

# CLIMA DE OLAJE EN EL PACÍFICO SUR DE COLOMBIA, DELTA DEL RÍO MIRA: COMPARACIONES ESTADÍSTICAS Y APLICACIÓN A PROCESOS COSTEROS

Por

Juan Camilo Restrepo L.<sup>1,2</sup>, Luis Otero D.<sup>1,2</sup>, & Sergio A. López I.<sup>3</sup>

## Resumen

**Restrepo L., J. C., L. Otero D. & S. A. López I.:** Clima de oleaje en el Pacífico Sur de Colombia, delta del río Mira: comparaciones estadísticas y aplicación a procesos costeros. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **33**(128): 357-375, 2009. ISSN 0370-3908.

Para determinar el comportamiento del oleaje en el delta del río Mira se propagaron dos series de datos de oleaje (1979-2000) desde aguas profundas, la primera se obtuvo de la base de datos mundial de oleaje visual ICOADS y la segunda fue generada por medio del modelo de tercera generación Wave Watch III. Se estimó la altura del oleaje durante su tránsito hacia aguas someras después de sufrir los efectos de asomeramiento, refracción-difracción, disipación por fricción con el fondo y rotura del oleaje. Además, se obtuvieron datos de oleaje in-situ recolectados en el frente deltaico del río Mira utilizando un correntómetro AWAC ADCP (600 kHz). El clima de oleaje en aguas profundas se caracteriza por un oleaje proveniente del SW y SSW, con alturas significativas que se encuentran entre 0.29 y 2.23 m, y periodos pico que varían entre 5.0 y 23.0 s. Los procesos de refracción-difracción y asomeramiento ocasionan diferencias significativas en la altura de la ola de una región a otra, generando alturas superiores a 3.0 m en proximidad a la línea de costa cuando el oleaje incidente proviene del NNW y presenta periodos pico del orden de 18 s.

**Palabras clave:** clima de oleaje, altura significativa de oleaje, periodo pico, asomeramiento, refracción-difracción, Pacífico colombiano.

- 1 Área de Manejo Integral de Zonas Costeras, Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas – Dirección General Marítima. Escuela Naval Almirante Padilla, Isla de Manzanillo – Barrio El Bosque. Cartagena, Bolívar. Tel.: +57(5)6694465 Ext.: 105. Correo electrónico: jrestrepo@dimar.mil.co; lotero@dimar.mil.co
- 2 Centro Control de Contaminación del Pacífico – Dirección General Marítima. Capitanía de Puerto de Tumaco (CCCP), vía al Morro. Tumaco, Nariño. Tel.: +57(2) 7272637 Ext.: 105.
- 3 Maestría en Ciencias de la Tierra, Universidad Eafit. Avenida las Vegas, Carrera 49 No. 7 sur 50. Medellín, Antioquia. Tel.: +57(4)2619535. Correo electrónico: slopezis@eafit.edu.co

### Abstract

We propagated two register of wave data (1979-2000) from deep waters to evaluate the wave dynamic in the Mira river delta. The first wave data series was obtained from the ICOADS - visual wave world database and the second was generated for NOAA through the Wave Watch III - third generation wave numerical model. We calculated statistics of wave in deep waters and estimated the significant wave height in shallow waters considering processes of shoaling, refraction-diffraction, dissipation due to bottom friction and wave breaking. Also, using an AWAC ADCP current meter (600 kHz) we measured wave parameters in the front of the Mira river delta. The wave climate in deep waters is characterized by waves coming from SW and SSW, with significant height between 0.29 and 2.23 m and peak periods changing from 5.0 to 23.0 s. The processes of shoaling and refraction-diffraction originate significant differences in wave height from one region to another, generating heights higher than 3.0 in nearshore when the incident waves comes from NNW and are characterized by peak periods of 18 s.

**Key words:** wave climate, wave significant height, peak period, shoaling, refraction-diffraction, Pacific of Colombia.

### 1. Introducción

El oleaje representa una de las fuentes dominantes de energía en gran parte de las zonas costeras, interviniendo de manera significativa en la circulación, el transporte de sedimentos, y el modelamiento de las costas, entre otros factores (Wright y Coleman, 1973). En este contexto, el conocimiento de los procesos de oleaje permite comprender mejor la dinámica de los sistemas costeros, que depende de un amplio conjunto de parámetros hidrodinámicos, atmosféricos, morfológicos y biológicos (Haslett, 2000). Este conocimiento es esencial antes de abordar preguntas relacionadas con la protección costera, el control ambiental y el desarrollo sostenible (Komar, 1998; Bird, 2000). De igual forma, la predicción de estados de mar es fundamental para la navegación y el mantenimiento de puertos y canales de navegación (GIOC, 2002a, 2002b; USGS, 2002).

A pesar de la importancia del clima de oleaje en los contextos oceanográfico, ambiental y económico, en Colombia no existen observaciones o datos continuos de oleaje (Tejada, 2002; Agudelo *et al.*, 2005). Hasta ahora, el clima de oleaje ha sido determinado principalmente por medio de la utilización de ecuaciones empíricas que emplean información del campo de vientos como dirección, velocidad y "fetch" (e.g. método de Bretschneider) (e.g. Javelaud, 1986; González *et al.*, 1992; Martínez *et al.*, 1995; Correa y González, 1998), el análisis y procesamiento de datos sobre oleaje visual implementado por la Organización Meteorológica Mundial, que finalmente son recolectados y filtrados por NOAA (National Ocean and Atmospheric Administration) en la base de datos COADS - ICOADS (The International Comprehensive Ocean-Atmosphere

Data Set Project) (e.g. Restrepo *et al.*, 2002; Tejada, 2002a; Agudelo *et al.*, 2005; Restrepo y López, 2007) y la implementación de modelos numéricos de generación de oleaje en aguas profundas (e.g. WAM, NedWAN, WaveWatch III) (Lonin *et al.*, 1996; Agudelo, 2003; Toro, 2006).

Una de las primeras caracterizaciones del clima de oleaje en el Caribe colombiano fue realizada por Javelaud (1986), quien por medio del método de Bretschneider (i.e. Bretschneider, 1954; Bretschneider y Reid, 1954) utilizó datos de dirección e intensidad del campo de vientos y el "fetch" para obtener estadísticos básicos de oleaje como altura promedio, dirección y periodo. Estudios posteriores han empleado los resultados obtenidos por Javelaud (1986) para realizar análisis oceanográficos y geomorfológicos en sitios específicos del litoral Caribe colombiano, como por ejemplo en los sectores comprendidos entre los golfos de Urabá y de Morrosquillo (Pujos y Javelaud, 1991; Molina *et al.*, 1994; Serrano, 2004), bocas de Ceniza y la Sierra Nevada de Santa Marta (Martínez y Molina, 1992; Bernal, 1996; Molina *et al.*, 1999), Santa Marta y punta Morro Hermoso (Molina, 1993), entre otros. En los últimos años, Agudelo *et al.* (2005) analizaron datos de oleaje proporcionados por la base de datos ICOADS y aplicaron ecuaciones de corrección de altura de oleaje visual, obtenidas de la comparación con datos instrumentales de altura media recolectados por medio de una boya escalar de oleaje instalada por NOAA en el Caribe. Con estos resultados, Agudelo *et al.* (2005) calcularon los regímenes de oleaje, medio y de temporal, en aguas profundas del Caribe colombiano y desarrollaron una metodología de generación de oleaje para el paso de tormentas tropicales y

huracanes. Recientemente, **Lonin et al.**, (1996) han implementado para el Caribe colombiano un modelo hidrodinámico bidimensional (una versión ajustada del modelo NedWAN) que genera datos de oleaje a partir de campos horarios de viento, con el objetivo de desarrollar sistemas de alerta para diferentes amenazas de origen marino (i.e. ENSO, mar de leva, oleaje de temporal, contaminación marina).

La caracterización inicial del oleaje en el Pacífico colombiano se concentró en los deltas de los ríos San Juan y Mira, y fue realizada a partir observaciones efectuadas en cortos periodos de tiempo y del análisis y procesamiento de datos de oleaje visual obtenidos de la base de datos ICOADS (e.g. **González et al.**, 1992, 1998; **López et al.**, 1993; **Martínez et al.**, 1995; **Correa**, 1996; **Correa y González**, 1998; **Restrepo et al.**, 2002), encontrando que en estas zonas se presentan condiciones intermedias de energía de oleaje (**Correa**, 1996; **Restrepo et al.**, 2002). También, se desarrollaron dos trabajos en los que se determinó el régimen de oleaje en el Pacífico colombiano con dos bases de datos diferentes, el primero utilizó datos visuales de la base de datos ICOADS (**Tejada**, 2002a), mientras que el segundo empleó datos de oleaje en aguas profundas simulados numéricamente mediante el modelo WaveWatch III (**Agudelo**, 2003). **Tejada** (2002a) desarrolló un módulo informático que permite manejar y procesar datos de oleaje visual ICOADS en las costas de Colombia (i.e. OLAS – disponible para el Caribe y el Pacífico colombiano). A partir de la información de datos visuales se estimaron las características del oleaje para regímenes medios en aguas profundas y en sitios de interés en la costa, generando información relacionada con el régimen medio escalar y direccional de alturas de oleaje, el régimen medio escalar y direccional de periodos, la distribución de probabilidad conjunta entre altura y periodo, la altura de ola y el periodo significativo, el flujo medio de energía, entre otros (**Tejada**, 2002a; 2002b). Por su parte, **Agudelo** (2003) analizó datos sintéticos de oleaje generados por el modelo WaveWatch III (**Tolman**, 2002a, 2002b), y los propagó hacia diferentes puntos del litoral Pacífico utilizando un modelo simplificado basado en la teoría del rayo, considerando únicamente procesos de refracción y asomeramiento, y una batimetría recta y paralela (i.e. utilizando la pendiente media de la costa) y con el fin de estimar los regímenes medio y extremal del oleaje en puntos de interés y calcular cotas de inundación integrando datos de marea y oleaje (**Agudelo**, 2003).

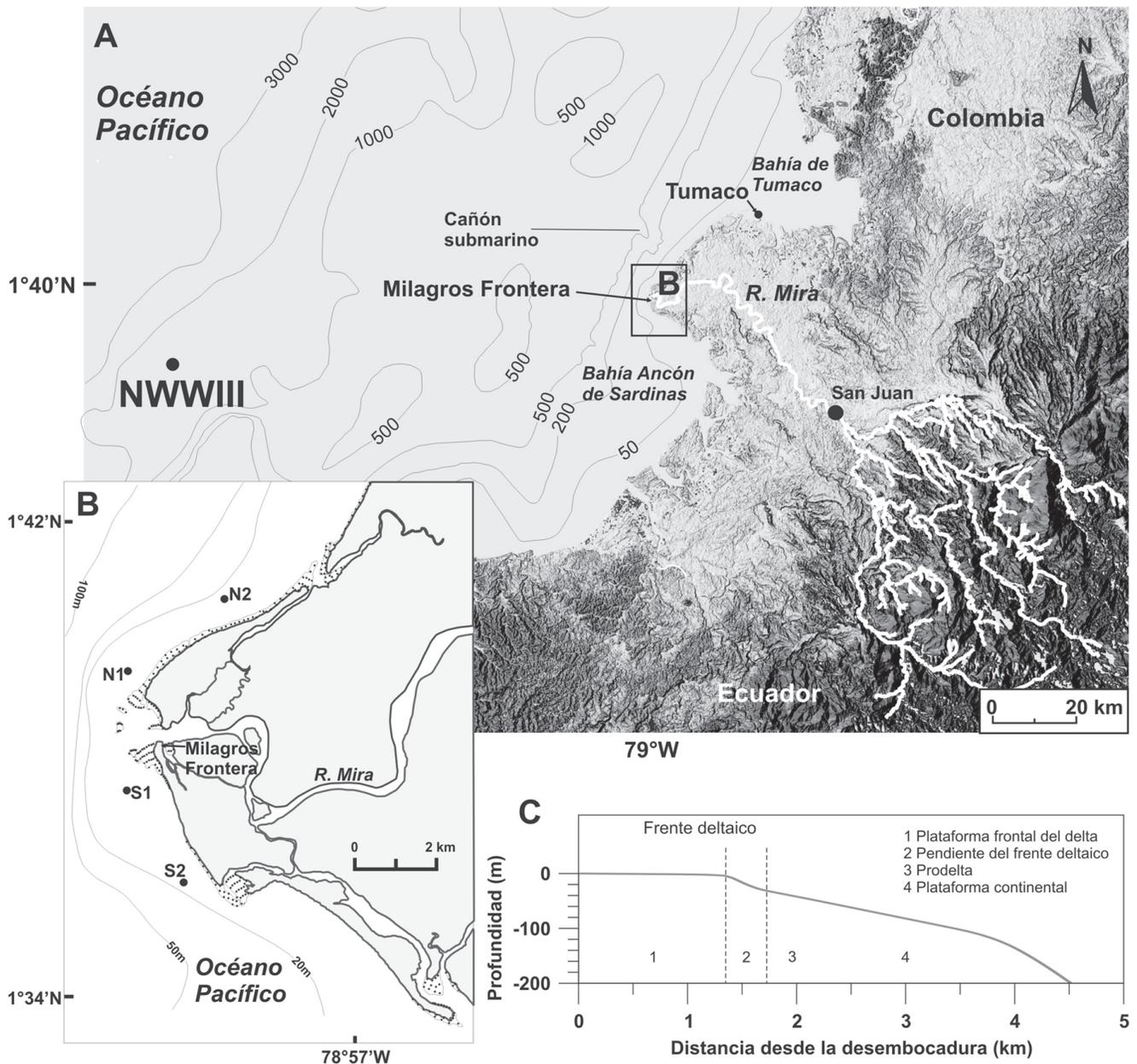
El análisis de la base de datos COADS – ICOADS también permitió que **Restrepo y López** (2007) determinaran el clima de oleaje en los principales deltas del Caribe (Mag-

dalena, Sinú, Atrato) y el Pacífico (San Juan, Patía, Mira) colombiano, obtuvieran datos de altura media, altura máxima, altura significativa, y periodo promedio en la plataforma frontal de estos deltas, y calcularan indicadores de poder marino como flujo de energía del oleaje y relación de atenuación del oleaje, entre otros (**Restrepo y López**, 2007).

La síntesis anterior busca resaltar la dispersión de información relacionada con parámetros de oleaje y la ausencia de datos instrumentales de adecuada resolución temporal en los litorales colombianos. En este contexto, el objetivo central de este trabajo es presentar una caracterización del clima de oleaje en el Pacífico sur de Colombia (delta del río Mira), obtenida a partir del análisis de la información disponible (i.e. ICOADS, WaveWatch III) y de la integración de datos estacionales de oleaje obtenidos en campo. Específicamente, este estudio busca (1) presentar y analizar la información básica de oleaje disponible como datos visuales (ICOADS), datos del modelo numérico NOAA WaveWatch III, e información de oleaje obtenida in-situ utilizando un correntómetro acústico AWAC ADCP (600 kHz.), (2) establecer una comparación entre los datos obtenidos a partir de estas fuentes de información, y (3) presentar y discutir el efecto de los procesos de refracción-difracción y asomeramiento sobre la propagación del oleaje en aguas someras del delta del río Mira.

## 2. Área de estudio

Para los fines de este estudio el sector Pacífico sur de Colombia ha sido delimitado entre las latitudes 1.0°N y 2.0°N, y las longitudes 79.0°W y 82.0°W (Figura 1), en un área que incluye los sitios en los que se obtuvieron los datos de oleaje, y que se enmarca geográficamente por la bahía de Tumaco y el delta del río Mira. La bahía de Tumaco constituye la mayor entrante de la costa Pacífica colombiana con un área de 350 km<sup>2</sup>, la zona interior de la bahía se caracteriza por presentar profundidades someras menores a 10 m., mientras que en la zona exterior la profundidad aumenta significativamente hasta alcanzar profundidades de 1000 m., aproximadamente a 40 km del límite de la plataforma continental (**CCCP**, 2003) (Figura 1). El delta del río Mira tiene una superficie subaérea de 520 km<sup>2</sup>, que se extiende desde el ápice ubicado aproximadamente a 20 km de la línea de costa. El plano deltaico subaéreo tiene un gradiente de  $53.3 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ . La fracción subacuosa del delta se puede dividir en tres zonas: (1) los planos submareales (i.e. plano deltaico subacuoso) de menos de 5 m de profundidad, (2) el frente deltaico a profundidades que oscilan entre 5 m y 40 m, y (3) el prodelta a profundidades mayores de 40 m. El límite entre el plano submareal y el frente deltaico se localiza aproximadamente a 1.4 km costa



**Figura 1.** Pacífico sur de Colombia - Área de estudio que incluye los sitios en los que se obtuvieron los datos de oleaje, y que se enmarca geográficamente por la bahía de Tumaco, el delta del río Mira, y la bahía Ancón de Sardinias. Se seleccionaron datos ICOADS de oleaje entre las latitudes 1.0°N y 2.0°N y las longitudes 79.0°W – 82.0°W, y se procesó una serie de oleaje correspondiente al lugar más cercano al área de estudio (1.5°N, 80.0°W) generadas por el modelo NWWIII; (B) se realizaron mediciones de oleaje utilizando un correntómetro AWAC ADCP (600 kHz.) en cuatro estaciones ubicadas en la plataforma deltaica del río Mira: Norte 2 (N2), Norte 1 (N1), Sur 1 (S1), y Sur 2 (S2); (C) perfil batimétrico longitudinal obtenido en el frente deltaico del río Mira.

afuera. El gradiente del plano submareal es de  $3.57 \times 10^{-3} \text{ m m}^{-1}$ , mientras que la pendiente del frente deltaico es de  $0.02 \text{ m m}^{-1}$ . Todo el sistema ha sido construido sobre una plataforma continental con una amplitud de 4.5 km.

El Pacífico sur de Colombia se caracteriza por fenómenos locales de viento que dependen de la diferencia de temperatura entre la superficie del mar y la tierra causada por la radiación solar. Otro factor que determina el patrón

de vientos en esta zona está relacionado con la incidencia de los vientos Alisios, que se ven afectados por el desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) (CCCP, 2003). Cuando la ZCIT se ubica sobre este sector, convergen los vientos Alisios provenientes del Noreste y los Alisios del Sureste. Cuando la ZCIT se desplaza hacia el Norte, en la región predominan los vientos del sureste, que adquieren localmente componentes SW y NW, mientras que durante los meses de enero a marzo, cuando la ZCIT se desplaza hacia el sur, predominan los vientos provenientes desde el norte (CCCP, 2003).

Correa (1996) determinó que esta zona se caracteriza por presentar alturas medias de oleaje que varían entre 0.5 m. y 1.5 m., con periodos que oscilan entre 8 s. y 10 s. Por su parte, Restrepo y López (2007) señalan que este sector se caracteriza por presentar un oleaje tipo swell proveniente del suroeste, con alturas medias de 1.3 m. en aguas profundas, y por la ocurrencia de procesos significativos de refracción y fricción en la plataforma, que dan lugar a que la altura de oleaje disminuya cerca de un 20% con respecto a su amplitud en aguas profundas.

La serie de datos del mareógrafo de Tumaco (1953-2000) indica que las mareas son típicamente semi-diurnas, con un rango mareal promedio de 2.6 m, y un máximo promedio de 3.1 m. Además, el análisis de regresión de los datos de nivel del mar ha mostrado una tasa general de descenso de  $\sim 1.14 \text{ mm a}^{-1}$ , que puede estar relacionada con la convergencia tectónica de placas y el levantamiento en algunos segmentos de la costa (Restrepo y López, 2007).

### 3. Datos y métodos

Para determinar el comportamiento del oleaje en el área de estudio se analizaron dos series de datos de oleaje (1979-2000) en aguas profundas, la primera se obtuvo de la base de datos mundial de oleaje visual ICOADS (Woodruff *et al.*, 1998; Díaz *et al.*, 2002) y la segunda fue generada por medio del modelo de tercera generación Wave Watch III desarrollado por la NOAA (Tolman, 2002a, 2002b). Luego de obtener los estadísticos básicos de oleaje en aguas profundas se estimó la altura del oleaje durante su tránsito hacia aguas someras después de sufrir los efectos de asomeramiento, refracción-difracción, disipación por fricción con el fondo y rotura del oleaje. Además, se obtuvieron datos de oleaje in-situ recolectados en el frente deltaico del río Mira utilizando un correntómetro AWAC ADCP (600 kHz), durante monitoreos realizados en 2005 y 2006 (Figura 1). A continuación se describen las características más significativas de cada una de las bases de datos consultadas y los procedimientos efectuados para el procesamiento de los datos.

### 3.1. Oleaje en aguas profundas

#### 3.1.1. Datos ICOADS

La Organización Meteorológica Mundial ha desarrollado, con la participación de buques mercantes, la base de datos mundial sobre oleaje visual. Estos datos son tomados por observadores a bordo de barcos de tráfico marítimo comercial, que al recopilar la información la transmiten por radio a centros internacionales que se encargan de su compilación, almacenamiento y distribución (Tejada, 2002a). Esta base de datos, conocida como ICOADS (The International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set Project), es el resultado de un proyecto conjunto desarrollado por la NOAA, el Instituto Cooperativo para Investigaciones en Ciencias Ambientales (Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences – CIRES) y el Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas (National Center for Atmospheric Research - NCAR) de los Estados Unidos (Díaz *et al.*, 2002).

Se obtuvo información entre 1979 y 2000 de la base de datos ICOADS en los siguientes campos: (1) longitud y latitud de cada observación, (2) fecha y (3) hora de la observación, (4) altura y (5) período visual del oleaje, y (6) dirección del oleaje. De acuerdo con el sistema de almacenamiento de datos del programa ICOADS, los períodos observados son aproximados hasta el segundo más cercano, la altura de oleaje visual se registra en intervalos de 0.5 m., y la dirección del oleaje es agrupada mediante códigos de clasificación en cuadrantes de arribo con un rango de  $9^\circ$  (Díaz *et al.*, 2002). Teniendo en cuenta estas características se seleccionaron datos entre las latitudes  $1.0^\circ\text{N}$  y  $2.0^\circ\text{N}$  y las longitudes  $79.0^\circ\text{W}$  –  $82.0^\circ\text{W}$ , encontrando así un total de 3796 datos ICOADS, los cuales fueron reclasificados utilizando solamente aquellos datos con información simultánea en los campos de altura visual, período visual y dirección del oleaje. Esta reclasificación se realizó con el fin de obtener una caracterización completa del clima marítimo que incluya altura, período y dirección de arribo del oleaje. Por lo tanto, para este análisis se obtuvo una base de datos derivada de ICOADS con un total de 1563 datos de oleaje visual.

Los datos de oleaje visual presentan imprecisiones relacionadas con aspectos como entrenamiento y experiencia del observador, altura del punto de observación, altura de puntos de referencia, entre otros (Tejada, 2002a). Por lo tanto, es necesario transformar los datos visuales en alturas significativas y periodos utilizando funciones de transferencias obtenidas por medio de la comparación entre registros de datos visuales e instrumentales realizados en forma simultánea (Copeiro, 2000). Aun cuando en Colom-

bia no se han realizado este tipo de comparaciones, existen funciones de transferencia obtenidas a escala global y regional que pueden ser utilizadas en el ámbito local (e.g. **Hogben y Lumb**, 1967; **Jardine**, 1977, 1979; **Guedes Soares**, 1986; **PCM**, 1991). Teniendo en cuenta el objeto de este estudio y la forma en la cual se almacenan los datos de altura de oleaje visual en el proyecto ICOADS (i.e. incrementos de 0.5 m.), se seleccionó la función de transferencia propuesta por el programa de Clima Marítimo Español, considerando que su aplicación permite disminuir las imprecisiones derivadas de sobreestimaciones efectuadas por el observador (**PCM**, 1991):

$$H_s = 0.54 + 0.59H_v \quad (1)$$

en donde  $H_s$  es la altura significativa (m) y  $H_v$  es la altura de oleaje visual (m). Finalmente, los datos fueron clasificados por cuadrante de arribo ( $22.5^\circ$ ) y a nivel estacional para definir la dirección predominante, la altura significativa y el periodo pico del oleaje incidente en el sistema deltaico del río Mira.

### 3.1.2. Datos WaveWatch III

El modelo numérico WaveWatch III (NWWIII) es un modelo de generación de oleaje de tercera generación, en el que los procesos físicos que describen el crecimiento y decaimiento del oleaje son parametrizados de manera explícita e incluyen el cálculo de las interacciones no-lineales del oleaje individual. Estos modelos proporcionan una relación estadística de un estado de mar y no permiten obtener una descripción determinística de un evento (**Tolman**, 1992; **Tolman y Chalikov**, 1994).

El modelo NWWIII fue desarrollado para efectuar pronósticos del comportamiento del oleaje en el ámbito de la oceanografía operacional (**Tolman**, 1992; **Tolman y Chalikov**, 1994), y fue validado a escala global utilizando datos de altimetría satelital (ERS 1) y boyas escalares de oleaje (**Tolman**, 2002). Además, los datos obtenidos durante el proceso de validación fueron comparados con datos generados por el modelo WAM. La validación del modelo mostró óptimos resultados a escala global, con errores cuadráticos medios relativos del orden del 15% con respecto a la altura media de oleaje registrada por medio de boyas escalares y altimetría satelital. Además, el modelo NWWIII mostró un mejor desempeño que el modelo WAM en el pronóstico de parámetros de oleaje, especialmente en las zonas tropicales y en la predicción de niveles extremos de oleaje (**Tolman**, 2002). Los errores asociados a los modelos de generación de oleaje están relacionados con el método de resolución de las ecuaciones, la imprecisión de los datos de entrada, y la resolución espacial y temporal

del dominio de cálculo (**Agudelo**, 2003; **GIOC**, 2004). Por lo tanto, es necesario utilizar datos instrumentales de altura de oleaje obtenidos a escala regional para calibrar los datos generados por medio del modelo NWWIII, y así establecer una relación entre los parámetros de altura de ola generados por el modelo numérico y las medidas instrumentales de altura de ola significativa (**Wittmann**, 2001; **GIOC**, 2004).

Para la calibración de los datos NWWIII generados frente a las costas de Suramérica en el Pacífico ecuatorial se ha utilizado una boya escalar de oleaje instalada por NOAA en aguas profundas frente a la costa de Perú (boya NOAA 32302), debido a su ubicación geográfica ( $18.0^\circ\text{S}$ ,  $85.0^\circ\text{W}$ ) y a la extensión de la serie de datos (i.e. 9 años) (**GIOC**, 2004). Utilizando un punto de generación NWWIII situado en la posición de la boya NOAA 32302, el **GIOC** (2004) comparó datos instrumentales de altura de oleaje registrados a escala horaria con datos de altura significativa simulados cada tres horas mediante NWWIII para el periodo comprendido entre 1986 y 1995, encontrando que en promedio, los datos instrumentales eran mayores en un 5% con respecto a los datos sintéticos. Finalmente, la comparación de 21 percentiles de las series instrumentales y sintéticas de datos de altura de oleaje, permitieron que el **GIOC** (2004) obtuviera una curva de ajuste para los datos de altura significativa generados por el modelo NWWIII (ecuación 2):

$$H_s = 0.297 + 0.968H_{NWWIII} \quad (2)$$

en donde  $H_{NWWIII}$  es la altura significativa (m) generada por medio del modelo NWWIII, y  $H_s$  es la altura de oleaje significativa (m) corregida usando datos instrumentales.

Se recolectaron series de oleaje generadas por el modelo NWWIII para diferentes sitios en el Pacífico colombiano, de las cuales se utilizó la correspondiente al lugar más cercano al área de estudio ( $1.5^\circ\text{N}$ ,  $80.0^\circ\text{W}$ ) (Figura 1) (**Graham y Díaz**, 2001). La serie de datos obtenida y ajustada por medio de la ecuación (2), con un total de 64544 datos, contiene información de estados de mar generada cada tres horas durante enero de 1979 y diciembre de 2000. La información analizada consta de valores de altura de ola significativa ( $H_s$ ), periodo pico ( $T_p$ ) y dirección dominante ( $D_p$ ), y fue clasificada por cuadrante de arribo ( $22.5^\circ$ ) y a nivel estacional para definir la dirección predominante, la altura significativa y el periodo pico del oleaje incidente en el sistema deltaico del río Mira.

## 3.2. Oleaje en aguas someras

### 3.2.1. Propagación del oleaje en aguas someras

Con el fin de evaluar el efecto de los procesos de asomeramiento, refracción, difracción, disipación y rotura

sobre la propagación del oleaje en aguas someras, se seleccionaron estados de mar (i.e.  $H_s$ ,  $F_p$ ,  $D_p$ ) característicos en aguas profundas que fueron propagados hacia diferentes puntos de la desembocadura del río Mira, mediante el modelo numérico de propagación de oleaje Oluca-SP (GIOC, 2002b). Este modelo de propagación de oleaje utiliza la aproximación parabólica de la ecuación de la pendiente suave, y sirve para modelar la propagación de un espectro direccional sobre una batimetría irregular considerando los procesos de asomeramiento, refracción-difracción, disipación por fricción con el fondo y rotura del oleaje (Kirby y Dalrymple, 1986a, 1986b). Este modelo no incluye los efectos del viento y la aceleración de Coriolis, y considera condiciones de presión constante en la superficie libre (GIOC, 2002b).

Para ejecutar el modelo numérico de propagación de oleaje Oluca-SP es preciso seleccionar el método paramétrico de resolución espectral y definir como dato de entrada un estado de mar direccional en el contorno exterior, caracterizado por un espectro bidimensional, discretizado en componentes de frecuencia y dirección que son propagados de manera simultánea. Además, como parámetros de entrada se debe fijar (1) el modelo para resolver el espectro, (2) las ecuaciones de cálculo para la disipación por rotura y fondo, (3) las condiciones de contorno en el dominio de cálculo, y (4) las condiciones de marea de referencia (GIOC, 2002b). El modelo espectral utilizado fue el TMA (i.e. Texel, Mersen and Arsløe) (Bouws *et al.*, 1985), que se aplica en zonas cercanas a la costa en donde las profundidades son relativamente poco profundas y las olas son afectadas por el fondo (USGS, 2002). Como datos de entrada se utilizaron parámetros de  $H_s$ ,  $F_p$ , y  $D_p$  definidos a partir del análisis del oleaje en aguas profundas. Por medio de la ecuación (3) se estimó la profundidad ( $d$ ) desde la cual se propagó el oleaje incidente (USGS, 2002),

$$\begin{aligned} d &= 0.5L_o \\ L_o &= \frac{gT_p^2}{2\pi} \end{aligned} \quad (3)$$

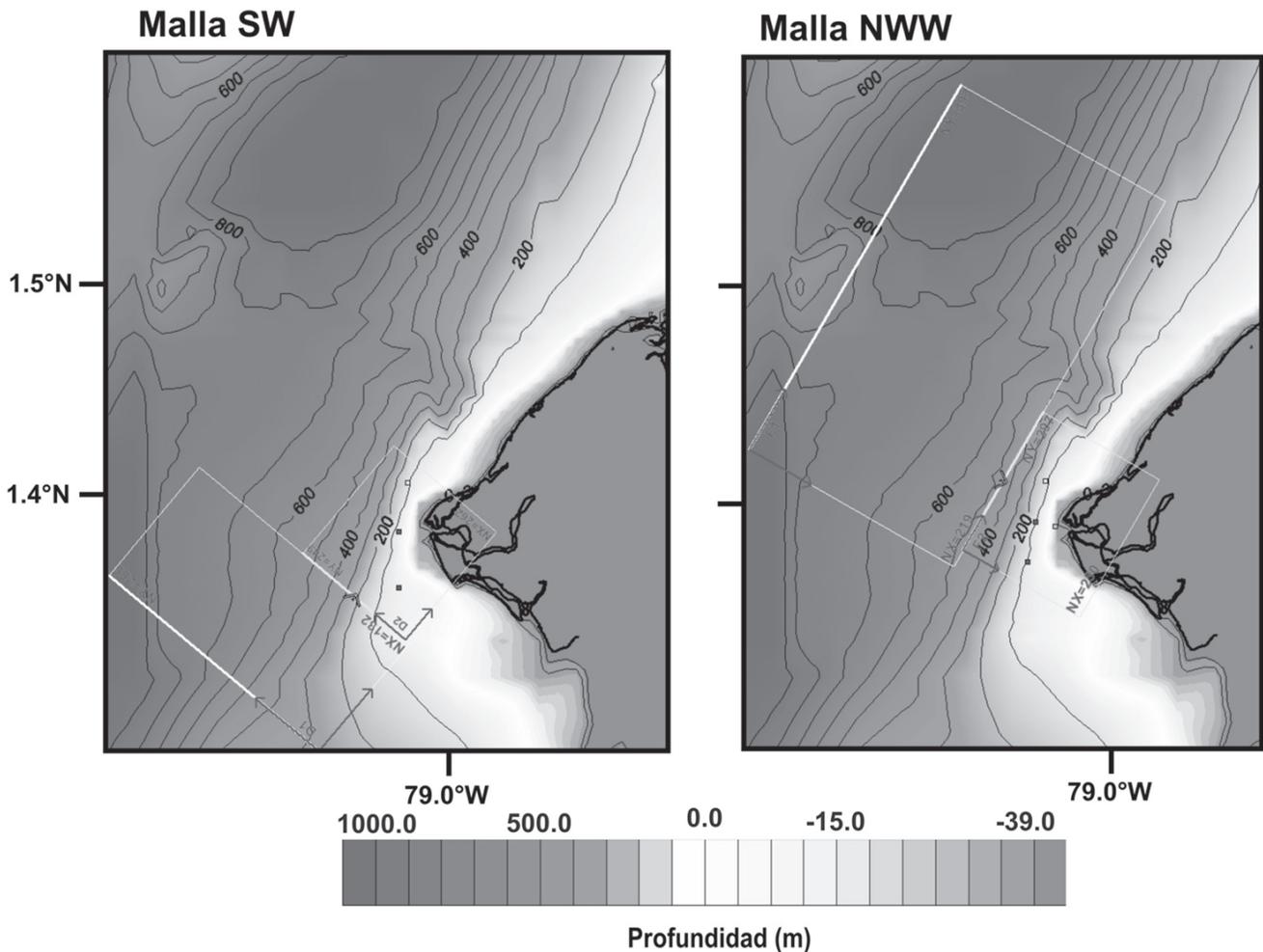
en donde,  $L_o$  es la longitud de onda del oleaje en aguas profundas,  $g$  la aceleración de la gravedad, y  $T_p$  el periodo típico del tren de olas que serán propagadas. Para resolver el espectro se utilizó el modelo compuesto (Kirby y Özkan, 1994), que cubre un mayor rango de profundidades de agua y por lo tanto permite una mejor aproximación a la dispersión del oleaje debido a la altura de ola significativa (GIOC, 2002b).

La presencia localizada de disipación de energía en el fondo provoca la difracción y atenuación del oleaje, y puede ser estimada por los modelos de capa límite laminar en superficie y fondo, capa límite turbulenta en el fondo y fondos porosos de arena. En campo las condiciones de oleaje hacen que la capa límite en el fondo sea siempre turbulenta, por lo que la disipación por fondo se calculó por medio del modelo de capa límite turbulenta en el fondo utilizando el coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach ( $f$ ) (Dean y Dalrymple, 1984). El análisis de rotura es fundamental en un modelo de propagación en aguas someras y debe ser útil para estimar la pérdida de energía. El modelo Oluca SP permite seleccionar entre los modelos Battjes y Janssen (1978), Thornton y Guza (1983) y Winyu y Tomoya (1998). La disipación por rotura se estimó mediante el modelo de Thornton y Guza (1983), que se fundamenta en la similitud que existe entre la disipación de energía debido a la rotura del oleaje y la disipación de un “bore”, asumiendo que la distribución de alturas de ola en un punto es de tipo Rayleigh (Thornton y Guza, 1983). En los procesos de validación y calibración del modelo Oluca SP desarrollados por la Universidad de Cantabria se obtuvieron las mejores aproximaciones a la disipación de energía del oleaje con estos métodos (GIOC, 2002b).

La resolución numérica de las ecuaciones implica transformar el dominio de cálculo continuo en un dominio discreto, formado por una malla rectangular de cálculo (GIOC, 2002a). Se estableció un conjunto de dos pares de mallas anidadas con una resolución espacial de 50 m., orientadas de acuerdo con la dirección de propagación del oleaje (Figura 2). Los estados de mar direccionales seleccionados se propagaron teniendo como referencia el rango mareal promedio en la desembocadura del río Mira (2.6 m) (Otero, 2005; Restrepo y López, 2007).

### 3.2.2. Mediciones in-situ de oleaje: plataforma deltaica del río Mira

Se realizaron mediciones de altura significativa y periodo de oleaje en cuatro estaciones ubicadas en la plataforma deltaica del río Mira (Figura 1) utilizando un correntómetro AWAC ADCP (600 kHz.). Este equipo emplea tres sistemas independientes para estimar parámetros de oleaje: (1) sensor de presión, (2) sensor de velocidades orbitales, y (3) un sistema Acústico de Seguimiento Superficial (Acoustic Surface Tracking – AST). El sistema AST actúa como un detector estándar de rango acústico, en donde el haz central es usado para transmitir un pulso de baja amplitud (i.e. en comparación con las mediciones de velocidad que usan el efecto Doppler) que permite calcular la distancia que existe entre el transductor central y la superficie libre (Nortek, 2004).



**Figura 2.** Conjunto de mallas anidadas – sector desembocadura R. Mira. Las mallas exteriores (cuadro blanco) tienen una resolución espacial de 100 m., mientras que las mallas de detalle (cuadro gris) tienen una resolución espacial de 50 m

La configuración del correntómetro AWAC ADCP para la medición de oleaje se centra en la selección de una tasa de muestreo acorde con la profundidad de fondeo del equipo, las características del oleaje y la capacidad de almacenamiento de datos (Nortek, 2004). En cada una de las estaciones (Figura 1) se obtuvieron 1024 muestras de parámetros de oleaje a una tasa de recolección de 2 Hz., con intervalos de medición de una hora. La duración de los muestreos varió entre 15 y 26 horas, aproximadamente (Tabla 1). Esta configuración se considera apropiada para muestreos en zonas costeras con profundidades inferiores a 20 m. (Nortek, 2004).

Los datos registrados por los sensores de presión y velocidad son dependientes de la profundidad de fondeo

del equipo y de la frecuencia del oleaje, por lo que deben ser procesados antes de que puedan ser usados para caracterizar la dinámica del oleaje (Gordon y Lohrmann, 2001; Nortek, 2004). Por lo tanto, se emplearon rutinas en Matlab (e.g. Gordon y Lohrmann, 2001) que usan teoría lineal de oleaje para convertir los espectros de velocidad y presión en un espectro de elevación superficial, utilizando las siguientes expresiones,

$$C_{mp} = \left[ \frac{\text{Cosh}Kh}{\text{Cosh}K(h+z)} \right]^2 \frac{C_{pp}}{\rho^2 g^2} \quad (4)$$

$$C_{mv} = \left[ \frac{\text{Sinh}Kh}{\text{Cosh}K(h+z)} \right]^2 \frac{C_{vv}}{\sigma^2} \quad (5)$$

**Tabla 1.** Localización geográfica y profundidad de los sitios en los que se instaló un Correntómetro AWAC ADCP (600 kHz.) para obtener datos de oleaje in-situ, y fechas en las que se realizaron las campañas de medición.

Estación	Localización geográfica		Prof (m)	Muestreo	
	Latitud	Longitud		Inicio (fecha/hora)	Fin (fecha/hora)
Sur 1 (S1)	01°37'34.2N	79°00'43.1W	6.9	25-04-06/13:22	26-04-06/15:30
Sur 2 (S2)	01°36'10.8N	78°59'53.1W	8.6	22-09-06/16:15	23-09-06/14:00
Norte (N1)	01°40'32.1N	78°59'17.2W	11.9	23-04-07/16:50	24-04-07/11:57
Norte (N2)	01°39'36.6N	79°00'42.4W	5.2	26-04-06/13:55	27-04-06/12:20

**Nota.** Prof= profundidad, tomando como referencia el mayor nivel de marea registrado durante el periodo de muestreo.

en donde,  $C_{\eta p}$  y  $C_{\eta u}$  son los espectros de elevación superficial ( $\eta$ ) basados en presión ( $p$ ) y velocidad ( $u$ ), respectivamente.  $K$  es el número de onda,  $h$  es el nivel medio del mar con respecto al fondo,  $z$  es la distancia vertical con respecto al nivel medio del mar,  $\sigma$  es la frecuencia,  $\rho$  es la densidad del agua y  $g$  es la gravedad. La frecuencia y el número de onda están relacionados mediante la relación de dispersión de oleaje superficial (Gordon y Lohrmann, 2001),

$$\sigma^2 = gK \tanh Kh \quad (6)$$

#### 4. Resultados y discusión

##### 4.1. Clima de oleaje en aguas profundas

###### 4.1.1. Caracterización a partir de la base de datos derivada de ICOADS

Por medio del procesamiento de 1563 observaciones derivadas de ICOADS de dirección, periodo y altura de las olas, recopiladas entre los años 1979 y 2000 en el sector Pacífico sur de Colombia, se estableció que el clima de olas para el sector marino proximal y la plataforma costera del delta del río Mira está dominado en un 42% por la ocurrencia de trenes de oleaje provenientes de una zona de generación localizada al sur-suroeste (SSW) (Figura 3). En aguas profundas, estas olas presentan una altura promedio de  $1.39 \pm 0.3$  m, con un periodo promedio de  $8.5 \pm 3.1$  s (Tabla 2). También se destacan oleajes provenientes del sur y del suroeste (Figura 3), con alturas promedio de  $1.37 \pm 0.6$  m y  $1.39 \pm 0.3$  m, respectivamente. Los oleajes más intensos provienen del SSW y el S, con alturas significativas que pueden llegar hasta 3.2 y 9.3 m, respectivamente. Los mayores periodos se presentan cuando el oleaje incidente proviene del SSW y el W (Tabla 2 y Figura 3). En general, los datos registrados en esta base de datos señalan que la altura significativa varía entre 0.54 y 9.39 m, mientras que los periodos se encuentran entre 2.4 y 32.8 s (Tabla 2).

A escala estacional, el análisis de la base de datos derivada del programa ICOADS indica que durante el perio-

do comprendido entre los meses de abril a diciembre el oleaje predominante proviene del SSW, con alturas significativas promedio que varían entre  $1.22 \pm 0.3$  m en abril y  $1.46 \pm 0.4$  m durante septiembre, y periodos medios que se encuentran entre  $7.84 \pm 3.2$  s en diciembre y  $8.67 \pm 3.8$  s durante abril (Tabla 3). En el primer trimestre del año el oleaje se caracteriza por presentar, en promedio, alturas significativas del orden de  $1.20 \pm 0.3$  m y  $1.36 \pm 0.7$  m, y periodos de  $8.0 \pm 2.7$  s y  $8.6 \pm 3.7$  s, con predominio de oleajes provenientes del sur (S) y el nor-noroeste (NNW) (Tabla 3).

###### 4.1.2. Caracterización a partir de la base de datos derivada de NWWIII

El procesamiento y análisis de la serie de datos NWWIII (1979 – 2000) señala que el clima de olas para el sector marino proximal y la plataforma costera del delta del río Mira se caracteriza por un oleaje en aguas profundas con alturas significativas que se encuentran entre 0.29 y 2.23 m, y periodos que varían entre 5.0 y 23.0 s (Tabla 2). En cuanto a la dirección predominante, el clima de olas está dominado por trenes de olas provenientes del suroeste (SW) (47.2%) y sur-suroeste (SSW) (28.8%), caracterizados por alturas significativas de  $0.91 \pm 0.2$  m y  $0.92 \pm 0.2$  m, y periodos de  $13.8 \pm 1.8$  s y  $13.4 \pm 1.7$  s, respectivamente (Figura 3). También existe un componente significativo proveniente del noroeste-oeste (NWW) (10.8%), que presenta alturas significativas hasta de 2.23 m y periodos que varían entre 7.0 y 23.0 s (Tabla 2 y Figura 3). Los mayores periodos se presentan cuando el oleaje incidente proviene del NWW y el NW. Igualmente, los oleajes más intensos provienen de estos sectores, con alturas significativas que pueden llegar hasta 1.8 y 2.3 m, respectivamente (Tabla 2 y Figura 3).

La base de datos NWWIII indica que durante la mayor parte del año (marzo – diciembre) el oleaje proviene del SW y SSW, mostrando ligeras diferencias en la dirección predominante ( $210^\circ < D_p < 219^\circ$ ) durante este tiempo (Tabla 3). Este oleaje se caracteriza por periodos del orden de 13.8

**Tabla 2.** Resumen estadístico de dos series de oleaje (1979 – 2000) en aguas profundas para el sector Pacífico sur de Colombia. La primera se obtuvo de la base de datos mundial de oleaje visual - ICOADS y la segunda fue generada por medio del modelo de tercera generación Wave Watch III desarrollado por NOAA (NWWIII). Para la serie derivada de la base de datos ICOADS original (Woodruff et al., 1998; Díaz et al, 2002) y para la serie ajustada de la base de datos NWWIII (Graham y Díaz, 2001) se obtuvieron los valores mínimos, medios y máximos de dirección dominante ( $D_p$ ), altura significativa ( $H_s$ ), y periodo pico ( $T_p$ ), para cada una de las categorías establecidas.

	Dirección dominante $D_p$ (°)						Altura significativa $H_s$ (m)						Periodo pico $T_p$ (s)					
	ICOADS			NWWIII			ICOADS			NWWIII			ICOADS			NWWIII		
	Min	Prom	Max	Min	Prom	Max	Min	Prom	Max	Min	Prom	Max	Min	Prom	Max	Min	Prom	Max
NW	304.0	318.9	326.0	304.0	304.8	308.0	0.83	1.34	2.01	0.49	0.97	1.85	8.1	8.4	15.3	8.0	16.5	23.0
NWW	282.0	294.9	303.0	282.0	296.2	303.0	0.84	1.33	1.72	0.49	1.02	2.23	4.8	9.3	20.0	7.0	14.4	23.0
W	259.0	266.7	281.0	259.0	270.2	281.0	0.84	1.24	2.02	0.29	0.93	1.94	2.5	8.0	32.8	7.0	13.2	19.0
SWW	237.0	240.5	247.5	237.0	246.3	258.0	0.84	1.32	2.61	0.29	0.87	1.65	2.4	8.4	24.7	5.0	13.0	19.0
SW	225.0	225.0	225.0	214.0	220.9	236.0	0.84	1.39	2.61	0.29	0.91	1.75	3.6	8.3	24.7	5.0	13.8	23.0
SSW	195.0	204.3	204.3	192.0	208.6	213.0	0.84	1.39	3.20	0.29	0.92	1.65	2.5	8.5	29.4	6.0	13.4	20.0
S	180.0	185.3	185.3	189.0	190.1	191.0	0.54	1.37	9.34	0.39	0.44	0.68	2.5	8.3	18.8	8.0	10.1	17.0

**Nota.** Min= mínimo; Prom= promedio; Max=máximo

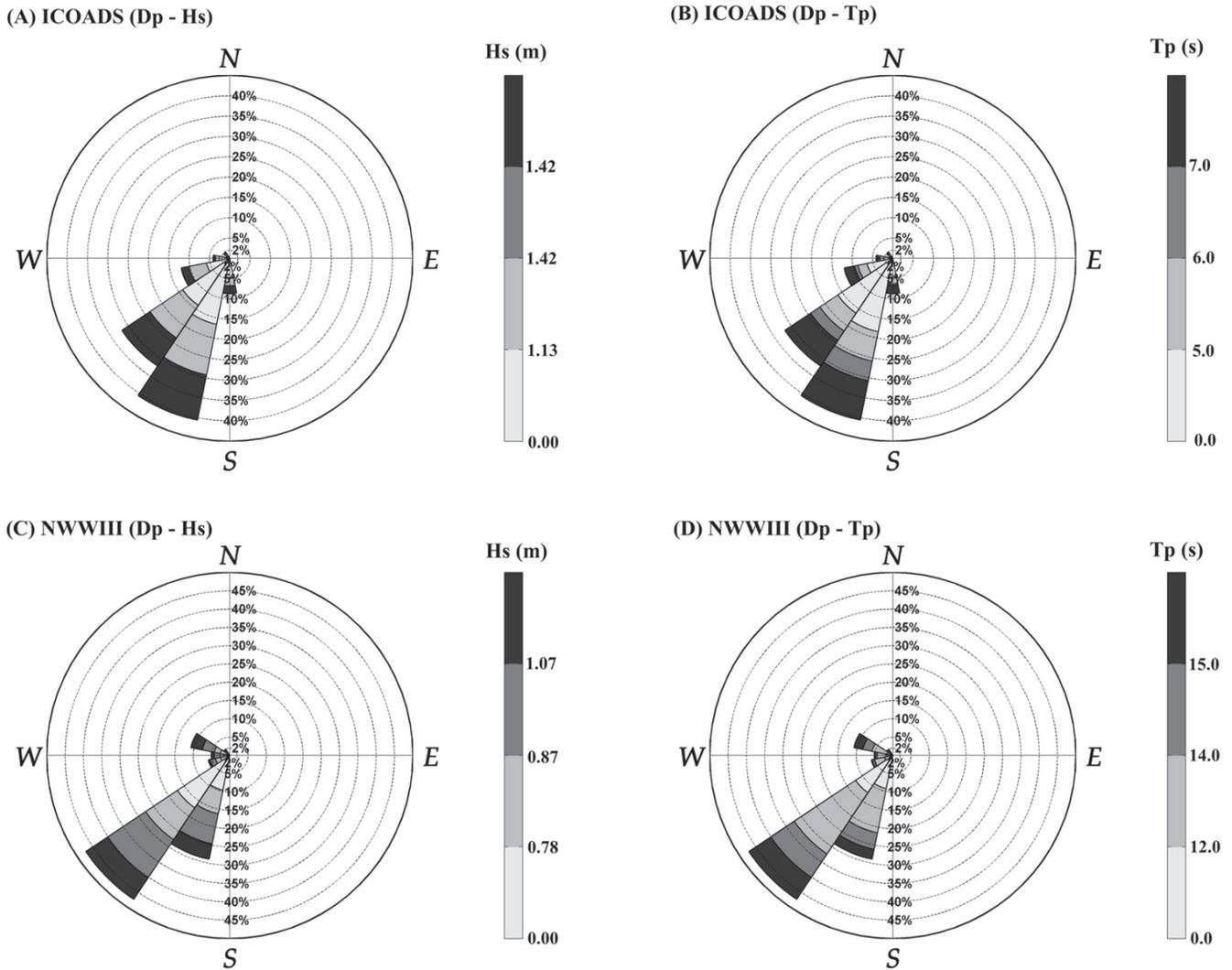
$\pm 1.8$  s y  $14.0 \pm 1.8$  s, y alturas significativas promedio que varían entre  $0.83 \pm 0.16$  m y  $0.96 \pm 0.22$  m. En los meses de enero y febrero el sistema se caracteriza por la ocurrencia de trenes de oleaje provenientes del NWW, encontrando alturas significativas promedio entre  $0.89 \pm 0.22$  m y  $0.99 \pm 0.26$  m, y periodos medios de  $13.8 \pm 2.0$  s y  $14.0 \pm 1.9$  s (Tabla 3).

#### 4.1.3. Comparación entre las bases de datos de oleaje visual (ICOADS) y oleaje sintético (NWWIII)

Los datos derivados de la base de datos ICOADS y los obtenidos mediante el modelo NWWIII muestran similitud en la dirección predominante del oleaje (Figura 3). Sin embargo, presentan diferencias en los valores de altura significativa y periodo pico (Tablas 2 y 3). La aplicación de una prueba t pareada entre 22 percentiles de  $H_s$  de las series de oleaje visual y sintético, indica que para un nivel de confianza del 95% existen diferencias significativas entre los registros visuales y sintéticos de altura de oleaje ( $\alpha = 0.05$ ;  $P\text{-value} = 4.46 \times 10^{-9}$ ). De igual forma, un análisis similar indica que los valores de  $T_p$  visuales y sintéticos también difieren para un nivel de confianza del 95% ( $\alpha = 0.05$ ;  $P\text{-value} = 0.0001$ ). En general, los datos de  $H_s$  estimados a partir de información de oleaje visual ICOADS son mayores que los valores de  $H_s$  calculados a partir de información de oleaje NWWIII, mostrando diferencias que varían entre 22 y 70%. Para el  $T_p$ , los resultados indican que los valores derivados de la base de datos de oleaje visual son menores que los registros obtenidos a partir de la serie de oleaje NWWIII, con diferencias que alcanzan hasta un 53%.

Los datos de  $H_s$  y  $T_p$  de las series de oleaje visual y NWWIII fueron ajustados a diferentes funciones de distribución (i.e. Weibull de mínimos, Normal, Log-normal, Gumbel de máximos) con el fin de construir los regímenes de altura y periodo del oleaje. En todos los casos se encontró que las series de datos se ajustaban mejor a la función de distribución Gumbel de máximos (Figura 4). El ajuste a esta distribución también mostró diferencias significativas entre las series de oleaje visual y oleaje NWWIII, particularmente en los valores de los parámetros de localización ( $\lambda$ ) y de escala ( $\delta$ ) de la distribución. Para la altura significativa, los parámetros estimados para la serie derivada de ICOADS ( $\lambda_{ICOADS} = 1.12$ ;  $\delta_{ICOADS} = 0.26$ ) fueron mayores que los parámetros calculados para el ajuste de los datos generados con el modelo numérico NWWIII ( $\lambda_{NWWIII} = 0.79$ ;  $\delta_{NWWIII} = 0.15$ ). En el caso del periodo pico, se obtuvo un parámetro de localización mayor para la serie ajustada de NWWIII ( $\lambda_{NWWIII} = 12.6$ ;  $\lambda_{ICOADS} = 4.4$ ), mientras que se estimó un parámetro de escala menor ( $\delta_{NWWIII} = 1.33$ ;  $\delta_{ICOADS} = 1.98$ ) en comparación con la serie ajustada de datos ICOADS.

Para la serie de datos de oleaje visual ICOADS se calculó un régimen de altura significativa que varía entre 1.1 y 3.7 m., encontrando niveles de 1.25 y 2.50 m. que corresponden a probabilidades de no excedencia de 50 y 99.5%, respectivamente (Figura 4A). El régimen de altura de oleaje obtenido para la serie de datos de oleaje sintético NWWIII muestra niveles inferiores, señalando para probabilidades de no excedencia de 50 y 99.5% alturas significativas de 0.87 y 1.65 m., respectivamente (Figura 4B). Por su parte, el régimen de periodo pico para la serie de oleaje visual ICOADS presenta

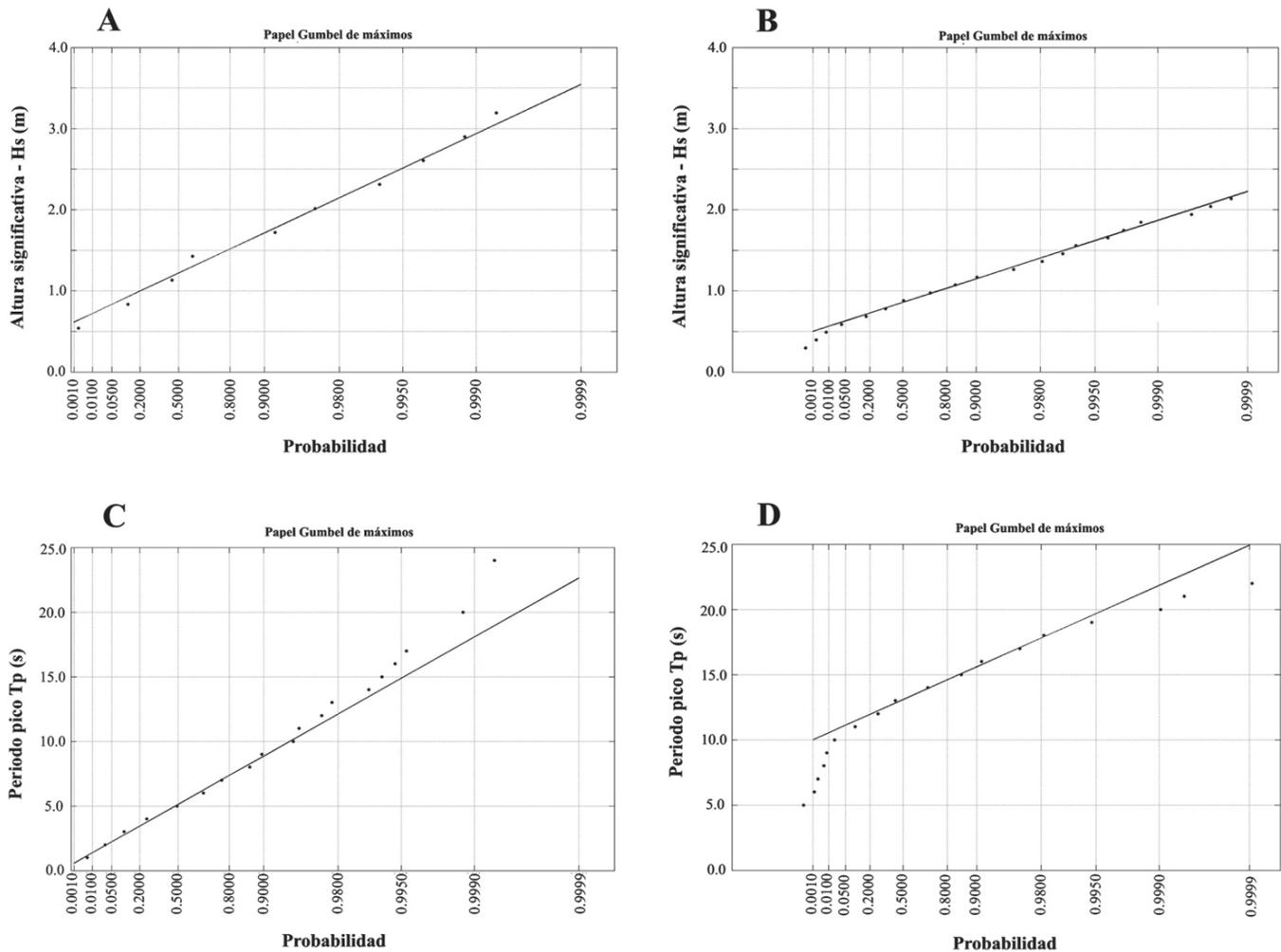


**Figura 3.** Rosas de oleaje considerando información combinada de: (A) dirección predominante y altura significativa derivados de la serie ICOADS, (B) dirección predominante y periodos pico derivados de la serie ICOADS, (C) dirección predominante y altura significativa derivados de la serie NWWIII, y (D) dirección predominante y periodos pico derivados de la serie NWWIII.

valores entre 1.0 y 23.0 s, con periodos de 5.0 y 15.0 s que corresponden a probabilidades de no excedencia de 50 y 99.5%, respectivamente (Figura 4C). La serie de oleaje sintético NWWIII muestra un régimen de periodo pico con un rango de variación menor, con valores entre 10.0 y 25.0 s, y periodos mayores en comparación con el régimen obtenido para la serie de datos ICOADS, con valores de 13.1 y 19.8 s para probabilidades de no excedencia de 50 y 99.5%, respectivamente (Figura 4D).

Las diferencias entre las series de oleaje visual y del modelo NWWIII pueden ser explicadas en términos de (1)

la distribución espacial y temporal de los datos que las conforman, debido a que los datos ICOADS son tomados en un cuadrante entre las latitudes 1.0°N y 2.0°N y las longitudes 79.0°W y 82.0°W, mientras que los valores NWWIII se generaron en un punto de coordenadas 1.5°N y 80.0°W; (2) imprecisiones en la recolección de datos ICOADS derivadas de aspectos como entrenamiento y experiencia del observador, altura del punto de observación, altura de puntos de referencia, entre otros; (3) el sistema de almacenamiento de datos de altura visual ( $\Delta H_V = 0.5$  m) y periodo ( $\Delta T_V = 1.0$  s) utilizados por la base de datos ICOADS, y (4) los errores asociados al modelo de genera-



**Figura 4.** Ajuste a una función de distribución Gumbel de máximos de las series de oleaje en aguas profundas derivadas de ICOADS y NWWIII. (A) régimen de altura significativa – ICOADS; (B) régimen de altura significativa – NWWIII; (C) régimen de periodo pico – ICOADS; y (D) régimen de periodo pico – NWWIII.

ción de oleaje NWWIII, que se encuentran relacionados con el método de resolución de las ecuaciones, la imprecisión de los datos de entrada, y la resolución espacial y temporal del dominio de cálculo (e.g. **Copeiro**, 2000; **Wittmann**, 2001; **Díaz et al.**, 2002; **Tejada** 2002a; **Tolman**, 2002; **Agudelo**, 2003).

Considerando el contexto anterior, la utilización de datos de oleaje visual con las apropiadas funciones de transferencia es de gran utilidad para la caracterización del clima de oleaje cuando no existen registros instrumentales o datos de modelos numéricos y calibrados por medio de boyas escalares de oleaje ubicadas en el área de interés (**GIOC**, 2002a; **Agudelo**, 2003, **Stewart**, 2004). La serie de oleaje NWWIII analizada en este estudio tiene las siguientes

características: (1) ha sido calibrada por medio de una boya escalar de oleaje, (2) tiene una extensión de 21 años con parámetros de oleaje ( $H_s$ ,  $T_p$ ,  $D_p$ ) generados cada tres horas, y (3) presenta una menor variabilidad comparada con la serie de datos de oleaje visual ICOADS, por lo que se considera que su aplicación en la caracterización del clima del oleaje en el Pacífico sur de Colombia (delta del Río Mira) es más apropiada. Además, la resolución temporal de la serie de oleaje NWWIII permite aplicar un análisis espectral al oleaje en aguas profundas. El espectro proporciona la distribución de la energía de oleaje considerando diferentes frecuencias y longitudes de onda en la superficie, por lo que generalmente tres horas de un conjunto de datos de oleaje puede ser usado para computar un espectro de altura de ola (**Janssen**, 2004; **Stewart**, 2004).

## 4.2. Aproximación a la dinámica del oleaje en aguas someras

### 4.2.1. Mediciones *in situ* de parámetros de oleaje

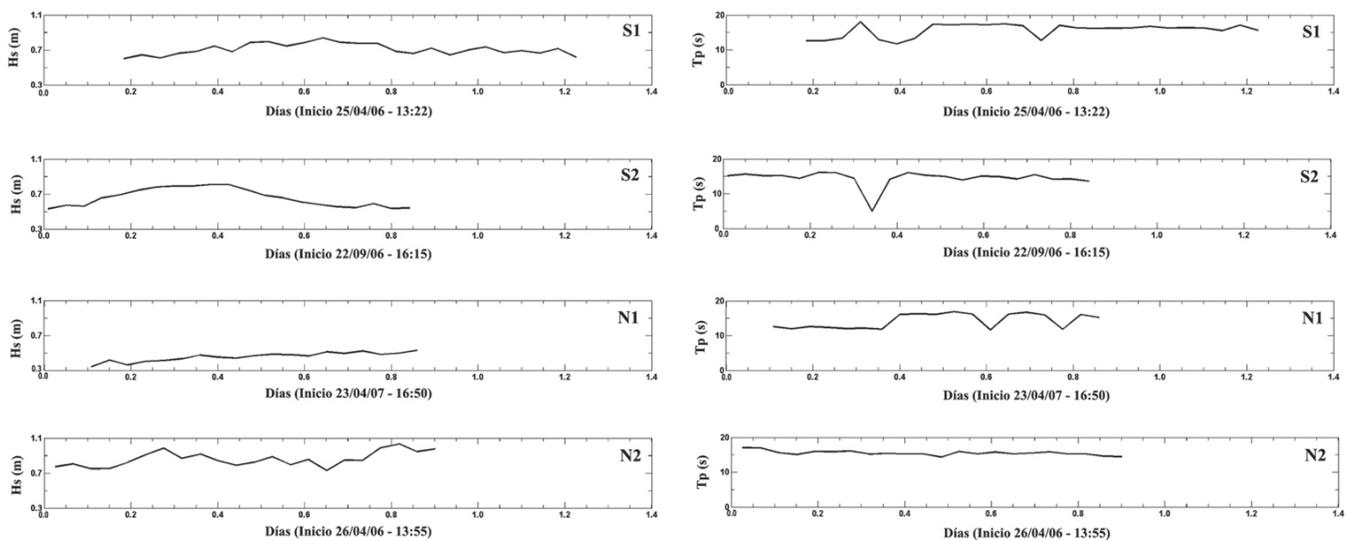
El análisis de los datos de oleaje registrados por medio del correntómetro AWAC ADCP (600 kHz) permitió obtener en cuatro estaciones ubicadas en el sistema deltaico del río Mira, la altura significativa y el periodo del oleaje en el pico del espectro superficial (Figura 5). En todas las estaciones de medición los resultados muestran valores relativamente homogéneos de altura significativa y periodo a lo largo del ciclo de muestreo. Se registraron alturas significativas que variaron entre ~0.3 y 1.1 m, encontrando que en promedio los valores más altos se presentan en la estación Norte 2 (N2) y los menores en la estación Norte 1 (N1) (Figura 5), en donde se registran profundidades de 5.2 y 11.9 m, respectivamente (Tabla 1).

La mayor variabilidad en los periodos pico registrados se presenta en la estación Sur 2 (S2), con un valor mínimo cercano a los ~5 s durante una de las etapas del ciclo de muestreo. Sin embargo, durante el resto del monitoreo los valores estuvieron cercanos a los 15 s (Figura 5). En las demás estaciones se observó una variabilidad relativamente baja durante todo el ciclo de muestreo, registrando valores mayores a 10 s y menores a 20 s en las estaciones Sur 1 (S1) y Norte 1 (N1), y superiores a 15 s e inferiores a 20 s en la estación Norte 2 (N2) (Figura 5). Los valores de periodo pico registrados por medio del correntómetro AWAC

ADCP son similares y consistentes con los valores simulados por medio del modelo numérico NWWIII y a su vez, presentan diferencias sustanciales con respecto a los periodos almacenados en la base de datos ICOADS (Tablas 2 y 3). La similitud entre los periodos pico simulados por el modelo NWWIII y los registrados por medio del correntómetro AWAC ADCP constituye una evidencia adicional para considerar que la aplicación de la serie de datos derivados de NWWIII es más apropiada para la caracterización del clima del oleaje en el Pacífico sur de Colombia (delta del Río Mira).

### 4.2.2. Propagación del oleaje en aguas someras

Estados de mar, derivados de la serie de oleaje NWWIII de aguas profundas, se propagaron hacia aguas someras para evaluar el efecto de los procesos de refracción-difracción, asomeramiento, disipación y rotura durante la aproximación del oleaje hacia el frente deltaico y caracterizar la dinámica del oleaje en el delta del río Mira. A partir de la información estadística obtenida de la serie original de datos de oleaje (Tabla 2 y 3) se establecieron casos representativos de propagación, definidos a partir de la dinámica del oleaje en aguas profundas (Figura 6). Para cada uno de los cuadrantes de arriba se realizó un análisis de distribución de frecuencias para la dirección dominante, altura significativa y periodo pico, seleccionando las combinaciones más representativas ( $D_p$ ,  $H_s$ ,  $F_p$ ) por medio de un análisis de probabilidad conjunta. En este caso se presenta el análisis de oleajes provenientes del SW (220°) y NW



**Figura 5.** Altura significativa ( $H_s$ ) y periodo pico ( $T_p$ ) calculados para intervalos de medición de una hora a partir de datos obtenidos por medio de un correntómetro AWAC ADCP (600 kHz.) en cuatro estaciones ubicadas en la plataforma deltaica del río Mira (Figura 1 y Tabla 1): Sur 1 (S1), Sur 2 (S2), Norte 1 (N1), y Norte 2 (N2).

**Tabla 3.** Resumen estadístico - estacional de dos series de oleaje (1979 – 2000) en aguas profundas para el sector Pacífico sur de Colombia. La primera se obtuvo de la base de datos mundial de oleaje visual - ICOADS y la segunda fue generada por medio del modelo de tercera generación Wave Watch III desarrollado por NOAA (NWWIII). Para la serie derivada de la base de datos ICOADS original (Woodruff et al., 1998; Díaz et al, 2002) y para la serie ajustada de la base de datos NWWIII (Graham y Díaz, 2001) se obtuvieron los valores mínimos, medios y máximos de dirección dominante ( $D_p$ ), altura significativa ( $H_s$ ), y periodo pico ( $T_p$ ), para cada una de las categorías establecidas.

	Dirección dominante $D_p$ (°)						Altura significativa $H_s$ (m)						Periodo pico $T_p$ (s)					
	ICOADS			NWWIII			ICOADS			NWWIII			ICOADS			NWWIII		
	Min	Moda	Max	Min	Moda	Max	Min	Prom	Max	Min	Prom	Max	Min	Prom	Max	Min	Prom	Max
Enero	10.0	195.0	360.0	189.0	302.0	307.0	0.84	1.36	9.39	0.29	0.89	2.13	2.47	8.06	16.5	6.0	13.8	23.0
Febrero	10.0	360.0	360.0	193.0	301.0	308.0	0.51	1.26	2.34	0.29	0.99	1.94	2.47	8.61	24.7	7.0	14.0	23.0
Marzo	10.0	360.0	360.0	197.0	215.0	307.0	0.54	1.20	2.90	0.49	0.96	2.23	2.47	8.26	18.8	10.0	14.0	22.0
Abril	10.0	213.7	360.0	197.0	215.0	306.0	0.84	1.22	2.61	0.39	0.90	1.55	2.47	8.67	36.4	7.0	13.9	21.0
Mayo	10.0	213.7	360.0	198.0	219.0	301.0	0.84	1.40	2.90	0.49	0.95	1.65	2.47	8.51	17.7	9.0	14.0	21.0
Junio	40.0	195.0	360.0	195.0	216.0	304.0	0.54	1.44	2.31	0.49	0.94	1.65	4.81	8.60	21.2	8.0	13.8	20.0
Julio	40.0	213.7	304.0	190.0	213.0	276.0	0.84	1.42	2.90	0.39	0.90	1.55	2.47	7.85	17.7	6.0	13.5	20.0
Agosto	10.0	195.0	282.0	198.0	210.0	297.0	0.54	1.43	2.61	0.49	0.94	1.55	3.64	8.28	17.7	5.0	13.6	22.0
Septiembre	20.0	213.7	326.0	192.0	213.0	303.0	0.84	1.46	3.20	0.49	0.87	1.65	3.64	8.56	29.4	6.0	13.5	22.0
Octubre	40.0	213.7	270.0	196.0	213.0	304.0	0.54	1.40	2.31	0.49	0.91	1.74	2.47	8.20	32.9	5.0	13.8	23.0
Noviembre	30.0	202.5	360.0	195.0	216.0	308.0	0.84	1.43	2.90	0.49	0.88	1.45	2.47	8.03	20.0	5.0	13.6	20.0
Diciembre	10.0	213.7	360.0	195.0	215.0	307.0	0.54	1.34	2.31	0.49	0.83	1.36	2.47	7.84	24.7	6.0	13.5	23.0

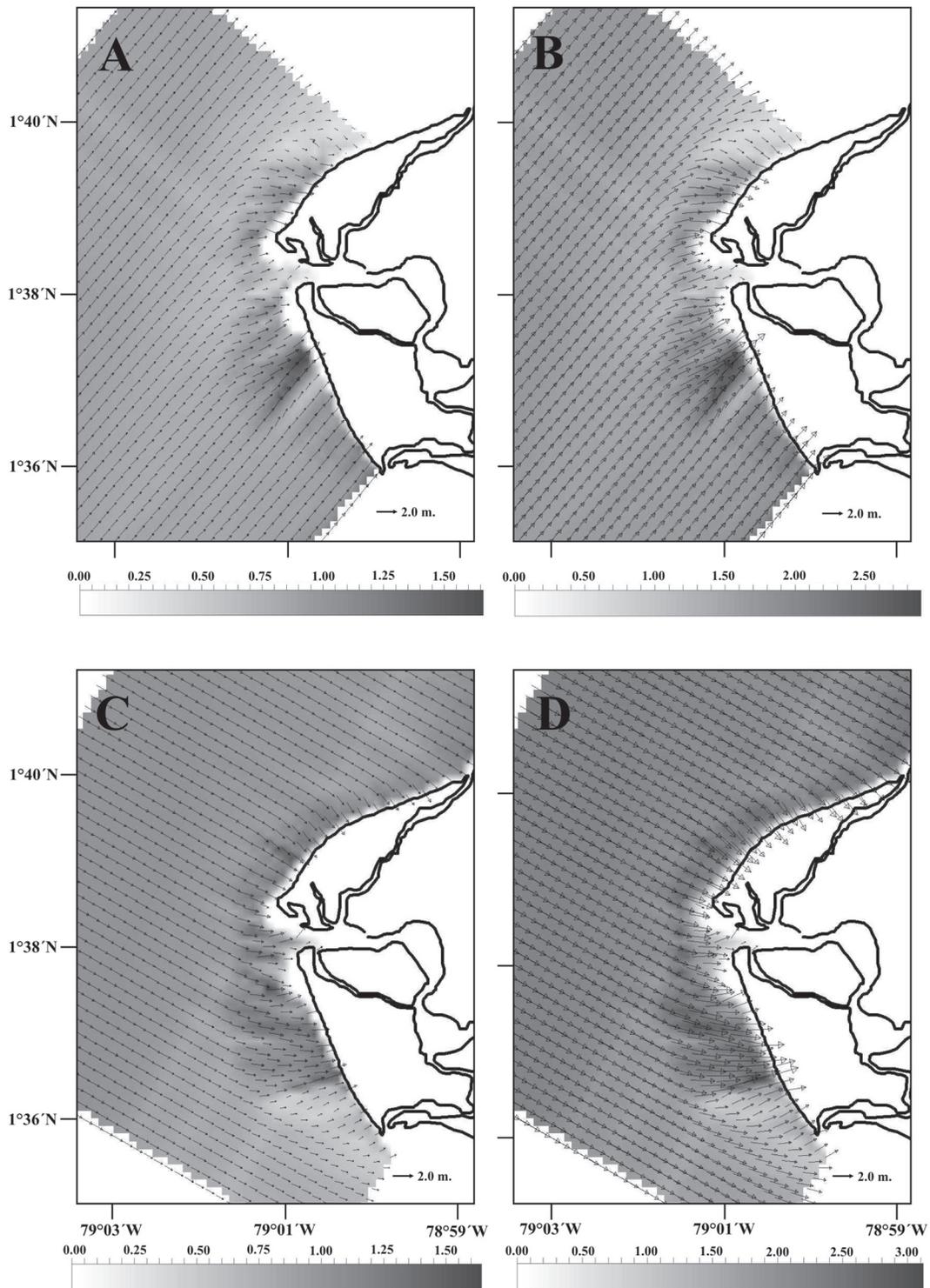
**Nota.** Min= mínimo; Prom= promedio; Max=máximo

(300°), debido a que constituyen las direcciones predominantes del oleaje incidente (Figura 3), y en gran medida, definen la dinámica estacional del oleaje en aguas profundas (Tabla 3). Considerando los periodos de la serie original de datos (Tabla 2), se calculó por medio de la ecuación (3) una profundidad de propagación de 300 m, teniendo como nivel de referencia una marea de 2.6 m, considerado como el rango mareal promedio para la desembocadura del río Mira (Restrepo y López, 2007).

Para cada uno de los casos de propagación de oleaje NWWIII se obtuvieron en el dominio de cálculo los vectores de propagación y las isolíneas de altura significativa ( $H_s$ ), lo que permite evaluar la interacción del oleaje con la batimetría en el frente deltaico, identificar zonas de concentración de energía de oleaje y estimar la altura del oleaje en profundidades definidas. De esta forma es posible establecer relaciones entre procesos oceanográficos y geomorfológicos, en una zona en donde se ha indicado que la presencia de olas de energía moderada, favorecidas por la poca interacción con una plataforma estrecha, constituye uno de los agentes primarios de erosión y redistribución de los sedimentos costeros (Correa, 1996).

La interacción del oleaje con el frente deltaico y la línea de costa está relacionada con las variaciones en los parámetros que definen un estado de mar (Figura 6). El tren de olas tiene mayor celeridad en los cañones debido a la profundidad, por lo que la cresta del oleaje comienza a deformarse a medida que se aproxima a la costa. Considerando que la energía del oleaje se propaga de manera perpendicular a la cresta de la ola, se presenta una concentración energética en las zonas en donde se origina la refracción, ocasionando diferencias significativas en la altura de la ola de una región a otra (zonas más oscuras en la Figura 6). Los rayos de oleaje tienden a ser ortogonales a las isóbatas a medida que disminuye la profundidad. Por lo tanto, en un bajo los rayos tienden a girar en dirección a las profundidades reducidas, generando un fenómeno de convergencia localizado que ocasiona aumentos considerables de la altura de ola en la zona del bajo, el efecto contrario se produce en los cañones submarinos (Janssen, 2004; Stewart, 2004).

Durante abril, cuando los vientos que provienen del SW son de intensidad moderada, el oleaje converge en las barras de desembocadura del río y en el sur del sistema de descarga fluvial, en donde debido a la refracción y al



**Figura 6.** Vectores de propagación y magnitud del oleaje ( $H_s$ ) en la plataforma deltaica del río Mira para diferentes estados de mar definidos a partir de la dirección predominante del oleaje, la altura significativa, el periodo pico y el nivel de marea de referencia ( $D_p$ ,  $H_s$ ,  $T_p$ ,  $h$ ): (A)  $D_p = 220^\circ$  (SW),  $H_s = 0.91$  m,  $T_p = 14$  s,  $h = 2.6$  m.; (B)  $D_p = 220^\circ$  (SW),  $H_s = 1.75$  m,  $T_p = 14$  s,  $h = 2.6$  m.; (C)  $D_p = 300^\circ$  (NW),  $H_s = 1.02$  m,  $T_p = 14$  s,  $h = 2.6$  m.; y (D)  $D_p = 300^\circ$  (NW),  $H_s = 2.23$  m,  $T_p = 14$  s,  $h = 2.6$  m.. La intensidad de la escala de colores es proporcional a la magnitud de la altura significativa (m).

asomeramiento el oleaje alcanza alturas hasta de 1.5 m (Figura 6A). En agosto, cuando los vientos procedentes del SW se intensifican en el sector del delta del río Mira, se observan alturas hasta de 2.5 m en los sectores donde se presenta mayor concentración de los rayos de oleaje incidente (Figura 6B). En estos sectores existe mayor susceptibilidad a los procesos de erosión y deriva litoral, ya que allí los procesos de refracción, asomeramiento y ascenso del oleaje son más intensos en comparación con otras zonas del delta (Figura 6A y 6B). Estas condiciones persisten durante la mayor parte del año, ya que entre marzo y diciembre el oleaje proviene del SW y SSW ( $210^\circ < D_p < 219^\circ$ ), mostrando sólo ligeras diferencias en la altura significativa y el periodo pico del oleaje incidente (Tabla 3).

Durante el periodo de mayor presencia de oleaje proveniente del NWW, que corresponde a los meses de enero y febrero, en el frente deltaico se observan alturas significativas similares a las estimadas para el resto del año ( $H < 2.0$  m.) (Figura 6C). Los procesos de refracción y asomeramiento tienen una intensidad y efecto equivalente a la que se presenta durante las demás temporadas del año (abril – diciembre). Sin embargo, en la barra ubicada al norte de la desembocadura del río Mira se intensifican estos procesos muy cerca de la línea de costa, ya que en este sector la batimetría es prácticamente paralela a la dirección de propagación NWW (Figura 6C).

Los oleajes más intensos provienen del NNW, con alturas significativas que pueden llegar hasta 2.23 m, y periodos que varían entre 7.0 y 23.0 s (Tabla 2 y Figura 3), por lo que durante esta temporada es común que se presenten los oleajes más energéticos para el delta del río Mira. Durante estas condiciones extremas el sistema deltaico experimenta una intensificación de los procesos de difracción-refracción y asomeramiento a lo largo de todo el sistema principal de descarga, encontrando alturas de oleaje en proximidad a la costa hasta de 3.0 m (Figura 6D). Los estados de mar con periodos mayores generan oleajes más energéticos por efecto del proceso de asomeramiento. El periodo del oleaje no cambia a medida que la onda se aproxima a la costa, pero se experimenta un incremento en la altura de ola debido a la reducción de su longitud de onda, causada por la interacción y la disipación con el fondo (Dean y Dalrymple, 1984; GIOC, 2002a; Janssen, 2004).

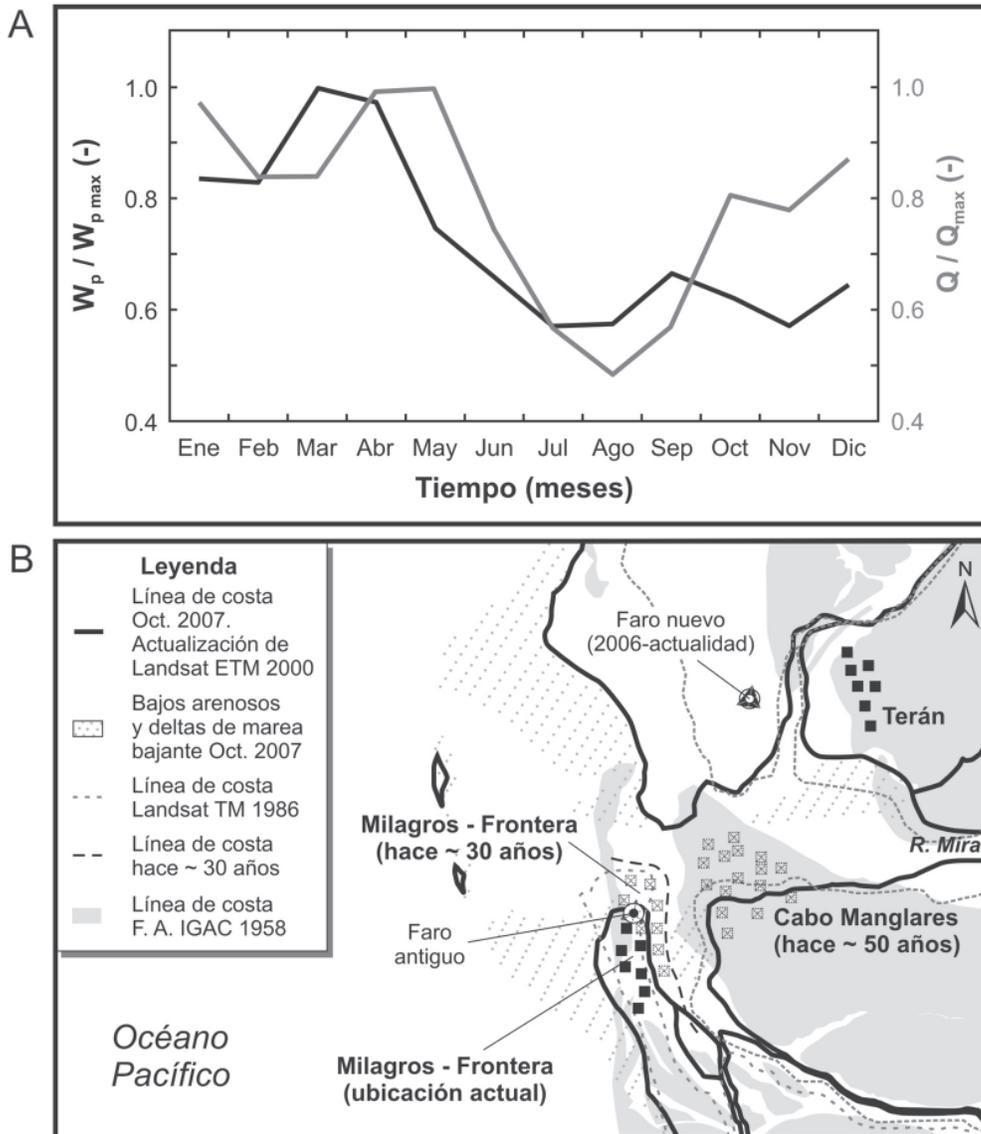
El oleaje ha sido señalado como uno de los factores significativos en la evolución reciente del delta del río Mira (Correa, 1986; Restrepo y López, 2007). A partir del análisis sistemático de índices marinos y fluviales obtenidos de la evaluación de parámetros oceanográficos, hidrológicos, morfométricos y climáticos en los principales deltas de Colombia, Restrepo y López (2007) señalan que de

acuerdo con la clasificación propuesta por Coleman (1981) la energía de oleaje es moderada en el delta del río Mira, aunque constituye la más alta entre los deltas del Pacífico colombiano. Además, indican que la relación de atenuación del oleaje, que representa el grado de reducción del poder del oleaje considerando la extensión y pendiente del perfil subacuoso del delta, que a su vez depende de la configuración del espacio disponible de acomodación y de la eficiencia del río en la descarga de sedimentos a la plataforma costera (Wright y Coleman, 1973), es la menor con respecto a los demás deltas del Pacífico colombiano (Restrepo y López, 2007). Asimismo, señalan que la configuración general de la morfología subaérea y subacuosa del delta del Mira puede ser interpretada a partir de la magnitud y la variabilidad estacional de los procesos fluviales y del oleaje (Wright y Coleman, 1973), observando que los picos máximos del poder del oleaje ocurren casi en fase con periodos de altas descargas fluviales (Figura 7) (Restrepo y López, 2007). En esas condiciones, el alto suministro de sedimentos al sistema se compensa con un mayor potencial para la erosión y el transporte litoral, que favorecen el desarrollo de una línea de costa regular y suave con presencia de cordones litorales y en menor proporción de flechas litorales y espigas. También existe otro pico de alta descarga durante estados de menor energía de las olas, que en el delta del río Mira favorece la progradación del sector de desembocadura principal (Figura 7) (Restrepo y López, 2007).

## 5. Conclusiones

Aun cuando los datos derivados de la base de datos ICOADS y los obtenidos mediante el modelo NWWIII muestran similitud en la dirección predominante del oleaje, presentan diferencias sustanciales en los valores de altura significativa y periodo pico. La aplicación de un análisis estadístico comparativo, la evaluación de las características de generación y almacenamiento de datos ICOADS y NWWIII, y la comparación con datos de periodo pico de oleaje registrados en el área de estudio indican que la utilización de la serie de oleaje NWWIII evaluada en este estudio es más apropiada para la caracterización del clima del oleaje en el Pacífico sur de Colombia (delta del Río Mira). Además, por sus características de resolución temporal permite aplicar un análisis espectral al oleaje en aguas profundas.

El clima de olas para el sector marino proximal y la plataforma costera del delta del río Mira, obtenido a partir del procesamiento de la serie NWWIII, se caracteriza por un oleaje en aguas profundas proveniente del SW y SSW, con alturas significativas que se encuentran entre 0.29 y 2.23 m,



**Figura 7.** (A) Relación entre el índice de estacionalidad fluvial ( $Q/Q_{\max}$ , línea gris) y poder de oleaje en costa ( $P_w/P_{w \max}$ , línea negra;  $P_w$  y  $P_{w \max}$  = valor medio y máximo de energía del oleaje, respectivamente;  $P_w = EC$ , en donde  $E$  = energía específica de las olas,  $C$  = celeridad) en el río Mira; la configuración general de la morfología subaérea y subacuosa del delta del Mira puede ser interpretada a partir de la magnitud y la variabilidad estacional de los procesos fluviales y del oleaje (adaptado de Restrepo y López, 2007); (B) evolución reciente del delta del río Mira (1958 – 2007), obtenida a partir del procesamiento de fotografías aéreas e imágenes de satélite.

y periodos que varían entre 5.0 y 23.0 s. También existe un componente significativo proveniente del noroeste-oeste (NWW), que generalmente se presenta entre los meses de enero y febrero, y se caracteriza por alturas significativas hasta de 2.23 m y periodos que varían entre 7.0 y 23.0 s.

Los registros de oleaje in-situ obtenidos por medio de un correntómetro AWAC ADCP en profundidades inter-

medias y someras (i.e. ~5 – 12 m) muestran valores relativamente homogéneos de altura y periodo en cada una de las estaciones, registrando alturas significativas del orden de 0.3 y 1.0 m y periodos pico superiores a 10 s. Finalmente, la implementación de un modelo numérico de propagación de oleaje (Oluca-SP) permitió evaluar el efecto de los procesos de refracción-difracción, asomeramiento, disipación y rotura durante la aproximación del oleaje hacia el

frente deltaico. Los casos de propagación evaluados indican que los procesos de refracción-difracción y asomamiento del oleaje ocasionan diferencias significativas en la altura de la ola de una región a otra, con aumentos considerables de la altura de ola en la zona del bajo que pueden alcanzar alturas hasta de 2.5 m durante el periodo comprendido entre abril y diciembre, y alturas superiores a 3.0 m cuando el oleaje incidente proviene del NNW, y presenta periodos pico del orden de 15 - 23.0 s. La implementación de modelos numéricos en áreas que no cuentan con registros instrumentales permanentes o de alta resolución constituye un elemento de gran importancia en el manejo integrado de zonas costeras, presentan gran utilidad para predecir el comportamiento de los sistemas costeros, conocer regionalmente los procesos dinámicos que operan en deltas y costas bajas y con base en los modelos numéricos, identificar el grado de vulnerabilidad ante amenazas naturales.

### Agradecimientos

Este estudio se ejecutó en el marco del proyecto “Modelos de Morfodinámica Litoral para definir Escenarios de Vulnerabilidad ante Amenazas Naturales: Bahía de Tumaco – Delta del Río Mira”, ejecutado por el Centro Control de Contaminación del Pacífico (DIMAR-CCCP) y la Universidad EAFIT, con el apoyo financiero de COLCIENCIAS (Código: 12160517616). Los autores expresan su agradecimiento a estas instituciones por su apoyo y contribución al desarrollo del proyecto, así como a los habitantes de la población de Milagros – Frontera (Nariño) por su apoyo y colaboración durante las campañas de campo.

### Bibliografía

- Agudelo, P.** 2003. Cota de inundación del litoral Pacífico colombiano. Tesis de maestría. Universidad de Cantabria, Santander (España).
- \_\_\_\_\_, **Restrepo A., Molares R., Tejada C., Torres R. & Osorio, A.** 2005. Determinación del clima de oleaje medio y extremal en el Caribe colombiano. *Boletín Científico CIOH*. **23**, 33-45.
- Battjes J.A. & Janssen J.** 1978. Energy loss and set-up due to breaking of random waves. *Proc. 16th Coastal Engineering Conf., ASCE*, 569-587.
- Bernal G.** 1996. Caracterización geomorfológica de la llanura deltaica del río Magdalena con énfasis en el sistema lagunar de la Ciénaga Grande de Santa Marta. *Boletín INVEMAR*. **25**, 19-48.
- Bird E.C.F.** 2000. *Coastal geomorphology: an introduction*. Wiley, Chichester.
- Bretschneider C.L.**, 1954. Field investigations of wave energy loss in shallow water ocean waves: U.S Army Corps Engineers Beach Erosion Board Tech. Memo, no. **46**, 1-21.
- \_\_\_\_\_, **Reid R.O.** 1954. Modification of wave height due to bottom friction, percolation and refraction. U.S Army Corps Engineers Beach Erosion Board Tech. Memo, no. **45**, 36 p.
- Bouws E., Gunther H. & Vincent C.L.** 1985. Similarity of Wind Wave Spectrum in Finite-Depth Water, Part I: Spectral Form. *Journal of Geophysical Research*. **85**, 1524 – 1530.
- CCCP.** 2003. Aportes al entendimiento de la bahía de Tumaco. Centro Control de Contaminación del Pacífico. Dirección General Marítima. Bogotá. 175 p.
- Coleman J.M.** 1981. *Deltas: processes of deposition and models for exploration*. Burgess Publishing Company, Minneapolis. 102 pp.
- Correa I. D.** 1996. *Le littoral Pacifique colombien: Interdependance des agents morphostructuraux et hydrodynamiques*. Ph. D. These – Geologie Marine. Université Bordeaux I, 178 p.
- \_\_\_\_\_, **González J.L.** 1998. Geomorfología general y sedimentología de la bahía de Tumaco. Memoria VI Seminario Nacional Ciencia y Tecnología del Mar en Colombia. C.C.O – Universidad Jorge Tadeo Lózano. Bogotá, 233 – 239.
- Dean R.G., Dalrymple R.A.** 1984. *Water wave mechanics for engineers and scientist*. Englewood Cliffs: Prentice – Hall.
- Díaz H., Folland C., Manabe T., Parker D., Reynolds R. & Woodruff S.** 2002. Workshop on advances in the use of historical marine climate data. *WMO Bulletin*. **51**, 377-380.
- GIOC (Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas).** 2004. Determinación de los regímenes de oleaje en la costa Pacífica costarricense. Reporte Técnico elaborado para el Instituto Costarricense de Turismo. 119 p.
- GIOC.** 2002a. Documento de referencia – Dinámicas. Ministerio de Medio Ambiente y Universidad de Cantabria. Santander. 187 p.
- \_\_\_\_\_, 2002b. Modelo de Propagación de Oleaje OLUCA SP – Manual de referencia. Universidad de Cantabria. 159 p.
- González J.L., Marín L.C., Martínez J.O. & Carvajal J.H.** 1992. Problemas geológicos asociados a la línea de costa del Pacífico colombiano: geomorfología y aspectos erosivos. Informe Interno Ingeominas. Calí, 51p.
- \_\_\_\_\_, 1998. Geomorfología y aspectos erosivos del litoral Pacífico colombiano. Publicación especial del INGEMINAS, Bogotá, Colombia, pp. 75-111.
- Gordon, L. & Lohrmann, A.** 2001. Near-Shore Doppler Current Meter Wave Spectra. *ASCE Wave 2001 Proceedings*. 19 p.
- Graham N.E. & Díaz H.F.** 2001. Evidence for Intensification of North Pacific Winter Cyclones since 1948. *Bulletin of Meteorological Society*. **82**, 1869 – 1893.
- Janssen P.** 2004. *The Interaction of Ocean Waves and Wind. Dynamics and Modelling of Ocean Waves*. WAM Group. 385 p.
- Javelaud,** 1986. Sedimentología de la plataforma continental del Caribe colombiano. *Boletín Científico CIOH*. **6**, 17-39.
- Kirby J.T. & Özkan H.T.** 1994. Combined refraction/diffraction model for spectral wave conditions. Ref/Dif s version 1.1. Documentation and User's Manual. Report No. CACR-94-04. Center for Applied Coastal Research, University of Delaware.

- , **Dalrymple R.A.** 1986a. Modelling waves in surfzones and around Islands. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*. **112**, 78-93.
- , **Dalrymple R.A.** 1986b. An approximate model for nonlinear dispersion in monochromatic wave propagation models. *Coastal Engineering*, **9**, 545-561.
- Komar P.** 1998. Beach processes and sedimentation. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, 2nd edn.
- Lonin S., Lonina I. & Tuchkovenko Y.S.** 1996. Utilización del modelo NedWAM para el cálculo y pronóstico del oleaje en el mar Caribe. *Boletín Científico CIOH*. **17**, 37-45.
- López G., Salazar O. & Tabarez N.** 1993. Geomorfología y sedimentología de la playa el Choncho, delta del río San Juan, litoral Pacífico colombiano. Tesis de grado, Departamento de Geología, Universidad Eafit. Medellín, 350 p.
- Martínez, J. O.; González J. L.; Pilkey O. H. & Neal W. J.** 1995. Tropical Barrier Islands of Colombia's Pacific Coast. *Journal of Coastal Research* **11**, 432-453.
- Martínez, M. & Molina.** 1992. Geomorfología y aspectos erosivos del litoral Caribe colombiano, sector Bocas de Ceniza – Parque Tayrona. Reporte técnico INGEOMINAS. 80 p.
- Meidenger, P.** 1991. Nature et origine des depots sedimentaires sur une plate-forme de marge active: la bordure pacifique des Andes Colombiennes dans les regions du Narino et du Cauca. Université de Bordeaux I. These pour l'obtention du titre du docteur.
- Molina, A.** 1993. Estudio sedimentológico y morfológico de la plataforma continental Caribe entre el sector de Santa Marta y Punta Morro Hermoso. *Boletín Científico CIOH*. **14**, 67-77.
- , **Molina, C., Giraldo L. & Barrera R.** 1999. Características estratigráficas y morfodinámicas de la franja litoral Caribe colombiana (sector Barranquilla: bocas de ceniza – flecha de Galerazamba). *Boletín INVEMAR*. **28**, 61-94.
- , **Molina, C., Giraldo L., Parra C. & Chevillot P.** 1994. Dinámica marina y sus efectos sobre la geomorfología del golfo de Morrosquillo. *Boletín Científico CIOH*. **15**, 93-113.
- Nortek.** 2004. AWAC Acoustic Wave and Current Meter User Guide. Doc. No: N3000-126. Norway. 88 p.
- Otero, L.** 2005. Metodología para la determinación de la línea de más alta marea en zonas donde no se cuentan con registros instrumentales. Dirección General Marítima. Reporte Técnico. 59 p.
- Pujos, M. & Javelaud O.** 1991. Depositional facies of a mud shelf between the Sinú river and the Darien gulf (Caribbean coast of Colombia): environmental factors that control its sedimentation and origin of deposits. *Continental Shelf Research*. **11** (7), 601-623.
- Restrepo, J.D., López, S.** 2007. Morphodynamics of the Pacific and Caribbean Deltas of Colombia, South America. *Journal of South American Earth Sciences*.
- , **Kjerfve B. Correa I. D. & González J.** 2002. Morphodynamics of a high discharge tropical delta, San Juan river, Pacific coast of Colombia. *Marine Geology*, **192**, 355-381.
- Serrano, B.** 2004. The Sinú river delta on the northwestern Caribbean coast of Colombia: bay infilling associated with delta development. *Journal of South American Earth Sciences*. **16**, 639-647.
- Stewart, R.H.** 2004. Introduction to Physical Oceanography. Department of Oceanography, Texas A&M University. 352 p.
- Tejada, C.** 2002a. Desarrollo de un modelo informático para el manejo de datos de oleaje visual para las aguas jurisdiccionales colombianas. *Boletín Científico CCCP*. **9**, 59-66.
- , 2002b. Clima marítimo de la bahía de Tumaco: un caso de aplicación del sistema de modelado integral de zonas costeras para Colombia. Tesis de Maestría en Ciencias Tecnológicas para la Gestión de la Costa. Universidad de Cantabria. España. 44p.
- Thornton E.B. & Guza R.T.** 1983. Transformation of wave height distribution. *Journal of Geophysical Research*. **88**, 5925-5938.
- Toro V.** 2006. Procesos hidrodinámicos litorales en la zona sur de la bahía de San Andrés de Tumaco. Tesis de Maestría. Postgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. 115 p.
- Tolman H.L.** 1992. Effects on numerics on a physics of a third-generation wind-wave model. *J. Phys. Oceanogr.* **22**, 1095-1111.
- , 2002a. Validation of WAVEWATCH III version 1.15 for a global domain. National Oceanic and Atmospheric Administration, Environmental Modeling Center – Ocean Modeling Branch. Technical Note. 33 p.
- , 2002b. Distributed-memory concepts in the wave model WAVEWATCH III. *Parallel Computing*. **28**, 35-52.
- , **Chalikov D.** 1994. Source terms in a third-generation wind-wave model. *J. Phys. Oceanogr.* **26**, 2497-2518.
- USGS (United States Geological Survey).** 2002. Shore and Beach Manual. Water Wave Mechanics. Chapter 2: Meteorology and Wave Climate. 77 p.
- Winyu R., Tomoya S.** 1998. Energy dissipation model for regular andirregular breaking waves. *Coastal Eng. Journal*, Vol. 40, n° 4, 327-346.
- Wittmann, P.** 2001. Implementation of WAVEWATCH III at Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center. Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center - Technical Report. 6 p.
- Woodruff S.D., Diaz H., Elms J. & Worley S.** 1998. ICOADS release 2. Data and Metadata Enhancements for Improvements of Marine Surface Flux Fields. *Phys. Chem. Earth*. **23**, 517-527.
- Wright, L.D. & Coleman, J.M.** 1973. Variations in morphology of major river deltas as functions of ocean wave and river discharge regimes. *Am. Assoc. Petroleum Geologist Bull.* **57**(2), 370-398.

Recibido: diciembre 19 de 2008.

Aceptado para su publicación: septiembre 7 de 2009.

