



ARTÍCULO

Altura significativa del oleaje en la Cuenca Colombiana del Caribe, datos de altimetría radar

Fecha de recepción: 2011-07-25 / Fecha de aceptación: 2011-09-15

Yves-François THOMAS, thomas.yves-francois@wanadoo.fr

Alexandre NICOLAE LERMA, nicolae.l.alex@gmail.com

Paul DURAND, paul.durand@univ-paris.fr

Laboratoire de Géographie Physique, UMR 8591 du CNRS et de l'Université Paris I, 1 place Aristide-Briand, 92195 Meudon Cedex, France.

Blanca POSADA, blanca.posada@invemar.org.co

Carolina GARCÍA VALENCIA, cgv@invemar.org.co

Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras, INVEMAR, A.A. 1016, Cerro Punta Betín, Santa Marta, Colombia.

Carlos Alberto ANDRADE AMAYA, candrade@costa.net.co
Escuela Naval Almirante Padilla, Isla Manzanillo, Cartagena de Indias, Colombia.

RESUMEN

Los autores proponen un estudio climatológico de la altura significativa del oleaje (H_s) en la cuenca colombiana mediante el análisis de datos de altimetría tomados por los satélites Jason-1, Topex-Poseidón, ERS-2, Envisat and Geosat-2 (GFO), catalogados en la base de datos AVISO *Delayed Time Corrected Sea Surface Heights* entre septiembre 1992 y abril 2009.

La cartografía mensual de la altura significativa media del oleaje analizada en ventanas de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ revela valores de altura importantes para enero y febrero, cuando los vientos alisios son más intensos, seguidos por los valores de junio y julio. Estos últimos debidos a la ocurrencia de vientos del *Veranillo*.

El análisis de la variabilidad interanual sobre cuatro ventanas de $1^\circ \times 1^\circ$, situadas cerca del Golfo de Urabá, Cartagena, Barranquilla y Riohacha presenta niveles de altura significativa del oleaje, que aumentan en sentido este/oeste. Exceptuando los valores del norte del golfo de Urabá con una posición geográfica más protegida. Por otra parte, no se observó aumento de la altura significativa máxima en el período 1992-2009.

La estimación de altura significativa del oleaje para diferentes probabilidades de retorno, permite constatar que para ocurrencias de 10 y 50 años, las alturas correspondientes son de 4.17 y 4.53 m. para Riohacha, 4.75 y 5.11 m. para Barranquilla, 5.23 y 5.51 mts para Cartagena y de 4.83 y 5.43 mts para el norte del golfo de Urabá.

Palabras claves: Teledetección, Altimetría radar, Colombia, Altura Significativa del Oleaje, Climatología.

ABSTRACT

The authors proposed a climatic study of the Significant Wave Height (H_s) in the Colombian Basin analyzing the altimetry data taken by the satellites Jason-1, Topex-Poseidon, ERS-2, Envisat and Geosat-2 (GFO) cataloged in the AVISO *Delayed Time Corrected Sea Surface Heights*, between September 1992 and April 2009.

Monthly mean significant wave heights were analyzed in $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ areas. They revealed higher values during January and February, when the Easterly Trade Winds reached their maximum and secondary maxima during June and July during the *Veranillo*.

Inter-annual variability analysis on four $1^\circ \times 1^\circ$ areas located near the Gulf of Urabá, Cartagena, Barranquilla and Riohacha showed significant wave height levels growing in a East/West direction, with exception of the Gulf of Urabá area that have a more protected position. Furthermore, there was no increase in the significant wave height maximum in the 1992-2009 period.

The estimation of Significant Wave Heights for different return periods, showed heights of 4.17 and 4.53 m. (Riohacha), 4.75 and 5.11 m. (Barranquilla), 5.23 and 5.51 m. (Cartagena) and 4.83 and 5.43 m. (Urabá) for 10 and 50 years return periods respectively.

Key words: Teledetection, radar altimetry, Colombia, Significant Wave Heights, Climatology.

INTRODUCCIÓN

Conocer la distribución espacio-temporal de la altura del oleaje es de gran interés para perfeccionar la previsión meteorológica, para la planificación y diseño de estructuras *offshore*, y para la instalación y mantenimiento seguro de equipos en el medio marino. Igualmente, las bases de datos de altura del oleaje son necesarias para el diseño y seguimiento de rutas marítimas, para el control y apoyo a la gestión de flotas pesqueras, para el desarrollo de infraestructura costera como la construcción de obras portuarias o de defensa contra procesos de erosión, y también, para la conformación de bases de datos históricos que permitan y enriquezcan estudios de carácter ambiental.

La información sobre los regímenes de oleaje estuvo antes limitada al registro de observaciones en buques de oportunidad, que se enriqueció progresivamente gracias a la instalación de instrumentos de medición como boyas de oleaje. Sin embargo, el conocimiento de las características de la superficie del océano experimentó un cambio radical con la aparición de observaciones a través de sensores satelitales.

Inicialmente, pensadas para apoyar la investigación climática, las medidas altimétricas permitieron múltiples aplicaciones tanto científicas como operacionales. Hoy en día, es posible detectar, desde un satélite, variaciones del nivel del mar con una precisión de 2 cm. Satélites como ERS-2, Geosat-2, Topex-Poseidon, Jason-1 y En-



Figura 1. Localización del área de estudio. La ventana A corresponde al sector de análisis a partir de datos de altimetría. La ventana B corresponde al sector de cartografía de altura significativa del oleaje [Hs].

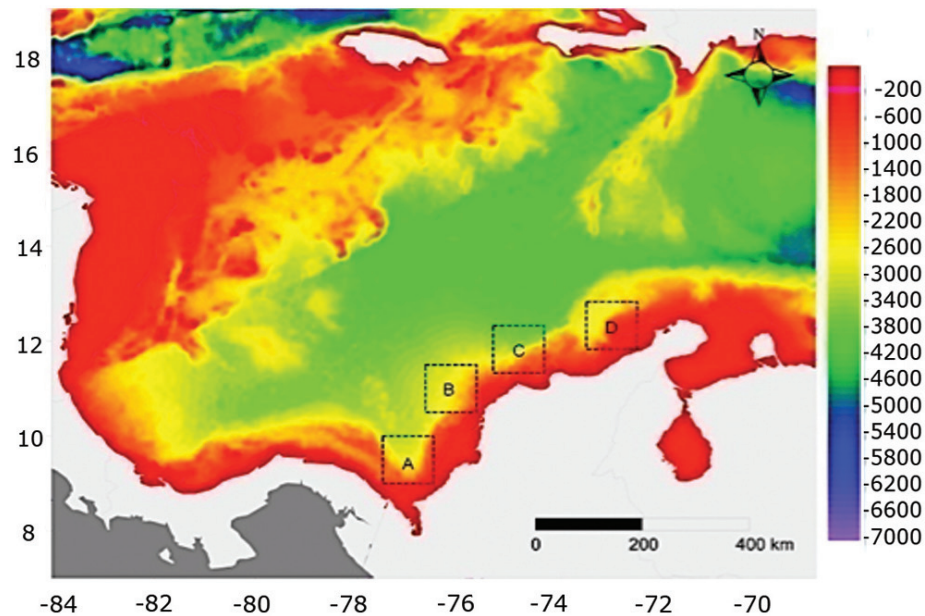


Figura 2. Representación batimétrica (en metros) del área de estudio. Las ventanas A, B, C y D corresponden respectivamente a las ventanas de análisis Urabá, Cartagena, Barranquilla y Riohacha donde se estudiaron las características de la variabilidad interanual de la altura significativa del oleaje [Hs].

visat, permitieron adquirir una cobertura completa y repetitiva de la altura significativa del oleaje del planeta [1], [2].

Este estudio presenta una evaluación de la altura significativa del oleaje en la costa norte de Suramérica, para el área de estudio que comprende la parte central y sur occidental del Caribe, la Cuenca de Colombia (entre 7° y 22° de latitud norte y entre 69° y 84° de longitud oeste). La figura 1 muestra la ubicación y extensión del área de estudio para la cual se analizó y cartografió la climatología de la altura significativa del oleaje. La figura 2 presenta la batimetría sobre cuatro ventanas: golfo de Urabá, Cartagena, Barranquilla y Riohacha, para las cuales se analizó la variabilidad interanual y se calcularon los niveles de retorno extremos.

DATOS Y MÉTODOS

MEDICIÓN DE ALTURA DEL OLAJE POR ALTIMETRÍA RADAR

Un radar altimétrico envía impulsos de energía muy cortos (micro-ondas), que son reflecta-

das por la superficie del océano. La duración del trayecto de ida y vuelta de los impulsos permite calcular la distancia entre el satélite y la superficie del mar, distancia igualmente corregida por varios instrumentos abordo. La altura de las olas se deduce de la manera cómo la señal de radar se refleja sobre la superficie del mar: la amplitud y la forma de los ecos (la forma de la onda) contienen información sobre las características de la superficie muestreada. Así, la intensidad y las variaciones en el tiempo de la onda reflectada varían según las condiciones marinas. La altura de las olas es medida con respecto a la pendiente del lado de ascenso de la forma de la onda del eco: cuando el mar está perfectamente plano o en calma se observa un fuerte aumento de la amplitud de la onda reflectada, que corresponde al momento en el que la onda de radar toca la superficie del océano. En presencia de oleaje, el aumento de la amplitud de la onda es más progresivo: la onda toca primero la cresta de una ola y de algunas otras, etc, permitiendo deducir la altura de las olas. El tiempo de regreso de la señal emitida por el satélite es proporcional a la altura, asumiendo que la pendiente de la curva corresponde a la amplitud de la onda, [3] [4].

Tabla 1. Características de los radares altimétricos cuyos datos fueron usados en este trabajo.

Satélite	Topex Poseidón	GFO (*)	Jason-1	ERS-2	Envisat
Lanzamiento	10/08/1992	10/02/1998	07/12/2001	21/04/1995	01/03/2002
Fin de vida	18/01/2006	26/11/2008			
Altitud	1336 km	784 km	1336 km	785 km	800 km
Inclinación	66 °	108°	66 °	98.52 °	98.55°
Repetitividad	9.9156 días	17 días	9.9156 días	35 días	35 días
Agencia	NASA / CNES	US NAVY/ NOAA	NASA / CNES	ESA	ESA
Instrumentos	Topex-Poseidón	Radar Altimeter	Poseidón 2	Radar Altimeter	Radar altimeter 2
Banda	K _u band C band K _u band	K _u band	K _u band C band	K _u -band	K _u -Band S-Band
Frecuencia	13.6 GHz 5.3 GHz 13.65 GHz	13.5 GHz	13.6 GHz 5.3 GHz	13.6 GHz	13.575 GHzW 3.2 GHz

(*): El satélite Geosat-2 también se conoce como GFO (Geosat Follow-On). Es el sucesor del satélite Geosat que fue la primera misión en proporcionar datos de altimetría de gran calidad durante un periodo largo, lanzado el 12 de marzo de 1985, funcionó hasta enero 1990.

LOS DATOS AVISO DELAYED TIME CORRECTED SEA SURFACE HEIGHTS (REFERENCIA DT CORSSH)

La base de datos utilizada compila la totalidad de los datos colectados a lo largo de la huella de las órbitas de los satélites Topex-Poseidon, ERS-2, Geosat-2, Jason-1 y Envisat. Los datos de la base AVISO, conocida como *Delayed Time Corrected Sea Surface Heights* o *DT CorSSH*, se caracterizan por el establecimiento de correcciones homogéneas a lo largo del período disponible, especificidad que favorece su utilización para estudios de largo plazo. En este caso, de hasta 17 años.

Cada carpeta de la base de datos corresponde al ciclo completo de un satélite (aproximadamente 10 días para Jason-1 y Topex-Poseidon, 17 días para Geosat-2, 35 días para ERS-2 y Envisat). Los datos están ya corregidos de perturbaciones instrumentales, ambientales (efectos ionosféricos y troposféricos) y geofísicas (marea oceánica, marea terrestre y marea polar) [5].

Los datos de altura significativa del oleaje (Hs) fueron extraídos, corregidos y transformados por medio de programas escritos en lenguaje *Matlab*®, utilizando la herramienta *snctools* [6].

La tabla 2 provee la lista de observaciones tratadas en publicaciones, donde más de 6.2 millones de mediciones satelitales de la altura del oleaje fueron usadas para el área estudiada.

CORRECCIÓN DE LA ALTURA SIGNIFICATIVA DE OLA

Los factores de corrección, aplicados a los datos de altimetría fueron desarrollados y propuestos por varios investigadores para convertir la altura obtenida por satélite en datos comparables con los de las boyas [7, 8, 9]. Las correcciones de la altura usadas son las propuestas por Queffelecoul (2007) [10].

Los factores de corrección aplicados se identificaron posteriormente con el valor de derivada

Tabla 2. Lista de los datos tratados en este trabajo.

Satélite	Radiómetro	Ciclos	Fechas	Observaciones
ERS-2	Radar Altimeter	1-85	23/05/95-17/06/03	1282056
Topex-Poseidon	Topex	1-481	28/09/92-04/10/05	1790265
Jason-1	Poseidon 2	1-264	15/01/02-11/03/09	1195488
Geosat Follow-On	Radar Altimeter	37-219	09/01/00-23/07/08	1113174
Envisat	Radar altimeter 2	9-77	26/09/02-06/04/09	880557
Cantidad total de observaciones				6261540

de las medidas satelitales, la altura significativa de ola corregida y el número de ciclo de una misión satelital dada.

El radiómetro Tope Side A fue utilizado hasta el ciclo 235. Para los ciclos < 98 :

$$H_s^c = 1.0539 * H_s - 0.0766$$

Para los números de ciclos ≥ 98 una corrección debida a la deriva del radiómetro tuvo también que ser integrada:

$$H_s^c = (1.0539 * H_s - 0.0766) + F_{98} - F_{cycle}$$

$$F_x = \sum (a_i * x^i)$$

Donde:

$$a_0 = 0.0864, a_1 = -6.0426E - 4,$$

$$a_2 = -7.7894E - 6, a_3 = 6.9624E - 8$$

El radiómetro Topex Side B, fue utilizado a partir de ciclo 236:

$$H_s^c = 1.0237 * H_s - 0.0476$$

Jason-1:

$$H_s^c = 1.0587 * H_s - 0.0571$$

ERS-2:

$$H_s^c = 1.0642 * H_s - 0.0006$$

Geosat-2:

$$H_s^c = 1.0625 * H_s - 0.0754$$

Envisat:

$$H_s^c = 1.0526 * H_s - 0.1991$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE LA ALTURA SIGNIFICATIVA

Dentro del área de estudio se extrajeron sectores de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ que sirvieron para la generación de cartografía mensual de la variabilidad espacial de la altura significativa del oleaje.

La figura 3 muestra el aporte del número de mediciones u observaciones por mes analizadas y utilizadas en el estudio para el período comprendido entre septiembre 1992 y abril 2009.

COMPARACIÓN CON OBSERVACIONES DE LA BASE DE DATOS ICOADS

La ausencia en el pasado de medidas in situ de las condiciones marinas por medio de boyas en la zona oceánica, limitó la climatología marina al análisis de observaciones directas realizadas desde buques seleccionados (de oportunidad) y reunidas en la base de datos *Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set* [11].

Los resultados obtenidos fueron comparados con valores de altura significativa extraída de la base de datos ICOADS por Thomas (2006-a, 2006-b) [12,13], para las medidas altimétricas efectuadas por el satélite Topex-Poseidon durante el período 1993-2002. Los datos ICOADS fueron corregidos según los criterios propuestos por Gulev y Hasse (1998, 1999) [14, 15], con el fin de deducir la altura significativa del oleaje. La figura 4, muestra el valor de altura significativa mensual media estimada por los buques seleccionados, que se separa en un máximo de 18 cm. de los valores obtenidos por el altímetro Topex.

Se encontró una significativa relación lineal caracterizada por un coeficiente de correlación

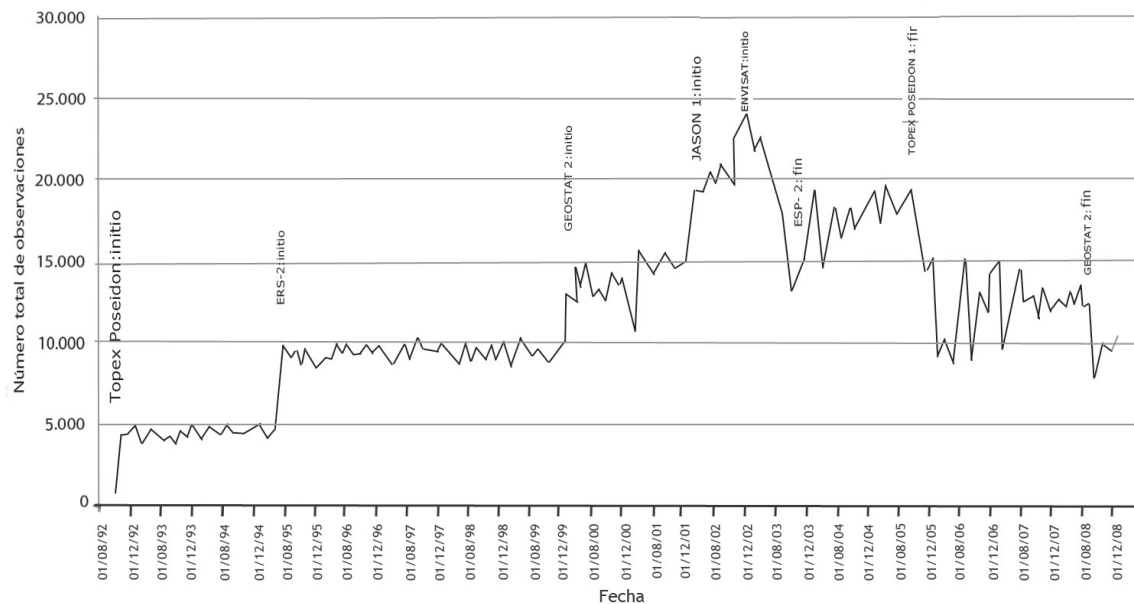


Figura 3. Evolución mensual de la cantidad de observaciones entre septiembre 1992 y abril 2009, en el área de estudio.

de 0.92, entre los valores obtenidos por los observadores de buques seleccionados (ICOADS) y las medidas altimétricas de la base de datos AVISO DT CorSSH (figura 5). Los valores observados fueron siempre superiores a los datos satelitales, la diferencia de altitud se estableció en promedio de 0.18 m, no superando nunca 0.34 m. y una media de 0.25 m.

Las observaciones de los datos ICOADS fueron corregidas según el procedimiento propuesto por Gulev y Hasse (1998, 1999) [14, 15] y valida los estudios de climatología marina basados en el empleo de dicha base de datos, cuya extensión temporal es de más de un siglo.

ALTURA SIGNIFICATIVA MEDIA MENSUAL

La figura 6 muestra el histograma de distribución de valores de altura para la totalidad de las 6.261.540 observaciones y la escala de color usada en las figuras 7 y 8, que presentan los resultados obtenidos por cada uno de los 12 meses del año.

La cartografía mensual de la altura significativa media del oleaje evidencia la ocurrencia de dos temporadas de alturas máximas, separadas por un período de alturas mínimas, más o menos marcadas:

Una primera temporada, durante la cual el oleaje es más fuerte, se extiende de diciembre a marzo, con alturas máximas observadas en enero y febrero, meses en que los vientos alisios soplan con mayor intensidad (> 2.5 m. en las ventanas de Cartagena y Barranquilla y cerca de 2 m. en los sectores de Urabá y Riohacha).

En junio y julio, el regreso de los vientos del *Veranillo* provoca un nuevo incremento de la altura del oleaje, los valores pueden superar los 2 m. en los sectores de Cartagena y Barranquilla.

Entre esas dos temporadas de máximas, la altura significativa media es claramente más débil, particularmente en septiembre y octubre, con valores < 1 m. en el extremo sur del golfo de Urabá, ya que su ubicación le confiere protección.

Las alturas significativas medias y máximas registradas por los altímetros muestran claramente la influencia de las condiciones meteorológicas y las variaciones temporales del mar Caribe. En detalle, el año se divide en tres temporadas meteorológicas que influyen los regímenes de alturas significativas del oleaje.

La temporada seca se extiende de diciembre a abril, correspondiendo al período durante el cual la Zona de Convergencia Inter Tropical (ZCIT) se

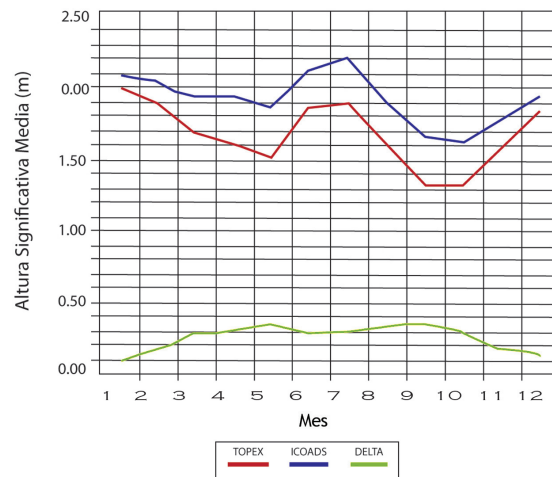


Figura 4. Alturas significativas de la media mensual observada (datos ICOADS) y la medida (datos TOPEX) en la Cuenca Colombiana para el período 1993-2003.

mueve a latitudes entre 0° y 5° sur. Esa posición permite al anticiclón de las Azores posicionarse más hacia el sur, en el océano Atlántico [16-18]. Eso provoca el fortalecimiento de los vientos alisios que soplan de manera muy regular e intensa con dirección norte y noreste. En frente de las costas colombianas, los vientos varían entre 2 y 16.6 m/s. La fuerza de los vientos aumenta generalmente al fin del día o durante la noche, momentos estos, cuando se registran las mayores alturas significativas del oleaje [16].

Durante el período de transición (mayo-julio) la ZCIT vuelve al hemisferio norte, los vientos

son débiles y de dirección variable. Oscila entre orientaciones sur, suroeste y norte – este (a SIOS) y velocidades entre 2.1 y 2.5 m/s. Durante este período, el oleaje proviene generalmente del sur, sur – oeste por la mañana, pero su orientación se modifica a lo largo del día, llegando a ser norte, norte – este en la noche. Los meses de junio y principios de julio son marcados por la influencia del *Veranillo* que puede provocar alturas del oleaje importantes [19].

En temporada de lluvia, la ZCIT se establece en su posición más septentrional, entre 8° y 12° de latitud norte. Los vientos alisios son enton-

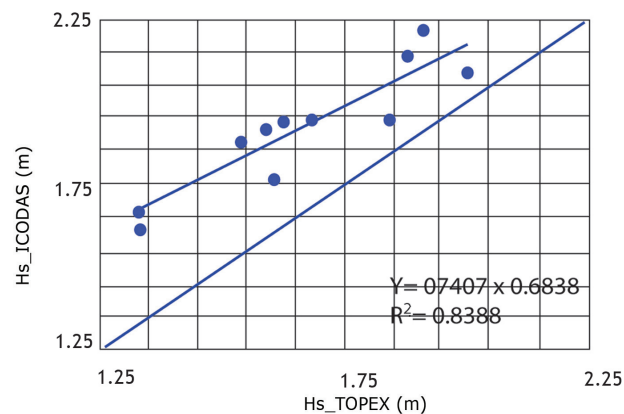


Figura 5. Representación de la relación entre altura significativa media mensual observada (datos ICOADS), y datos satelitales (datos Topex), para la Cuenca Colombiana en el período 1993-2003.

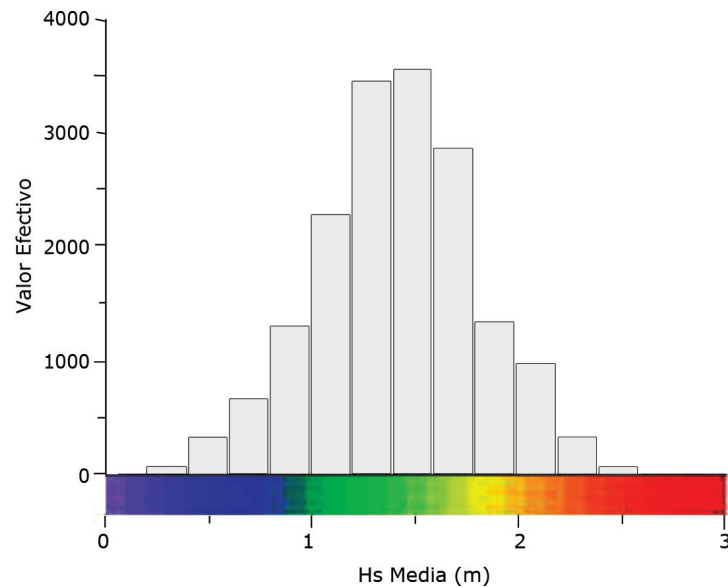


Figura 6. Histograma de los valores de la altura significativa media para la totalidad de las observaciones, después de agruparlos en ventanas de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. La misma convención gráfica es utilizada para las figuras 7 y 8.

ces sustituidos por vientos de menos fuerza. Se establecen con orientación sur, suroeste y velocidades medias del orden de 4.1 m/s. El oleaje en la costa es influenciado por esa dirección y es significativamente más débil. Sin embargo, en este período ocurren circulaciones ciclónicas que pueden generar, alrededor de las trayectorias, alturas significativas máximas extremas [19].

ALTURA SIGNIFICATIVA MÁXIMA MENSUAL

La figura 9 presenta el histograma de distribución de todos los valores de altura del oleaje, de las 6.261.540 observaciones agrupados en áreas de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ y la escala de color usada para las figuras 10 y 11, que presentan los resultados obtenidos por cada uno de los 12 meses del año.

Se encuentra la misma repartición temporal que para las alturas medias con valores que pueden ser muy fuertes en temporada de alisios (cerca de 6 m en inmediaciones de Barranquilla para el mes de enero).

VARIABILIDAD INTERANUAL

La variabilidad interanual de la altura significativa fue estudiada a escala mensual entre los

meses de septiembre 1992 y abril 2009, sobre tres ventanas de $1^\circ \times 1^\circ$ localizadas cerca de la Bahía de Cartagena, la desembocadura del Río Magdalena y del litoral de Riohacha. La cuarta ventana corresponde al sector frente al golfo de Urabá, pero su crónica inició en mayo de 1995. La figura 2 y la tabla 3, precisan la localización exacta de los sectores analizados.

ALTURA SIGNIFICATIVA MEDIA MENSUAL

Para cada una de las ventanas se representaron: las curvas de los valores medios de la altura significativa, el valor de la media climatológica de la altura significativa, calculada para todo el período de medidas, y la curva de la diferencia entre estos dos valores, para cada mes de la serie. Este último valor fue sumado a la variabilidad interanual residual de la altura significativa media de la serie a escala mensual (figura 12). El mismo procedimiento fue aplicado para la altura significativa mensual máxima (figura 13).

En cada sector se observó un aumento de la altura significativa media y máxima durante el *Veranillo*. Los valores de aumento de altura fueron poco significativos en el golfo de Urabá. El aumento de altura se vuelve más importante hacia el este, siendo claramente significativo

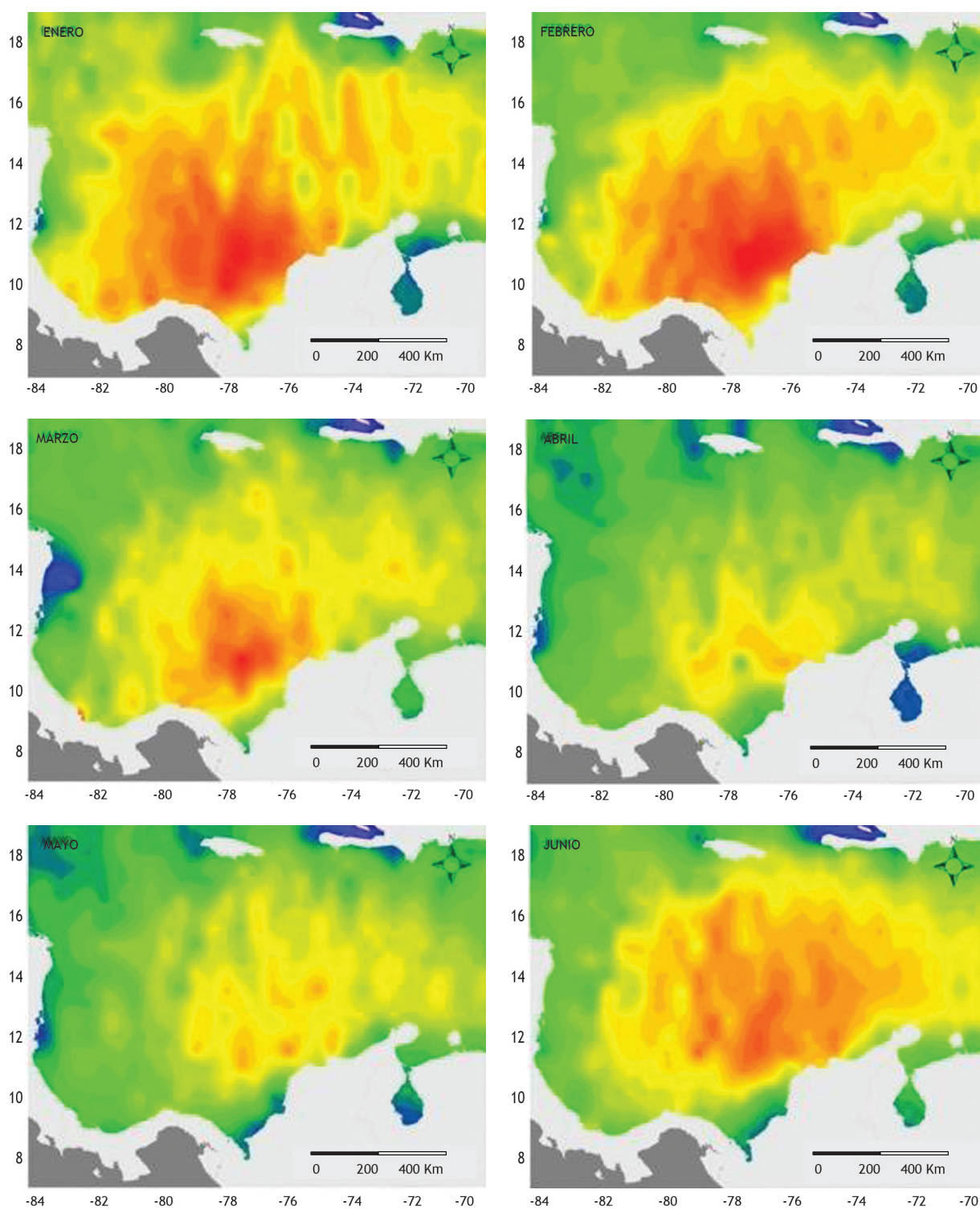


Figura 7. Cartografía de la altura significativa media del oleaje (H_s), para los meses de enero a junio (escala de color en la figura 6).

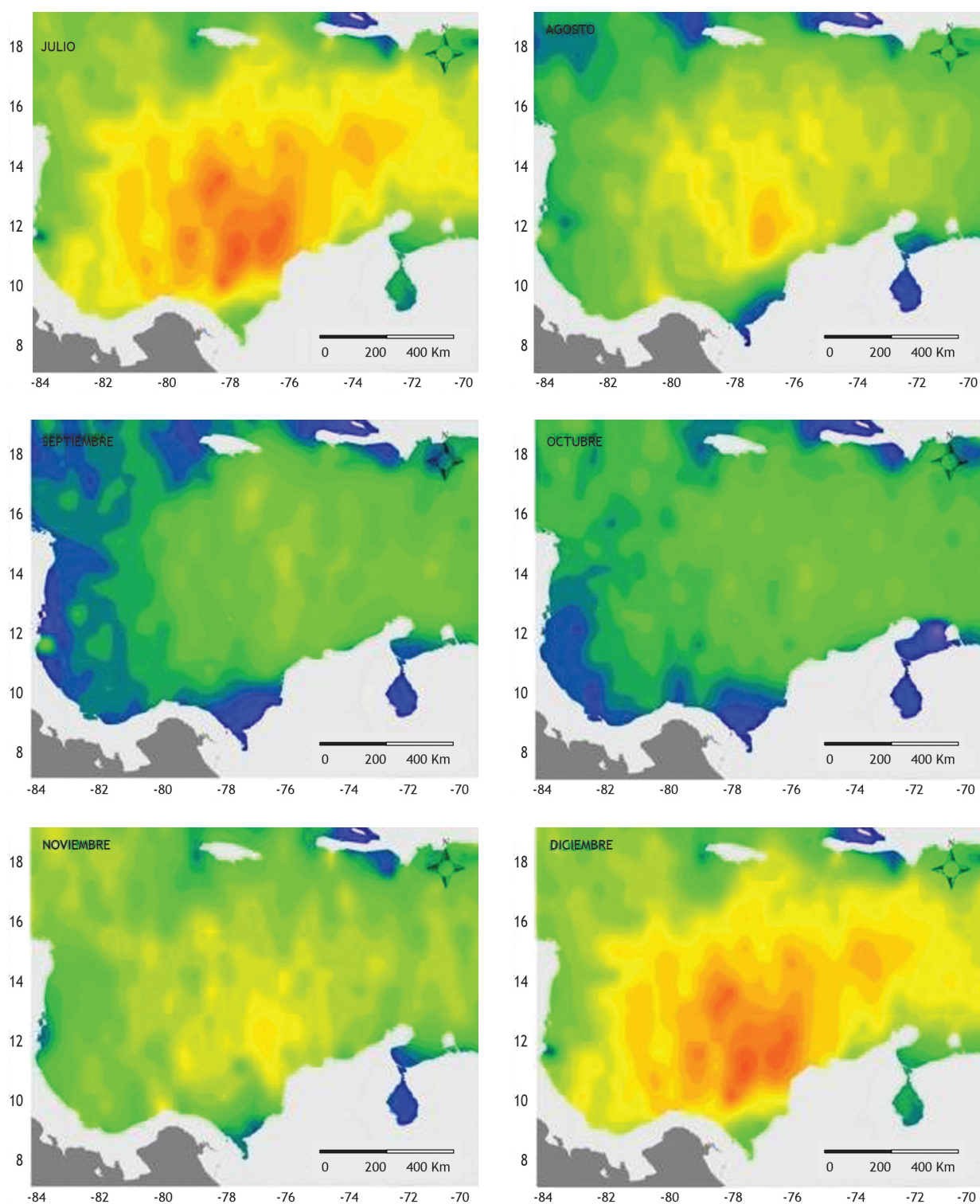


Figura 8. Cartografía de la altura significativa media del oleaje (H_s), para los meses de julio a diciembre (escala de color en la figura 6).

en Cartagena, Barranquilla, y predominante en Riohacha.

Es de destacar que la vulnerabilidad interanual residual de las series de datos no revela tendencia al aumento sobre el período estudiado.

DISTRIBUCIÓN DE VALORES EXTREMOS DE ALTURA SIGNIFICATIVA

La distribución del oleaje extremo suele ser descrito por la ley de Rayleigh [20], la ley de Weibull [21], o también por la ley de Gumbel [22].

Las leyes de Weibull, Gumbel o Frechet pueden usarse bajo una fórmula unificada denominada de Von Mises-Jenkinson [23, 24], fórmula que se consideró de mejor ajuste para nuestro estudio:

$$G(z) = \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(z - \frac{\mu}{\sigma} \right) \right]^{-1/\xi} \right\}$$

$$\text{Para } \left\{ z: 1 + \xi \left(\frac{z - \mu}{\sigma} \right) > 0 \right\}$$

Siendo ξ (parámetro de forma), $\sigma > 0$ (parámetro de escala) y μ real (parámetro de posición). La ley de Gumbel se consigue usando $\rightarrow 0$.

La fórmula estima el nivel de retorno z_p de una ola extrema de probabilidad p dada:

$$G(z_p) = 1 - p = \left\{ - \left[1 + \xi \frac{z_p - \mu}{\sigma} \right]^{-1/\xi} \right\}$$

$$z_p = \mu - \frac{\sigma}{\xi} \left[1 - \{ \log(1 - p) \}^{-\xi} \right] \quad \text{si } \xi \neq 0$$

$$z_p = \mu - \sqrt{\log \{ -\log(1 - p) \}} \quad \text{si } \xi = 0$$

Diferentes herramientas para el cálculo de la función de Valor Extremo Generalizado o GEV (por sus sigla en inglés), han sido propuestas por diferentes autores [23, 25, 26]. En nuestro caso, la función GEV fue calculada con el uso del lenguaje *R* propuesto por Guillerand et al., (2005)

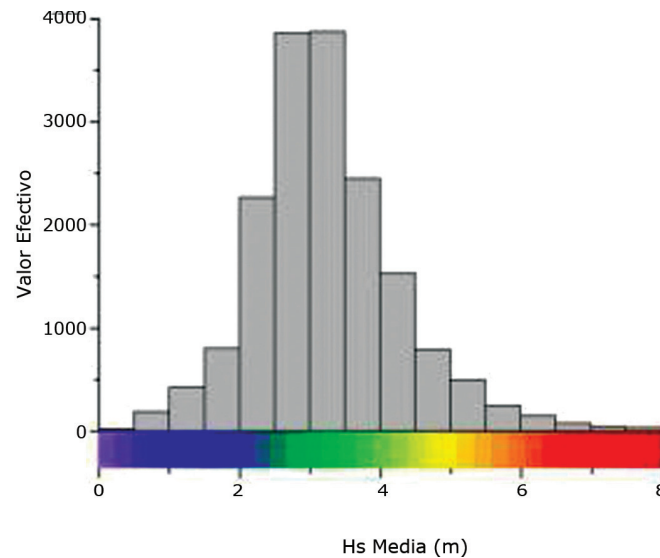


Figura 9. Histograma de los valores de la altura significativa máxima para la totalidad de las observaciones después de agruparlos en áreas de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. La misma convención gráfica es utilizada para las figuras 10 y 11.

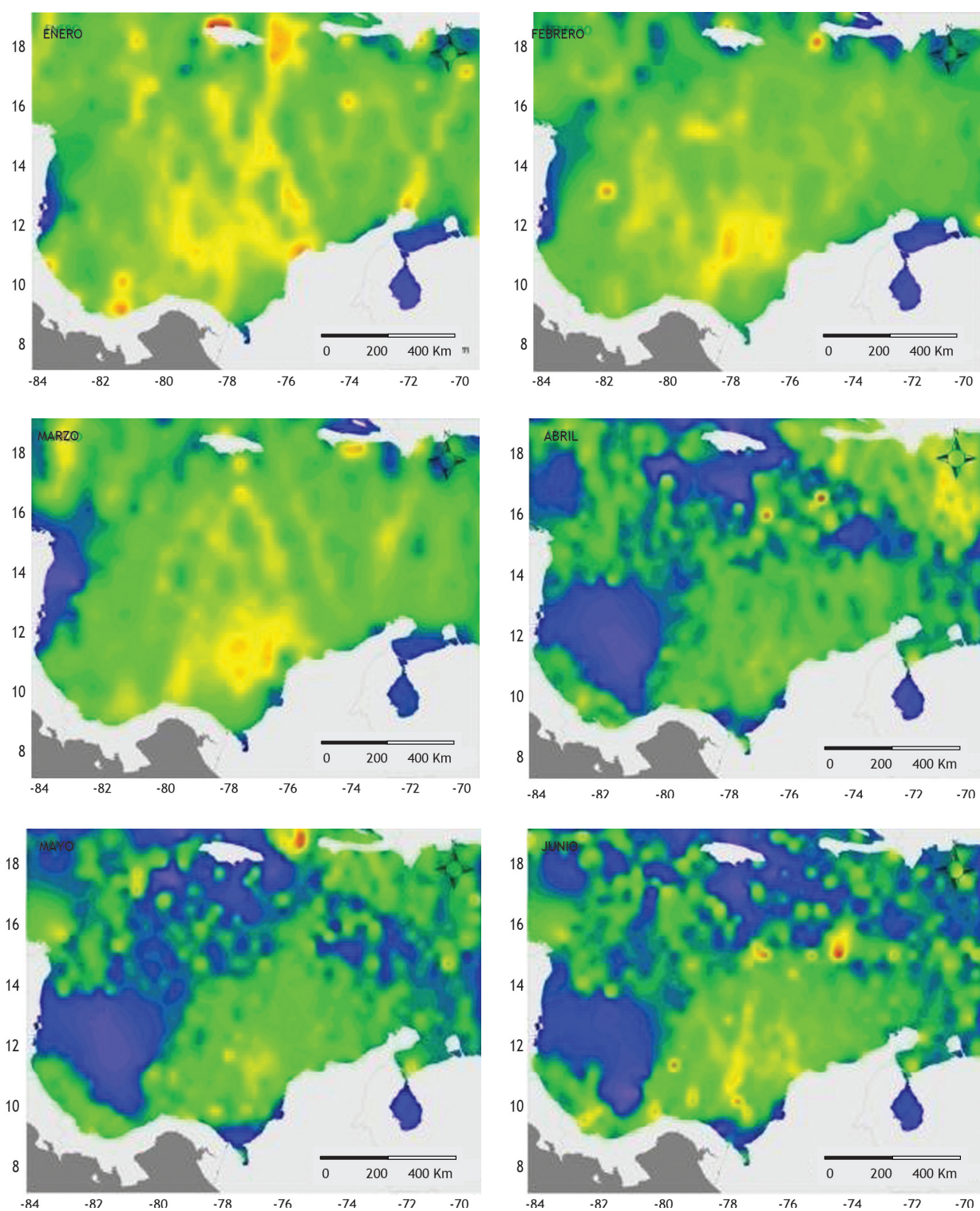


Figura 10. Cartografía de la altura significativa máxima del oleaje (H_s), para los meses de enero a junio (escala de color en la figura 9).

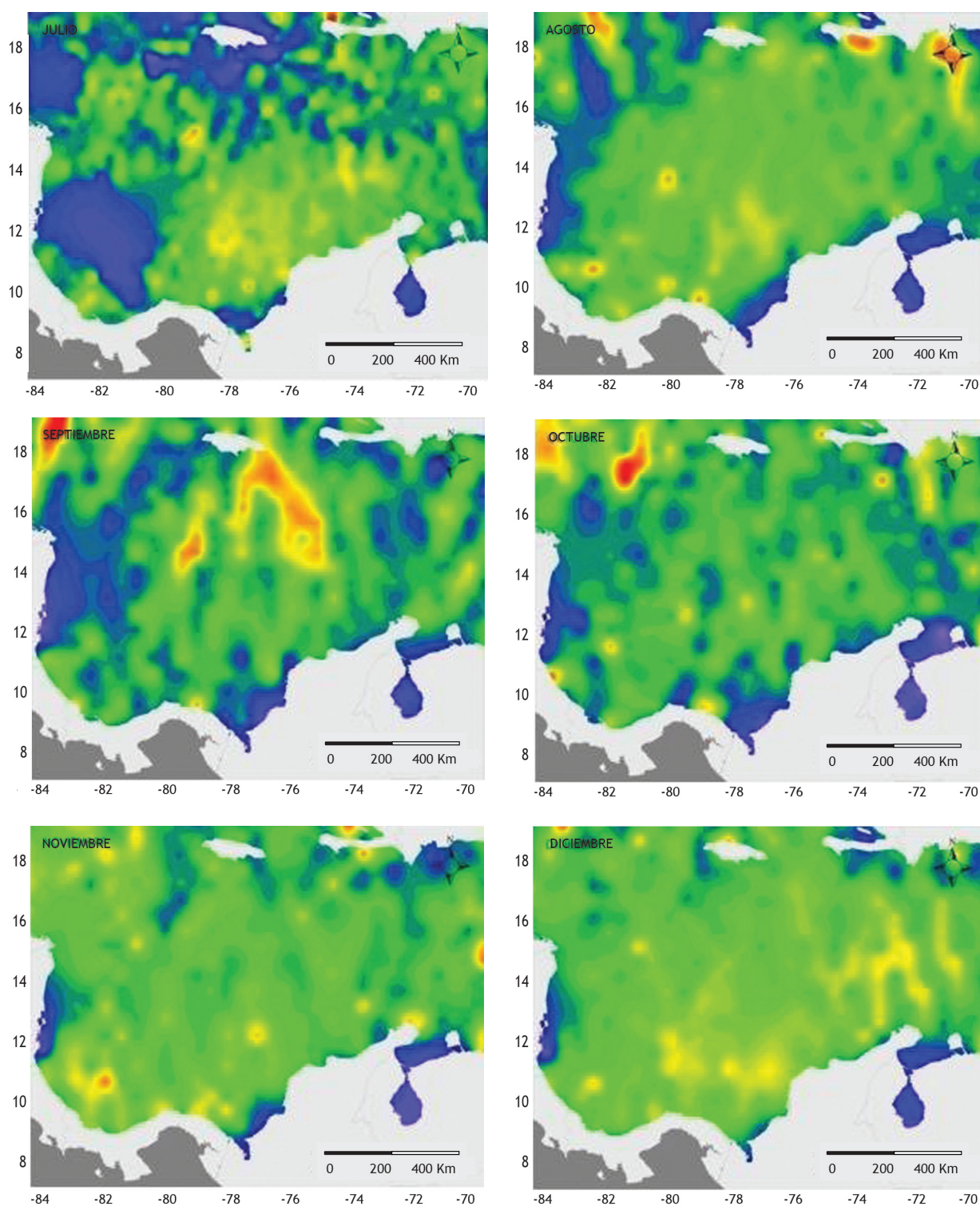


Figura 11. Cartografía de la altura significativa máxima del oleaje (H_s), para los meses de julio a diciembre (escala de color en la figura 9).

Tabla 3. Límite geográfico de las ventanas Urabá, Cartagena, Barranquilla y Riohacha, para análisis interanual de la altura significativa del oleaje.

Sector	Límite superior izquierda		Límite inferior derecho	
	Longitud	Latitud	Longitud	Latitud
Urabá	-77.50°	10.00°	-76.50°	9.00°
Cartagena	-76.66°	11.50°	-75.66°	10.50°
Barranquilla	-75.33°	12.33°	-74.33°	11.33°
Riohacha	-73.50°	12.83°	-72.50°	11.83°

*Altura significativa mensual media

[25], para cada una de las cuatro áreas de análisis, basándose en los valores máximos mensuales de altura significativa, para todo el período considerado. Cada ventana geográfica fue caracterizada con una tabla de 201 valores, excepto el área de Urabá que contó con solo 168 valores. La tabla 4, sintetiza los resultados obtenidos y presenta el número de valores para altura significativa de la máxima anual, decenal, y centenal, calculados a partir de la función GEV. La figura 14, ilustra las curvas de retorno de la altura significativa máxima de las olas, para cada ventana.

Aunque se tuvo a disposición más de 12 años de observaciones de oleaje, los valores de altura de ola de ocurrencia anual y decadal no mostraron un aporte destacado en la distribución sobre la curva de ajuste, de ahí que los órdenes de altura se muestran, entonces, *alisados* (figura 14).

Los órdenes de alturas del oleaje centenal deben ser claramente tenidos en cuenta con precaución. Oleaje anual de 3.5 m., decadal de 4.2 m. y centenal de 4.7 m. son observables al este del sector estudiado Riohacha, valores que aumentan para llegar respectivamente a 4.5, 5.2 y 5.6 m. para el sector Cartagena. Valores bajos se observan en el sector Urabá, situado en posición relativamente protegida: 3.8, 4.8 y 5.6 m.

Estos resultados son coherentes con estudios previos sobre altura significativa y extrema del oleaje en el Caribe colombiano [27, 28].

CONCLUSIONES

Durante el período 1992-2009, no se observó tendencia alguna en el aumento de la altura

significativa del oleaje (cf. § 3.2). Sin embargo, en el caso de aumento del nivel medio absoluto del mar de aquí al fin del siglo, respecto del fenómeno de calentamiento global [29], puede resultar un fortalecimiento significativo del impacto de oleaje de altura extrema en la costa. Las olas pueden romper con un nivel de base más alto. Como datos de referencia, los escenarios globales del IPCC predicen valores de aumento entre +18 y + 58 cm de aquí a 2100 [29], reconsiderados entre + 45 cm. y 1.45 m. si se toma en cuenta una desestabilización de los casquetes polares [30, 31, 32].

El efecto de ese oleaje podría ser fortalecido por fenómenos locales de erosión o de subsidencia que acentúen el aumento de nivel medio del mar, como en el sector de Cartagena (aumento del nivel marino medio relativo) de 5,6 mm. por año, observado entre 1952 y 1992 [33, 34, 35].

En ese contexto, y considerando los valores de oleaje extremo propuesto en la tabla 4, oleaje de períodos de retorno de 50 años podrían acercarse a los 5 m. generando daños importantes e inundaciones en sitios sensibles a fuerte oleaje, como Cartagena de Indias.

Los resultados muestran la distribución geográfica de la altura media significativa del oleaje, en las regiones estudiadas con valores significativos para cada una de ellas, y su relación directa con la distribución de la intensidad y dirección del viento.

Durante el período 1992-2009, no se observó ninguna tendencia en el aumento de la altura significativa del oleaje en los sectores estudiados.

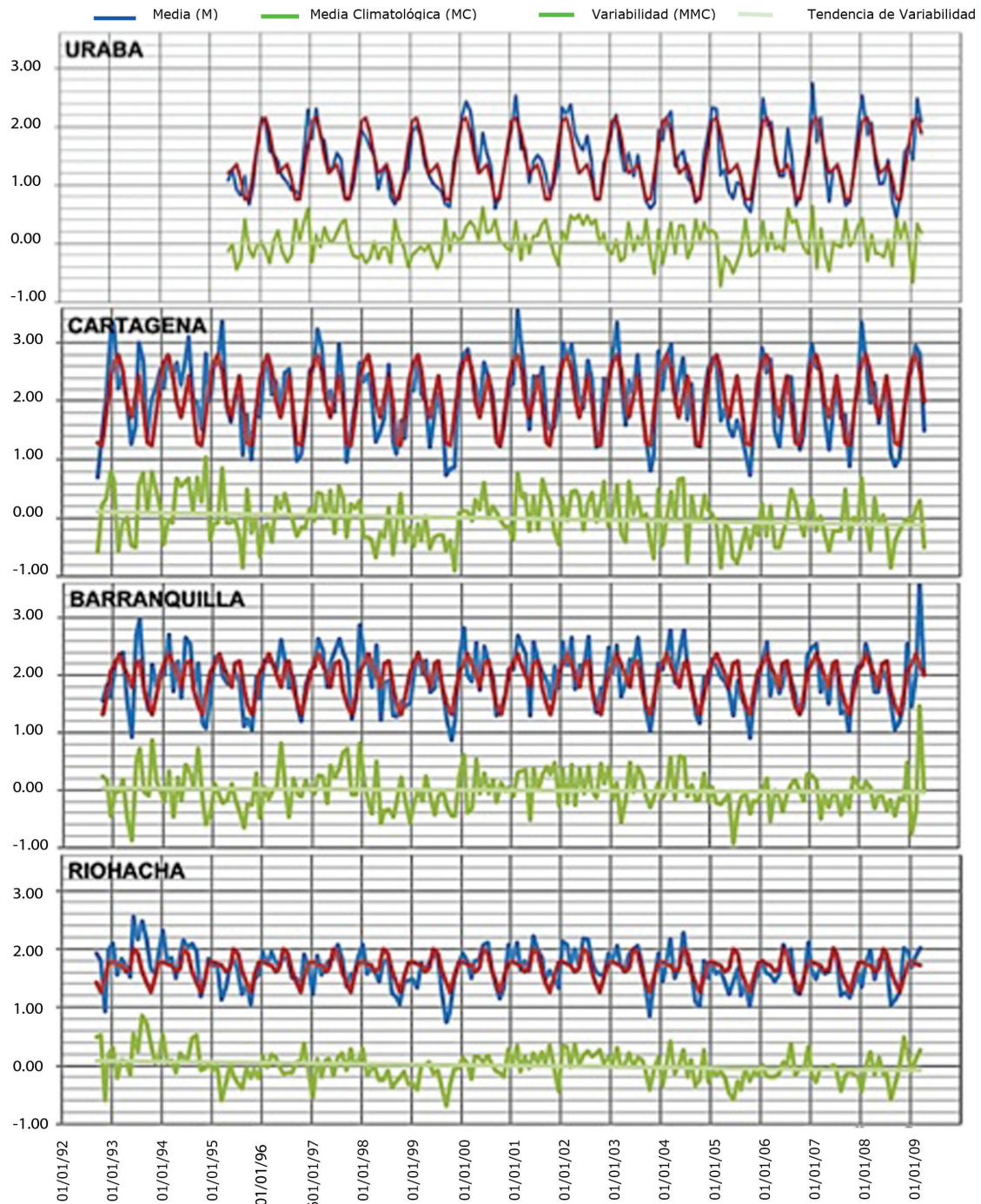


Figura 12. Altura significativa mensual media, altura significativa mensual media climatológica y variabilidad mensual de la altura significativa media, calculada a partir de las observaciones de los satélites Topex-Poseidon, ERS-2, Geosat-2, Jason-1 y Envisat para los sectores de análisis (ventanas) de Urabá, Cartagena, Barranquilla y Riohacha en el período 01/10/1992 a 06/04/2009.

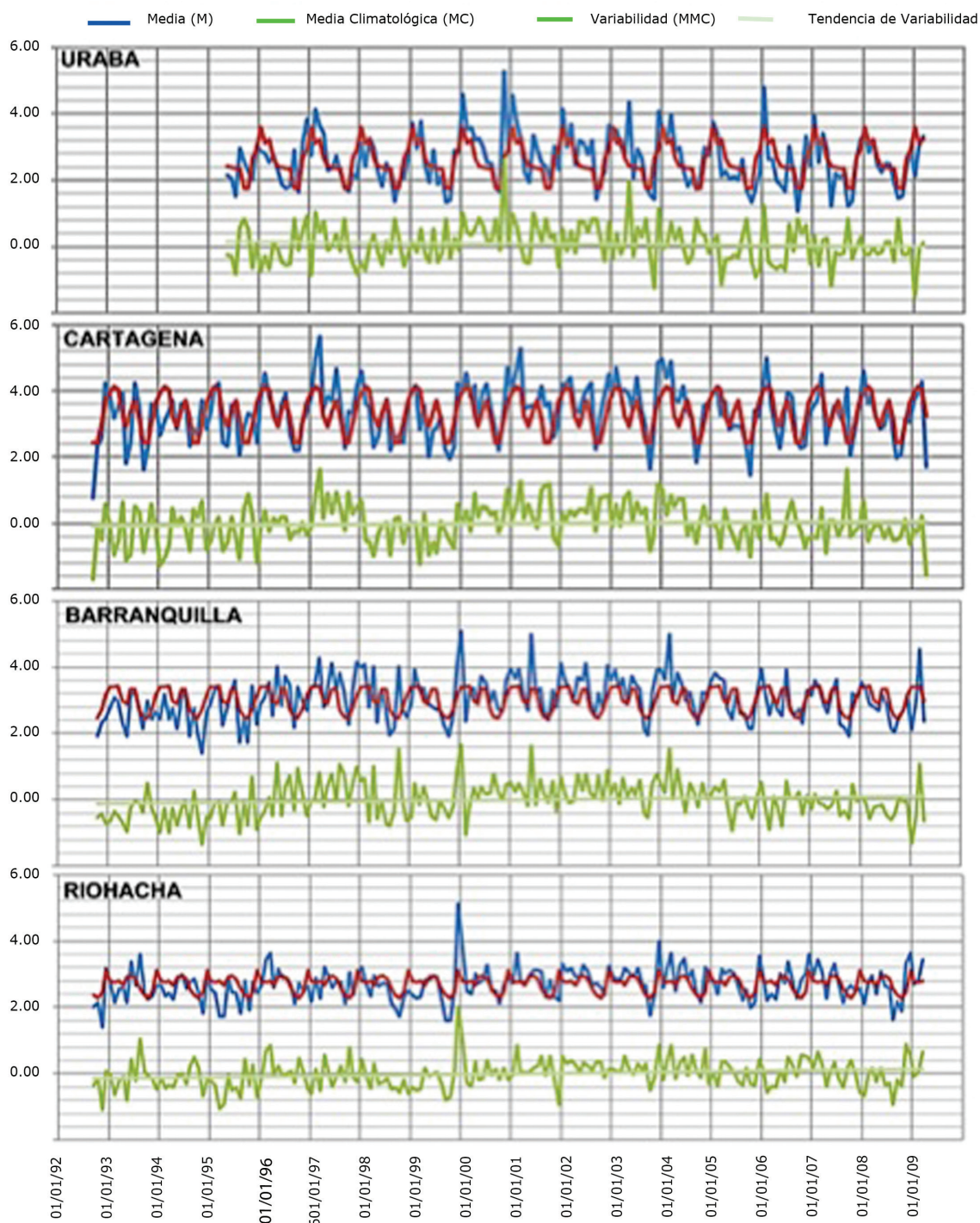


Figura 13. Altura significativa mensual máxima, altura significativa mensual máxima climatológica y variabilidad mensual de la altura significativa máxima, calculada a partir de las observaciones de los satélites Topex-Poseidon, ERS-2, Geosat-2, Jason-1 y Envisat para los sectores de análisis (ventanas) Urabá, Cartagena, Barranquilla y Riohacha en el período 01/10/1992 a 06/04/2009.

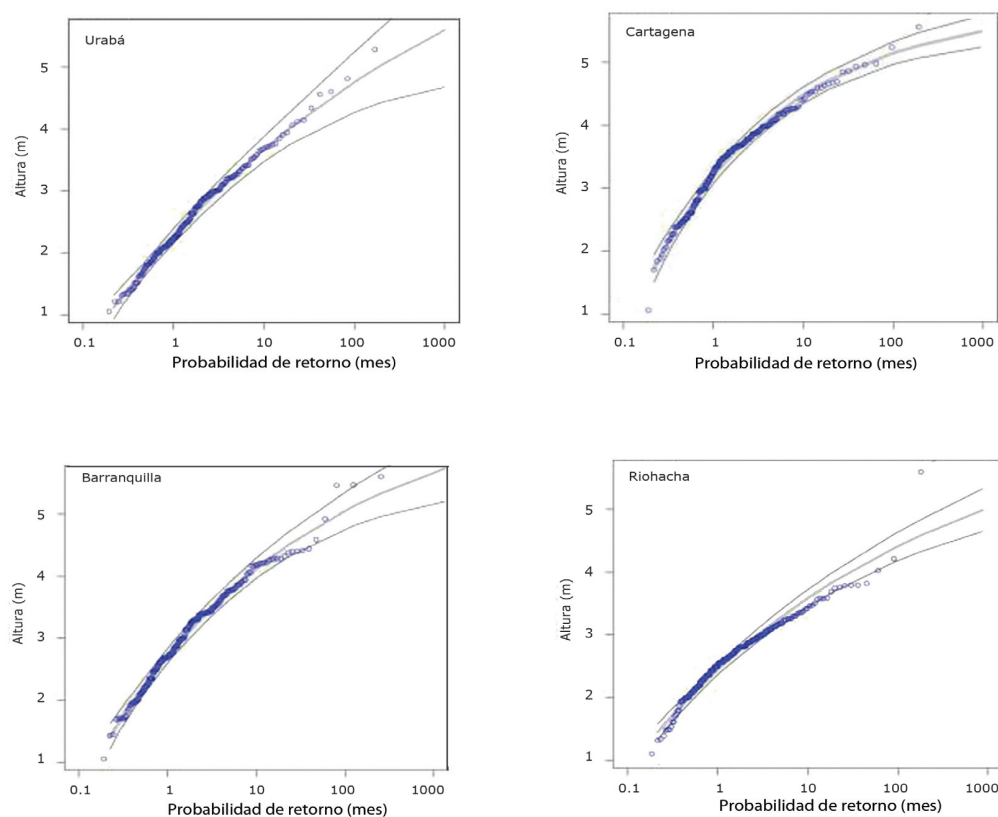


Figura 14. Probabilidad de retorno en meses de la altura significativa máxima, dada en metros para los sectores Urabá, Cartagena, Barranquilla y Riohacha.

Tabla 4. Parámetros de la función GEV y valores de retorno de olas de ocurrencia 1, 10, 25, 50 y 100 años para los cuadros Urabá, Cartagena, Barranquilla y Riohacha. En *itálicas* figuran los intervalos de confianza por un umbral de 95%.

Parámetros	μ	σ	ξ			
Urabá	2.26941	0.69169	-0.11208			
Cartagena	3.06889	0.82561	-0.28322			
Barranquilla	2.78862	0.62170	-0.18715			
Riohacha	2.50053	0.47685	-0.13679			
Retorno	1 año	10 años	25 años	50 años	100 años	
Urabá	3.75 <i>3.55,4.00</i>	4.83 <i>4.45,5.57</i>	5.18 <i>4.70,6.20</i>	5.43 <i>4.86,6.65</i>	5.65 <i>5.00,7.10</i>	
Cartagena	4.52 <i>4.39,4.68</i>	5.23 <i>5.07,5.51</i>	5.40 <i>5.24,5.74</i>	5.51 <i>5.33,5.89</i>	5.59 <i>5.41,6.01</i>	
Barranquilla	4.01 <i>3.88,4.17</i>	4.75 <i>4.54,5.13</i>	4.97 <i>4.72,5.45</i>	5.11 <i>4.83,5.68</i>	5.23 <i>4.92,5.89</i>	
Riohacha	3.49 <i>3.38,3.62</i>	4.17 <i>4.01,4.42</i>	4.39 <i>4.21,4.70</i>	4.53 <i>4.33,4.90</i>	4.66 <i>4.45,5.09</i>	

TRABAJOS FUTUROS

La limitación de la altimetría de radar es que provee únicamente el dato de altura del oleaje, pero la caracterización completa se puede obtener mediante la utilización conjunta de un radar altímetro y de un radar de apertura sintética. El primero, ofreciendo la información sobre la altura de las olas, y el segundo, complementándolo con indicaciones sobre la longitud de la onda y la dirección de propagación.

Ese complemento de información de la altura significativa puede también lograrse usando datos adquiridos de manera análoga por buques seleccionados (observaciones de oportunidad), por medidores de oleaje (mediciones) o por modelación (cálculos); trabajo que permitiría completar el conocimiento del clima del oleaje en la Cuenca de Colombia.

AGRADECIMIENTOS

Los datos altimétricos DT / CorSSH / REF fueron producidos por la División de Oceanografía Espacial del CLS y distribuidas vía FTP por AVISO, con el soporte del CNES. Los autores agradecen la facilitación del acceso a esa base de datos. Así mismo, los autores reconocen el aporte de los revisores del Consejo Editorial por sus acertados comentarios y correcciones al manuscrito final.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Baird & Associates. Pacific Ocean wave information study. Validation of wave model results against satellite altimeter data. W.F. Baird & Associates Coastal Engineers LTD., Madison, Wisconsin, 2005.13 p.
- [2] Thomas Y. F, Senhoury E-M A. Distribution de la hauteur significative en Afrique de L'ouest mesurée par le radiometre Topex – Poseidon. Photo Interpretation, 2007; 2007-1: 25-32 et 45-48.
- [3] Fu L-L, Cazenave A. Satellite Altimetry and Earth Sciences. San Diego, Academic Press Ed., 2001. 465 p.
- [4] Ollivier A, Faugere ,y Picot N, Femenias P. ENVISAT Jason-2 Cross calibration. Poster presented at OSTST meeting, Nice, France, 09-12 November 2008. Available at:

<http://www.aviso.oceanobs.com/fileadmin/documents/OSTST/2008/ollivier.pdf>.

- [5] Aviso. DT/ CorSSH and DT/ SLA Product Handbook. CLS-DOS-NT-05-097, Version: 1, rev1, October 17, 2005. 24 p.
- [6] Evans J. MEXNC, SNCTOOLS, and the NetCDF Toolbox. 2009. <http://mexcdf.sourceforge.net/>.
- [7] Queffeulou P. Long-term quality status of wave height and wind speed measurements from satellite altimeters. ISO-PE-2003 Conference Proceedings, Honolulu, Hawaii, May 25-30, 2003. 7 p.
- [8] Queffeulou P, Bentamy A, Guyader J. Satellite wave height validation over the Mediterranean Sea. Proceedings of the 2004 Envisat and ERS Symposium, Salzburg, Austria, 6-10 September 2004 (ESA SP-572, April 2005). 2004. 5 p.
- [9] Ablain M, Mertz F. TOPEX / Poseidon validation activities 12 years of T/P data (GDR-Ms). Ramonville Saint-Agne, CNES/CLS Ed., Contract No 03/CNES/1340/00-DSO310-lot2.C, 2005. 98 p.
- [10] Queffeulou P, Bentamy A. Analysis of Wave height Variability Using Altimeter measurements: Application to the Mediterranean Sea. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2007; 24: 2078-2092.
- [11] Woodruff SD, Diaz HF, Elms JD, Worley SJ. COADS Release 2 Data and Metadata Enhancements for Improvements of Marine Surface Flux Fields. Physics and Chemistry of the Earth, 1998; 23: 517-527.
- [12] Thomas YF. Climatologie des vagues pour la mer territoriale sous juridiction colombienne (8° à 19° N – 69° à 84° W) : analyse des données ICOADS. Paris, rapport de convention LGP-INVEMAR. 2006-a. 127 p.
- [13] Thomas YF. Climatologie des vagues pour la mer territoriale sous juridiction colombienne (8° à 19° N – 69° à 84° W) : analyse des données du satellite TOPEX – POSEIDON. Paris, rapport de convention LGP-INVEMAR. 2006-b. 69 p.
- [14] Gulev SK, Hasse L. North Atlantic Wind Waves and Wind Stress Fields from Vo-

- luntary Observing Ship Data. *Journal of Physical Oceanography*, 1998; 28: 1107-1130.
- [15] Gulev SK, Hasse L. Changes of Wind Waves in the North Atlantic over the last 30 Years. *International Journal of Climatology*, 1999; 19: 1091-1117.
- [16] Andrade CA. Análisis de la velocidad del viento en el Mar Caribe con datos de GEOSAT. *Boletín Científico CIOH*, 1993; 13: 33-44.
- [17] Wang C. Variability of the Caribbean low-level jet and its relations to climate. *Climate Dyn.*, 2007; 29: 411-422.
- [18] Wang C, Lee SK, Enfield D. Climate Response to Anomalous Large and Small Atlantic Warm Pools during the Summer. *Journal of Climate*, 2008; June, 2008: 2437-2450.
- [19] Andrade CA, Barton ED. The Guajira Upwelling System. *Continental Shelf Research*, 2005; 25: 1003-1022.
- [20] Bonnefille R. *Cours d'hydraulique maritime*. Paris, Masson Ed.; 1980. 171 p.
- [21] Boccotti P. *Wave Mechanics for Ocean Engineering*. Amsterdam, Elsevier Ed.; 2000. 495 p.
- [22] Calverely MJ, Szabo D, Cardone VJ, Orelup EA, Parsons MJ. *Wave Climate Study of the Caribbean Sea*. 7th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting. October 21-25, 2002, Banff, Alberta, Canada. 2002.
- [23] Coles S. *An Introduction to Statistical Modelling of Extremes Values*. London, Springer Ed.; 2001. 208 p.
- [24] Klajnmic H. Estimation et comparaison de niveaux de retour pour les vitesses extremes des vents. *Modulad*, 2005; 35: 29-41.
- [25] Guillerand E, Katz R, Young G. *Extremes Toolkit, Weather and Climate Applications of Extreme Value Statistics*. Boulder, National Center for Atmospheric Research. 2005. 137 p.
- [26] The WAFO Group. *A Matlab ® Toolbox for Analysis of Random Waves and Loads*. Lund, Lund Institute of Technology – Centre for Mathematical Sciences. 2000: 112 p.
- [27] Agudelo P, Restrepo AF, Molares R, Tejad-CE, Torres R, Osorio AF. Determinación del clima de oleaje medio y extremal en el Caribe colombiano. *Boletín Científico CIOH*, 2006; 23: 33-45.
- [28] Osorio AF, Mesa JC, Bernal GR, Montoya RD. Reconstrucción de cuarenta años de datos de oleaje en el mar Caribe. *Boletín Científico CIOH*, 2009; 27: 37-56.
- [29] IPCC. Contribution of working group I to the Fourth Final report, Working Group I: The physical basis of Climate change. Intergovernmental Panel for Climate Change. 2007. <http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/wg1-report.html>.
- [30] Rahmstorf S. A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise. *Science*, 2007; 315: 368-370.
- [31] Rahmstorf S, Cazenave A, Church JA, Hansen JE, Keeling RF, Parker DE, Somerville RCJ. Recent Climate Observations Compared to Projections. *Science*, 2007; 316: 709. DOI : 10.1126/science.1136843.
- [32] Grinsted A, Moore JC, Jevrejeva S. « Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100 AD”. *Climate Dynamics*, 2009: 10. www.springerlink.com.
- [33] Torres PR, Gomez LJC, Afanador FF. Variación del nivel medio del mar en el Caribe colombiano. *Boletín Científico CIOH*, 2006; 24: 64-72.
- [34] Lerma AN, Thomas Y-F, Durand P, Torres RR, Andrade CA. Variabilidad del nivel del mar desde 1950 hasta el 2000 y riesgos asociados a episodios de Mar de leva en las Penínsulas de Bocagrande y Castillogrande, Cartagena de Indias, Colombia. *Boletín Científico CIOH*, 2008; 26: 71-84.
- [35] Andrade CA. Cambios recientes del nivel del mar en Colombia. En: *Deltas de Colombia: morfodinámica y vulnerabilidad ante el Cambio Global*, Restrepo JD (editor), Fondo Editorial Universidad EAFIT, COLCIENCIAS; 2008. p. 101-121.