominado por las épocas climáticas, donde para la época seca, que se caracteriza por presentar vientos fuertes y de dirección norte, se presenta una zona de erosión a 500 m antes de llegar a su extremo sur, en una franja de costa de 600 m aproximadamente y una zona de sedimentación justo al final de la punta en una franja de costa de 160 m aproximadamente, aumentando el crecimiento hacia el sur de la misma a tal punto de alcanzar casi el cierre total de la bahía El Uno. Para la época húmeda ocurre todo lo contrario, debido a que los vientos son moderados y de dirección sur, genera un retroceso de la línea de costa justo en el extremo sur de la punta (erosión) y un avance de la línea de costa en la misma zona donde en la época seca se presentó la erosión en la punta, devolviendo el equilibrio geomorfológico inicial de la espiga.

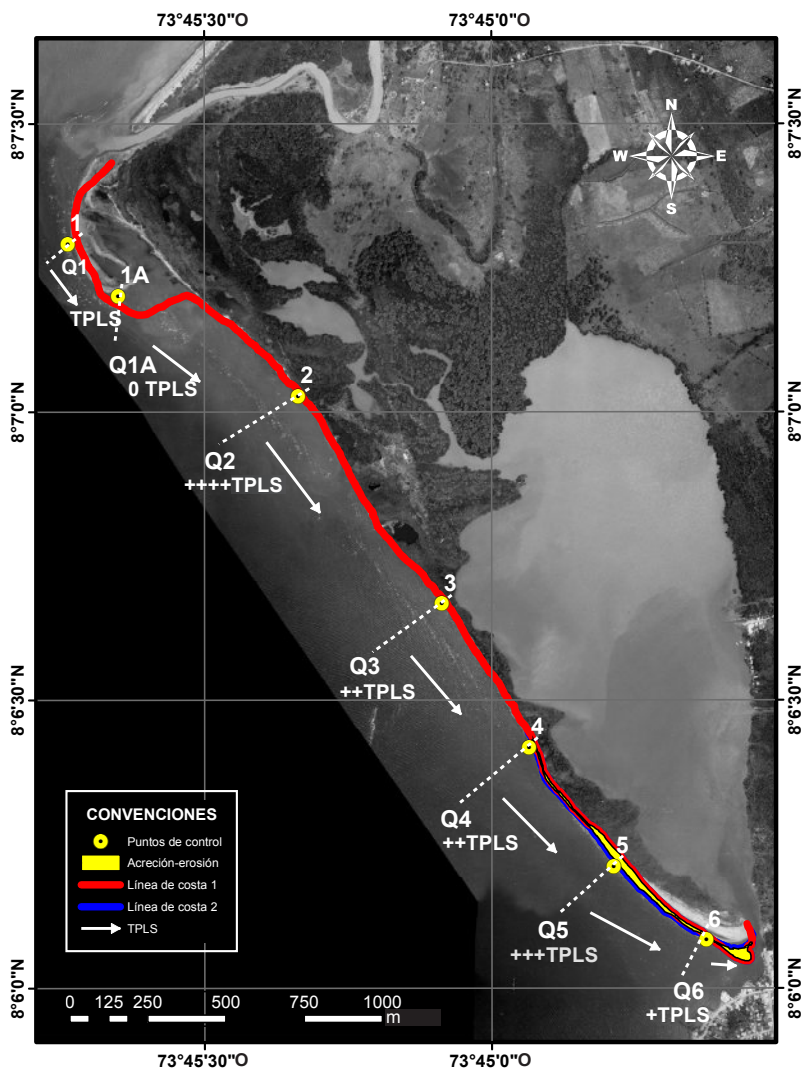


Figura 20. Correlación de las tasas de transporte potencial longitudinal de sedimento (TPLS) con la evolución de las líneas de costa levantadas durante las campañas de campo. Fuente: Ortofotomapa construido por Expedición Estuarina, golfo de Urabá, fase 1.

A continuación se describe detalladamente la dinámica del transporte longitudinal estimado para cada uno de los puntos de control ilustrados en la Figura 20. A partir de la figura se puede decir que las tasas de TPLS calculadas por las ecuaciones propuestas son en promedio las más bajas para los puntos 1 y 1A, mostrando incluso que la tasa de TPLS para el punto 1A es cero (no hay transporte o

es mínimo), debido a que el oleaje no incide de manera oblicua sino paralela a la línea de costa. Estos ámbitos de valores bajos se asocian aceptablemente a la evolución observada con el levantamiento de las líneas de costa durante las campañas, ya que se puede apreciar la alta acumulación de sedimentos en la desembocadura, a tal punto que se está formando una segunda punta la cual modifica la morfodinámica hacia la zona central y sur de la antigua espiga. Ahora, ubicándose en el punto de control 2 de la Figura 20, se ve que este registró las mayores tasas de TPLS por las diferentes ecuaciones propuestas. Este ámbito de valores altos está asociado con la evolución observada en el levantamiento de las líneas de costa durante las campañas, la cuales muestran un equilibrio para esta zona debido a que se encuentra muy próxima a la desembocadura del río Turbo (fuente de sedimentos que alimenta todo el sistema de la espiga de Punta Yarumal) y por estar protegida debido al avance de la nueva espiga del delta del río Turbo (Figura 20). En los puntos de control 3 y 4 de la Figura 20, se indica que para ambos puntos los registros de las tasas de TPLS arrojaron valores medios, que en orden de importancia de mayor a menor ámbito de tasas calculadas se encuentran en el tercer puesto. Estos ámbitos de valores están asociados con la evolución observada en el levantamiento de las líneas de costa durante las campañas debido a que no presentaron variaciones significativas, ya que el avance o retroceso fue mínimo, evidenciando un equilibrio que se mantiene recíprocamente de acuerdo con la época climática presente (época seca: mínima erosión-época húmeda: mínima sedimentación). En el punto 5 de la Figura 20, dicho punto de control es el segundo en orden de importancia que presenta mayores valores de tasas de TPLS calculadas. Estos ámbitos de valores están asociados con la evolución registrada en los levantamientos de las líneas de costa durante las campañas de campo debido a que son los puntos donde más se evidencian los fenómenos de erosión y sedimentación en la espiga de Punta Yarumal, por el avance de la nueva espiga en el delta del río Turbo. Este avance ha ocasionado que los problemas de erosión-sedimentación se hayan trasladado principalmente a la zona sur de la antigua espiga, justo donde se ubicaron los puntos de control 5 y 6. Es por esto que en estos puntos se observa que la línea de costa 1 (época seca), al presentarse mayor oleaje con incidencia oblicua y vientos fuerte del norte (mayores tasas de transporte longitudinal) se ve que el área de influencia del punto 5 presenta erosión (retroceso de la línea de costa 1) que se traduce en sedimentación hacia el sur (avance de la línea de costa 1), en el área de influencia del punto 6 por las tasas de TPLS bajas que presenta dicho punto. Para la época húmeda ocurre todo lo contrario, los vientos débiles del sur y las olas con incidencia oblicua son de menor magnitud (menores tasas de transporte longitudinal), por lo tanto se ve que el área de influencia del punto de control 5 presenta sedimentación (avance de la línea de costa 2) que se traduce en erosión

hacia el sur (retroceso de la línea de costa 2) en el área de influencia del punto 6 por las tasas de TPLS medias que presenta dicho punto. Finalmente, con base en la dinámica de la morfología de la línea de costa evidenciada en la Figura 20, principalmente en el área donde se ubican los puntos de control 5 y 6, se estimaron los volúmenes de erosión y sedimentación identificados a partir de la dinámica evidenciada con el trazado de las dos líneas de costas levantadas durante las dos campañas de campo durante 2009. Los valores respectivos se encuentran ilustrados en la Tabla 4.

Tabla 4. Cálculo de volúmenes de erosión y sedimentación para cada una de las épocas climáticas.

Polígono	Área (m ²)	H promedio	Volumen (m ³ /año)	Tiempo dinámica líneas de costa (días)	Tasa de transporte (m ³ /mes)	Tasa de transporte (m ³ /día)
1: Sedimentación-época seca Erosión-época húmeda	2530	2.5	6326	239	791	26
2: Erosión-época seca Sedimentación- época húmeda	9409	2.5	23523	239	2940	98
Total			29849			

En la Figura 21, se ilustran los respectivos polígonos a los cuales se les calcularon los volúmenes de erosión o sedimentación de acuerdo con la época climática presente. Ahora tomando como base los datos registrados por Restrepo y Kjerfve (2000) referente a la producción de sedimentos para 23 cuencas de río en todo el Caribe colombiano, específicamente los datos de descarga de sedimentos de la cuenca del río Turbo (0.073×10^6 ton/año = $27.547 \text{ m}^3/\text{año}$ = $75.47 \text{ m}^3/\text{día}$). Al comparar este valor con el hallado se nota que ambos oscilan entre los 20000 a $30000 \text{ m}^3/\text{año}$, mostrando que el dato calculado en este estudio guarda una relación significativa del 85%. De esta forma se verificó que los datos de volumen aproximados calculados se encuentran dentro del ámbito admisible y acorde a lo que realmente está sucediendo de acuerdo con la dinámica intra-anual de TPLS de Punta Yarumal. Ahora teniendo como base el valor de $23523 \text{ m}^3/\text{año}$ (Tabla 4), se puede decir que las tasas de transporte calculadas por las diferentes ecuaciones aplicadas que más se ajustan a la dinámica del TPLS anual del área de estudio, es la ecuación de CERC con el $K = 0.77$ de Komar (Figura 19). Como última instancia se analizó el comportamiento de las series medias mensuales multianuales de TPLS calculadas por las diferentes ecuaciones propuestas versus el comportamiento de las series de oleaje medio mensual multianual para cada uno de los puntos de control.

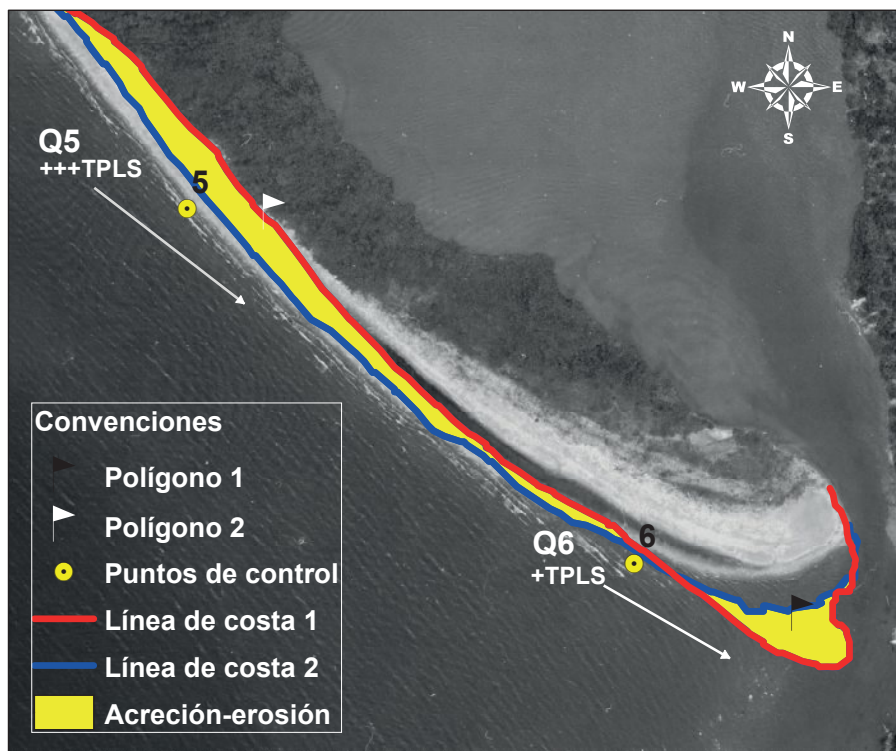


Figura 21. Volúmenes de erosión y sedimentación en las zonas aferentes a los puntos de control P5 y P6.

CONCLUSIONES

La fórmula de mayor aplicación en ingeniería de costas, a nivel mundial, para el cálculo del transporte longitudinal de sedimentos, ha sido la de CERC (1984). A partir de esta fórmula, se han venido desarrollando nuevas experimentaciones para mejorarla y/o adaptarla a las particularidades de las zonas de estudio, algunas de ellas son las mejoras realizadas en cuanto al uso de los diferentes K de acuerdo con varios autores como el propuesto por Bailard (1981), en donde K está en función del ángulo de rotura, de la velocidad orbital u_{mb} , de la velocidad de caída del sedimento wf y está basada en la altura de ola media cuadrática (H_{rmsb}); según Del Valle *et al.* (1993) K decrece con el incremento del diámetro medio del sedimento (D_{50}); Kamphuis *et al.* (1986) propusieron una nueva fórmula en la que K es inversamente proporcional al diámetro medio del sedimento (D_{50}); Komar e Inman (1970) introdujeron un valor de diseño recomendado de $K = 0.77$ para su utilización con la altura de ola media cuadrática (H_{rmsb}), valor usado comúnmente en los cálculos de tasas de transporte

longitudinal de sedimentos costeros; Shore Protection Manual (1984) propuso un valor constante de $K = 0.39$, basado en cálculos donde se utiliza la altura de ola significativa.

La variabilidad en los resultados encontrada con cada una de las formulaciones utilizadas, era de esperarse debido a que las formulaciones aplicadas para la estimación de las tasas de TPLS fueron desarrolladas a partir de muchos ensayos de laboratorio y para diferentes zonas costeras. La ecuación de CERC con los diferentes aplicaciones de K de acuerdo con los autores escogidos [$K = 0.77$ de Komar e Inman (1970), $K = 0.39$ recomendado por Shore Protection Manual (1984) y el K por fórmula de Kamphuis *et al.* (1986)], sobrestiman los resultados obtenidos de las tasa de TPLS media mensual multianual y media anual. A esta conclusión también han llegado diversos autores en estudios anteriores donde indican la misma condición, por lo que recomiendan su aplicación para valores de K inferiores a 0.77. Con base en las diferentes ecuaciones utilizadas y los resultados encontrados, las tasas de transporte longitudinal de sedimentos calculadas para cada uno de los siete puntos de control que mejor se ajustan a los datos reales de producción de sedimento de la zona de estudio, fueron las calculadas por la ecuación de CERC con el $K = 0.77$ de Komar e Inman (1970) .

En cuanto a la dinámica intra-anual del transporte potencial longitudinal de sedimentos en Punta Yarumal, se puede concluir que durante 2009, la dinámica o tendencia intra-anual geomorfológica ha sido la evolución de la espiga, manteniendo su equilibrio el cual es dominado por las épocas climáticas. Durante la época seca (diciembre-abril) la espiga evoluciona en sentido norte-sur, donde en la zona norte de la punta se presenta erosión (retroceso de la línea de costa) y sedimentación (avance de la línea de costa) en la zona sur de la misma con tendencia a cerrar la bahía El Uno y durante la época húmeda (mayo-noviembre) de sur-norte, cuando ocurre todo lo contrario, evidenciado por el retroceso del avance de la espiga en su extremo sur, devolviendo el equilibrio geomorfológico inicial de la misma.

Los resultados muestran que el modelo captura aceptablemente las características del oleaje medido en las campañas de campo, en especial las tendencias de crecimiento y decrecimiento aunque no lo hace adecuadamente con las magnitudes, subestimando los valores de la serie simulada. De las simulaciones finales y de los datos de campo se encontró que en la zona exterior del golfo (al norte del delta del río Atrato) el oleaje es predominantemente de *Swell*, mientras que en la bahía Colombia es mucho más significativo el oleaje de *Sea*, debido a que la energía del oleaje de fondo se disipa a medida que se propaga hacia el interior del golfo de Urabá, especialmente al acercarse al delta del río Atrato.

Para futuros estudios se recomienda registrar series simultáneas de oleaje y vientos en las campañas de campo más largas para garantizar una calibración óptima del modelo de oleaje para generar las series. Además, es recomendable aplicar los diversos métodos para la estimación del transporte longitudinal de sedimentos tomando como base las ecuaciones de CERC, con el fin de poder comparar resultados, calibrar el modelo de transporte y finalmente escoger de las diversas formulaciones desarrolladas, la que mejor se ajuste a las condiciones particulares de la zona de estudio.

AGRADECIMIENTOS

El desarrollo de este trabajo fue posible gracias al apoyo de la Dirección de Investigación de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín (DIME) por la financiación del proyecto “Respuesta de los manglares y el macrobentos asociado a los cambios naturales y antrópicos en dos escalas de tiempo en el delta del río Turbo y la bahía El Uno (golfo de Urabá)”, a la Gobernación de Antioquia con el proyecto “Expedición estuarina golfo de Urabá, fase 1” (proyecto de la Universidad de Antioquia en asocio con las universidades Eafit y Nacional), a la empresa Buceos Industriales y Dragados de Urabá por el proyecto “Análisis de alternativas para la mitigación de la problemática de sedimentación en la desembocadura del río León” y al Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas por el apoyo en las campañas.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez-Silva, O. 2010. Modelación morfodinámica de desembocaduras a escala intra-anual. Tesis de Maestría, Univ. Nacional de Colombia, Medellín. 127 p.
- Álvarez-Silva, O., A. Osorio y A. Gómez-Giraldo. 2010. Calibración y validación de un modelo de oleaje de la bahía Colombia. 546-551. Invemar y Acimar (Eds.). Libro de Resúmenes Extendidos XIV Sem. Nal. Cienc. Tecnol. Mar (Senalmar). Serie de Publicaciones Especiales del Invemar No. 21, Santa Marta. 578 p.
- Andrade, C. 1993. Análisis de la velocidad del viento en el mar Caribe. Bol. Cient. CIOH, (13): 33-43.
- Bailard, J. A. 1981. An energetic total load sediment transport model for a plane sloping beach. J. Geophys. Res., 86: 10938-10964.
- Bayram, A., M. Larson y H. Hanson. 2007. A new formula for the total longshore sediment transport rate. Coast. Eng., 54: 700-710.
- Bernal, G., L. J. Montoya, C. Garizábal y M. Toro. 2005. La complejidad de la dimensión física en la problemática costera en el golfo de Urabá, Colombia. Gestión y Ambiente, 8 (1): 123-135.
- Booij, N., R. C. Ris y L. H. Holthuijsen. 1999. A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation, J. Geophys. Res., 104: 7649-7666.

- CERC. 1984. Shore protection manual. U. S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center. U. S. Government Printing Office, Washington. 1034 p.
- Corpourabá y Universidad Nacional. 1998. Evaluación de zonas de erosión crítica en el litoral Caribe antioqueño, Informe final, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Univ. Nacional de Colombia, Medellín. 1999 p.
- Correa, I. D. y J. Alcántara. 2005. Historical and recent shore erosion along the Colombian Caribbean Coast. *Earth Sci. Res. S J.*, 14 (2): 153-160.
- Correa, I. D. y G. Vernet. 2004. Introducción al problema de la erosión litoral en Urabá (sector Arboletes-Turbo), costa Caribe colombiana. *Bol. Invest. Mar. Cost.*, 33: 7-28.
- Dean, R. G. 1987. Coastal sediment processes: Toward engineering solutions. *Coast. Sed.*, 1: 1-24.
- Del Valle, R., R. Medina y M. Losada. 1993. Dependence of coefficient k on grain size. *J. Waterways, Port, Coastal Ocean. Eng.*, 119 (5): 568-574.
- DNP, Gobernación de Antioquia y Junta Efemérides. 2006. Plan estratégico para la región de Urabá-Darién. Primera fase: Construcción de insumos para el proceso en la región. Departamento Nacional de Planeación. Departamento Administrativo de Planeación de Antioquia. Dirección de Planeación Estratégica Integral. Junta Efemérides. Urabá. Medellín. 154 p.
- Estrada, E. y S. Gil. 2005. Análisis de las condiciones morfológicas actuales como indicadoras de la evolución de la flecha litoral, en la actual desembocadura del río Turbo, Antioquia. Corporación Académica Ambiental, Univ. Antioquia sec. Urabá, Turbo, Colombia. 77 p.
- García-Valencia, C. (Ed). 2007. Atlas del golfo de Urabá: una mirada al Caribe de Antioquia y Chocó Serie de Publicaciones Especiales de Invemar No. 12, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (Invemar) y Gobernación de Antioquia, Santa Marta. 180 p.
- Invemar y Corpourabá. 2003. Diagnóstico, zonificación y definición de la estructura administrativa de manejo de la Unidad Ambiental Costera del Darién, Caribe colombiano. Fase I. Caracterización y diagnóstico. Informe técnico preliminar, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (Invemar), Santa Marta. 470 p.
- Kamphuis, J. W. 1991. Along shore sediment transport rate. *J. Waterway, Port, Coastal Ocean. Eng.*, 117 (6): 624-640.
- Kamphuis, J. W., M. H. Davies, R. B. Nairn y O. Sayao. 1986. Calculation of littoral sand transport rate. *Coastal Engineering*, 10: 1-21.
- Komar, P. D. y D. L. Inman. 1970. Longshore sand transport on beaches. *J. Geophys. Res.*, 75 (30): 5514-5527.
- Larson, M. y N. C. Kraus. 1991. Numerical model of longshore current for bar and trough beaches. *J. Waterway. Port Coast. and Oc. Engrg. ASCE*, 117 (4): 326-347.
- Ortega, S., A. F. Osorio, P. Agudelo y J. I. Vélez. 2010. Generación de series sintéticas de oleaje en lugares con instrumentación escasa en el mar Caribe colombiano. Libro de resúmenes extendidos del XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica Punta del Este. Uruguay. 11 p.
- Poveda, G. 2004. La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 28 (107): 201-222.
- Restrepo, J. D. y B. Kjerfve. 2000. Water discharge and sediment load from the Western slopes of the Colombian Andes with focus on Río San Juan. *J. Geol.*, 108: 17-33.

- Roldán, P. 2008. Modelamiento del patrón de circulación de la bahía Colombia, golfo de Urabá. Implicaciones para el transporte de sedimentos. Tesis de Maestría Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Univ. Nacional de Colombia, Medellín. 97 p.
- Shore Protection Manual. 1984. U.S. Army engineer waterways experiment station, coastal engineer research center. Vol. 1. U. S. Government Printing Office, Washington. 652 p.
- SWAN Team. 2009. SWAN technical documentation. Delft University of Technology, Delft, Países Bajos. 119 p .
- Velásquez, N. 2000. Geomorfología y dinámica de la línea de costa en el Urabá chocoano: sector Cabo Tiburón-Bahía Acandí. Tesis de Ingeniería Geológica, Univ. Nacional de Colombia, Medellín. 301 p.
- Vera, L. 2007. Comparación de la tasa anual de transporte de sedimentos de playa en la isla Jambelí, utilizando formulación sugerida por varios autores. *Acta Oceanogr. Pac.*, 14 (1): 21-24.
- Wentworth, C. K. 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *J. Geol.*, 30: 377-392.

RECIBIDO: 15/02/2012

ACEPTADO: 09/05/2013