



ARTÍCULO

## Evaluación de la actividad ciclónica y el impacto del oleaje en la Isla de San Andrés desde 1851 hasta 2010

Fecha de recepción: 2011-07-29 / Fecha de aceptación: 2011-09-15

**José Manuel PLAZAS MORENO**, [jplazas@cioh.org.co](mailto:jplazas@cioh.org.co)

Área de Oceanografía Operacional, Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas – C I O H. Barrio Bosque, Sector Manzaniello, Escuela Naval, Cartagena, Colombia.

**Juan Carlos ORTIZ ROYERO**, [jortiz@uninorte.edu.co](mailto:jortiz@uninorte.edu.co)

Instituto de Estudios Hidráulicos y Ambientales (IDEHA). Universidad del Norte. Grupo de Física Aplicada. Universidad del Norte.

**Omar G. LIZANO R.**, [omar.lizano@ucr.ac.cr](mailto:omar.lizano@ucr.ac.cr)

Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología (CIMAR), Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI), Departamento de Física Atmosférica, Oceánica y Planetaria (DFAOP), Escuela de Física, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

### RESUMEN

Con el fin de evaluar la actividad ciclónica y el impacto del oleaje en la isla de San Andrés, hasta donde los datos disponibles y registros históricos lo permitieron, se realizó la identificación de las trayectorias de tormentas y huracanes que desde 1851 se han acercado a la isla de San Andrés, a una distancia menor de 90 millas entre la pared de la tormenta y la costa insular. Partiendo de esta información, se modelaron los campos de vientos y espectros de oleaje de los huracanes identificados y seleccionados como típicos, mediante el uso del modelo paramétrico de vientos de Lizano y el Modelo de Oleaje SWAN (Simulate Waves Nearshore).

Finalmente, se evaluaron y discutieron los resultados del oleaje producto de la modelación de huracanes, desde la escala regional a la local, diferenciando el impacto del mismo al norte y al sur de la isla. Este estudio permitió identificar las zonas más propensas a sufrir el efecto del oleaje de temporal.

**Palabras claves:** Actividad ciclónica, impacto del oleaje, Isla de San Andrés.

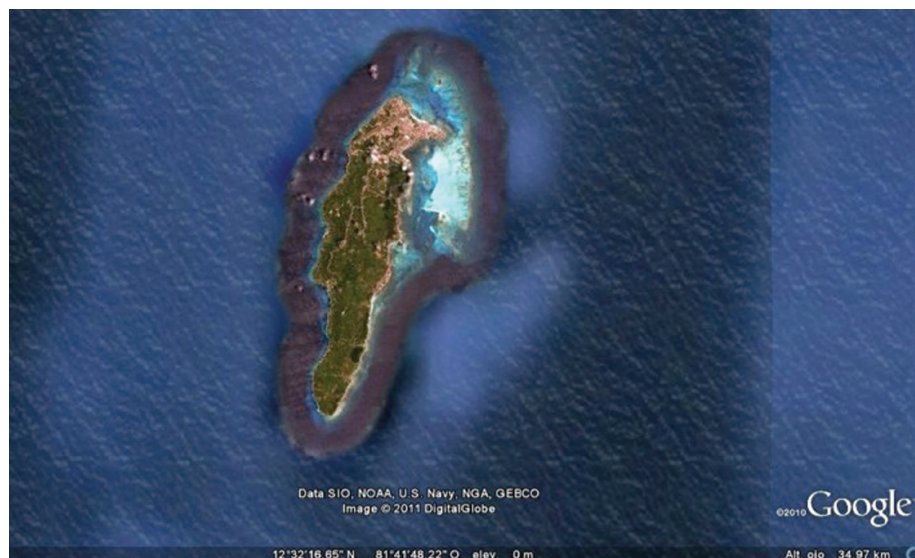
### ABSTRACT

With the object of evaluating the cyclonic activity and the wave impact on the Island of San Andres, as far back as the available information and historic record allow it, a study of the identification of the paths of the tropical storms and hurricanes since 1851 that have come close to the Island of San Andres, at a distance of less than 90 miles from the wall of the storm to the insular coastline. Starting with this information, a model was made of the wind fields and wave ranges of the hurricanes that were identified and selected as typical, using the parametric wind model of Lizano and the Simulate Waves Nearshore model (SWAM).

Finally, the results of the waves produced by the hurricane model that went from a regional to a local scale, and also differentiating their impact in the north as well as in the southern part of the

island, were assessed and discussed. This study allowed the identification of the areas more prone to suffer the effects of the waves produced by these cyclones.

**Key words:** Cyclonic activity, wave impact, San Andres Island.



**Figura 1.** Imagen satelital de la isla de San Andrés. Tomado de Google Earth 2010®.

## INTRODUCCIÓN

Teniendo en cuenta los destrozos e inundaciones causados por los eventos ciclónicos en el Caribe, y dado que el Caribe centroamericano es frecuentemente impactado por huracanes [1], [2], se justificó la evaluación del impacto del oleaje de huracán en la Isla de San Andrés, con miras a establecer zonas de mayor amenaza de sufrir sus efectos.

La Isla de San Andrés, ubicada en el Mar Caribe, hace parte del departamento Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, localizada entre los 12° 28' 58" y 12° 35' 55" de latitud norte y los 81° 29' 47" y 81° 44' 19" de longitud oeste. De formación geomorfológica coralina, presenta principalmente dos tipos de modelados acentuados; un sector montañoso interior, y una planicie litoral que está conformada por la plataforma emergida. La plataforma submarina, al occidente, comienza en la misma costa; al norte y este de la isla se amplía hasta los arrecifes coralinos que la bordean.

San Andrés cubre un área de 53 km<sup>2</sup>, de los cuales el 17% sería inundado por un ascenso proyectado de un metro del nivel del mar. Las zonas más afectadas por la inundación representan la mayor parte de la riqueza natural de la isla, y es el sector donde se asienta la infraestructura turística y comercial. La alta vulnerabilidad de estas zonas es debida a la presencia de rellenos habilitados entre 1950 y 1960 [3].

## DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

### DESCRIPCIÓN GEOMORFOLÓGICA

La Zona del Caribe Insular la conforma el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina; conformado por tres islas mayores y un grupo de islas menores, atolones y bancos coralinos. Por su extensión de 300.000 km<sup>2</sup> aproximadamente, ocupa alrededor del 10% del área total del Caribe colombiano. Allí se encuentra, además, la segunda barrera arrecifal más extensa del mar Caribe; uno de los sistemas marino-costeros más productivos del océano Atlántico y del país, como se ilustra en la figura 1.

## CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

El clima que se presenta en la región del archipiélago está influenciado por la corriente marina cálida ecuatorial del Atlántico, que tiene curso general circular y se dirige al litoral de Yucatán, pasando al norte de la Península de la Guajira, para prolongarse al Golfo de México y confluir a la corriente del Golfo [4]. Es un clima isomegatérmico (tipo A), caracterizando así su evapotranspiración potencial o eficacia térmica (ETP) mayor a 1140. Esta es debida a que la estación de meses secos se inicia al final del invierno del Hemisferio Norte (sub-tipo W), que corresponde al llamado "Savana Umar" y que es predominante en Jamaica, La Española, parte de Cuba y la Costa Caribe de Colombia y Venezuela, excepto la Guajira y otros lugares específicos. Existen dos épocas de mal tiempo, una de septiembre a noviembre, caracterizada por fuertes vientos, tormentas eléctricas y acompañada por la presencia de huracanes. La otra, de marzo a junio, con lluvias y vientos fuertes. El promedio anual de temperatura es de 27.5° C. Los promedios anuales no tienen diferencias mayores a 2.0° C. El mes de menor temperatura es enero, con 26.5° C, y el de mayor es agosto, con 29.2° C [5].

## VIENTOS

El promedio anual de los vientos es de 5.6 m/s. Los promedios mensuales no tienen diferencias mayores de 2.3 m/s. El mes de menor velocidad del viento es octubre (3.8 m/s), y el de mayor (7.1 m/s) es diciembre; sin embargo, la frecuencia porcentual de los vientos provenientes del oeste es un 68.0%; del noroeste 17.5% y del norte y del suroeste en 3.5%. La dirección de los vientos varía durante el año desde la posición noroeste hasta el sur abarcando los cuadrantes noroeste y suroeste.

Durante los meses de noviembre, diciembre y enero los vientos provenientes del norte y del noroeste son comunes [4].

Los costados norte y oeste de la Isla de San Andrés están permanentemente expuestos a los vientos; en algunos meses del año como enero y febrero se alcanzan velocidades de 18,5 m/s, que al tener más duración podrían dar origen a mares bastante desarrollados. San Andrés se ha visto afectada por los mismos huracanes que han azotado a Providencia, aunque en menor intensidad [5].

## OLEAJE

En las áreas de la isla principal del archipiélago, protegidas naturalmente de las olas y corrientes oceánicas o del efecto de los vientos (fetch), se observan olas de corta longitud y de poca altura; las olas que se aproximan a la isla revientan en los arrecifes situados frente a su costa.

El litoral noroeste de la isla está naturalmente protegido por una barrera coralina conocida como *The Bar*, distante unos dos Km. de la costa. Este arrecife crea un frente de rompimiento de las olas, dejando pasar las de menor amplitud que disminuyen aún más su energía al encontrarse con un extenso y somero banco de arenas, algunos cayos y parches arrecifales y una barrera arrecifal interior llamada *Little Reef*.

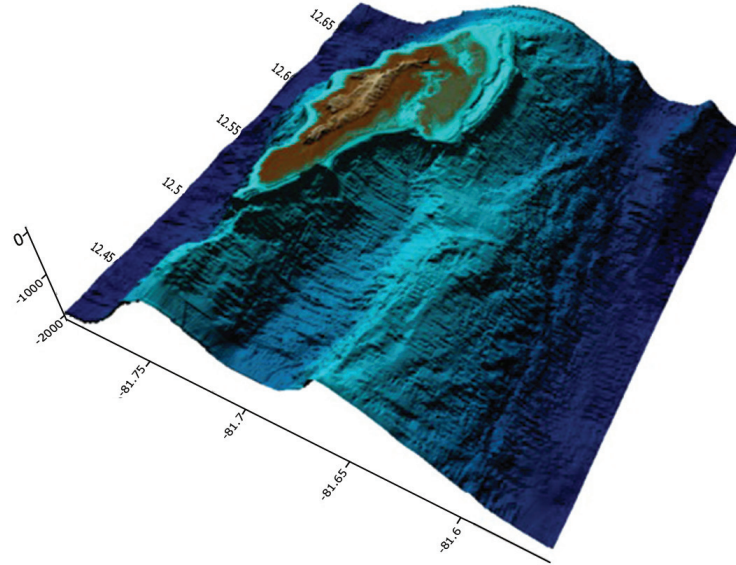
Dentro de estos dos kms. que separan la playa de la barrera arrecifal, se observan olas de corta longitud (1.20 m a 5.0 m), de poca altura (0.3 a 0.60 m), y altas frecuencias (hasta de 17 olas/min). Cuando hay vientos bastante fuertes se incrementa la altura de las olas hasta 1.0 m y se disminuye la frecuencia hasta 7 olas/min, pero se conserva su período.

Para resaltar el efecto de la acción combinada de los diversos factores, se puede indicar que en Cocoplum Bay la altura promedio de las olas varía entre 0.10 m y 0.20 m, llegando en forma casi perpendicular a la playa.

En el área de Bahía Hooker el oleaje es mínimo, siendo importante únicamente en sus porciones exteriores y media. La altura de las olas puede oscilar entre 0.10 m y 0.50 m dependiendo de la velocidad del viento. A causa de la refracción que se presenta en el área, la energía de las olas se concentra en la parte oriental del canal. En el interior de la Bahía se puede decir que no se presentan olas, o que éstas son mínimas, aún en condiciones adversas.

El fondo marino está compuesta de arenas finas y de sedimentos de textura más gruesa de origen bioclástico (escombros de coral, moluscos, equinodermos, etc.) Tienden a distribuirse en las zonas más expuestas al oleaje y en los alrededores de las formaciones de coral.

La aproximación a la Isla de San Andrés se puede efectuar por cualquiera de los puntos car-



**Figura 2.** Mapa batimétrico y topográfico de la Isla de San Andrés.

dinales. Los buques que van a atracar en el Muelle Departamental, deben recalar por el este de la isla buscando la boya de mar localizada en latitud  $12^{\circ} 32' 21''$  norte y longitud  $81^{\circ} 41' 28''$  oeste, sitio de embarque del piloto práctico, y punto de referencia que indica el inicio del canal de acceso a dicho muelle.

La batimetría irregular y la escasa profundidad limitan el paso de embarcaciones con calados superiores a 12 pies (figura 2) [5].

## METODOLOGÍA

De la información divulgada por el Centro Nacional de Huracanes (NHC) de los Estados Unidos se descargaron las trayectorias de la actividad ciclónica desde 1851 hasta la fecha [6], seleccionándose todos aquellos cuya pared del huracán se acercó a menos de 90 MN (millas náuticas, equivalentes a 167 km) aproximadamente de la costa insular de San Andrés. Se generaron los campos de viento para cada advertencia registrada en el paso de cada huracán con el modelo paramétrico de vientos de Lizano [7]. Este modelo utiliza la ecuación para el viento máximo [8].

$$V_{\max} = 0.085 \left[ \left( P_n - P_o \right)^{\frac{1}{2}} - f R_{\max} \right] + 0.5 V_F \quad (1)$$

Donde  $P_o$  es la presión central,  $P_n$  es la presión ambiente,  $f$  es el parámetro de Coriolis,  $R_{\max}$  es el radio de viento máximo y  $V_F$  es la velocidad de avance del huracán.

La distribución espacial del viento  $V(r)$  es calculada usando la siguiente parametrización [8]:

$$V(r) = V_{\max} \left( \frac{2R_{\max} r}{R_{\max}^2 + r^2} \right), \quad r < R_{\max} \quad (2)$$

$$V(r) = \left( \frac{V_{\max}}{C_1 r^k} \right) * \text{Log} \left( \frac{R}{C_2 r^m} \right), \quad r > R_{\max} \quad (3)$$

De acuerdo a Willoughby [8], se calculó el radio máximo del viento (RMV) mediante la ecuación del radio máximo de vientos en función de la latitud.

$$R_{\max} = 46.29 \exp(-0.0153V_{\max} + 0.0166\phi) \quad (4)$$

Donde  $\phi$  es latitud de la posición del ojo del huracán en radianes.

El modelo espectral de oleaje SWAN (Simulating WAVes Nearshore), es un modelo de tercera generación [10], ampliamente utilizado por la comunidad científica mundial. Este modelo propaga el oleaje debido al viento, el cual, basado en la ecuación de balance de la acción, calcula el espectro de oleaje y diferentes variables en zonas costeras. Su aplicación en escalas oceánicas ha sido utilizada en Ortiz y Mercado [11]. Los campos de vientos de calcularon a una resolución espacial de 1/6 de grado y cada 6 horas de acuerdo a la información de HURDAT.

Se realizaron en total 24 corridas del modelo SWAN (Versión 40.72), de las cuales seis se usaron para simular las condiciones de oleaje en la malla principal que se propagarían luego a la malla intermedia. En ambas corridas se utilizaron los campos de vientos modelados. De la malla intermedia se calcularon las salidas necesarias

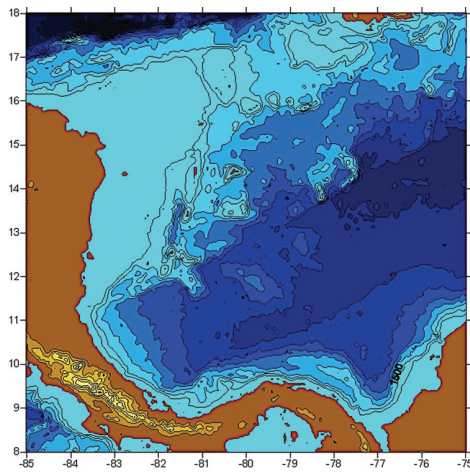
para introducir las condiciones de contorno o de frontera de las dos mallas locales. En las mallas locales se descartó el uso de condiciones de viento cambiantes por la resolución de la malla, y el tiempo de las salidas se redujo ostensiblemente, el cual pasó de seis horas en el dominio principal e intermedio, a 30 minutos en las dos mallas locales anidadas del sur y norte de la Isla de San Andrés.

Se generaron cuatro dominios a ser modelados, un dominio principal de escala sinóptica que caracterizó la geomorfología submarina, uno intermedio anidado que caracterizó la geomorfología marina de la plataforma insular de San Andrés y dos locales anidados dentro del dominio intermedio que caracterizaron los cambios en el fondo marino tanto al norte como al sur de la isla de San Andrés para la propagación del oleaje.

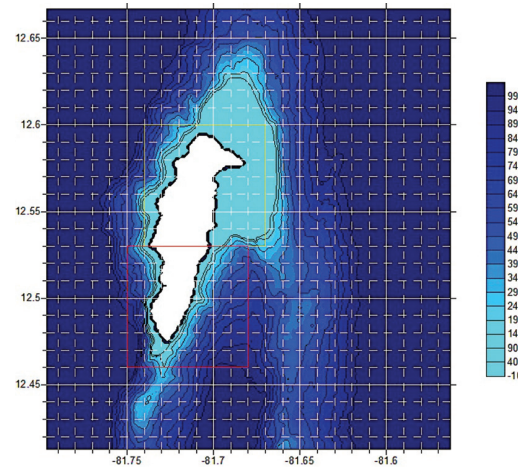
Los dominios intermedios y locales fueron elaborados con datos de los levantamientos hidrográficos de alta resolución realizados en la isla de

**Tabla 1.** Características de las mallas principal, intermedia y local norte y sur.

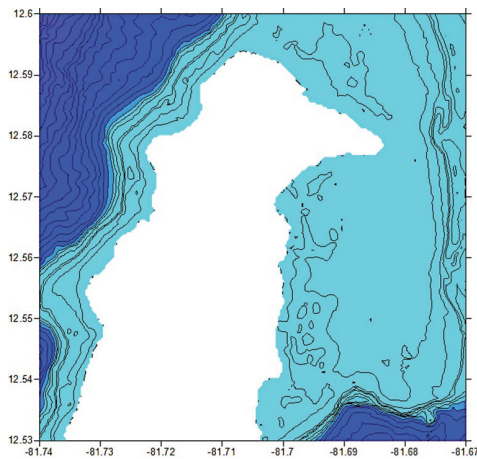
Malla	Valor min. en grados	Valor max. en grados	Max. – Min. grados	No. de nodos	Celda en décimas de grado	Celda en metros
Principal (Lon.)	-85.0000	-75.0000	10.0000	200	0.050000	5556.0000
Principal (Lat.)	8.0000	18.0000	10.0000	200	0.050000	5556.0000
Intermedia (Lon.)	-81.7960	-81.5630	0.2331	200	0.001165	129.5200
Intermedia (Lat.)	12.4125	12.6660	0.2532	200	0.001267	140.8050
Local norte (Lon.)	-81.7400	81.6700	0.0700	194	0.000359	40.0000
Local norte (Lat.)	12.5300	12.6000	0.0700	194	0.000359	40.0000
Local sur (Lon.)	-81.7500	-81.6800	0.0700	194	0.000359	40.0000
Local sur (Lat.)	12.4600	12.5300	0.0700	194	0.000359	40.0000



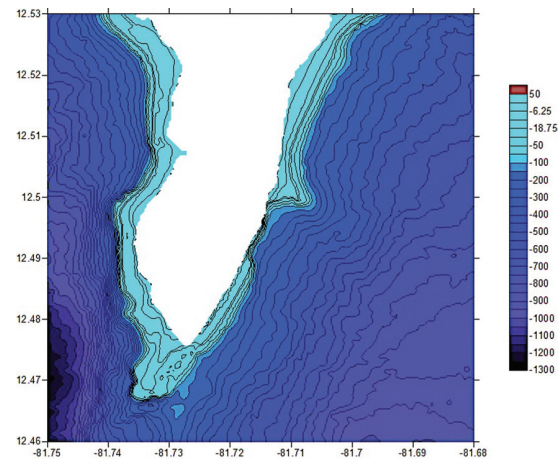
**Figura 3.** Malla principal 200 x 200.



**Figura 4.** Malla intermedia 200 x 200.



**Figura 5.** Malla local norte 194 x 194.



**Figura 6.** Malla local sur 194 x 194.

San Andrés con tecnología multihaz, elaborados por DIMAR [12]. Las mallas locales del Norte y Sur de la isla tienen 40 m de resolución.

La simulación local del impacto de oleaje requerirá los mejores datos batimétricos. En este caso la fuente fue inmejorable gracias a los levantamientos batimétricos recientes de alta resolución efectuados por el CIOH [12]. En la tabla 1 se presentan las coordenadas y tamaño de la celda de las mallas principal, intermedia y de escala local para el norte y sur de la Isla de San Andrés.

Para la malla principal (figura 3) se realizó la interpolación de grillas con los datos batimétricos

tomando las fuentes disponibles. En el dominio principal que se muestra en la diapositiva se utilizaron datos batimétricos de Etopo2 y datos batimétricos de las campañas multihaz de la DIMAR [12] interpoladas para generar un modelo digital de 200 por 200 de 5500 m de resolución.

Con los datos procedentes de los levantamientos batimétricos de alta resolución efectuados durante las campañas del proyecto de generación de cartografía, náutica y terrestre del 2005 correspondientes a la Carta 201 y 200 de la Isla de San Andrés se construyeron el dominio intermedio (figura 4) y local del norte de la Isla (figura 5) y del sur de la isla (figura 6) mediante la interpolación de datos batimétricos.

**Tabla 2.** Procesos físicos activados en el modelo SWAN.

<b>Procesos</b>	<b>Autor</b>
Crecimiento exponencial debido a viento	Janssen (1989, 1991)
Rompimiento en aguas profundas (Whitecapping)	Alkyon (2002)
Interacciones entre cuatro olas (Quadruplets)	Hasselmann et al. (1985)
Interacciones entre tres olas (Triads)	Eldeberky (1996)
Depth-induced breaking	Battjes and Janssen (1978)
Fricción del fondo	Jonswap (1973)

En este trabajo se realizaron simulaciones del modelo SWAN para representar las condiciones de oleaje en la malla principal que se propagaron a la malla intermedia. En las dos simulaciones se alimentaron las condiciones de viento, simulando el fetch con los campos de vientos modelados para los seis huracanes seleccionados. De la malla intermedia se calcularon las condiciones de contorno para las dos mallas locales. En las mallas locales se descartó el uso de las condiciones de viento teniendo en cuenta que el efecto del oleaje evaluado es debido al fetch. Para las anidaciones locales se aumentó la resolución de la malla y se disminuyeron los intervalos de tiempo de las salidas ostensiblemente, el cual paso de 6 horas en el dominio principal e intermedio a 30 minutos en las dos mallas locales anidadas del sur y norte de la Isla de San Andrés.

Para el desarrollo del mismo, SWAN estima por defecto unas condiciones físicas del medio a modelar, las cuales fueron ajustadas a la realidad del medio, teniendo en cuenta la formación de un campo de oleaje producto de un campo de vientos direccionalmente cambiante de manera permanente.

## VALIDACIÓN

Desafortunadamente, no hay registros experimentales de boyas oceanográficas para las fechas en que se simularon los eventos en los dominios locales anidados. Sin embargo, en trabajos como Lizano [8], ya se ha verificado y validado el uso del modelo paramétrico de vientos como forzador para el modelo SWAN. Como lo muestra la figura 7.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

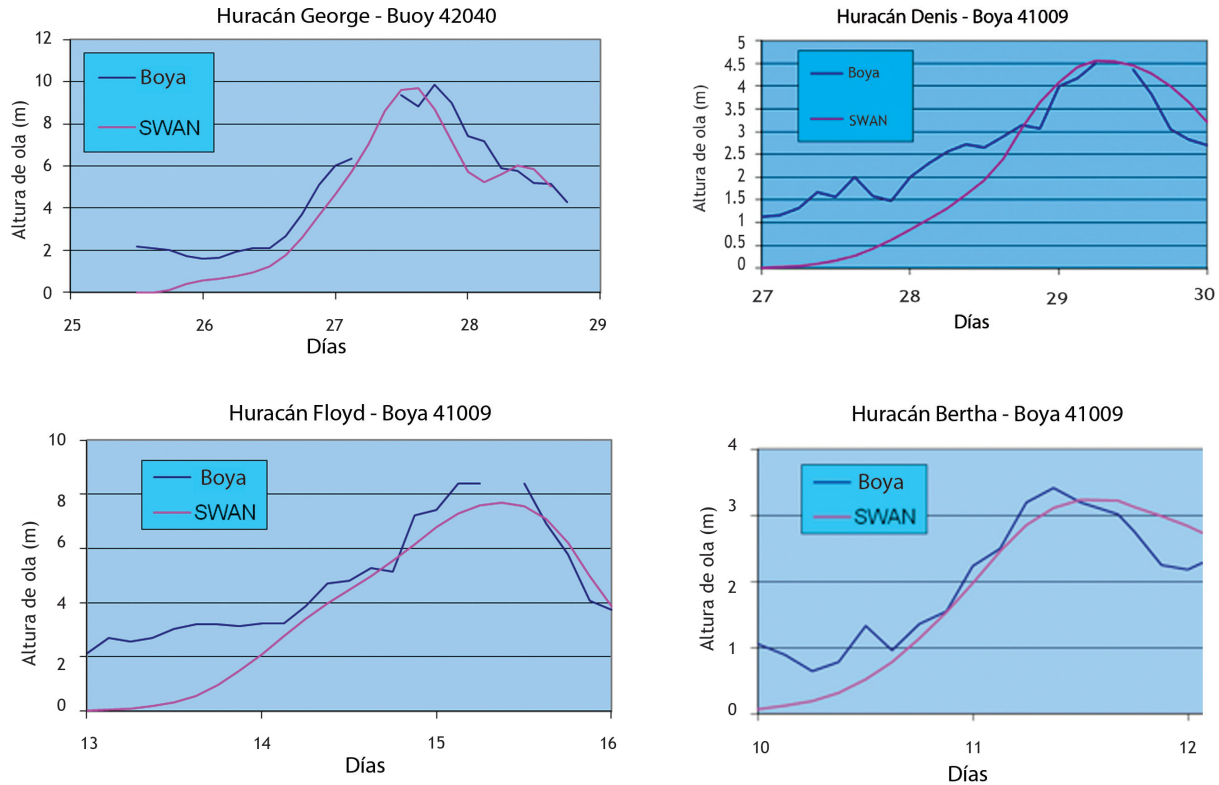
De la información divulgada por el Centro Nacional de Huracanes (NHC) de los Estados Unidos

se descargaron las trayectorias de la actividad ciclónica desde 1851 hasta la fecha. En la figura 8, se pueden ver las trayectorias descritas en la base de datos histórica. En esta gráfica se observa que, en general, los huracanes describen trayectorias de sur a norte, predominantemente al este de la isla, y de este a oeste, detallando un movimiento equivalente entre los paralelos 11° y 13° N, frecuentemente al sur de la isla. Como caso excepcional está la trayectoria descrita por el Huracán Beta, el cual, luego de trasladarse de sur a norte, se desvió hacia a oeste, afectando el oleaje de tormenta producido por este fenómeno por el este, y posteriormente, por el oeste.

Se puede observar que desde 1865 hay datación de tormentas que peligrosamente se aproximaron a la Isla de San Andrés.

Durante el siglo XX, la cuarta tormenta de 1911 se destaca entre las demás por haber surcado literalmente la isla en sentido este - oeste. Este fenómeno se originó como tormenta tropical el 3 de septiembre de 1911, al este de las Antillas Menores y tuvo un recorrido paralelo entre la latitud 14° N y 15° N. Unos días después, al norte de la desembocadura del Río Magdalena, aumentó su fuerza y la energía obtenida de la superficie del mar permitió que la velocidad de sus vientos lo convirtiese en categoría 1. Al rebasar el meridiano 80° elevó su fuerza a categoría 2, donde alcanzó la costa nicaragüense, perdiendo fuerza y continuando su desplazamiento en el mismo sentido, perdiendo fuerza al tocar aguas del Pacífico. Se destaca, de igual manera, la tormenta Hattie, la cual cruzó literalmente la isla de sur a norte. Los resultados de la modelación de esta tormenta y el impacto del oleaje se presentan más adelante.

Para la simulación de las trayectorias que desde 1851 han afectado el área insular del Caribe colombiano, figura 8, se seleccionaron aquellas



**Figura 7.** Perfiles de la altura de ola (m) observados en boyas y la simulada por el modelo SWAN en A: el Huracán George, B: el Huracán Denis, C: el Huracán Floyd y D: el Huracán Bertha en el Golfo de México [8].

en las cuales la pared del huracán se acercó lo suficiente para generar un oleaje de temporal considerable en la Isla de San Andrés, y de los cuales existe la información necesaria para realizar la simulación de los campos de viento descritos en el anterior capítulo, principalmente, la presión atmosférica que antes de la mitad del siglo XX no está datada. La figura 9, muestra instantáneas obtenidas de la distribución espacial de la intensidad del viento producto entre las 18.00 del 18 de octubre y las 12.00 del 21 de octubre de 1988, durante el paso Huracán Joan.

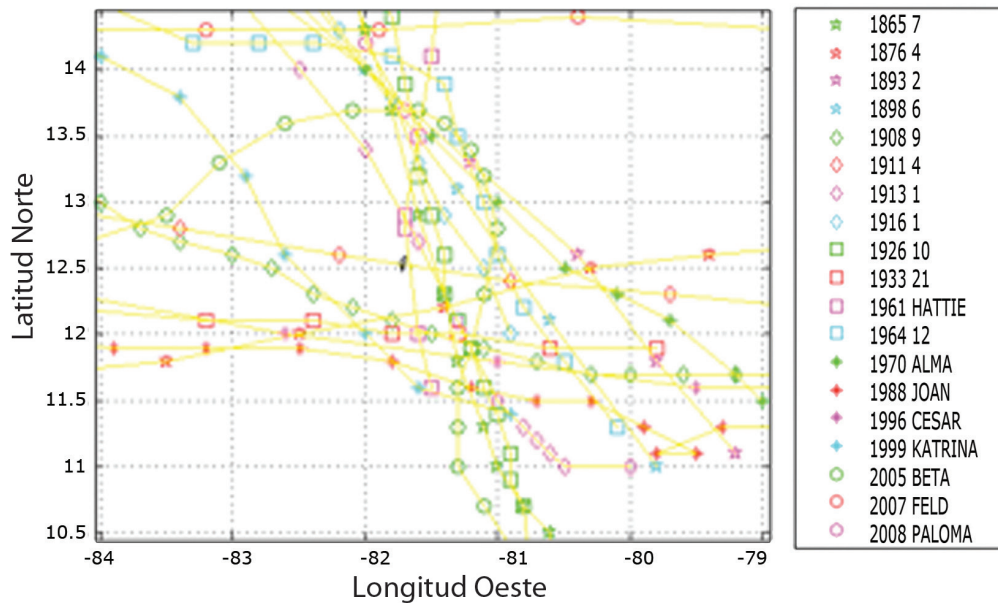
Luego de modelar los campos de viento, se procedió a la obtención de los demás datos de entrada para la simulación del oleaje con el modelo SWAN, tales como la construcción de las superficies batimétricas correspondientes a los dominios principales, intermedios y locales del norte y sur de la isla de San Andrés.

A continuación se realizó el modelamiento del oleaje de los fenómenos ciclónicos Hattie 1961, Alma 1970, Joan 1988, Cesar 1996, Katrina 1999 y Beta 2005. Estos se realizaron en los distintos dominios o mallas: principal, intermedia y anidadas.

En la figura 10, se presentan instantáneas obtenidas de la simulación en la malla o dominio principal. En esta se puede observar la distribución espacial de la altura significativa de oleaje de temporal en intervalos de tiempo de seis horas simuladas entre las 18:00 del 18 de octubre y las 12:00 del 21 de octubre de 1988, durante el paso del Huracán Joan. Se observa que las isoclinas de altura se desplazan concéntricas alrededor del ojo del huracán en la medida que este se desplaza.

En la figura 11, se presentan instantáneas obtenidas de la simulación en la malla o dominio





**Figura 8.** Trayectorias de la actividad ciclónica de mayor proximidad desde 1851 a la isla de San Andrés.

intermedia. En esta se puede observar la distribución espacial de la altura significativa de oleaje de temporal en intervalos de tiempo de dos horas simuladas entre las 08:00 del 21 de octubre y las 22:00 del 22 de octubre de 1988, durante el paso del Huracán Joan.

Se observa que las isolíneas de altura significativa se desplazan en sentido este oeste, y se deforman perdiendo altura una vez "sienten" el fondo, debido a cambios de la profundidad por presencia de la plataforma continental de la isla, que se extiende al este de ella, principalmente al norte de la misma.

Como se puede ver en la figura 11, al sureste de la isla dicha plataforma no se extiende hacia el oeste, de la misma forma que al norte, quedando expuesto, en mayor medida, el borde costero sur al impacto del oleaje de temporal.

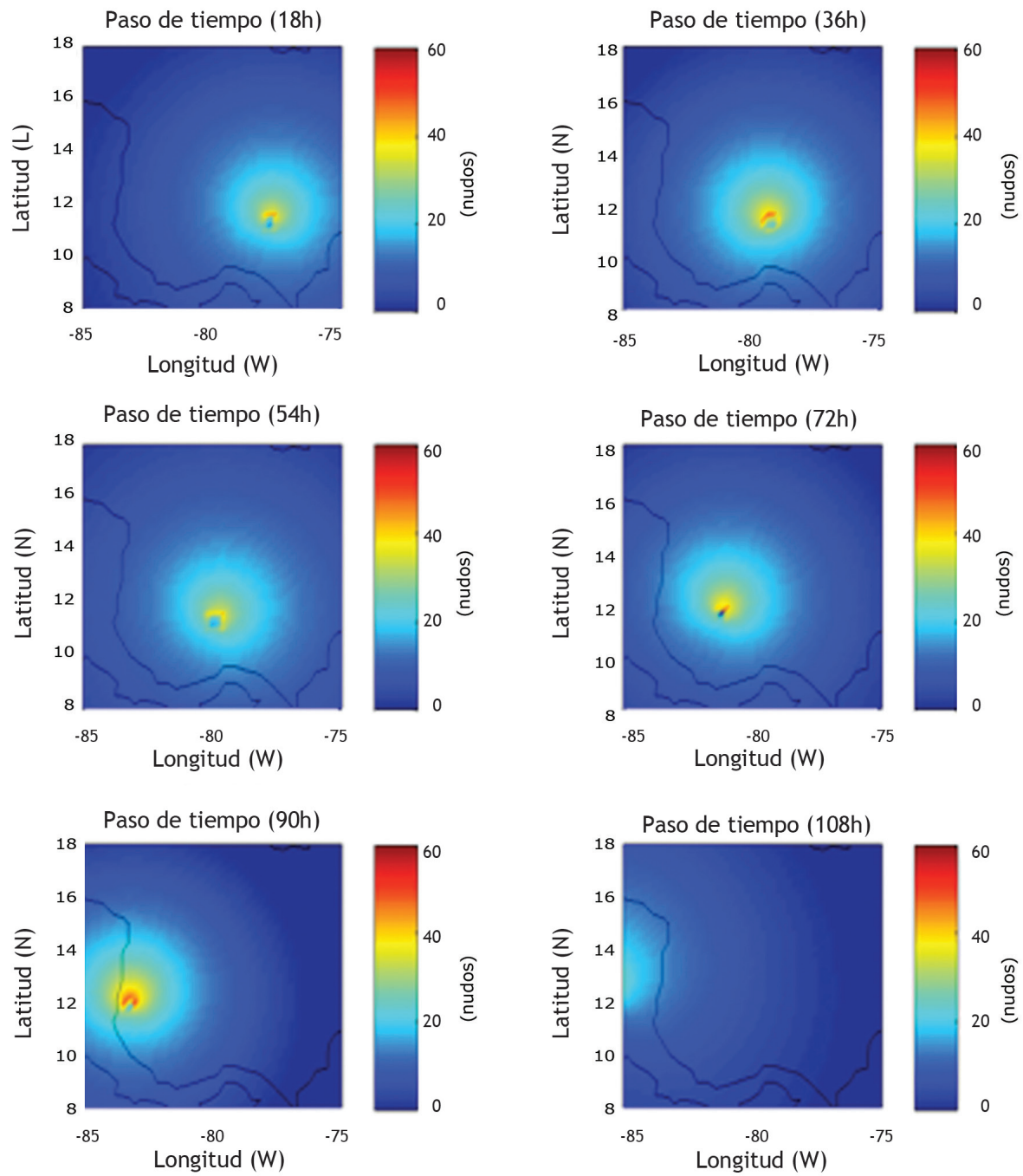
En las figuras 12 y 13 se presentan instantáneas obtenidas de la simulación en las mallas anidadas locales. En esta se puede observar la distribución espacial de la altura significativa de oleaje de temporal en intervalos de tiempo de dos horas, simuladas entre las 08:00 del 21 de

octubre y las 06:00 del 22 de octubre de 1988, durante el paso del Huracán Joan.

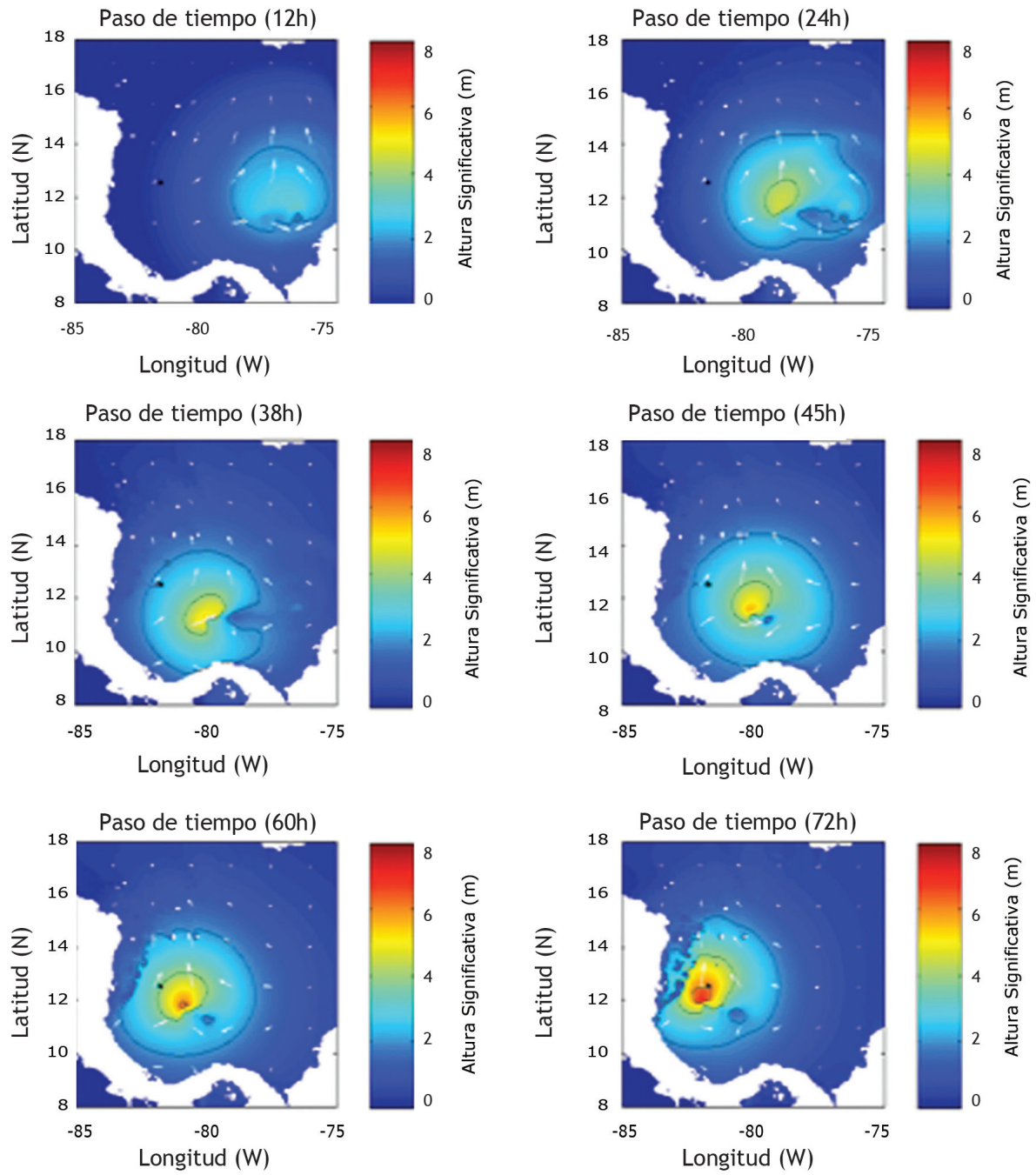
Se observa en las figuras la dirección local del oleaje y la disipación de la energía del oleaje debida a la plataforma continental extendida en el dominio local norte.

En la figura 13, se observa en el dominio anidado local sur, los efectos de asomeramiento cercanos al borde costero. De igual manera, como se observo en la malla intermedia, al sureste de la isla dicha plataforma no se extiende hacia el oeste, de la misma forma que al norte, quedando expuesto, en mayor medida, el borde costero sur, al impacto del oleaje de temporal.

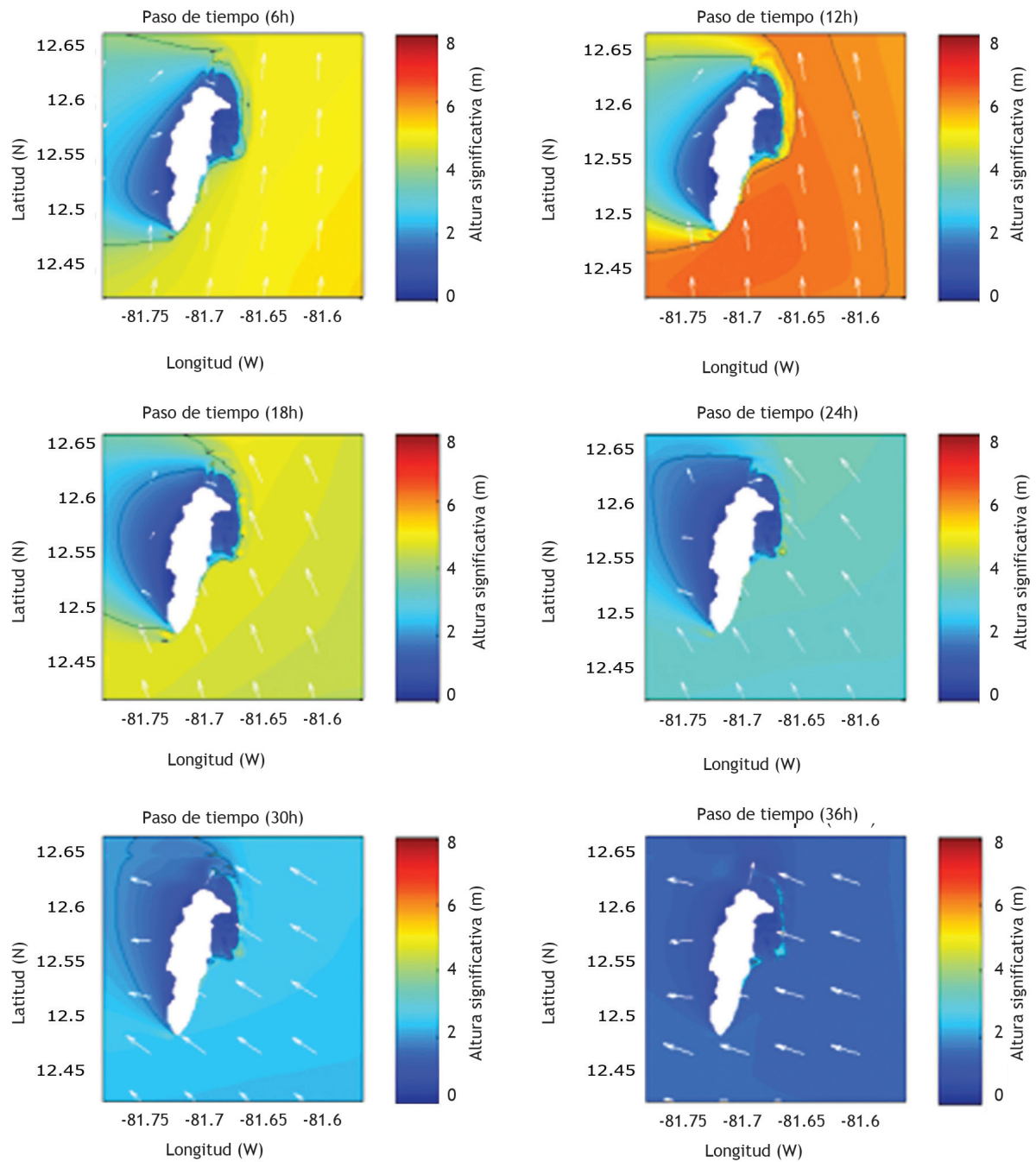
En la figura 14, se presenta una imagen satelital de *Google Earth*<sup>®</sup> del borde costero, en la cual se transpusieron los contornos de altura significativa y dirección promedio modeladas durante el paso del Huracán Joan de 1988, al sur de la Isla de San Andrés. Se puede observar cómo, de manera significativa esta área está afectada por fenómenos de asomeramiento. Como se observa en la misma imagen, esta área de la isla está afectada en gran manera por la erosión, es-



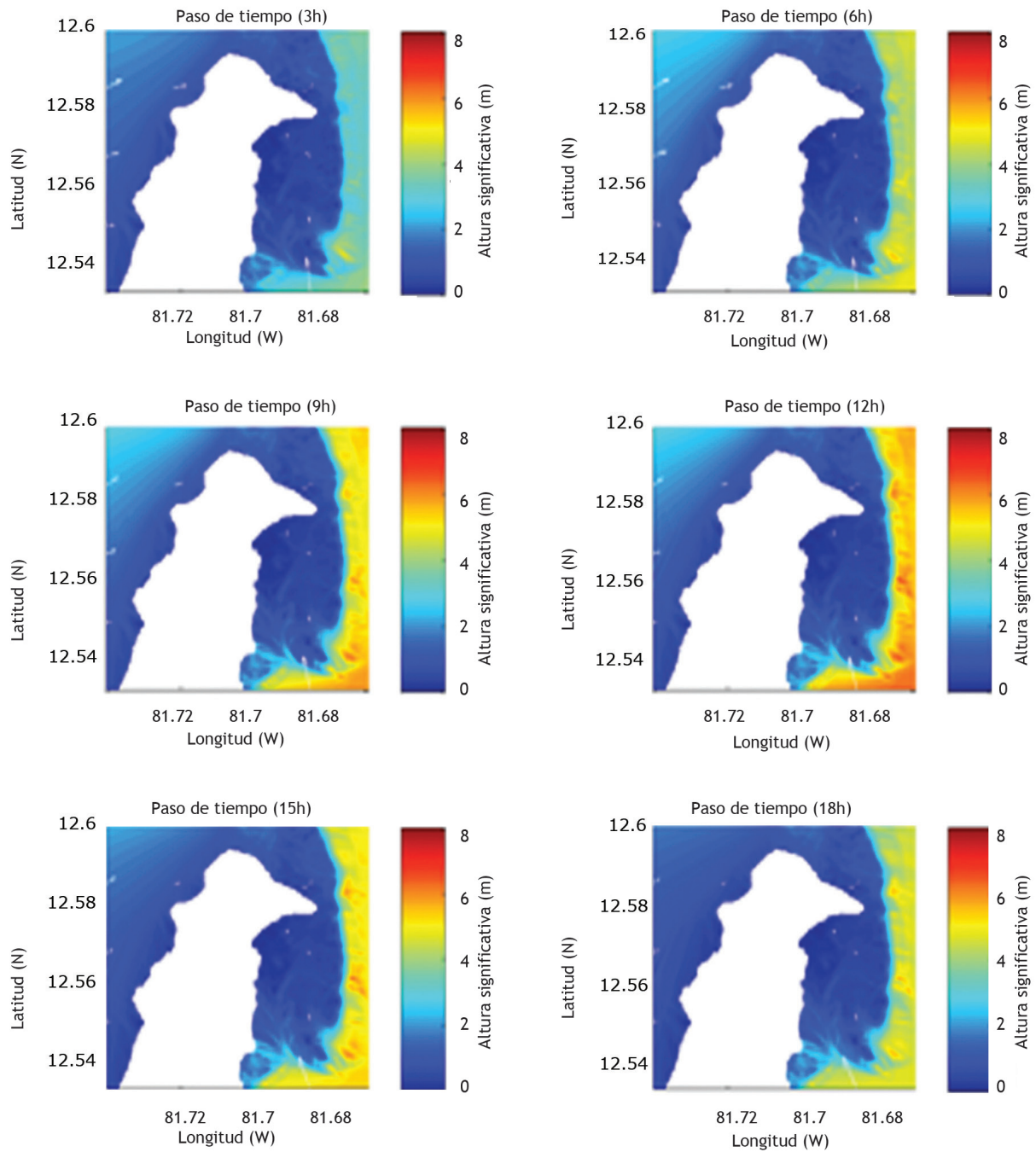
**Figura 9.** Campo de vientos generados por el modelo paramétrico correspondiente al Huracán Joan en 1988.



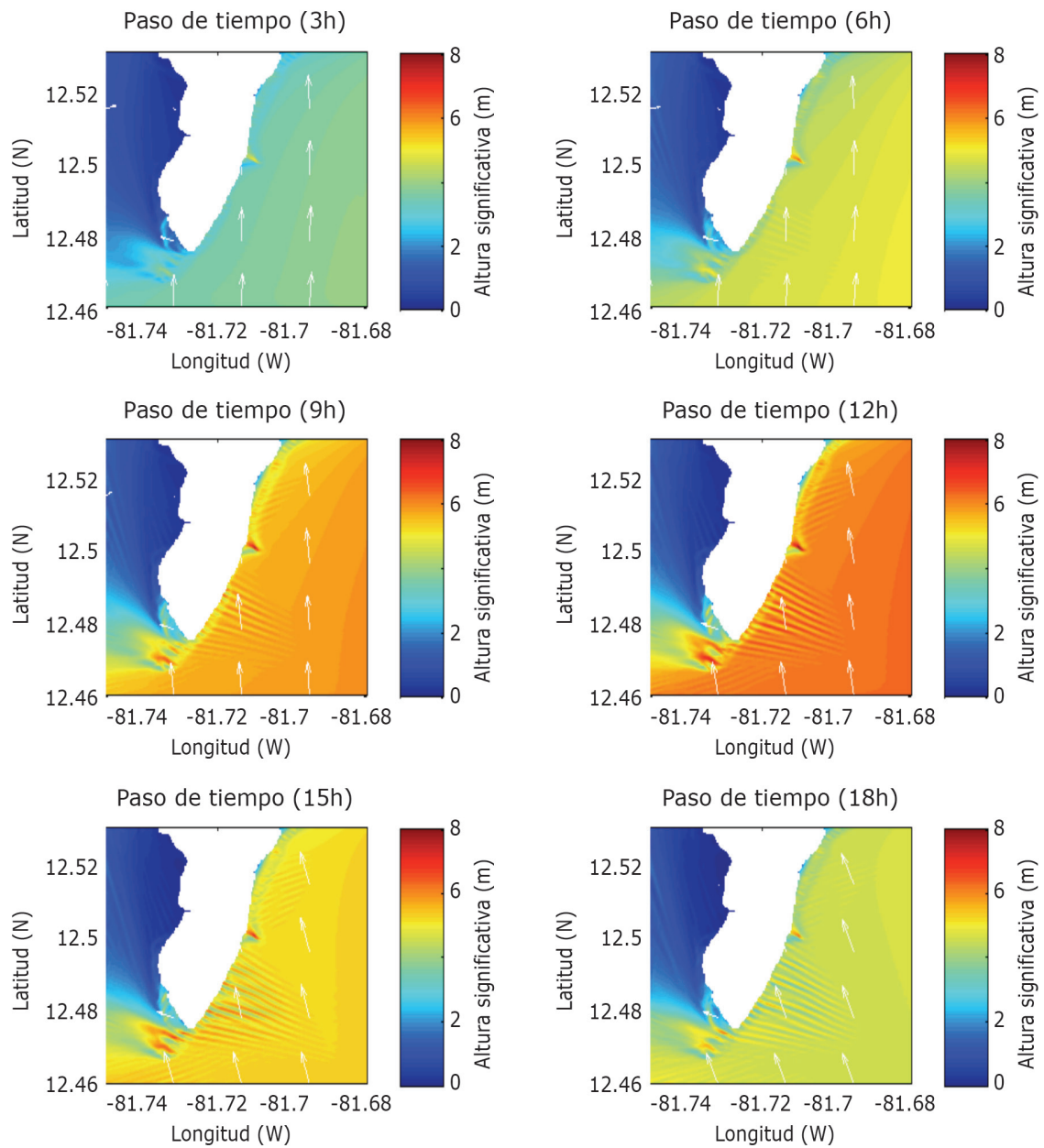
**Figura 10.** Campos de alturas significantes generados por el modelo SWAN, correspondientes al Huracán Joan en 1988, en la malla principal.



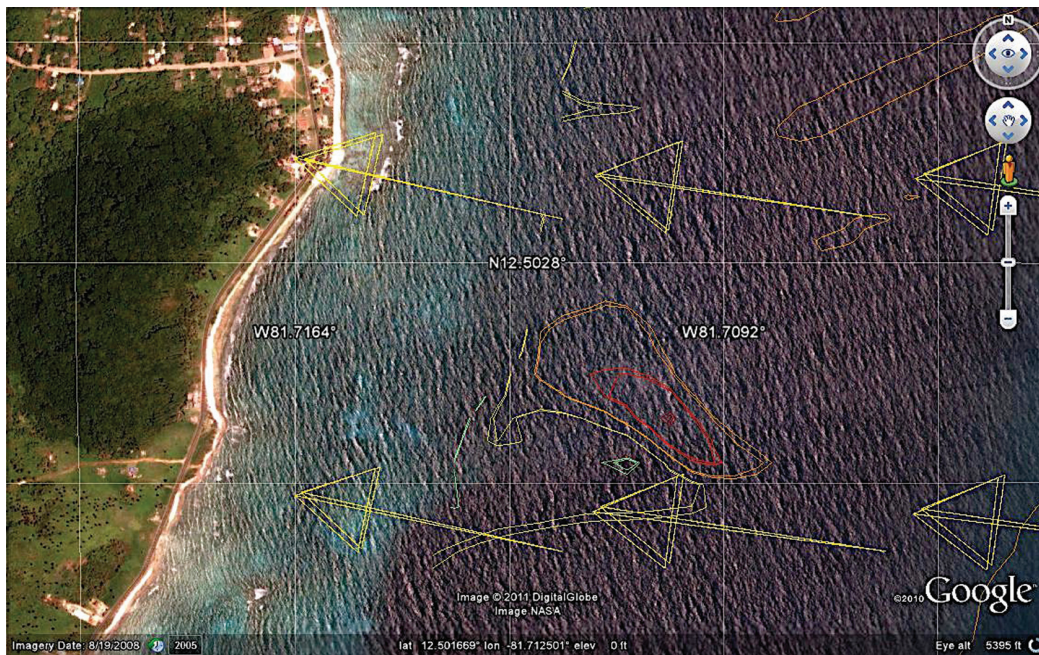
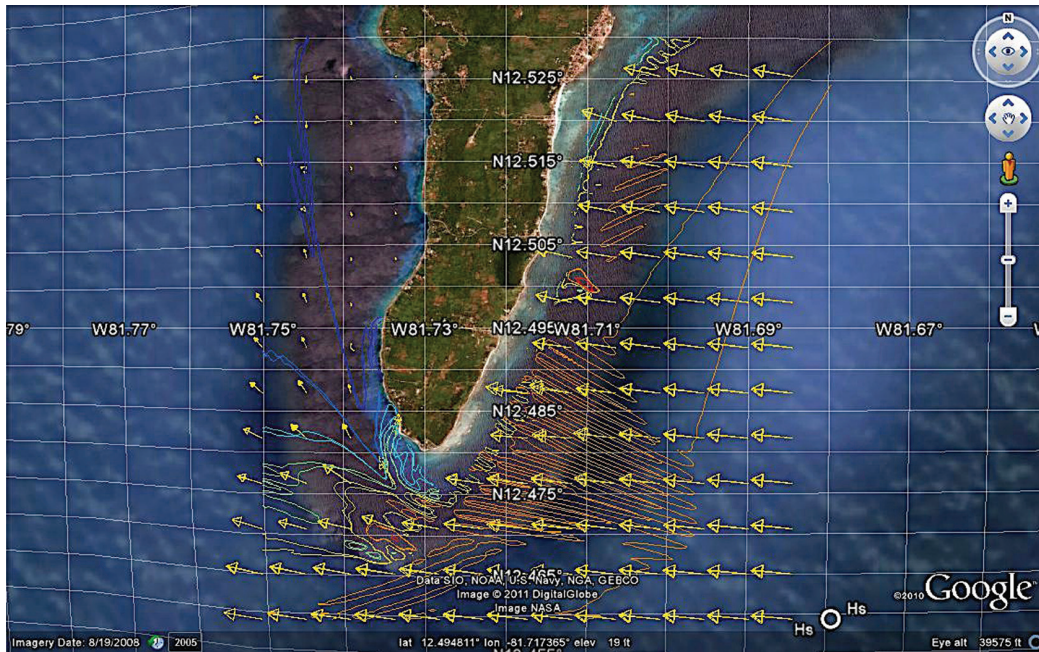
**Figura 11.** Campos de alturas significantes generados por el modelo SWAN, correspondientes al Huracán Joan en 1988 en la malla intermedia.



**Figura 12.** Campos de alturas significantes generados por el modelo SWAN, correspondientes al Huracán Joan de 1988, en la malla local norte de la Isla de San Andrés.



**Figura 13.** Campos de alturas significativas generados por el modelo SWAN, correspondientes al Huracán Joan de 1988, en la malla local sur de la Isla de San Andrés.



**Figura 14.** Borde costero general y ampliado, a partir de imagen satelital proveniente de Google Earth®, de las isolíneas de contornos de altura significativa y dirección promedio, correspondientes al Huracán Joan de 1988, al sur de la Isla de San Andrés, modelados en este trabajo.

**Tabla 3.** Localización y denominación de las boyas virtuales alrededor de la isla de de San Andres ubicadas a 50 m y 100 m.

<b>100 M</b>	<b>Posición</b>	<b>LON</b>	<b>LAT</b>
B1	NE	-81.6636	12.56181
B2	SE	-81.7129	12.49746
B3	NW	-81.7335	12.50556
B4	SW	-81.7281	12.57556
<b>50 M</b>	<b>Posición</b>	<b>LON</b>	<b>LAT</b>
B5	NE	-81.6720	12.57237
B6	SE	-81.7074	12.51219
B7	NW	-81.7338	12.51383
B8	SW	-81.7277	12.57933

pecialmente, la que soporta el frente de oleaje perpendicular a la costa, en el punto de mayor altura de oleaje descrito en la imagen, que alcanza alrededor de cinco m de altura significativa en esa instantánea.

Los resultados de la modelación, sumada a estas herramientas de aplicativos Web disponibles de manera libre, pueden coadyuvar en la formulación de planes de gestión del riesgo que pueden ser fácilmente actualizados y divulgados.

Para el análisis y evaluación del impacto de oleaje, se resolvieron a partir los parámetros de altura significativa, dirección promedio y periodo pico, calculado en la malla intermedia en el siguiente arreglo de boyas virtuales descritas en la tabla 3. Para las isobatas de 100 m y 50 m ubicadas al noroeste, noreste, suroeste y sureste de la Isla de San Andrés.

Para el caso del Huracán Joan, se presentan en la figura 15, los valores de altura significativa en el arreglo de boyas virtuales anteriormente definidas. En esta se observan valores máximos al noreste y al sureste de la isla en la boya de los 100 m, con una ligera disminución en los picos de altura, en la boya ubicada en los 50 m.

En cuanto al periodo pico, en la figura 16, se presentan un comportamiento clásico de aumento del mismo, en la medida que la altura del oleaje presenta un comportamiento extremo en la región noreste y sureste, presentando valores entre 10 y 14 segundos. Se presenta un cambio

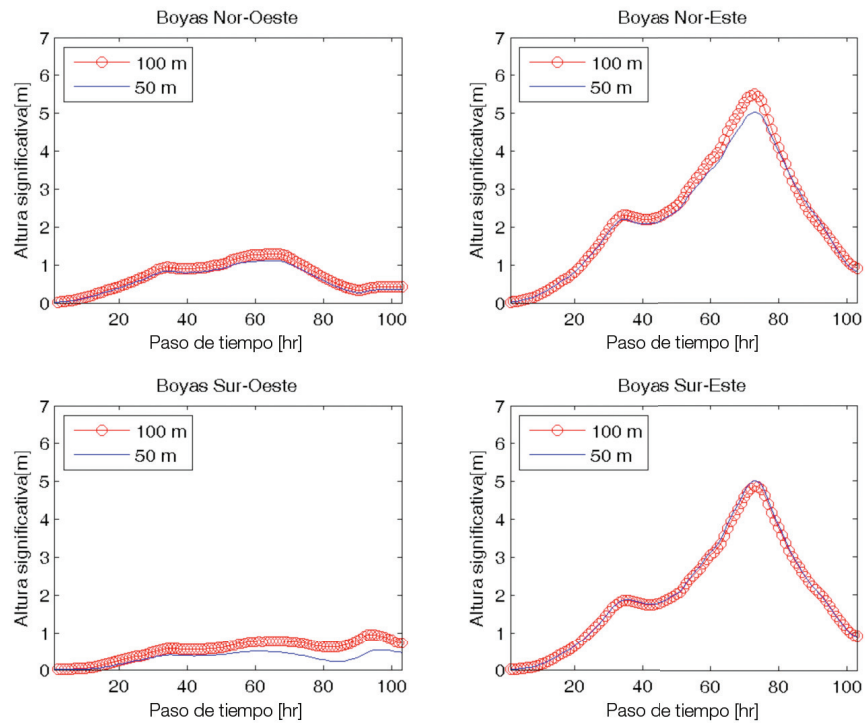
súbito del periodo pico en la boya del suroeste, debido a fenómenos de difracción que transmiten y propagan características de una ola de temporal momentáneamente al sector noroeste.

En la figura 17, se observa la dirección promedio del campo de oleaje producto del paso del Huracán Joan, el cual, en su trayectoria cruzó al sur de la isla de este a oeste, en los cuatro puntos cardinales. Se observa, en general, que al este de la isla la dirección promedio varía entre 250 y 100 grados, en las profundidades evaluadas a 100 m y 50 m. En cambio, al oeste de la isla, de manera constante, presentó una dirección promedio de 270, excepto cuando la trayectoria alcanzó el sur de la isla, recibiendo el embate de las olas por el sur, con direcciones entre 360 y 010 en el extremo sur de la isla.

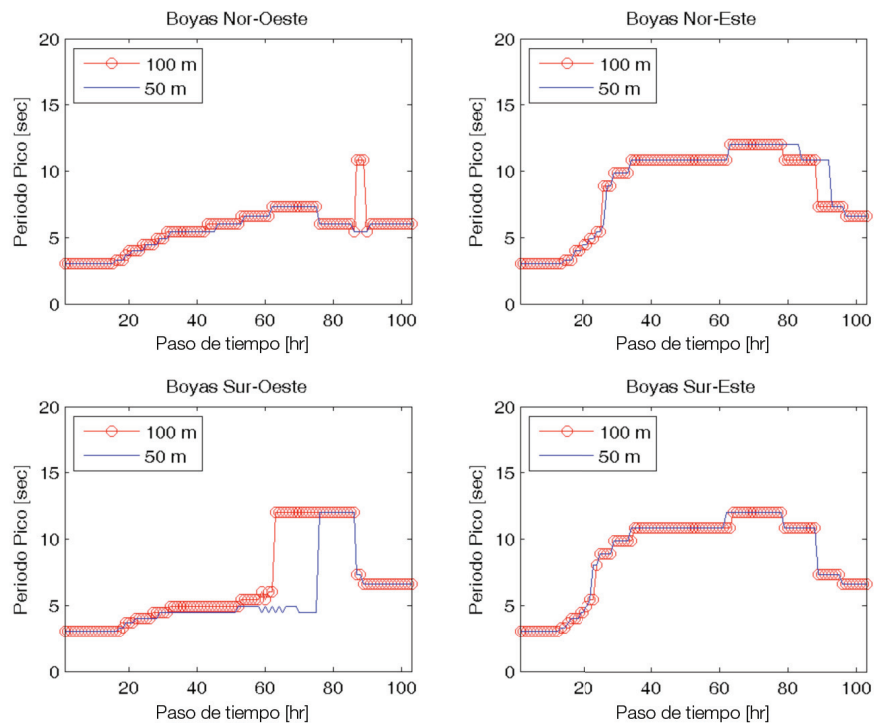
Los valores numéricos se presentan de manera resumida en la tabla 4, donde se exhiben los valores máximos de altura significativa (Hs), periodo pico (Tp), longitud de onda (Wlen) y promedios de dirección, obtenidos de la simulación de los huracanes alrededor de la isla de San Andrés, en las boyas virtuales ubicadas a 50 m y 100 m de profundidad. Estas boyas, como fue explicado en la tabla 4, se ubicaron al NE, NW, SW y SE respectivamente.

Los valores máximos de altura significativa se obtuvieron de la simulación del Huracán Cesar de 1996, el cual presentó alturas de 6.74 m, éste valor se observó en la boya virtual ubicada al noreste en los 100 m.

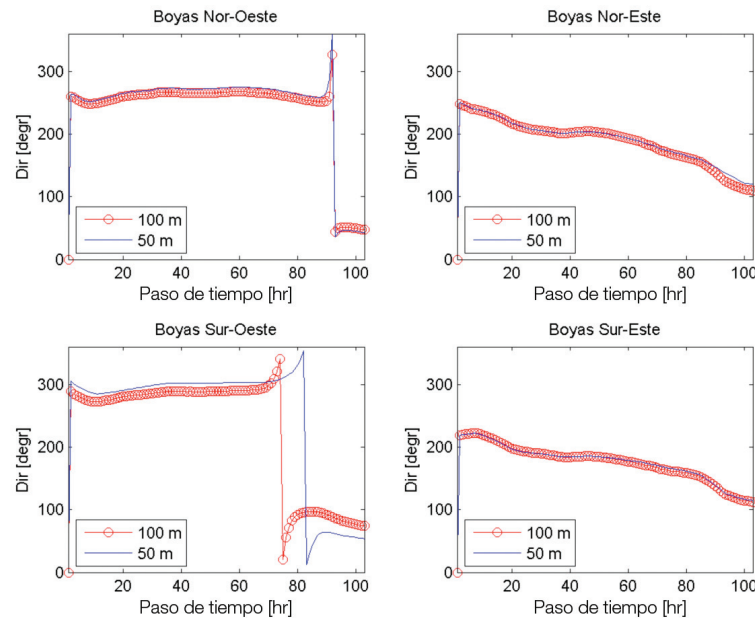




**Figura 15.** Valores de altura significativa entre las 18:00 horas del 18 de octubre y las 00:00 horas del 23 de octubre de 1988, durante el paso del Huracán Joan.



**Figura 16.** Valores de período pico entre las 18:00 horas del 18 de octubre y las 00:00 horas del 23 de octubre de 1988, durante el paso del Huracán Joan.



**Figura 17.** Valores de la dirección media del oleaje entre las 18:00 horas del 18 de octubre y las 00:00 horas del 23 de octubre de 1988, durante el paso del Huracán Joan.

**Tabla 4.** Localización y denominación de las boyas virtuales alrededor de la isla de San Andrés, ubicadas a 50 m y 100 m.

Huracán	Boya	Hs Max.	Dir. Prom.	Tp. Máx.	Wlen máx.
Hattie 1981	B2	4.34588	147.038	8.0761	41.0102
Alma 1970	B2	1.34788	219.607	8.0761	25.5472
Joan 1983	B2	5.50783	71.2120	12.001	91.3742
Cesar 1996	B1	6.74085	199.811	12.001	69.7361
Katrina 1999	B3	2.32190	338.700	6.6252	27.2613
Beta 2005	B2	2.80077	188.167	6.6252	25.3275

Los valores máximos de periodo pico se presentaron durante la simulación de los huracanes Joan y Cesar, con valores de 12.001 s y se presentaron en las boyas virtuales ubicadas al noreste y sureste, siendo muy recurrente este periodo en la boya virtual de los 50 m para el Huracán Cesar, como se observa en la figura 15. El mismo periodo en el Huracán Joan de 1988 se presenta en la boya noreste y sureste.

## CONCLUSIONES

Se lograron reconocer al menos 19 fenómenos ciclónicos que describieron trayectorias que

generaron alguna afectación por la cercanía de las mismas a la Isla de San Andrés.

De la evaluación de trayectorias anteriormente seleccionadas, se concluyeron comportamientos similares para las que se desplazan de sur a norte, las cuales, de manera predominante, lo hicieron por el este de la isla.

Las implicaciones que tiene sobre el impacto del oleaje de temporal son inmejorables para el noreste de la isla, la cual posee una barrera arrecifal que disipa los campos de oleaje de hasta siete metros.

Para el sur, la evaluación no es alentadora, pues la barrera arrecifal no es muy extensa y la disipación por fricción del fondo contribuye muy poco, excepto para fenómenos poco intensos, como el caso del Huracán Hattie de 1961, que pasó muy cerca a la isla, pero su nivel de afectación fue muy bajo.

En el caso de fenómenos de trayectoria este a oeste, estos generalmente pasan por el sur de la isla, casos descritos para los casos del Huracán Cesar de 1996 y Joan de 1998.

De estas simulaciones, se concluyó que el suroeste se encuentra desprotegido al avance de un fenómeno de esta clase, teniendo en cuenta el impacto del oleaje temporal que, de acuerdo a las estimaciones halladas en este trabajo, superaría los 6.5 metros de altura significativa, con las graves consecuencias que esto pudiera tener para esta zona de la isla, independientemente de la trayectoria del huracán.

De manera general, se concluye que el oleaje de temporal en el área sur de la isla afectará en proporciones mayores, como fue estimado comparativamente, en cuanto a la altura significativa modelada para el norte y sur de la isla.

Sin embargo, el sur de la isla no es el más vulnerable al efecto de la inundación por marejada ciclónica, el cual depende más de otros factores como la amplitud de la plataforma continental adyacente.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Lizano O, Ocampo F, Alvarado L, Vega R, Puig J. Evaluación de Modelos Numéricos de Tercera Generación para el Pronóstico del Oleaje en Centroamérica y México. *Tópicos meteorológicos y oceanográficos* 2001; 8(1): 40-49.
- [2] Ortiz JC. Huracanes y tormentas en el Caribe colombiano desde 1900. *Boletín científico CIOH*. 2007; 25: 48-59.
- [3] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia. Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático Colombia 2001; 1-267.
- [4] Andrade C. Circulation and Variability of the Colombian Basin in the Caribbean Sea. PhD Thesis, p. 223 Univ. Of Wales at Menai Bridge, U.K.; 2000.
- [5] Derrotero de las costas y áreas insulares de Colombia [CD ROM] Versión 4.0. [Citado en Dic 2010] Cartagena (BOL): Dimar Cioh; 2003.
- [6] Unisys Weather Tropical Data Department [en línea]. 2010 dic. 1 [Citada 2010 dic. 10] Disponible en URL: <http://www.weather.unisys.com/hurricane/atlantic/index.html>.
- [7] Lizano OG. Modelo de vientos ajustado a un modelo de generación de olas para el pronóstico durante huracanes. *Geofísica* 1990; 33: 75-103.
- [8] Lizano OG. Simulación de oleaje de huracán usando modelos de viento paramétricos en un modelo de olas de tercera generación. *Boletín científico CIOH*. 2006; 24: 36 - 47.
- [9] Willoughby HE. Parametric representation of the primary vortex. Part I: observations and evaluation of the Holland (1980) model. *Monthly Weather Review*. 2004; 3033-3048.
- [10] Booij N, Holthuijsen LH. Propagation of ocean waves in discrete spectral wave models. *Journal of computation Physics*. 1987; 68:307-326.
- [11] Ortiz JC, Mercado A. An Intercomparison of SWAN and WAVEWATCH III models with data from NDBC-NOAA buoys at oceanic scales. *Coastal Engineering Journal of Japan* 2008; 50(1):47-73.
- [12] DIMAR - CIOH. Proyecto de generación de cartografía náutica, electrónica y terrestre. 2005; 1-123.