



ARTÍCULO

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

Sea-level variability from 1950 to 2000 and hazards linked to storm surge episodes in Bocagrande and Castillogrande peninsulas, Cartagena de Indias, Colombia

Fecha recepción: 2008-09-10 / Fecha aceptación: 2008-09-26

Alexandre Nicolae Lerma, nicolae.l.alex@gmail.com, Université Paris I-Panthéon-Sorbonne et UMR 8591 LGP, Institut de Géographie, 191 rue Saint-Jacques, 75005, París, France.

Yves François Thomas, Yves-Francois.Thomas@cnrs-bellevue.fr, UMR 8591 LGP, 1 place Aristide Briand, 92195 Meudon Cedex, France.

Paul Durand, durandp69@aol.com, Université Paris I-Panthéon-Sorbonne et UMR 8591 LGP, Institut de Géographie, 191 rue Saint-Jacques, 75005, París, France.

Rafael Ricardo Torres, rrtorresp@yahoo.com, Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas - CIOH, Isla Manzanillo, Cartagena de Indias, D.T. y C., Colombia.

Carlos Alberto Andrade, candrade@costa.net.co, Grupo de Investigaciones Oceanológicas, Escuela Naval "Almirante Padilla", Cartagena de Indias, D.T. y C., Colombia.

Resumen

Se estudió el riesgo de inundación en Bocagrande y Castillogrande, dos penínsulas de la ciudad colombiana de Cartagena de Indias en la cuenca suroeste del mar Caribe, en varias etapas. Se analizó la serie de tiempo del nivel del mar registrada por un mareógrafo en la Bahía de Cartagena calculando la marea meteorológica a partir de la diferencia entre los niveles del mar observados y la marea astronómica. Estos residuos fueron analizados en busca de correlaciones con datos meteorológicos locales, regionales y a escala de toda la cuenca del mar Caribe. Este análisis permitió caracterizar el aumento en el nivel del mar causado por tormentas (ANMCT) en esta parte del litoral colombiano, lo que permitió entender los fenómenos de inundaciones que ocurrieron entre 1950 y el 2000, causados por los llamados localmente "mares de leva". Estos eventos recurrentes, producidos por la combinación de fenómenos de 'set-up' causados por el viento y el oleaje, y de 'run-up' por las olas, provocan inundaciones de amplitudes variables en algunas calles en las penínsulas de Bocagrande y Castillogrande. Un Modelo de Terreno Digital de alta precisión construido con base en datos de LIDAR (con precisión de +/- 20 cm) sirvió de base topográfica para la elaboración de escenarios relacionados con el ANMCT y del aumento local del nivel medio del mar para el siglo XXI. Estos escenarios mostraron la extrema vulnerabilidad de Cartagena, particularmente en las penínsulas de Bocagrande y Castillogrande y la necesidad de intervención en el corto plazo teniendo en cuenta las características geomorfológicas de la ciudad y dada su importancia social y económica para Colombia.

Palabras claves: Marea meteorológica, aumento del mar causado por tormenta, mar de leva, inundaciones, modelo de terreno digital, Cartagena de Indias.

Abstract

The risk of flood in Bocagrande and Castillogrande, two peninsulas of the city of Cartagena de Indias (southwest Caribbean Sea) were studied in several stages. A sea-level time series registered by a tide-gage inside the Bay of Cartagena was analyzed extracting the 'meteorological tide' based on the differences between the observed levels and the astronomical tide. These residuals were then analyzed looking for correlations with meteorological data at

local, regional and basin-wide levels. This analysis permitted the characterization of the sea-level rise caused by storms in this part of the Colombian coast, giving explanation to the floods occurred between 1950 and 2000 caused by this storm surges called locally “mares de leva”. These recurrent events formed by the combination of the wind set-up and waves 'set-up' and 'run-up' produce floods of variable amplitude in the streets of Bocagrande and Castillogrande. A high-resolution digital terrain model constructed with a LIDAR data base (+/- 20 cm precision) served as topographic base for the construction of several scenarios related to the sea-level rise caused by storm surges and to the climatic sea-level rise for the 21st century. These scenarios showed the extreme vulnerability of Cartagena, particularly in Bocagrande and Castillogrande peninsulas and the necessity of intervention in the short-term taken into account its social and economic importance for Colombia.

Key words: Meteorological tide, storm surges, mar de leva, floods, digital elevation model, Cartagena de Indias.

Introducción

La altura del nivel del mar, además de los que produce la marea astronómica, es el resultado de una complicada suma de varios factores. La influencia que producen la presión atmosférica y los vientos se conocen como marea meteorológica. Asimismo, el nivel se afecta debido a las corrientes oceánicas (topografía dinámica), el efecto debido al cambio de temperatura y salinidad conocido como altura eólica, los cambios eustáticos debido a la cantidad total de agua en el mar y los efectos geológicos tales como el rebote post-glacial y/o la subsidencia. Además, ondas de largo periodo (de infra-gravedad) especialmente las atrapadas en las costas también afectan el nivel del mar por periodos relativamente largos.

El presente trabajo después analizar las variaciones del nivel del mar relacionadas con diferentes tipos de mareas se ocupa de tres fenómenos que producen elevación del nivel del mar debidos al viento y el oleaje. El “set-up” del viento es la sobre-elevación del nivel del mar que ocurre en la costa considerada como una función de la dirección y longitud desde donde

sopla el viento (el 'fetch'), la profundidad del agua y la velocidad del viento. Ahora bien, cuando las olas llegan a una playa, sus características (altura, periodo, longitud) interactuando con la batimetría local producen una sobre-elevación por encima del nivel que tendría el agua si estuviera quieta conocido como el “set up” del oleaje. Finalmente, el término 'run-up' del oleaje es la máxima extensión vertical (elevación) de la ola cuando rompe y se extiende hacia la playa. Como no se encontró una traducción específica se utiliza el término en inglés.

El aumento del nivel del mar causado por tormentas (ANMCT) es un importante riesgo que debe ser tenido en cuenta en los estudios sobre litorales altamente desarrollados en cualquier parte del mundo. Adicionalmente, las predicciones estiman que para el 2020, el aumento global del nivel medio del mar, estará entre los 18 y 59 mm [1], lo cual implica un mayor impacto de estos fenómenos sobre la costa debido al aumento de la cota de inundación. Igualmente es posible que aumente la frecuencia e intensidad de las tormentas, dadas las consecuencias del cambio climático en los patrones oceanográficos y atmosféricos en el océano Atlántico [2,3,4].

Anteriores estudios regionales sobre el aumento acelerado del nivel del mar han expresado su preocupación por la situación de Cartagena, especialmente en los barrios alrededor de la Ciénaga de Tesca y Bocagrande y el centro amurallado [5] y sobre la implementación de estos temas en la Política Nacional Ambiental [6].

La ciudad de Cartagena de Indias sufre con frecuencia casi anual de episodios de inundaciones de origen marino, llamados localmente mar de leva. Este estudio tiene dos objetivos principales: estudiar las causas que originan estos fenómenos, y evaluar su impacto en la costa colombiana, estimando el riesgo de inundación en el sector de Bocagrande y Castillogrande.

A nivel mundial existen numerosos estudios con respecto a los fenómenos de ANMCT, en los cuales se muestra cómo el origen y las consecuencias de estos episodios de aumento de nivel del mar se relacionan siempre con características locales [7,8,9], como la fisionomía del litoral [10] y las particularidades meteorológicas.

Teniendo en cuenta lo anterior, en el presente estudio se analizaron los ANMCT registrados por un mareógrafo ubicado en la Bahía de Cartagena, relacionándolos a la vez, con datos meteorológicos locales [10] y regionales en la cuenca del mar Caribe. Esta aproximación en diferentes escalas permitió comprender mejor el origen de fenómenos meteorológicos como el Mar de Leva. Los estudios del riesgo relacionados con el ANMCT son indispensables para la elaboración de escenarios futuros que permitan evaluar la vulnerabilidad de litorales altamente desarrollados [11,12,13]. Entonces este ejercicio de modelación numérica toma en cuenta los niveles de agua extremos, asociados al aumento del riesgo dado la subida global del nivel del mar. Esta información fue relacionada con datos topográficos de un DTM con el fin de ilustrar la importancia de las inundaciones potenciales.

Con este artículo se espera poner en evidencia la vulnerabilidad de Cartagena con respecto a un riesgo local poco estudiado, lo cual cobra relevancia si se tiene en cuenta que en la península de Bocagrande están concentrados intereses socio-económicos esenciales para la ciudad de Cartagena de Indias.

Con respecto al área de estudio, se tiene que la flecha de Bocagrande (figura 1) constituye el último elemento geomorfológico de la amplia zona sedimentaria que se extiende desde la desembocadura del río Magdalena hasta la isla de Tierra Bomba. Localmente, la Punta de Santo Domingo (sobre la cual está edificada la parte colonial de Cartagena) es la última saliente de esta zona sedimentaria, la cual está constituida por rocas de formación terciaria llamadas de la Popa [14], de origen calcáreo, muy divisible y por mucho tiempo sometidas a la erosión. Este afloramiento es el punto de fijación de la flecha arenosa que forma la península de Bocagrande, la cual está constituida por sedimentos del cuaternario de naturaleza y origen variados, procedentes de fuentes locales como los transportados por la deriva litoral. La altitud de la península no sobrepasa los 2 m con respecto al nivel medio del mar. El perfil batimétrico en frente de la península de Bocagrande cuenta con una pendiente suave del orden de $2/1000$, por lo cual la isóbata de los 15 m se encuentra a más de 7 kms de la costa [15], lo cual se debe a una acumulación arenosa que forma una flecha sumergida que actúa como un espolón.



Figura 1. Mapa de localización del área de estudio, la península de Bocagrande.

En la parte distal de esta flecha, el oleaje se refracta cerca de la punta del Laguito perdiendo energía a causa de la batimetría y la presencia de varios espolones, dando como resultado la constitución de flechas secundarias como la que cierra la boca del Laguito y en mayores proporciones la flecha de Castillogrande [16].

Las pendientes de las playas en la parte interna de la flecha tienen un perfil muy diferente al exterior, por lo cual las playas allí son poco extendidas. En la parte sur de la península de Castillogrande la pendiente de las playas es muy marcada pasando de 0 a 22 m de profundidad en 100 m de distancia, en tanto que en la parte norte (hacia la bahía interior), la pendiente es levemente más suave. En la línea de costa de Bocagrande hacia la bahía interior, el perfil aumenta aún más y no existe ninguna playa.

Este sector del litoral colombiano, ha sido intensamente modificado por el hombre, concentrando actualmente importantes actividades económicas, a pesar de tener características geomorfológicas que la hacen muy dinámica, por lo cual la estabilidad actual de la línea de costa se mantiene como consecuencia de considerables esfuerzos de acondicionamiento mediante obras de protección [13,16,17].

Materiales y métodos

Datos utilizados

El estudio fue elaborado a partir de la serie de tiempo de un mareógrafo ubicado en la Bahía de Cartagena

(10°4' N -75°55'W), con datos horarios comprendidos entre el 1 de noviembre de 1951 hasta el 31 de diciembre de 2000 (figura 3). Los datos utilizados proceden del GLOSS (Global Sea Level Observing Sistem) y fueron controlados localmente por el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia).

Los datos del mareógrafo de Cartagena están organizados en dos series. La primera (Cartagena A, referencia 265A) se extiende del 02 de noviembre de 1951 hasta el 26 de abril de 1993, donde termina por el cambio de posición del mareógrafo. A esta serie le hacen falta datos de 11 interrupciones de más de un mes. La segunda serie (Cartagena B, referencia 265B) se extiende del 1 de mayo de 1993 hasta el 29 de diciembre de 2000, faltándole datos de 6 interrupciones de más de un mes. En esta ocasión el mareógrafo se ubicó en el muelle del CIOH, a una corta distancia de la estación inicial. En la figura 2 se presenta el porcentaje de datos disponibles de la serie de tiempo registrada por el mareógrafo.

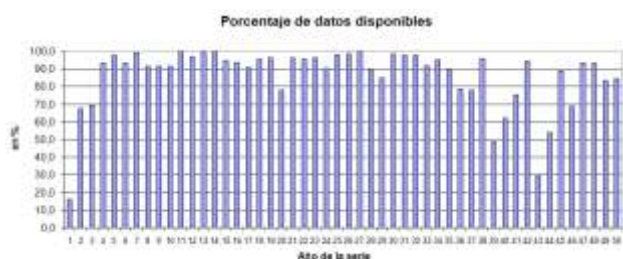


Figura 2. Datos disponibles de la serie de tiempo mareográfica.

Procesamiento de datos

El nivel del mar registrado por el mareógrafo sirvió para calcular la marea astronómica utilizando el programa SLPR2 “Sea Level Processing Software versión 2” [18] (figura 3). Para determinar los componentes armónicos de la marea astronómica, el programa utiliza las rutinas propuestas por Foreman [19] permitiendo calcular las armónicas del año seleccionado. El cálculo de las armónicas de la marea es posible debido a que la marea puede descomponerse en una suma infinita de ondas elementales. Para los cálculos el programa SLPR2 utiliza un número variable de armónicas en función del período de observación (la mayoría del tiempo de 12 meses) y del número de datos disponibles en la serie analizada.

En los cálculos de la marea astronómica siempre se utilizaron las ondas anuales (S_a), diurnas (luni-solares: K1; lunares: O1 y Q1), semi-diurnas (lunares: M2 y N2; solares: S2) y armónicos de aguas someras cuarto-diurnos (MN4, M4 y MS4). Para ser más preciso, las armónicas fueron sistemáticamente calculadas cuando los datos correspondieron a más del 80% por año. Para los años en que no se cumplió este criterio (1952, 1953, 1970, 1986, 1987, 1989, 1990, 1991, 1993, 1994 y 1996), se utilizaron las armónicas del año más próximo sin sobrepasar en ningún caso los dos años.

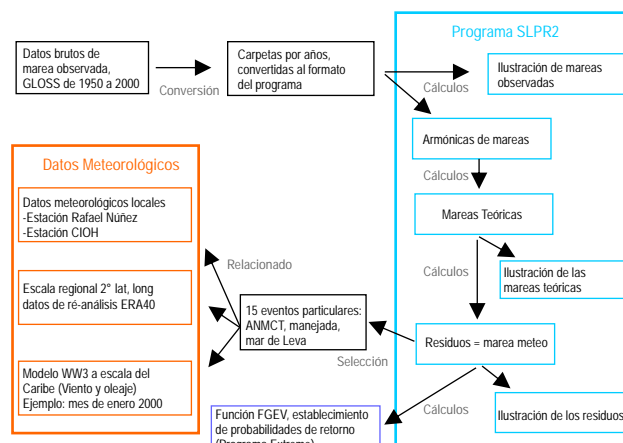


Figura 3. Flujoograma del procesamiento de datos mareográficos.

En una segunda etapa se restaron los valores de la marea astronómica calculada con el programa SLPR2 a los valores observados, después de eliminar el componente de aumento del nivel medio del mar (figura 4), con el fin de obtener solamente información de la marea meteorológica, entendida ésta como la variación del nivel del mar causada por las condiciones climáticas y meteorológicas [10]. Los residuos obtenidos pueden corresponder a un aumento del nivel del mar (marea meteorológica > 0) o a una disminución del mismo (marea meteorológica < 0), (figura 4). De acuerdo con el objetivo del estudio, se tiene interés por estos aumentos de nivel, que son los que pueden generar el fenómeno de Mar de Leva. Entre los aumentos de nivel del mar encontrados, sólo se tomaron en cuenta aquellos mayores a los 200 mm, asumiendo que el riesgo de inundación para el área de estudio es significativo a partir de este nivel. En el presente estudio se denominará a este aumento significativo del nivel del mar ANMCT, asumiendo

que estos fueron causados por el efecto de tormentas. Es importante tener en cuenta que algunos de estos eventos de ANMCT pudieron haberse presentado en momentos en que el mareógrafo no registraba datos (ver figura 2).

Correlación de ANMCT con datos meteorológicos

Para la escala local (figura 3) los datos proporcionados por la estación del aeropuerto Rafael Nuñez, situada al noreste de Cartagena (ver figura 1) se utilizaron para buscar correspondencia temporal entre las variaciones de los datos de presión atmosférica, dirección e intensidad del viento, con los períodos de ANMCT. Esos datos fueron cruzados con el fin de examinar la existencia de eventuales correlaciones.

Para tratar de evidenciar estas correlaciones a escala regional, recurrimos al modelo europeo de re-análisis ERA-40 de la base de datos ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). Los datos del proyecto ERA-40 asociados a su predecesor, el modelo ERA-15, compilan la información de circulación atmosférica de 1957 hasta el año 2002 con una resolución horizontal de 2.5°. Los datos utilizados fueron la presión atmosférica en milibares y los componentes U10 y V10 del viento en m/s (calculados cada 6 horas). De la misma manera que para la escala local se buscó relación temporal cruzando las señales de aumento de nivel mareográfico y los diferentes componentes meteorológicos.

Los valores extremos

De otra parte se busca en Bocagrande el origen de las inundaciones causadas por mar de leva y su relación con los datos mareográficos. Estos datos brutos permiten establecer frecuencias de ocurrencia calculadas a partir de una Función Generalizada de Valores Extremos-FGVE (General Extreme Values). El cálculo de esta función tiene por meta facilitar estimaciones de nivel para la elaboración de escenarios. La teoría de los valores extremos [20] fue desarrollada para estimar las probabilidades de retorno de acontecimientos poco frecuentes. Esta permite extrapolar el comportamiento de la cola de la distribución a partir del reparto de los datos observados. El modelo más utilizado para describir los comportamientos estadísticos de los valores extremos en hidrología y climatología es la distribución estadística de Gumbel.

La utilización de la FGVE [21] (figura 7):

$$G(z) = \exp \{ -[1 + (z - \mu) / \sigma]^{-1/\alpha} \}$$

tiene en cuenta las leyes de Gumbel, Frechet y Weibull, siendo μ un parámetro de localización, σ de escala y α de forma, como una solución general para el estudio de valores extremos.

Las características de los datos se presentan en la figura 6, después de haber excluido el 12.23 % de observaciones que faltan (2233 días). La distribución tiene como características: un efectivo de 16 030 días, una media de 38 mm y una mediana de 37 mm, un mínimo de -170 mm, un máximo de 381 mm, con una desviación estándar de 58.4.

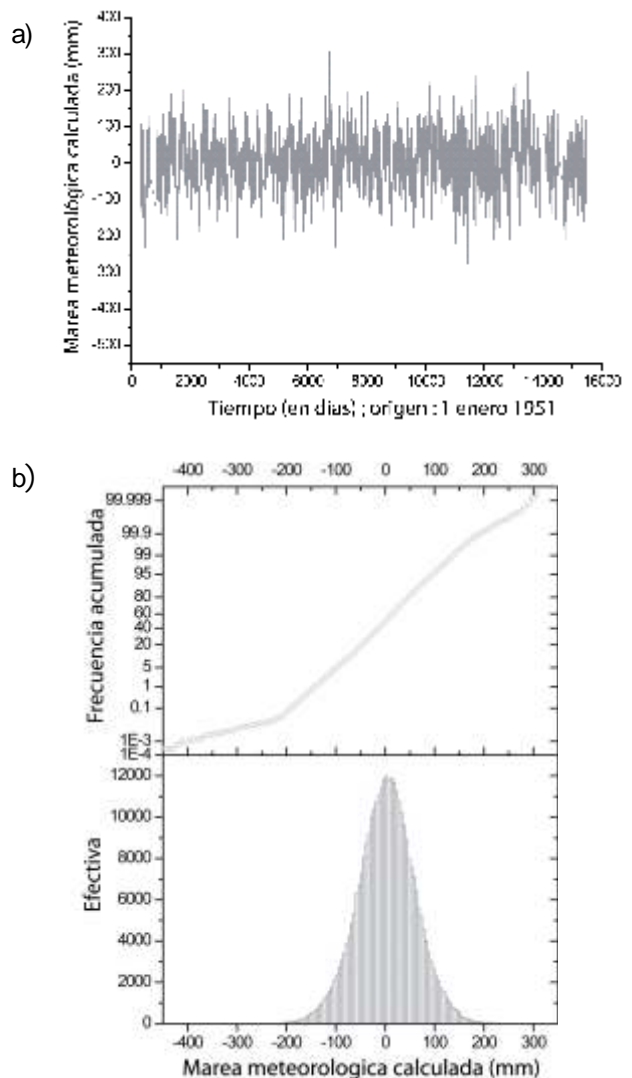


Figura 4. Conjunto de las características de la serie de tiempo estudiada (1. marea meteorológica (en curva), 2. marea meteorológica acumulada y en efectiva, 3. tabla de los valores centrales).

La FGEV tiene como características una media de 14.102 con un error estándar de 0.455, una varianza de 57.525 con error estándar de 0.087, y un coeficiente de forma de -0.156

Tabla 1: Probabilidades retorno determinadas por la FGEV.

Período de retorno (años)	Altura del nivel del mar en (mm)	Período de retorno (años)	Altura del nivel del mar en (mm)
1	233	40	298
5	266	50	301
10	278	100	309
20	288	200	317
30	294	300	321

En la tabla 1 se nota que los resultados de la predicción, para retornos que van hasta 50 años, están de acuerdo con las observaciones (50 años de observaciones). Los datos 306, 309 y 310 mm se sitúan al nivel de crecidas de la bahía cuya probabilidad de retorno es del orden del siglo y que tienen lugar particularmente durante acontecimientos excepcionales como el huracán Lenny en 1999. La observación de 381mm (observación 18204 del 2 de noviembre 2000) es totalmente excepcional y puede deberse a un aumento puntual del Canal del Dique, o a un error en la toma de datos a lo largo del día.

Estimación de niveles alcanzados

a) Límites de la consideración de los períodos de retorno de los ANMCT

Se elaboró un primer escenario de inundación teniendo en cuenta un ANMCT de 30 cm (período de retorno de 50 años calculado a partir de la función). Esta información es de interés en la parte interna de la bahía sin la acción del oleaje, que permite observar la sensibilidad de la franja interna ante oscilaciones del nivel marino de poca amplitud. Estas elevaciones del nivel del mar estimadas por la FGEV subvaloran los impactos sobre las playas en la parte exterior de la península. Las estimaciones no permiten dar cuenta de las inundaciones que podría causar un mar de leva mediano ya que otros factores tales como fenómenos hidrodinámicos ('set-up' y 'run-up') que tienen lugar en la zona de rompiente no están considerados. Hemos tenido entonces que reevaluar las alturas potencialmente alcanzadas durante episodios de mares de leva teniendo en cuenta otras fuentes de datos.

b) Niveles del agua durante los mares de leva

Se estudiaron varias fuentes de datos locales con el fin de determinar cuales habían sido las consecuencias de los mares de leva en la segunda mitad del siglo XX. Este análisis, en cuanto a la recurrencia y amplitud de los mares de leva, permitió destacar 28 episodios de inundaciones de diferentes importancias en 50 años, lo que permite afirmar según los sectores afectados que un aumento del plano de agua de 50 cm corresponde a simular un mar de leva de amplitud media.

Más aun, valiéndonos de los archivos del periódico local, El Universal, www.eluniversal.com.co, así como de numerosos testimonios, pudimos determinar cuales fueron los episodios de inundación más importantes a lo largo de los 50 últimos años. En ellos, el mar penetró en el barrio hasta alcanzar las calles de la tercera fila de bloques. Tal progresión de las aguas puede ser simulada por una elevación del plano de agua de 1 m. Esos niveles considerados como válidos con respecto al conjunto de información histórica pudo ser relacionada con la información topográfica.

c) Consideraciones sobre la elevación actual del nivel del mar

Se trata de un fenómeno marcado en la región, que amenaza con aumentar la sensibilidad de la ciudad al desarrollo de fenómenos meteo-marinos extremos en los próximos decenios. Así, los registros del satélite Topex-Poseidon muestran un valor de elevación del nivel absoluto comprendido entre 2.5 mm y 5 mm en el período 1993-2004 en la cuenca Suroeste del Caribe [1].

Los datos de elevación del nivel relativo del mar que proceden de los mareógrafos cubren períodos más largos y revelan valores aún más elevados, obtenidos de los recientes estudios del CIOH que se basan en el análisis de los datos mareográficos de varias estaciones alrededor del mar Caribe [22]. El rango de elevación fue entre 2.0 y 3.6 mm al año en el período 1907-1997 para la estación de Cristóbal de Panamá. Para la estación de Cartagena, en el período 1952-1992, la estimación es de 5.6 mm al año [23]. En un trabajo similar [24] se obtuvieron elevaciones de 1.6 mm para la estación de Cristóbal y de 4.5 mm por año para Cartagena. No obstante se obtiene un valor levemente inferior para el período 1951-2000 de 200 mm de elevación en 50 años, o sea de aproximadamente 4 mm al año, (figura 4a),

similares a los encontrados en [24]. Los mayores valores en Cartagena podrían deberse a la clase de suelo de la península que provoca ritmos de subsidencia que acentúan localmente el aumento del nivel del mar. En estudios anteriores, se elaboraron escenarios para la cuenca Suroeste Caribe con el fin de evaluar las consecuencias de este aumento en el próximo siglo [5]. Para ese trabajo se tomó como valor de referencia la media entre la estimación alta y baja de los valores de elevación del nivel relativo del mar observados en Cristóbal, en Panamá, osea 2.8 mm/año [23]. Este estudio propone valerse de este ritmo de elevación al horizonte 2030, o sea un aumento de 6.7 cm y al 2100 que sea de 26.2 cm.

Elaboración de un modelo numérico de terreno

La cartografía utilizada para evaluar el riesgo de inundación en la península de Bocagrande está basada en la elaboración de un modelo de terreno digital de gran precisión, en la determinación del nivel de agua que representan episodios de aumento de nivel del mar, de mar de leva y en los valores locales de elevación del nivel marino en el siglo XXI.

Los datos empleados en la constitución del DTM se obtuvieron con la tecnología aeroportada LIDAR (Light Detection And Ranging), previamente ortorectificados y filtrados con la ayuda del programa MARS [23-25]. Los datos proceden de la misión realizada por la DIMAR (Dirección General Marítima de Colombia) en diciembre de 2005 y abarcó el litoral colombiano desde Punta Canoas hasta el Sur de Tierra Bomba. Esta información está en coordenadas X, Y, Z según el sistema de coordenadas colombiano MAGNAS-SIRGAS, con origen en Bogotá-Magna ($04^{\circ} 35' 46.3215''N$; $74^{\circ} 04' 39.0285''W$). Los datos están separados unos de otros, en menos de 1 m en promedio, lo que genera una cantidad de datos muy importante, de 1 338 825 puntos. Esta red de puntos permite constituir un DTM muy completo y preciso. Sin embargo, cabe inevitablemente un pequeño margen de error en las coordenadas de los puntos obtenidos con esta tecnología que se estima en ± 20 cm entre cada punto [25].

La precisión del levantamiento de puntos aeroportados fue verificada con puntos de control determinados con un DGPS Leica de precisión milimétrica, resultando en que la diferencia máxima en la vertical, entre los puntos de control y los puntos LIDAR correspondientes, varió entre 25 cm y + 18 cm y que el margen de error mediano

de los 16 puntos (en valor absoluto) fue de 9.01 cm. Este margen de error es coherente con los datos que se encuentran en la literatura [25]. Se puede entonces considerar el DTM preciso en más o menos 25 cm en el conjunto de la zona estudiada.

Se utilizó el programa SURFER [26] para construir el DTM. La superficie estudiada cubre la zona $X = 836985$ hasta 839500 e $Y = 1641120$ hasta 1644900 con un pixel de 5 m en cada dirección, osea 757 líneas por 504 columnas. Se obtuvo con imposición de filtros destinados a eliminar los ruidos y con triangulación de Delaunay e interpolación lineal (figura 8). Se modificó el origen de los Z para facilitar la comprensión y poner a 0 el nivel del mar que figura en los datos a -5.664 altitud elipsoidal (sistema de proyección colombiano Magnas Sirgas origen Bogotá).

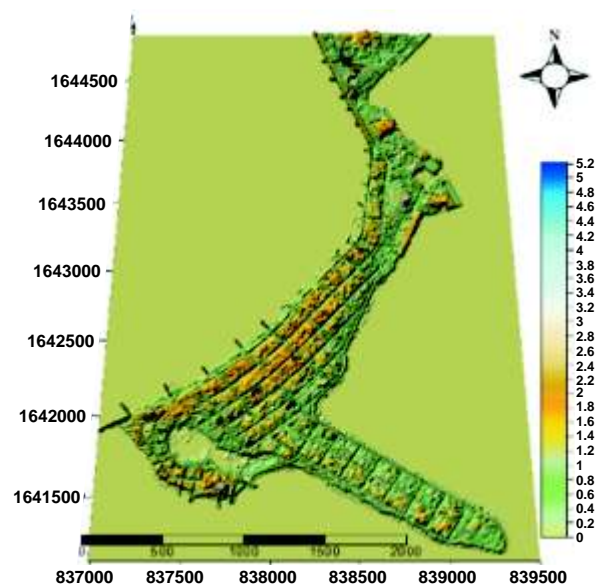


Figura 5. Modelo digital de terreno por triangulación de Delaunay e interpolación lineal.

Resultados

Crónica mareográfica

El cálculo de los armónicos de marea en Cartagena muestra que la marea astronómica es de amplitud micromareal (unos 60 cm de amplitud máxima entre la pleamar y la bajamar), con variaciones altimétricas comprendidas entre 30 y 95 cm (figura 4). El régimen es de tipo mixto con predominio semi-diurno.

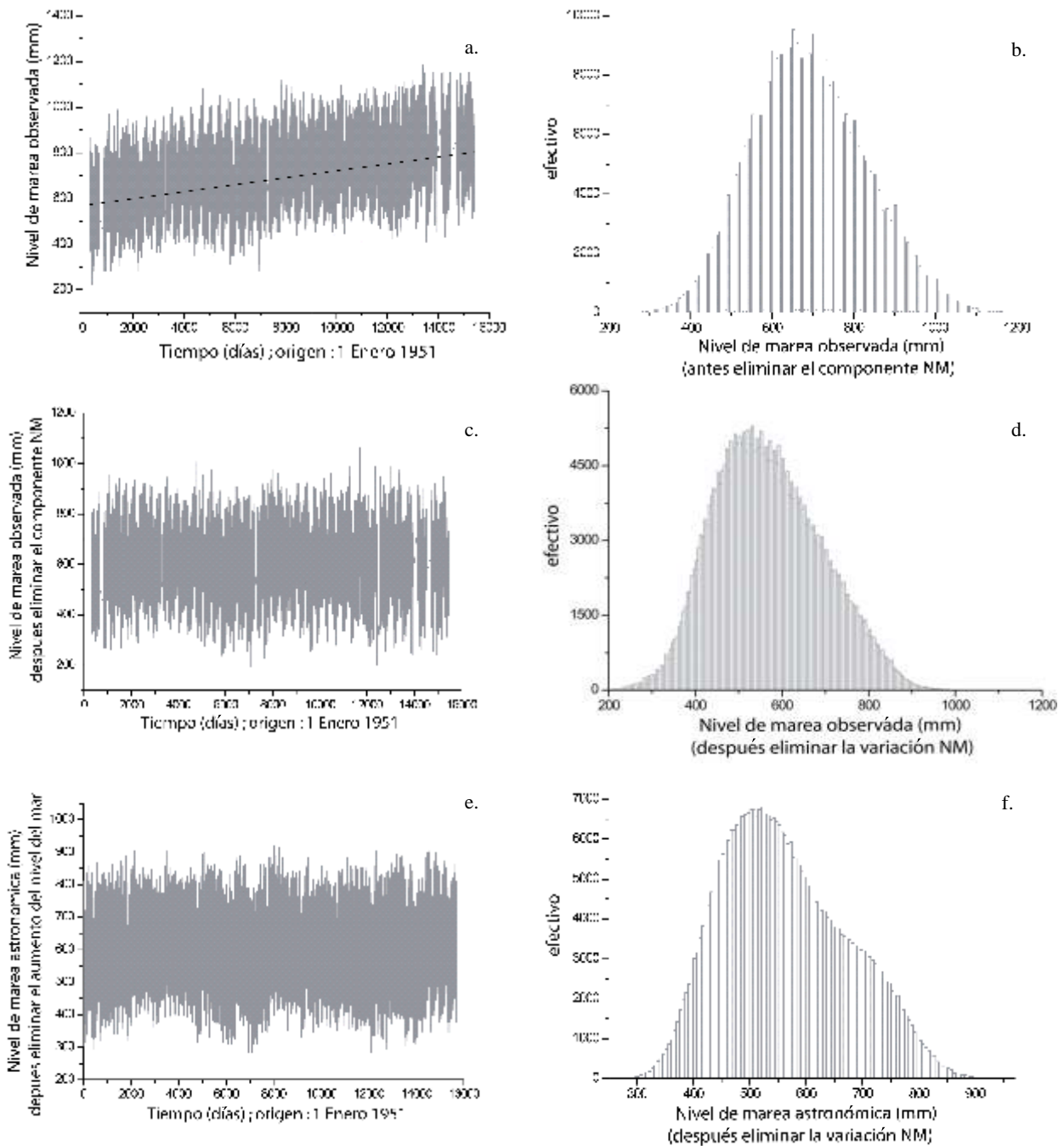


Figura 6. Detalles de la crónica mareográfica (a, b: marea observada a Cartagena, respectivamente en curvas y diagrama; c, d: marea observada en Cartagena después de eliminar la tendencia lineal o componente de Nivel Medio NM; e, f: marea astronómica en Cartagena después de eliminar la tendencia lineal de la elevación del nivel del mar).

Los aumentos de nivel

Los eventos de ANMCT mayores de 200 mm que representan 88 días de los 18265 días de la serie temporal fueron aislados y analizados comprobando la

ausencia de un perfil típico único de AMNCT. Sin embargo varias configuraciones se pueden identificar y asociar a diferentes orígenes (figura 7). Desde este punto de vista, para comprender las variaciones del

nivel del agua, es importante recordar que el mareógrafo está situado en la Bahía de Cartagena. Esta localización particular puede provocar una alteración de la señal (generalmente subestimaciones) de los aumentos que se producen al nivel de la costa. Esta posición asociada a las características morfológicas de la bahía, acarrea igualmente la introducción de ruido o aumentos estacionales del nivel de agua en relación con las lluvias locales y los caudales del canal de Dique (que desemboca en la bahía).

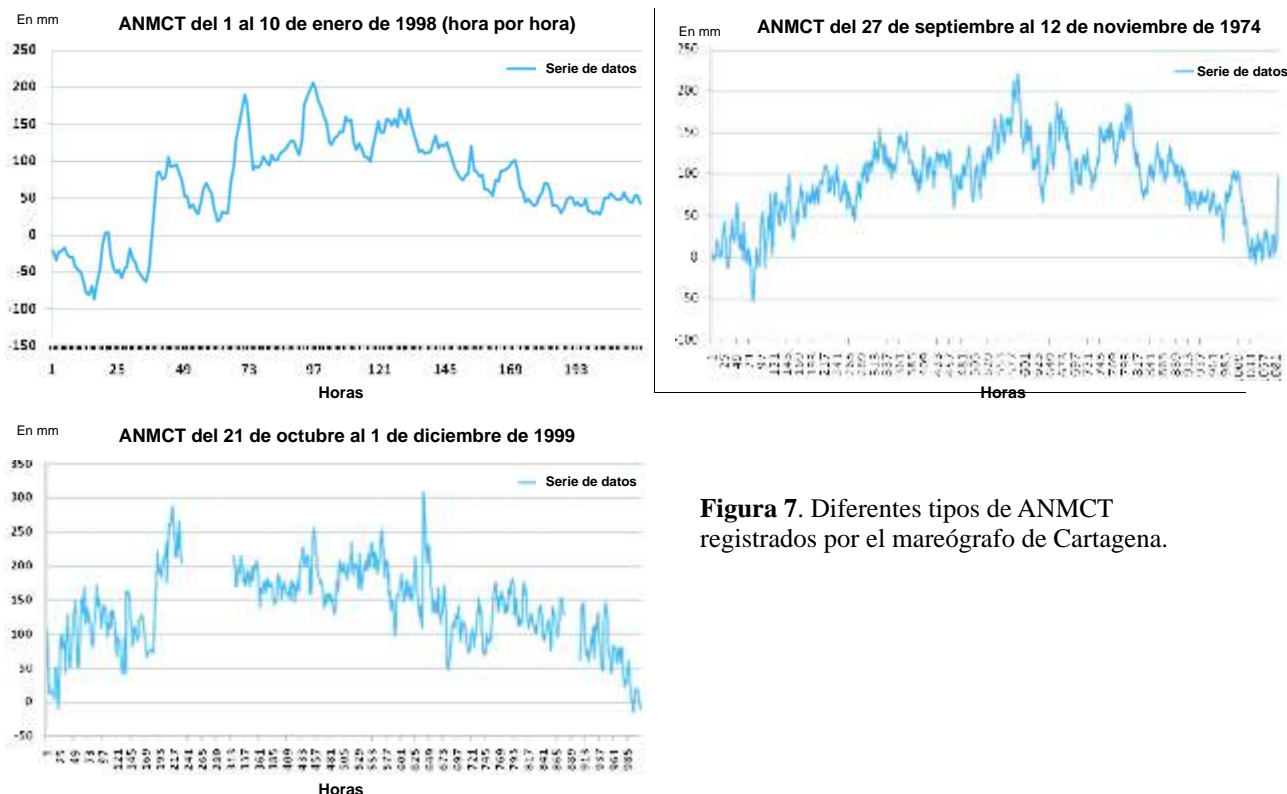


Figura 7. Diferentes tipos de ANMCT registrados por el mareógrafo de Cartagena.

Al analizarlo hora por hora, comprobamos también, que la subida y bajada del nivel no son lineales y que estas fluctuaciones parecen ser cíclicas. Estos saltos se atribuyen a la inconstancia de los motores meteorológicos de la elevación marina (el viento y la presión atmosférica). Su intensidad puede en efecto evolucionar a lo largo del día y durante la noche. El análisis de los residuos permitió poner en evidencia la existencia de diferentes tipos de aumento de nivel del mar. ANMCT clásicos, aumentos que mantienen un nivel elevado durante varios meses, llamados aumentos estacionales, y aumentos mixtos en los que las influencias estacionales y las de episodios de tormenta se juntan. Los aumentos estacionales tienen una frecuencia anual y son provocados principalmente por el aumento del caudal del canal del Dique de julio a noviembre (período local de lluvias). Es la fisionomía de la Bahía de Cartagena, donde las comunicaciones con el mar están limitadas, lo que provoca una

acumulación de agua en la bahía y su evacuación progresiva mantiene un nivel elevado durante varias semanas.

Un origen meteorológico regional

Se comprobó la ausencia de correlación significativa entre los ANMCT y los datos meteorológicos locales y semi-locales, en la mayoría de los casos. Además, se observó que los aumentos no se presentan al mismo tiempo que las inundaciones en el frente marino de la península. Las primeras parecen relacionadas ante todo con las variaciones del caudal del canal del Dique que desemboca en la bahía, mientras que las segundas parecen estar principalmente correlacionadas con las condiciones meteorológicas regionales.

El tratamiento a escala semi-local revela por ausencia de correlaciones con los 'motores' meteorológicos locales y por observación del fenómeno a menor escala que las

inundaciones llamadas localmente mar de leva se deben a la progresión de frentes fríos de orientación Nor-Noreste. Estos frentes son frecuentes en período seco y particularmente de noviembre a finales de febrero, entran al mar Caribe y generan oleaje de fuerte amplitud teniendo en cuenta la regularidad de los vientos que lo levantan. Cuando estos frentes progresan más bajos en latitud, la extensión de la zona de generación de olas, de 1400 km desde el Noroeste y 650 km desde el Norte, permite la génesis de un imponente oleaje que engendra una concentración de agua al llegar a la costa colombiana, origen del aumento del nivel medio del mar en las playas externas de la península de Bocagrande. Este aumento resulta de fenómenos de 'set-up', a la vez el 'set-up' dado a los vientos que empujan la masa de agua hacia la costa y el 'set-up' dado a la acción mecánica de las olas en la zona de rompientes. Este fenómeno de 'set-up' acarrea un 'run-up' más o menos importante en función del tamaño de las olas que alcanzan a romper en las calles que están al frente del mar. La meteorología local puede alimentar el fenómeno con una orientación atípica de los vientos o una intensidad persistente. Este fenómeno pudo comprobarse con una animación regional sobre el mar Caribe durante un episodio de inundación por un mar de leva, fue sacada del modelo WW3 (Wave Watch 3, modelo de oleaje en alta mar desarrollado por H.Tolman, NOAA) [27].

Las condiciones meteorológicas y oceanográficas extremas afectan con regularidad esta región del Caribe. Pero la importancia de los impactos, sobretudo durante los episodios de mar de leva, es debida a las particularidades de la costa. La exposición local y la abertura del litoral al mar son las características que determinan el impacto de las inundaciones marinas [10.28]. En el caso de Cartagena, la orientación Noreste Suroeste de la costa y la posición de la ciudad frente al mar provocan una alta sensibilidad del lugar al aumento del tamaño de las olas. Además, teniendo en cuenta la configuración de los fondos enfrente del barrio de Bocagrande, las olas tienden a tomar localmente más amplitud y aumentar su progresión en la tierra durante los mares de leva.

Elaboración de escenarios de inundación

a) Mar de leva promedio

Al aumento de 50 cm del plano de agua considerado en la parte precedente se le han añadido las estimaciones

recientes de elevación del nivel del mar para el siglo XXI [1.5]. Estos escenarios muestran qué fenómenos de esta amplitud, relativamente frecuentes (9 veces en 50 años), provocan inundaciones consecuentes. Partes enteras de la península se encontrarían bajo las aguas, principalmente la parte más vulnerable que es el único eje de comunicación con los barrios del centro de la ciudad (figuras 8 y 9). Más en detalle, ciertos sectores serán gravemente afectados, sin contar con la acción mecánica de las olas que podrían romper al interior de la tierra causando importantes daños.

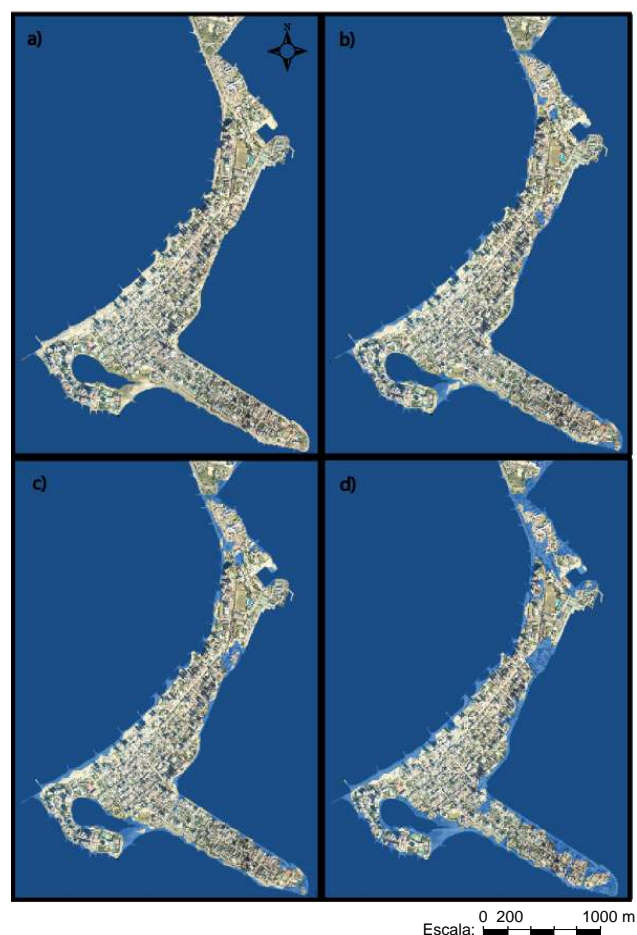


Figura 8. Ilustración de los escenarios de inundación para un mar de leva de 50 cm: a) situación actual b) simulación de mar de leva provocando un aumento del nivel marino de 50 cm, c) simulación de mar de leva provocando un aumento del nivel marino de 50 cm asociado al aumento del nivel del mar proyectado al 2030, 56.7 cm, d) simulación de mar de leva provocando un aumento del nivel marino de 50 cm asociado al aumento del nivel del mar proyectado al 2100, 76.2 cm.



Figura 9. Detalle del sector más afectado, la entrada del barrio de Bocagrande: a) elevación marina de 50 cm, b) elevación marina de 50 cm asociada al aumento del nivel del mar proyectado al 2030, 56.7 cm, c) elevación marina de 50 cm asociada al aumento del nivel del mar proyectado al 2100, 76.2 cm.

b) Mar de leva extremo

Según la información existente en Cartagena, las mayores inundaciones causadas por mar de leva que conoce la ciudad desde 1950 son las del 21 de febrero de 1988 durante el paso del huracán Joan, cuyo alcance sirve de comparación con las simulaciones de mar de leva extremo aquí realizadas. Como se hizo anteriormente, los valores que corresponden al nivel del agua durante un mar de leva que se estimó con una elevación del plano de agua de 1 m, fueron asociados a las proyecciones realizadas por el CIOH en cuanto a la elevación local del nivel marino para el 2030 y el 2100 (figura 10).

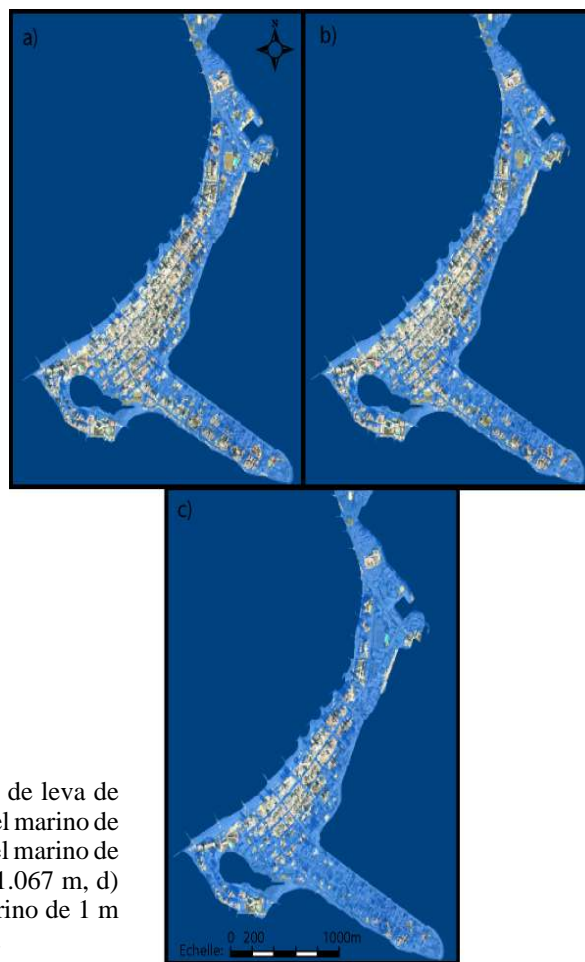


Figura 10. Ilustración de escenarios de inundación para un mar de leva de 1 m.: a) simulación de mar de leva provocando un aumento del nivel marino de 1 m, b) simulación de mar de leva provocando un aumento del nivel marino de 1 m asociado al aumento del nivel del mar proyectado al 2030, 1.067 m, d) simulación de mar de leva provocando un aumento del nivel marino de 1 m asociado al aumento del nivel del mar proyectado al 2100, 1.262 m.

Discusión

El estudio de la altura de agua al nivel del mareógrafo permitió evidenciar aumentos del nivel del mar, puntuales o estacionales debidos a las condiciones atmosféricas, pero también a la fisionomía y a la llegada de aguas a la bahía. Estos aumentos del nivel del agua de leve amplitud provocan la inundación de las calles más bajas de la parte interna pero en general no tienen lugar al mismo tiempo que las inundaciones del frente de mar. Las inundaciones marinas que afectan la franja externa de la península, bien se conocen en Cartagena. Se pudo comprobar que se produjeron en fechas en las que los residuos que corresponden a la marea meteorológica son generalmente positivos aunque relativamente poco importantes. En efecto, la distancia entre el litoral y las condiciones meteorológicas que provocan los oleajes al origen del '*set-up*', hacen a las señales meteorológicas imperceptibles o de manera muy atenuada hacia la costa.

Los escenarios que ilustran inundaciones marinas de media o extrema importancia, evidencian una muy importante vulnerabilidad del sector a los riesgos marinos, dada la debilidad de su altimetría (poca altura). En efecto, la elevación del plano de agua, aunque tenga consecuencias importantes (en el último escenario la totalidad de las calles del barrio quedan inundadas), es limitada. Así, una elevación de 1.26 m (escenario al 2100 para un mar de leva de 1 m) es un valor relativamente bajo que puede presentarse varias veces por siglo. En ese sentido se pueden imaginar mayores niveles en el caso en que un huracán afectara directamente Cartagena.

La parte interna de la península estaría igualmente muy afectada en caso de inundación marina ya que la altitud es allí menor. Esta parte es entonces más sensible a la elevación del plano de agua. Como lo vimos anteriormente, las variaciones que tratamos de caracterizar con las condiciones climáticas locales como los ANMCT clásicos, resultan también de los factores hidrodinámicos y morfológicos de la bahía que habría que estudiar más detalladamente (aumento exagerado del caudal del canal del Dique, o el impacto local de fuertes lluvias).

Además, la elevación global del nivel del mar es un factor central en el aumento de las consecuencias de

los riesgos que afectan entonces tanto el interior como el exterior. Su elevación relativa podría ser acelerada por fenómenos de subsidencia por licuefacción [14] que conciernen la totalidad del sustrato de la península de Bocagrande.

Finalmente, las herramientas utilizadas para este intento de modelación, si bien permiten cartografiar el riesgo y el aumento pasivo del nivel de las aguas, no permiten tener en cuenta los componentes dinámicos de las inundaciones. Las características y el origen de los mares de leva se han podido evidenciar y su característica principal es generarse a cierta distancia de la costa y tener su origen en un '*set-up*' al nivel del litoral que permite la penetración del oleaje al interior de las tierras. Para obtener una mejor precisión del avance de las aguas se podría utilizar un modelo dinámico de oleaje alimentado con datos observados recientemente [29].

Conclusiones

Interesarse por el riesgo de inundación en las penínsulas de Bocagrande y Castillogrande tanto a escala local como global nos ha permitido poner en evidencia dos orígenes. Las inundaciones pueden proceder de aumentos del nivel del mar generados por las condiciones atmosféricas locales añadidas a las variaciones del caudal del canal del Dique y a las lluvias locales, o ser causados por factores meteorológicos de más pequeña escala. Durante la época seca frentes fríos penetran en la cuenca caribeña con una dirección Sur Sureste y generan oleaje de tamaño muy importante. Cuando este oleaje se presenta, la fisionomía y la orientación de la costa son los principales factores de vulnerabilidad. La orientación de las olas provocadas por la progresión de los frentes es perpendicular a la costa, lo que produce un '*set-up*' importante y permite por medio del '*run-up*' que las olas se estrellen hasta en las calles de frente al mar.

Si se tienen en cuenta las proyecciones de elevación del nivel marino local, los episodios de inundaciones se van a amplificar y van a ser cada vez más frecuentes. Por otra parte, se admite en numerosos estudios recientes que las condiciones meteorológicas extremas tienen frecuencias y niveles de intensidad en aumento en la cuenca del Caribe [4,8].

Si no se toma ninguna medida, incluso pequeñas variaciones de las condiciones marinas podrían provocar la parálisis de la circulación y dañar la infraestructura urbana. Las inundaciones más frecuentes podrán, además de los fenómenos ya observados, engendrar crisis erosivas importantes haciendo más vulnerables los sistemas de playa y dejar obsoletos el conjunto de defensas existentes. El riesgo actual y futuro de inundación pone en tela de juicio la elección de urbanizar aun más Bocagrande y Castillogrande e introduce la necesidad de actuar ya. Al mismo tiempo deja importantes interrogantes en cuanto a su perennidad, que deben convertirse en un reto a enfrentar en el futuro inmediato, no dentro del contexto del temor, sino en el de la inventiva y la creatividad, para generar el factor de seguridad necesario que permita tomar decisiones correctas y adaptarnos sabiamente al cambio climático que ha llegado.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento al Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (Colombia), por haber recibido a Alexandre Nicolae Lerma durante la elaboración de su tesis de maestría, lo que permitió llevar a cabo ese estudio, y al Laboratoire de Géographie Physique, UMR 8591 du CNRS (Francia). El estudio no hubiera podido ser realizado sin la entrega de los archivos de los mareógrafos de Cartagena de Indias por el Global Sea Level Observing System, ni la información topográfica de LIDAR por parte del CIOH.

Referencias bibliográficas

- [1] IPCC. Working Group I: The physical basis of Climate change. Contribution of working group I to the Fourth Final report. [online]:2007; URL:<http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/wg1-report.html>.
- [2] Curry J. Le réchauffement global et les ouragans: la Science, les controverses et les risques à venir en Amérique latine. Colloque les Ouragans de l'Atlantique Nord et le réchauffement climatique: l'exemple de la Caraïbe, Georgia Institute of Technology, 2007:28.
- [3] Dolique F, Jeanson M, Besson J. A monitoring network for assessing the impact of extreme marine meteorological events on tropical beaches. *J. Coast. Res.* 2007; SI 50:77-81.
- [4] Komar PD, Allan JC. Increasing hurricane-generated wave heights along the U.S. east coast and their climate controls. *J. Coast. Res.* 2008;24 (2).
- [5] INVEMAR. The Netherlands Climate Changes Studies Assistance Program: Colombia. Definición de la vulnerabilidad de los sistemas bio-geofísicos y socioeconómicos debido a un cambio en el nivel del mar en la zona costera colombiana y medidas para su adaptación, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andreis (INVEMAR), Santa Marta: 2003, 7 volúmenes.
- [6] Sierra-Correa PC, Arias-Isaza FA, Alonso D, Andrade CA. Colombia: Country Experiences and Highlights Vulnerability Assessment on Sea Level Rise from Global Change Effects., In: Netherlands Climate Change in developing countries, An overview of study results from the Netherlands Climate Change Studies Assistance Programme, Institute of Environmental Studies, 1, M.A. van Drunen, R. Lasage and C. Dorland (eds.) Amsterdam, 2005:32-40.
- [7] Pirazzoli P. Surges, atmospheric pressure and wind change and flooding probability on the Atlantic coast of France. *Oceanol. Acta.* 2000;23(6):643-661.
- [8] Stone G, Liu B, Jose F. Winter storms and tropical cyclone impacts on the short-term evolution of beaches and barriers along the north-eastern Gulf of Mexico. *Coast. Sediments.* 2007;1:1-16.
- [9] Titus JG, Richman C. Maps of land vulnerable to sea level rise: modeled elevations along the US Atlantic and Gulf coasts. *Clim. Res.* 2001;18:205-228.
- [10] Ullmann A, Moron V. Configurations atmosphériques de vastes échelles spatiales et variabilité des surcotes dans le Golfe du Lion. *Cybergeo: Revue européenne de géographie.* 2007;406:15.
- [11] Anselme B, Durand P, Goeldner-Gianella L, Bertrand F. Impacts de l'élévation du niveau marin sur l'évolution future d'un marais maritime endigué. Le domaine de Graveyron, bassin d'Arcachon (France). *Vertigo, la revue électronique des sciences de l'Environnement.* 2008;8(1).
- [12] Costa S, Cantat O, Pirazzoli P, Lemaître M, Gamas L, Delahaye D. Le risque de submersion de tempête en manche orientale, analyse Météo-marine sur la période historique récente. 2004:4.
- [13] Durand P, Thomas Y-F, Benavides J, Ménanteau L, Andrade C, Gamero E. Evolution du trait de côte et vulnérabilité du littoral de Carthagène des Indes (Colombie) entre 1772 et 2004, Colloque, Interaction Nature-Société, analyse et modèles. UMR 6554 LETG. 2006:6 La Baule. France.
- [14] INGEOMINAS. Amenazas Geológicas Potenciales y Aptitud Urbanística del casco Urbano de Cartagena. Cartagena. 1995.
- [15] Vernet G, Lesueur P, Klingebiel A. Evolution morphologique et sédimentologique de la flèche de laguïto (Baie de Carthagène, Colombie). *Bulletin de l'Institut de Géologie du Bassin d'Aquitain.* 1978;23:127-145.

[16] Pagliardini J-L. Condition Hydrodynamiques et mécanismes Sédimentaires sur la plate forme cotière de Cartagena et le cordon littoral de la Boquilla. [Ph.D. Thesis]. Bordeaux. Université de Bordeaux 1, 1983:173.

[17] Molina A, Pelgrain A, Suzunaga J, Giraldo L. Comportamiento de la dinámica marina en el sector costero entre Gale-razamba y Cartagena. Boletín Científico CIOH 1996;(17):73-78.

[18] Caldwell P. Sea Level Data Processing On IBM_PC Compatible Computers, Version 3-10, Year 2000 Compliant. Joint Archive for Sea Level of the National Oceanographic Data Center and University of Hawaii Sea Level Center Ed., JIMAR Contribution 1998;(80):98-319.

[19] Foreman MG. Manual for Tidal Heights Analysis and Prediction. Pacific Marine Science Report 77-10. Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, Sidney, B. C. 1977;97.

[20] Embrechts P, Klüpelberg C, Mikosch T. Modelling extremal events. ed. Springer-Verlag, Applications of mathematics 33, New York. 1997.

[21] Coles S. An Introduction to Statistical Modelling of Extremes Values. ed. London, Springer 2001:208.

[22] Torres R, Gómez J-C, Afanador F. Variación del nivel medio del mar en el Caribe colombiano. Boletín Científico CIOH 2006;(24):64-72.

[23] Afanador F, Torres R, Gómez JC, Gutiérrez JC. LIDAR y fotografía aérea digital en la determinación del impacto del aumento en el nivel medio del mar en el sector de “La Boquilla”, Cartagena de Indias, Caribe Colombiano. Boletín Científico 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, J.D. Restrepo (editor), ISBN 978-958-720-020-1, Fondo Editorial Universidad EAFIT, COLCIENCIAS 2008:101-12.

[25] Ackermann F. Airborne laser scanning present status and future expectations. Journal of Photogrammetry & Remote Sensing. 1999;(54):64-67.

[26] Smith D, Wall W, Chen Z, Barnes R, Simons B, Keckler D. Surface mapping system, version 6.04, Golden Software Inc., Golden, Colorado, 1997.

[27] Ardhuin F, Magne R, Rasclé N, Queffeuilou P, Hamon M. Modélisation des vagues avec le code WAVEWATCH III: version 3.13-SHOM et Prévimer, aspects multi-échelles et multi-disciplinaires. Journée PCIM, 28 janvier 2008:14.

[28] Ullmann A, Pirazzoli P. Caractéristiques spatiales de la formation des surcotes marines dans le Golfe du Lion. Cybergeog: Revue européenne de géographie, 2007;362:12.

[29] Agudelo P, Restrepo AF, Molares R, Tejada CE, Torres R, Osorio AF. Determinación del clima de oleaje medio y extremal en el Caribe colombiano, Boletín Científico CIOH 2006;(23):33-45.