

La influencia de la descarga del Canal del Dique en los niveles del mar de la Bahía de Cartagena-Colombia

The influence of the Dique Channel discharge on the sea water level of Cartagena Bay-Colombia

Fecha de recepción: 2012-01-17 / Fecha de aceptación: 2012-07-23

Ricardo Molares¹ y Marc Mestres^{2 y 3}

¹ Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH). Barrio El Bosque, Isla de Manzanillo, Escuela Naval "Almirante Padilla", Cartagena, Colombia. Correo electrónico: jefcioh@dimar.mil.co / ricardomolares@yahoo.com. Tel: +57 (5) 672 53 89. Fax: +57 (5) 669 41 24.

² Laboratori d'Enginyeria Marítima (LIM-UPC), Universitat Politècnica de Catalunya. C/ Jordi Girona 1-3, Mòdul D1, 08034 Barcelona, España. Correo electrónico: marc.mestres@upc.edu. Tel: 34 93 401 69 00. Fax: 34 93 401 65 04.

³ Centre Internacional d'Investigació dels Recursos Costaners (CIIRC). C/ Jordi Girona 1-3, Mòdul D1, 08034 Barcelona, España.

Molares, R. y Mestres, M. 2012. La influencia de la descarga del Canal del Dique en los niveles del mar de la Bahía de Cartagena-Colombia. Bol. Cient. (3): 13-28.

RESUMEN

El incremento en los eventos de inundaciones no relacionados con marejadas es frecuente en Cartagena de Indias, Colombia, durante los meses de octubre y noviembre. Esta situación pone en riesgo las inversiones realizadas por la Administración Municipal y por la empresa privada, en torno a la infraestructura turística alrededor de la bahía, pues parte de su economía giran alrededor de actividades turísticas y marítimas.

Los eventos de inundación podrían relacionarse con la descarga de agua dulce del Canal del Dique en la Bahía de Cartagena, teniendo en cuenta que el nivel del mar en la bahía muestra una fluctuación anual similar a la del caudal de la descarga del Canal del Dique, el cual está relacionado con el régimen de precipitación en el área. Con el propósito de determinar los efectos de la descarga del Canal en el nivel del mar en la bahía, se aplica el modelo ROMS_AGRIF (*Regional Ocean Modelling System*), comparando escenarios de años de alta precipitación (1988-Evento 'La Niña') con años regulares (1990).

Los resultados muestran una anomalía en el nivel del mar en la costa noreste de la bahía en cerca de +2 cm durante la época de lluvias, para los años con lluvias promedio; mientras que éste aumenta (+3 cm) durante años con alta precipitación. Considerando un escenario extremo y asumiendo un caudal de descarga mayor que el presentado en años con descarga extrema (La Niña), se sugiere que no se producen altos impactos en el nivel del mar de la Bahía de Cartagena.

Considerando el aumento del nivel del mar en la Bahía de Cartagena reportado por varios autores, entre 4,5 y 5,98 mm/año, las autoridades deberán tomar las decisiones necesarias para proteger la ciudad de la inundación. Los resultados presentados aquí revelan que, aunque el manejo y control de la descarga del Canal del Dique durante la estación de lluvias podría llevar a una pequeña reducción del nivel del mar en la costa noreste de la bahía, esa medida no representa un avance importante y una solución a largo plazo.

Palabras clave: Canal del Dique, Bahía de Cartagena, aumento del nivel del mar, inundación, La Niña.

ABSTRACT

Increasingly flooding events, unrelated to storm surges, are frequent in Cartagena de Indias, Colombia, during October-November. This situation is jeopardizing large economical investments in touristic infrastructure around the bay, in a city in which the main economical activity is related to the tourism and maritime activities.

The flooding events could be related to the freshwater discharge into Cartagena Bay from the Dique Channel, since the sea water level in the bay shows a yearly fluctuation similar to that of the Dique Channel flow rate, which is related to precipitation. The Regional Ocean Modelling System (ROMS_AGRIF) is applied in order to determine the effects of the Dique Channel discharge on Cartagena Bay's water level, comparing high precipitation years (1988 - La Niña event) with regular precipitation years (1990).

The results show a water level anomaly at the north-east coast of the bay of about +2 cm during the rainy season for average precipitations years, but increased (+3 cm) during high precipitation year. Considering an extreme scenario and assuming higher flow rate discharge of the Dique Channel than the presented during extreme discharges years (La Niña), suggest not to produce high impacts on the Cartagena Bay water level.

Considering the sea level rise for Cartagena de Indias reported by various authors, between 4,5 - 5,98 mm/yr, decisions have to be made to protect the city from flooding. The results presented here reveal that, although the management and control of the Dique Channel discharge during the rainy season could lead to a small reduction in the water level at the north-eastern coast of the bay, this measure does not represent a particularly important advance and long-term solution.

Key words: Dique Channel, Cartagena Bay, water level, flooding, La Niña event.

INTRODUCCIÓN

El aumento del nivel del mar (ANM) debido al cambio climático es una de las más grandes preocupaciones en la zona costera [1] [2] [3] y particularmente en zonas planas [4], no solamente en aquellas áreas no intervenidas, sino también en zonas costeras urbanizadas. Normalmente el ANM es relacionado con el incremento del volumen de agua debido al aumento de las temperaturas que disparan la expansión térmica del agua de los océanos, y el derretimiento de los glaciares [5]. El movimiento vertical del terreno (subsistencia), debido a causas geológicas o inducidas por el ser humano, es tomado en consideración con el ascenso del nivel del mar para derivar el aumento relativo del nivel del mar [6] [7] [8].

El cambio climático es generalmente asociado al incremento de la temperatura, ya que éste es un parámetro básico medible; éste también causa cambios en los patrones del viento [9] [10], en la intensidad o frecuencia de tormentas [11] [12]; así como también de la lluvia y de la escorrentía [5] [13]. Aunque no se ha llegado a un consenso sobre la actividad futura de la actividad de El Niño [14] [15], recientemente encontraron, después de hacer 79 simulaciones de doce diferentes modelos climáticos, acoplado el océano y la atmósfera, y evaluando seis diferentes escenarios del IPCC, un incremento en el número de anomalías del tipo La Niña en el sector del océano Pacífico a partir del 2050. Sin embargo, en general, sus resultados simplemente representan un cambio en el estado base del ENOS (El Niño Oscilación del Sur) para el futuro. Eso es particularmente importante en el caso de la costa Caribe colombiana [16], considerando que durante la fase fría del ENOS (La Niña) se detecta una anomalía positiva en las precipitaciones [17].

El incremento de las lluvias y, consecuentemente, del caudal de descarga de los ríos cambiarán la salinidad y, si no se controla, también la introducción de nutrientes en las aguas costeras; lo que puede resultar en eventos futuros de eutrofización [18] [19]. En escenarios específicos, como en bahías semi-cerradas o en pequeños estuarios, es posible que resulten incrementos en los caudales de descarga de ríos, lo que resulta en la elevación del nivel del mar [20].

El aumento del nivel del mar ha atraído mucha atención en la ciudad de Cartagena, principalmente porque ésta se encuentra situada en

una costa plana, sujeta a procesos de subsistencia local [22] (determinó una rata de hundimiento del orden del 1,4 mm/año) y porque durante los últimos años la ciudad ha sufrido de inundaciones entre los meses de octubre y noviembre. Considerando la estimación del ascenso relativo del nivel del mar entre 4,5 y 5,98 mm/año, dependiendo de diferentes autores [23] [24] [25] y ya que las inundaciones están sucediendo durante la época de lluvias (octubre–noviembre), unos pocos centímetros adicionales en el nivel del mar, debido a la descarga del Canal del Dique, podría representar efectos importantes, considerando que en estos meses ocurren los mayores caudales del Canal.

Empleando diferentes metodologías se han analizado las variaciones del nivel del mar en la Bahía de Cartagena. Usando datos del nivel del mar de la Bahía de Cartagena [26] no se encontró una correlación significativa entre la elevación del nivel del mar debido a tormentas y la información meteorológica local o semi-local. Ellos observaron que el incremento del nivel del mar a lo largo del año no era coincidente con los eventos de inundaciones en la costa que enfrenta el mar abierto, debido a la marejada producto de tormentas. Para esos autores, la elevación del nivel del mar debe ser relacionada con la variación del caudal de descarga del Canal del Dique.

Por otra parte, aunque numerosos proyectos de investigación han estudiado la Bahía de Cartagena empleando modelación numérica, su propósito ha sido evaluar la circulación del agua y su calidad [27] [28] [29] [30] [31] [32] [33] [34], sin considerar las variaciones del nivel del mar. Para llenar ese vacío, el objetivo de este estudio es evaluar los efectos de la descarga del Canal del Dique en el nivel del mar de la Bahía de Cartagena.

ÁREA DE ESTUDIO

La Bahía de Cartagena (Figura 1) es un cuerpo de agua semicerrado situado en la costa Caribe colombiana, entre 10°16'N y 10°26'N; 75°30'W y 75°35'W. Tiene cerca de 16 km de largo y 9 km de ancho, con una profundidad promedio de 16 m; está separada del mar abierto por la isla Tierrabomba (6,5 por 6,0 km, con una altura máxima de 80 m), lo que crea dos entradas que conectan el agua de la bahía con el mar abierto (Bocachica y Bocagrande). En la costa norte de la Bahía se encuentra la ciudad de Cartagena de Indias, mientras que al sur de la Bahía se ubica

la desembocadura del Canal del Dique, que descarga agua dulce a la bahía con diferentes ratas. Durante la época seca, en la que el caudal del Canal del Dique es el más bajo, en la bahía se experimentan también los valores más bajos del

nivel del mar. Por el contrario, los mayores valores del nivel del mar se observan durante la época de lluvias, entre los meses de septiembre y noviembre (Figura 2).

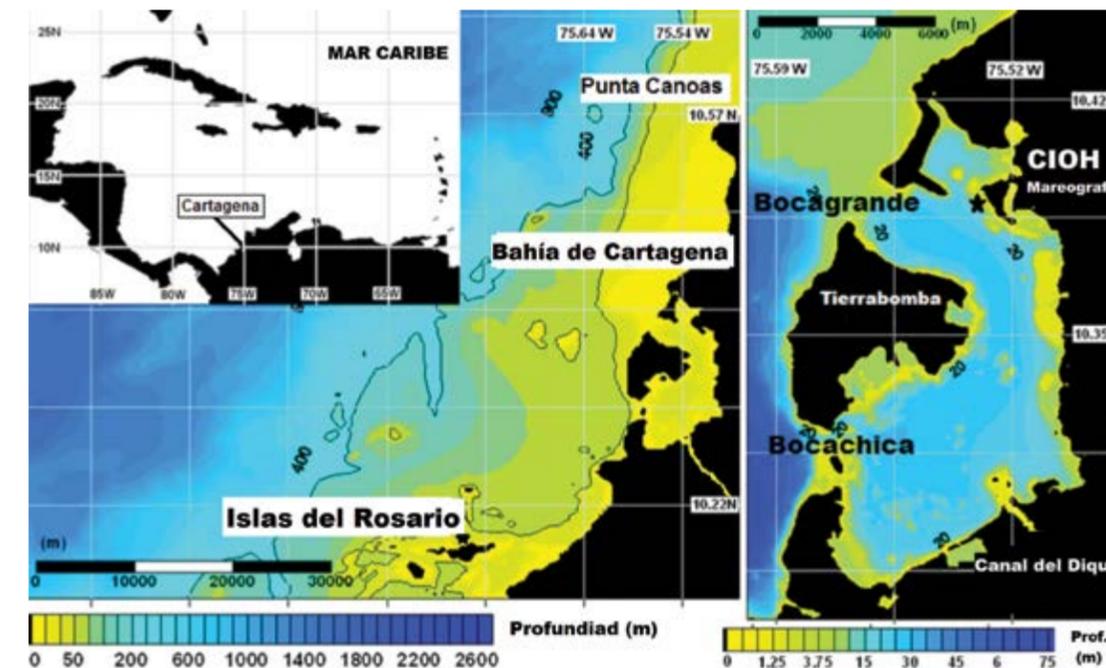


Figura 1. De izquierda a derecha: localización general de la ciudad de Cartagena; sección de la costa colombiana en el Caribe entre Punta Canoas (Norte) y las Islas del Rosario (Sur); Bahía de Cartagena; la estrella negra muestra la ubicación de un mareógrafo en el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH).

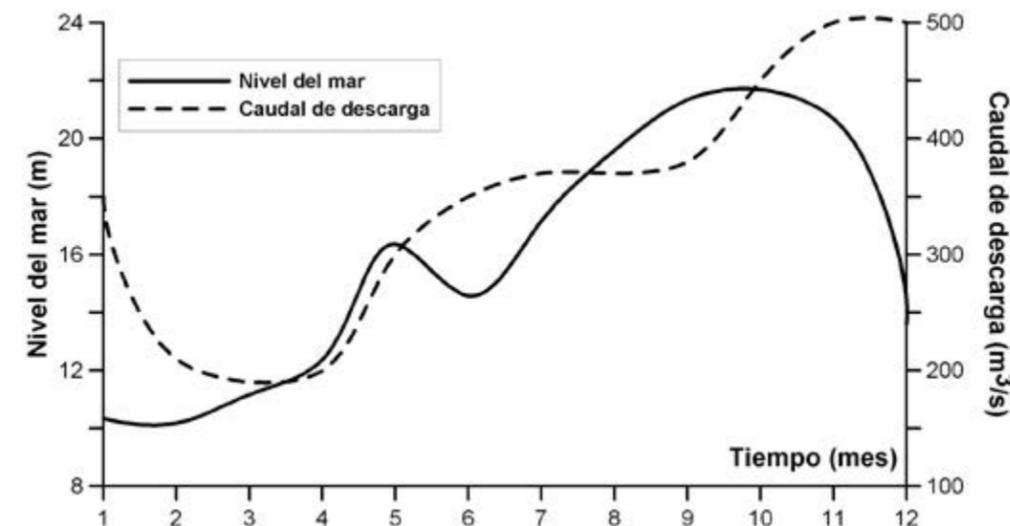


Figura 2. Derecha: promedio mensual del caudal de descarga del Canal del Dique (1984-2000) (UNAL, 2008[21]), medido en la estación Sta. Helena II (30 km río arriba, desde la desembocadura). Izquierda: promedio mensual del nivel del mar en Cartagena (1995-2001), basado en datos del nivel del mar medidos por la estación mareográfica del CIOH.

METODOLOGÍA

Modelo Numérico

Para el presente estudio fue utilizado el Sistema de Modelamiento Regional Oceánico (ROMS) [35], que es un descendiente evolucionado del modelo S-coordenada de la Universidad de Rutgers [36]. ROMS resuelve las ecuaciones primitivas en un ambiente de rotación centrado en la Tierra, basado en la aproximación de Boussinesq y el balance hidrostático vertical. ROMS está discretizado en coordenadas curvilíneas para la línea de costa y coordenadas de seguimiento del fondo. El esquema matemático de ROMS es explícito, de superficie libre, donde se usan cortos pasos de tiempo para avanzar la elevación del nivel del mar y la inercia barotrópica; con pasos de tiempo más largos que se usan para la temperatura, salinidad y la inercia baroclínica (ROMS emplea un procedimiento especial que promedia el tiempo en dos vías para el modo barotrópico y que satisface la ecuación de continuidad tres dimensional [35]). El algoritmo predictor-corrector del paso del tiempo especialmente diseñado en ROMS permite un incremento substancial en el tamaño del paso del tiempo permisible.

La versión usada en el estudio es ROMS_AGRIF, que tiene la capacidad de anidamiento en el cual AGRIF (*Adaptive Grid Refinement in Fortran*) fue el método escogido. Una de las mayores ventajas de AGRIF en la grilla embebida es la habilidad de manejar un número arbitrario de grillas fijas y un número arbitrario de nive-

les embebidos [37]. Para el presente estudio se construyeron dos grillas de cálculo; una de gran escala con una resolución espacial de 1 X 1 km y otra local embebida, que incluye la Bahía de Cartagena con una resolución de 300 X 300 m. Las mallas batimétricas para los dominios de cálculo fueron construidas con la misma resolución, tomando información batimétrica suministrada por el CIOH. Especial atención fue tenida en cuenta en las entradas de la bahía (Escollera-Bocagrande y Bocachica) y de esta manera reproducir las profundidades del sector.

Para la inicialización del modelo se utiliza WOA05 (*World Ocean Atlas 2005*) [38] [39]. Para cada WOA z-level los valores perdidos fueron reemplazados por medio de análisis objetivo. Las matrices resultantes son horizontalmente y verticalmente interpoladas en la grilla de seguimiento del terreno de ROMS [40].

El modelo incluye la descarga del Canal del Dique en la Bahía de Cartagena. Fue empleado el promedio quincenal del caudal de la descarga correspondiente a los años 1988 y 1990, calculado de acuerdo con UNAL [41] y basado en datos de la estación Incora [42]. Durante la época seca (diciembre-abril), cuando no se registran precipitaciones, el caudal del Canal del Dique disminuye hasta la época de transición (abril-junio), cuando inician las lluvias. Durante la época húmeda (agosto-noviembre) la lluvia causada por el paso de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) produce un incremento del caudal del Canal del Dique (Figura 3).

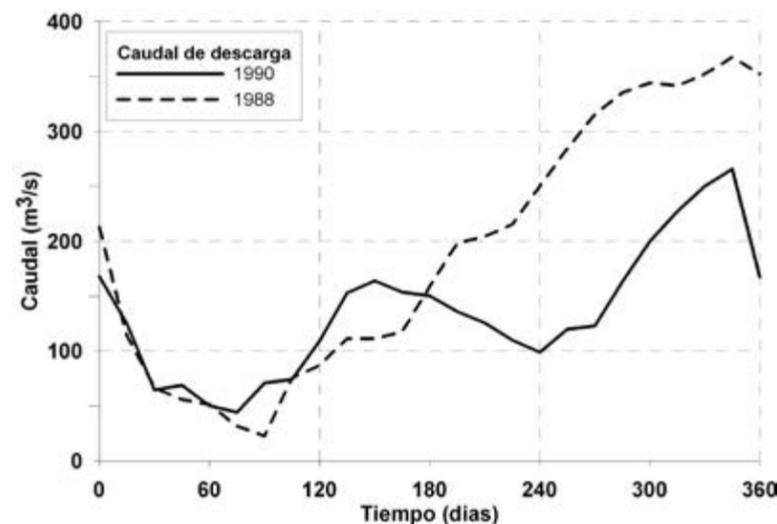


Figura 3. Caudal de descarga del Canal del Dique (1988 y 1990) en la Bahía de Cartagena. (Fuente de datos: CNR, 2007) [42].

Se escogieron los caudales de 1988 (primer experimento) y 1990 (tercer experimento) para la simulación, tomando en consideración la fuerte correlación entre el caudal y las oscilaciones interanuales [43] [44]; estos años fueron catalogados como La Niña y como un año normal, tomando de esta manera años con precipitaciones extremas y por consiguiente, caudales extremos.

El forzamiento por mareas fue aplicado en las fronteras abiertas, empleando 10 armónicos (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1, Mf, Mm) tomados del modelo inverso global de mareas 1/4º TPX06 [45]. La marea de Cartagena está clasificada como micromareal, mezclada y principalmente diurna [46].

Las forzantes de superficie fueron tomadas de COADS (climatología mensual con una resolución espacial de 0,5º a 1º de resolución en cuanto a los parámetros meteorológicos y oceánicos derivados de observaciones individuales) [47]. Las matrices resultantes fueron interpoladas empleando un método cúbico [40], para los nodos del dominio de gran escala. Para el dominio de cálculo local se emplearon datos de viento de 10 años (2000-2010), obtenidos por el CIOH; el promedio mensual del stress del viento (t_x, t_y)

fue calculado usando la expresión cuadrática (eq. 1 y 2) para cada uno de los nodos. Teniendo en cuenta la existencia de solo una estación meteorológica en la Bahía, se asumieron vientos uniformes en la misma.

$$\tau_x = \rho_a C_d U_{10}^2 \cos \phi \quad (1)$$

$$\tau_y = \rho_a C_d U_{10}^2 \sin \phi \quad (2)$$

Donde,
 U_{10} es la velocidad del viento
 τ es la dirección del viento
 $\rho_a = 1.2 \text{ kg/m}^3$ es la densidad del aire
 $C_d = 0.0013$ es el coeficiente de rozamiento

El análisis del viento muestra la predominancia de los vientos Alisios durante la época seca. En los meses siguientes el viento cambia la dirección oeste y finalmente, durante la época de lluvias, el viento es predominantemente del suroeste (Figura 4).

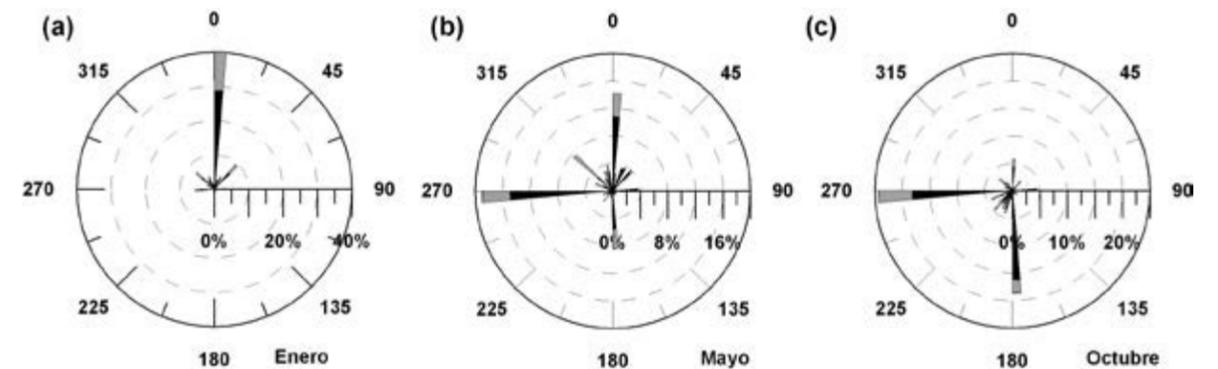


Figura 4. Rosa de viento: enero (a); mayo (b); octubre (c). Velocidad del viento w (m/s): negro ($w \leq 4$); gris ($4 < w < 10$).

Una descripción detallada de la configuración del modelo, diseño de grillas y de los datos empleados se encuentran descritas en [48].

Casos Modelados

Fueron diseñados tres experimentos numéricos. El primero evalúa los efectos del viento y

la descarga del Canal del Dique, tomando como valor de caudal los correspondientes al año 1988 (año La Niña), con el propósito de evaluar los cambios en el nivel del mar de la Bahía durante altas ratas de descarga, que es típico de los años de altas precipitaciones. Este experimento fue dividido en tres escenarios, con la finalidad de evaluar el nivel del mar durante la época de bajo caudal, alto caudal y extremos (Tabla I).

Tabla I. Escenarios del primer experimento.

ID	Caudal (m ³ /s)	Vel. Viento (m/s)	Viento (Dir)	Mes
Escenario 1.1				
1.1.1	0	0		Enero
1.1.2	213	0		Enero
1.1.3	0	3,06	N	Enero
1.1.4	213	3,06	N	Enero
Escenario 1.2				
1.2.1	0	0		Octubre
1.2.2	344	0		Octubre
1.2.3	0	2,84	SW	Octubre
1.2.4	344	2,84	SW	Octubre
Escenario 1.3				
1.3.1	400	2,84	SW	Octubre
1.3.2	450	2,84	SW	Octubre

El segundo experimento, a diferencia del primero, es una simulación continua y no se limita a los periodos promedios anuales de mínimos y máximos caudales. Se simula la dinámica de la Bahía, forzada por la descarga del Canal del Dique y el viento durante un año (de promedios altos de caudal-1988), con el propósito de evaluar el comportamiento quincenal del nivel del mar durante el año. El tercer experimento fue similar al segundo; no se considera la forzante del viento y se emplean promedios bajos de caudal, para confirmar que la elevación estacional del nivel del mar puede ser causada por la limitada comunicación de la bahía con el mar, lo que podría llevar a la acumulación de agua en la bahía como fue propuesto por [26].

RESULTADOS

Primer experimento

Para el primer experimento los resultados de nivel del mar obtenidos en cinco estaciones (Figura 5), de acuerdo con los escenarios propuestos, son comparados con el escenario de línea de base (1.1.1-Figura 5a y 1.2.1-Figura 5b) para de esa forma obtener la Anomalia del Nivel del Mar (ANM).

a) Escenario 1.1

Cuando solo se considera la descarga del Canal del Dique de 1988 (escenario 1.1.2), esto genera una elevación del nivel del mar que es mayormente concentrado en la costa este de la Bahía, decreciendo de sur a norte. En promedio, la ANM en la estación C (escenario 1.1.2-1.1.1) es +1,65 cm. Sin embargo, la diferencia de ANM entre las estaciones del norte (B) y el sur (E) es

muy pequeña (cerca de 5 mm), y puede ser considerada insignificante. Si solo el viento característico del mes de enero es considerado como forzante (escenario 1.1.3), éste actúa aumentando el nivel del mar de norte a sur. En la estación E (Sur) el agua es apilada contra la costa, elevando el nivel del mar hasta en 0,5 cm, mientras que en la estación C (Este) el nivel del mar decrece. Similar a los resultados del escenario 1.1.2, la diferencia del nivel del mar entre las estaciones B y C es muy pequeña.

El empleo simultaneo de la forzante del viento y del caudal de descarga (escenario 1.1.4) produce un incremento del nivel del mar principalmente concentrado al sureste de la bahía (Figura 5a); sin embargo, se detecta una ANM de +1,35 cm (escenario 1.1.4-1.1.1) en la estación C (Figura 6a). Ambas forzantes actúan para incrementar el nivel del mar de sur a norte. Las condiciones de enero forzan una disminución del nivel del mar en la estación C.

b) Escenario 1.2

Considerando la descarga del Canal del Dique correspondiente y característica del mes de octubre (escenario 1.2.2), se detecta un incremento sostenido del nivel del mar durante la primera mitad del mes, durante el cual el mayor valor de ANM (escenario 1.2.2-1.2.1) es de 2,5 cm. En promedio, la descarga produce un incremento de 2 cm en la estación C. Como en el escenario 1.1.2 la elevación de agua se concentra mayormente en la costa este de la bahía, disminuyendo de sur a norte. Si sólo se considera la forzante del viento del suroeste, característica del mes de octubre (escenario 1.2.3), el agua es apilada contra la costa noreste de la bahía (estaciones A, B, C). En la estación C se evidencia en promedio una ANM (escenario 1.2.4-1.2.1) de +1 cm.

La combinación de ambas forzantes (viento y descarga del Canal del Dique) produce una ANM de + 2,8 cm (escenario 1.2.4-1.2.1) en la esta-

ción C. El nivel del mar decrece de este a oeste (figuras 5b y 6b). Considerando la estación C, las forzantes actúan incrementando el nivel del mar.

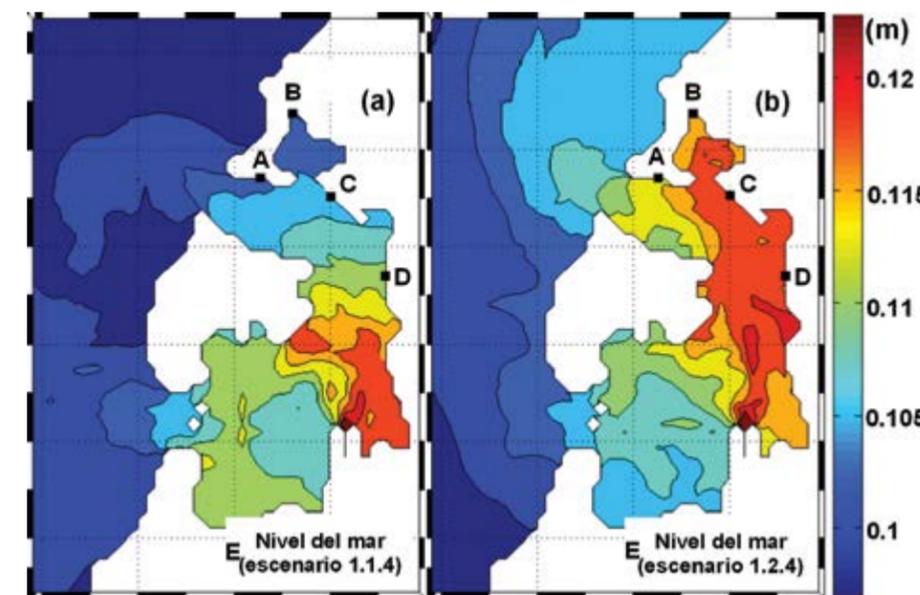
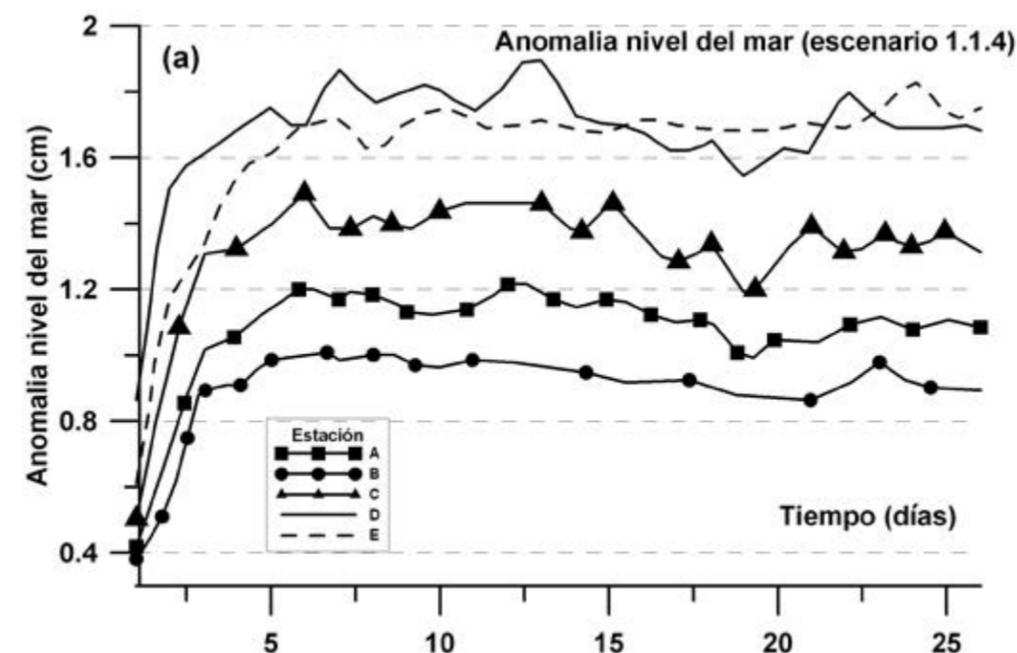


Figura 5. Distribución del nivel del mar en la bahía durante la marea alta. a) Escenario 1.1.4, condiciones de enero -día 27; b) Escenario 1.2.4, condiciones de octubre - día 297. Los puntos negros indican las posiciones donde los resultados se comparan en la Figura 6.



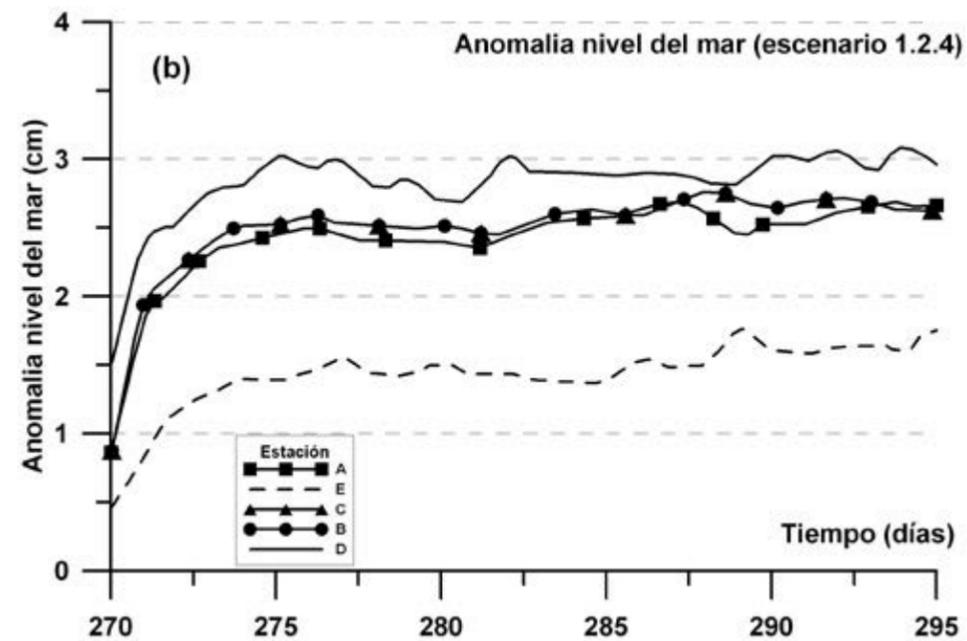


Figura 6. Anomalia del nivel del mar en diferentes estaciones, basado en los escenarios modelados 1.1.1 (a) y 1.2.1 (b), causado por la combinación de la descarga del Canal del Dique y el viento para las condiciones de enero (a) y octubre (b).

c) Escenario 1.3

El efecto de la descarga del Canal del Dique se evalúa en el tercer escenario con las condiciones de viento promedio de octubre y con un incremento de 50 m³/s de descarga, tomando

como base el caudal de octubre de 1988 (año La Niña), para evaluar el efecto en la bahía de un año El Niño más fuerte. Los resultados muestran que 50 m³/s de incremento en el caudal lleva a un incremento del nivel del mar de únicamente 0,1 cm en la estación C (Figura 7).

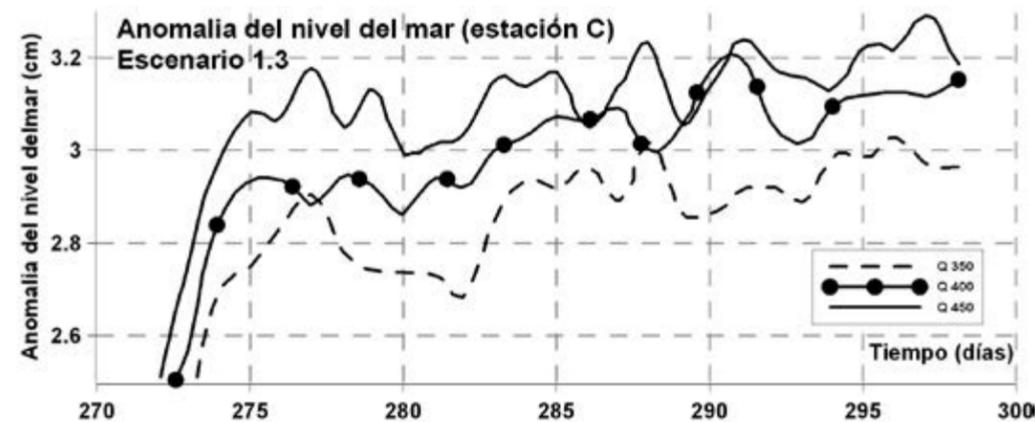


Figura 7. Anomalia del nivel del mar en la estación C; escenario: 1.2.4 (línea punteada); 1.3.1 (línea continua con puntos); 1.3.2 (línea continua). Q representa el caudal de descarga del Canal del Dique (m³/s).

Segundo experimento

El segundo experimento fue implementado para analizar el comportamiento del nivel del mar en la bahía a lo largo del año. Entre las forzantes se incluyeron el promedio mensual de la velocidad del viento; la descarga del Canal del Dique (Figura 3) de acuerdo con lo medido en 1988 (año La Niña) y los parámetros de la marea de acuerdo con los datos de TPX06 2001, con el propósito de comparar los resultados con los registros disponibles del nivel del mar medidos por el CIOH en la bahía; ni los records de nivel del mar de 1988, como tampoco las mediciones del caudal del Canal del Dique del año 2001 se encontraban disponibles. Estos años fueron escogidos considerando que los años 1988 y 2001 fueron clasificados como años La Niña, caracterizados por altas tasas de precipitación y, consecuentemente, alto caudal en el Canal de Dique. De esa manera, el efecto del Canal del Dique se evalúa considerando valores extremos.

La modelación fue computada durante 360 días de máquina, pero reiniciada cada 15 días

para poder actualizar el caudal de descarga. En este experimento, la batimetría en las entradas de la bahía tuvo que ser suavizada para evitar corrientes inducidas excesivamente fuertes por el flujo de la descarga de agua dulce y además incrementadas por el rozamiento del viento.

En la Figura 8 se grafica el promedio quincenal de nivel del mar calculado en el punto donde se ubica la estación mareográfica del CIOH y se compara con el promedio quincenal del nivel del mar medido por la estación mareográfica en 2001; se grafica también el caudal de descarga del Canal del Dique, solo para visualizar su tendencia. La simulación del nivel del mar muestra la misma tendencia que el caudal del Canal del Dique y que el nivel del mar medido; sin embargo, las magnitudes entre los resultados de la simulación y las mediciones difieren en cerca del 80 % (valor promedio). Considerando que este resultado podría relacionarse con la batimetría suavizada en la entrada de la bahía, lo cual podría llevar a un mayor intercambio de agua entre la bahía y aguas abiertas, se hace necesario un tercer experimento.

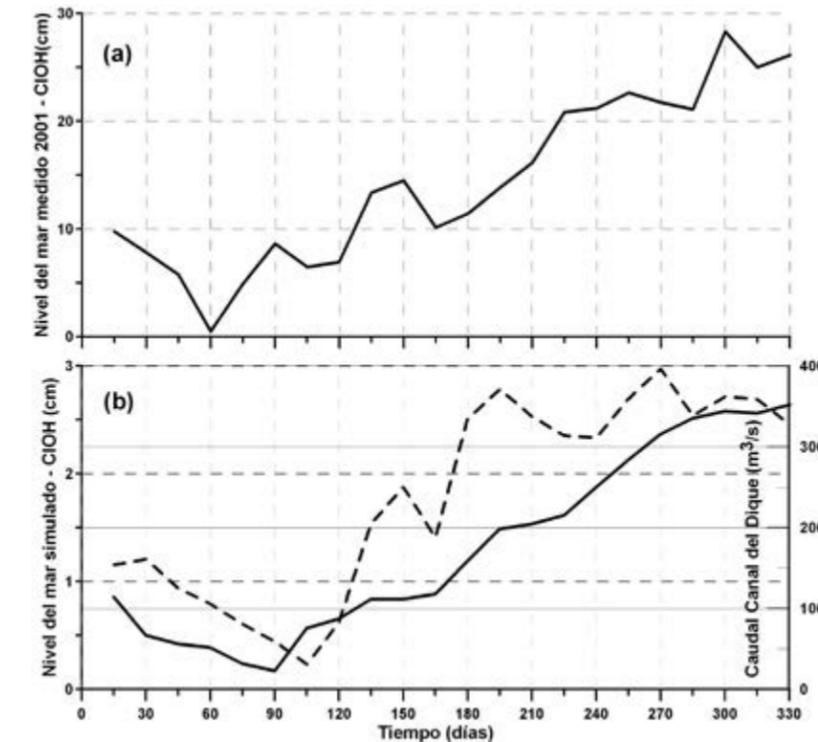


Figura 8. Resultados obtenidos del nivel del mar durante el segundo experimento. (a) Niveles del mar medidos por el CIOH (records promediados cada 15 días-línea continua); (b) resultados computados de nivel del mar (línea punteada), y el caudal de descarga del Canal del Dique (línea continua).

Tercer experimento

Debido a las limitaciones enfrentadas en el segundo experimento, para el tercer experimento no se consideró el viento, y el caudal de descarga empleado correspondió al del año 1990, clasificado como un año "normal" (no La Niña, no El Niño). El modelo se corrió por 360 días usando batimetría realista en las entradas de la bahía.

En la Figura 9 la medición del nivel del mar de 1990 (promediado cada 15 días) en el CIOH se grafica y comparan con el nivel del mar calculado (promediado cada 15 días). La tendencia del nivel del mar simulado es consistente con las mediciones. Comparando el nivel del mar simulado con el caudal de descarga, un incremento del caudal en 150 m³/s refleja un incremento de cerca de 0,8 cm en el nivel del mar.

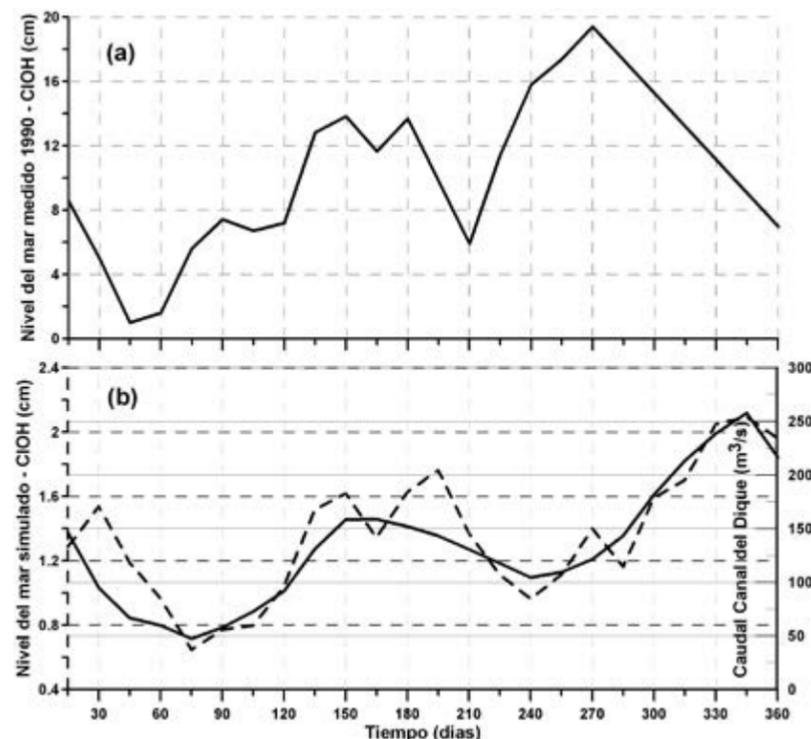


Figura 9. Resultado de nivel del mar durante el tercer experimento. **(a)** Nivel del mar medido (1990) por el CIOH (datos promediados cada 15 días—línea continua); **(b)** Resultados del nivel del mar calculados (línea punteada)—caudal de descarga del Canal del Dique (línea continua).

DISCUSIÓN

De la comparación entre las magnitudes del nivel del mar simulado y medido (Figura 9) es evidente que el incremento observado del nivel del mar no puede ser explicado por la influencia de la descarga del Canal del Dique y por el viento únicamente. Por lo tanto, es posible que existan otros mecanismos responsables de la variación del nivel del mar a lo largo del año. Sin embargo, el Canal del Dique juega un rol, incrementando el nivel del agua de la bahía en 2 cm durante la época de lluvias.

El efecto del Canal del Dique en el nivel del mar de la Bahía de Cartagena es del orden del 10 % del observado y lo que no explica el aumento sostenido del nivel del mar a lo largo del año, el cual alcanza cerca de 15 cm. Comparando el nivel del mar medido en la Bahía de Cartagena con los medidos en las Islas del Rosario, situadas a 40 km al suroeste de Cartagena (Figura 1), ambas series de tiempo muestran la misma tendencia con magnitudes de nivel del mar similares (Figura 10), lo que sugiere la presencia de

otras forzantes del comportamiento del nivel del mar, diferentes al régimen de caudales del Canal del Dique y del viento. Se han lanzado hipótesis con respecto al rol de la circulación ciclónica y anticiclónica como causa de anomalías del nivel

del mar estacionales, ya que existe un variabilidad a mesoescalar en el Mar Caribe relacionada con eddies que viajan cerca de la costa [49] [50] [51] [52] en el nivel del mar [53].

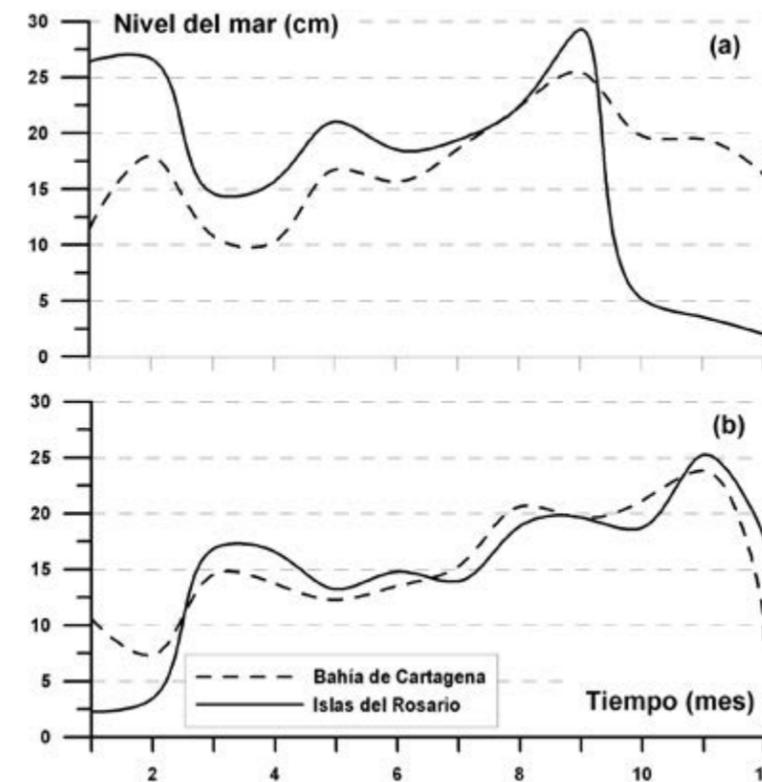


Figura 10. Promedio mensual del nivel del mar en las Islas del Rosario (línea continua) y Bahía de Cartagena (línea punteada). **(a)** 1999; **(b)** 1997.

CONCLUSIONES

Cartagena de Indias, situada en la costa norte de la Bahía de Cartagena, sufre de frecuentes inundaciones durante los meses de octubre y noviembre. Estos eventos, relacionados con incrementos del nivel del mar, podrían estar asociados al set-up inducido por la descarga de agua dulce del Canal del Dique, el viento local o una combinación de ambos.

La descarga del Canal del Dique, al sur de la Bahía de Cartagena, induce diferencias en el nivel del mar en la bahía; se pueden encontrar niveles del mar altos cerca a la costa (continente), que disminuye de este a oeste y que aumenta de

sur a norte. Las simulaciones numéricas muestran que esta anomalía del nivel del mar es del orden de +2 cm durante la época de alta descarga; sin embargo, esta anomalía puede aumentarse o disminuirse dependiendo de la velocidad y dirección del viento. Los vientos Alisios pueden producir una anomalía adicional en el nivel del mar, apilando agua contra la costa sur de la bahía, en el orden de 0,5 cm.

Durante los meses de diciembre y marzo el viento predominante empuja el agua superficial contra la costa sur; en la parte norte de la bahía, el nivel del mar disminuye (en esta época del año el Canal del Dique experimenta los caudales más bajos); en los meses siguientes la fuerza del

viento decrece. Durante los meses de septiembre a diciembre, la dirección del viento cambia (suroeste) y el caudal de descarga del Canal del Dique aumenta; esta situación produce un incremento del nivel del mar del orden de +2 cm en la costa este de la bahía.

Durante eventos de altos caudales del Canal del Dique (asociado al fenómeno de La Niña), en el sector continental de la bahía se podrían registrar anomalías del nivel del mar en el orden de +3 cm; el efecto del Canal del Dique es más significativo que el efecto producido por las condiciones promedio del viento, sin embargo las anomalías de viento asociadas al ENOS deben ser tenidas en consideración.

Si se considera como parte del cambio climático global un incremento de los eventos fríos ENOS como lo sugiere [15], en el futuro se podrían considerar caudales de descarga del Canal del Dique mayores al presentado durante 1988, sin embargo y de acuerdo con los resultados, esta situación parece no producir grandes impactos en el nivel del mar de la bahía.

Los resultados de la modelación presentados muestran que el efecto general de la descarga fluvial y los vientos locales no explican la variación del nivel del mar en la Bahía de Cartagena, lo que sugiere que podría haber otros mecanismos no locales y que no fueron considerados en la modelación. Este mecanismo no local puede estar relacionado con la circulación de eddies a lo largo de la costa Caribe colombiana. Esta hipótesis puede ser confirmada usando modelos numéricos. Sin embargo, existen algunos asuntos relacionados con la falta de datos que deben ser solucionados para confirmar los resultados presentados aquí. Primero, el régimen de viento en la bahía y el efecto de la isla de Tierrabomba deben ser evaluados, teniendo en cuenta que la distribución espacial del stress de viento juega un rol muy importante en la circulación de la bahía; segundo, deben ser obtenidas mediciones directas en la desembocadura del Canal del Dique. Finalmente, se debe utilizar una grilla de mayor resolución para evitar problemas relacionados con la batimetría, de tal forma que se tenga una topografía del fondo de la bahía lo más realista posible, considerando la implicación de ésta en el intercambio de masas de agua en las entradas de la bahía.

El manejo y control de la descarga fluvial en la bahía durante la época húmeda puede producir una pequeña reducción en el nivel del mar

al noreste de la bahía. Si el nivel más bajo del caudal de descarga, que se presenta en la época seca, se mantiene durante la época húmeda, se logra una reducción de 1 cm en el nivel del mar. Sin embargo, considerando las magnitudes del ascenso del nivel del mar reportadas por varios autores, esta medida no representa un avance significativo y una solución de largo plazo para la protección de la ciudad contra las inundaciones por altos niveles del mar.

LITERATURA CITADA

- [1] Nuttle WK., Portnoy JW. *Effect of rising sea level on runoff and groundwater discharge to coastal ecosystems. Estuarine, Coastal and Shelf Science.* 1992; 34: 203-212.
- [2] Huang JCK. *Climate change and integrated coastal management: a challenge for small island nations. Ocean and Coastal Management.* 1997; 37: 95-107.
- [3] Snoussi M., Ouchani T., Niazi S. *Vulnerability assessment of the impact of sea level rise and flooding on the Moroccan coast: the case of the Mediterranean eastern zone. Estuarine, Coastal and Shelf Science.* 2008; 77: 206-213.
- [4] Jiménez J., Sánchez-Arcilla A. *Physical impacts of climatic change on deltaic coastal systems (II): driving terms. Climatic Change.* 1997; 35: 95-118.
- [5] IPCC. *Climate Change 2007: Synthesis Report. Adopted at the International Panel of Climate Change Plenary XXVII (Valencia, Spain, 12 - 17 November 2007).*
- [6] Burkett VR., Zilkoski DB., Hart DA. *Sea-level rise and subsidence: implications for flooding in New Orleans, Louisiana. 2003. In: Prince, K.R., Galloway, D.L. (Eds.), U.S. Geological Survey Subsidence Interest Group Conference, Proceeding of the Technical Meeting, November 27-29, 2001, Galveston, Texas, pp. 63-70.*
- [7] González JL., Tornqvist TE. *Coastal Louisiana in crisis: Subsidence or sea level rise?, Eos Trans. AGU.* 2006; 87(45), 493, doi:10.1029/2006EO450001.
- [8] Mazzotti S., Lambert A., Van der Kooij M., Mainville A. *Impact of anthropogenic subsidence on relative sea-level rise in the Fraser River delta. Geology.* 2009; 37: 771-774, doi:10.1130/G25640A.1
- [9] Hoyme H, Zielke W. *Impact of climatic changes on wind behaviour and water levels at the German North Sea coast. Estuarine, Coastal and Shelf Science* 2001; 53:451-458.
- [10] Pryor SC., Barthelmie RJ. *Climate change impacts on wind energy: a review. Renewable and Sustainable Energy Review.* 2010; 14: 430-437.
- [11] Lionello P., Cogo S., Galati MB., Sanna A. *The Mediterranean surface wave climate inferred from future scenario simulations. Global and Planetary Change.* 2008; 63: 152-162.
- [12] Mösso C., Mestres M., Sierra JP., Sánchez-Arcilla A., Goodess C. *Waves and surges in the Valencia Gulf. Variability rather than climate change. Journal of Coastal Research.* 2009; 56: 243-247.
- [13] Gräwe U., Wolff JO., Ribbe J. *Impact of climatic variability on an east Australian bay. Estuarine, Coastal and Shelf Science.* 2010; 86: 247-257.
- [14] Cane MA. *The evolution of El Niño, past and future. Earth and Planetary Science Letters.* 2005; 230: 227-240.
- [15] Paeth H., Scholten A., Friederichs P., Henze A. *Uncertainties in climate change prediction: El Niño-Southern-Oscillation and monsoons. Global and Planetary Change* 2008; 60: 265-288.
- [16] Blanco JA., Vilorio EA., Narváez B. *ENSO and salinity changes in the Ciénaga Grande de Santa Marta coastal lagoon system, Colombian Caribbean. Estuarine, Coastal and Shelf Science.* 2006; 66: 157-167.
- [17] Poveda G., Mesa O. *Feedbacks between Hydrological Processes in Tropical South America and Large-Scale Ocean-Atmospheric Phenomena. Journal of Climate.* 1997; 10: 2690 - 2702.
- [18] Struyf E., Van Damme S., Meire P. *Possible effects of climate change on estuarine nutrient fluxes: a case study in the highly nutrified Schelde estuary (Belgium, The Netherlands). Estuarine, Coastal and Shelf Science.* 2004; 60: 649-661.
- [19] Lloret J., Marín A., Marín-Guirao L. *Is coastal lagoon eutrophication likely to be aggravated by global climate change? Estuarine, Coastal and Shelf Science.* 2008; 78: 403-412.
- [20] Zhang W., Yan Y., Zheng J., Li L., Dong X., Cai H. *Temporal and spatial variability of annual extreme water level in the Pearl River Delta region, China. Global and Planetary Change.* 2009; 69: 35-47.
- [21] UNAL. *Flow rate reduction alternative of the Dique Channel through the narrowing of the channel section by sectors and the construction of the lock of Paricuica. Final Report CM-513.* 2008; Vol. 1.
- [22] Seemüller W., Seitz M., Sánchez L., Drewes H. *The position and velocity solution SIR09P01 of the IGS Regional Network Associate Analysis Centre for SIRGAS (IGS RNAAC SIR). DGFI Report 85.* 2009; 96 pp.
- [23] Afanador F., Torres R., Gómez JC. *LiDAR y fotografía aérea digital en la determinación del impacto del aumento en el nivel del mar en el sector de "La Boquilla", Cartagena de Indias, Caribe Colombiano. Bol. Cient. CIOH* 2006; 24: 94-106.
- [24] Andrade CA. *Cambios recientes del nivel del mar en Colombia. En: Deltas de Colombia: morfodinámica y vulnerabilidad ante el cambio global. ISBN 978-958-720-020-1. Universidad EAFIT, COLCIENCIAS.* 2008; 101 - 121.
- [25] Restrepo J., López S. *Morphodynamics of the Pacific and Caribbean deltas of Colombia, South America. Journal of South American Earth Sciences.* 2008; 25: 1-21.
- [26] Nicolae-Lerma A., Thomas YF., Durand P., Torres R., Andrade CA. *Variabilidad del niv-*

- el 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.
- [27] Lonin SA., Giraldo L. Circulación de las aguas y transporte de contaminantes en la Bahía Interna de Cartagena. Bol. Cient. CIOH. 1995; 16: 25-56.
- [28] Lonin SA., Giraldo L. Influencia del intercambio térmico a través del fondo marino en el régimen de temperaturas en zonas costeras. Bol. Cient. CIOH. 1995; 16: 57-72.
- [29] Kazakov AL., Lezhenin AA., Spreranzkiy LS. Resultados preliminares del estudio de la capa límite meso-meteorológica de la atmósfera en la costa norte colombiana aplicando un modelo numérico. Bol. Cient. CIOH. 1996; 17: 17-26.
- [30] Lonin SA., Giraldo L. Influencia de los efectos térmicos en la circulación de la bahía interna de Cartagena. Bol. Cient. CIOH. 1996; 17: 47-56.
- [31] Garay T., Giraldo L. Influencia de los aportes de materia orgánica externa y autóctona en el decrecimiento de los niveles de oxígeno disuelto en la Bahía de Cartagena, Colombia. Bol. Cient. CIOH. 1997; 18: 1-13.
- [32] Lonin SA. Cálculo de la transparencia del agua en la Bahía de Cartagena. Bol. Cient. CIOH. 1997; 18: 85-92.
- [33] Tuchkovenko Y., Lonin SA., Calero L. Modelo de eutrofización de la Bahía de Cartagena y su aplicación práctica. Bol. Cient. CIOH. 2002; 20: 28-44.
- [34] Tuchkovenko Y., Lonin SA. *Mathematical model of the oxygen regime of Cartagena Bay. Ecological Modelling.* 2003; 165: 91-106.
- [35] Shchepetkin A., McWilliams JC. *The regional ocean modelling system (ROMS): A split-explicit, free-surface, topography-following coordinates oceanic model. Ocean Modelling.* 2005; 9: 347-404.
- [36] Song Y., Haidvogel DB. *A semi-implicit ocean circulation model using a generalized topography-following coordinate system. J. Comp. Phys.* 1994; 115 (1): 228-244.
- [37] Penven P., Debreu L., Marchesiello P., McWilliams J. *Evaluation and application of the ROMS 1-way embedding procedure to the central california upwelling system. Ocean Modelling.* 2006; 12: 157-187.
- [38] Locarnini RA., Mishonov AV., Antonov J I., Boyer TP., García HE. *World Ocean Atlas 2005, Volume 1: Temperature. S. Levitus, Ed. NOAA Atlas NESDIS 61, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 182 pp.*
- [39] Antonov JI., Locarnini RA., Boyer TP., Mishonov AV., García HE. *World Ocean Atlas 2005, Volume 2: Salinity. S. Levitus, Ed. NOAA Atlas NESDIS 62, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 182.*
- [40] Penven P., Marchesiello P., Lefevre J. *Software tools for pre- and post-processing of oceanic regional simulations. Environmental Modelling & Software.* 2008. 23: 660-662.
- [41] UNAL. *Project: Study and research about the works for environmental and navigational restoration for the Dique Channel. Report CM-CD-2.* 2007; 97 pp.
- [42] CNR-(Compagnie Nationale du Rhône). *Estudio de factibilidad y anteproyecto para el programa de restauración del Canal del Dique en Colombia. Final report 2007. Apéndice (4/6). N°: DI-EE 07-262a.*
- [43] Mesa O., Poveda G., Carvajal LF. *Introducción al clima de Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. Facultad de Minas.* 1997.
- [44] Poveda G. *La hidro-climatología de Colombia: una síntesis desde la escala interdecadal hasta la escala diurna. Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 2004; 28: 201-222.
- [45] Egbert G., Erofeeva L. *Efficient inverse modelling of barotropic ocean tides. J. Atmos. Ocean. Technol.* 2002; 19: 183-204.
- [46] Molares R. *Clasificación e identificación de las componentes de marea del Caribe colombiano. Bol. Cient. CIOH* 2004; 22: 105-114.
- [47] DaSilva A., Young A., Levitus S. *Atlas of surface marine data 1994, volume 1: Algorithms and procedures.,” Tech. Rep. 6, U.S. Department of Commerce, NOAA, NESDIS.* 1994.
- [48] Molares R. *The influence of the Dique Channel Discharge on the sea water level of Cartagena Bay. Msc. Tesis. Coastal and Marine Engineering and Management. Tudelft University.* 2011.
- [49] Nystuen JA., Andrade CA. *Tracking mesoscale ocean features in the Caribbean Sea using GEOSAT altimetry. J. Geophys. Res.* 1993; 98: 8389-8394.
- [50] Andrade CA., Barton E. *Eddy development and motion in the Caribbean Sea. J. Geophys. Res.* 2000;105(C11): 26191-26201.
- [51] Jouanno J., Sheinbaum J., Barnier B., Molines J., Debreu L., Lemarié F. *The mesoscale variability in the Caribbean Sea. Part I: simulations with an embedded model and characteristics. Ocean Modelling.* 2008; 23: 82-101.
- [52] Jouanno J., Sheinbaum J., Barnier B., Molines J. *The mesoscale variability in the Caribbean Sea. Part II: energy sources. Ocean Modelling.* 2009; 26: 226 - 239.
- [53] Andrade CA. *The Circulation and variability of the Colombian basin in the Caribbean Sea. PhD Thesis, School of Ocean Sciences, University of Wales.* 2000.

