



ARTÍCULO

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

Lidar and digital aerial photography in the sea level rise impact determination in “La Boquilla” sector, Cartagena de Indias; Colombian Caribbean

Fecha recepción: 2006-06-21 / Fecha aceptación: 2006-08-15

Fernando Afanador Franco, E-mail: fafanador@cioh.org.co.

Rafael Ricardo Torres Parra, E-mail: rtorres@cioh.org.co.

Juan Carlos Gómez López, E-mail: cmaizc@cioh.org.co.

Julio Cesar Gutiérrez Briceño, E-mail: jgutierrez@cioh.org.co.

Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas CIOH,
Isla Manzanillo, Cartagena de Indias, D.T. y C.

Resumen

Debido al riesgo en que se encuentran los habitantes de las zonas costeras colombianas ante una amenaza de ascenso del nivel medio del mar y por otra parte, debido también a la ausencia de Modelos Digitales del Terreno (DTM's) con exactitud horizontal y vertical centimétrica, se establecieron espacialmente las zonas del litoral Caribe colombiano que se inundarán en el sector de la Boquilla, así como también se evaluaron los efectos de esta inundación sobre la población y sus viviendas, a través de la utilización de las tecnologías del sensor LIDAR (Light Detection and Ranging), cámara métrica digital y del SIG ArcGis 9.0. En términos de alcance y relevancia, los resultados de la investigación proporcionan un elemento de soporte técnico para la toma de decisiones relacionadas con el control y administración de los litorales por parte de la Autoridad Marítima Nacional (DIMAR) y de sus Capitanías de Puerto.

El desarrollo de la investigación incluyó la toma de fotografías aéreas digitales simultáneamente con la operación del sensor LIDAR, la posterior ortorectificación digital del material aerofotográfico y el filtrado de la información tridimensional obtenida con el sensor LIDAR durante su operación en Diciembre de 2005; así como también la adopción de escenarios de inundación, la utilización de las funciones del SIG ArcGis 9.0 para la generación de los DTM's; la recopilación de información sobre cantidad de población y sus viviendas; la determinación del riesgo y finalmente, la evaluación de la cantidad de población

afectada. Los resultados de la investigación además, de la utilidad para la Autoridad Marítima Nacional, proporcionan información adecuada para el conocimiento, análisis y gestión del riesgo debido al ascenso del nivel medio del mar en el litoral Caribe colombiano, por parte de autoridades nacionales, regionales y locales, encargadas de formular y poner en marcha, las políticas de desarrollo social y económico del país.

Plabras claves: LIDAR, Fotografía aérea digital, La Boquilla, Inundación, Ascenso del Nivel del Mar.

Abstract

Due to the risk in that the inhabitants of the Colombian coastal areas can be by an event of sea level rise, and on the other hand, the absence of Digital Terrain Models (DTM's) with horizontal and vertical accuracy of centimeters, it was established the Colombian Caribbean littoral areas that will be flooded in the Boquilla sector, as well as the effects of this flood on the population and their housings, through the use of the technologies of LIDAR (Light Detection and Ranging) sensor, digital metric camera and the ArcGis 9.0. In reach terms and relevance, the results of the research provides technical support elements for the taking of decisions related with the control and administration of coasts by National Maritime Authority (DIMAR) and their Captaincies of Port.

The development of the research included the simultaneously taking of digital aerial photographs with the operation of LIDAR sensor, the later digital orthorectificación of the photographs and the filtrate of the three-dimensional information obtained with the LIDAR sensor during its operation in December 2005; as well as the adoption of flood scenarios, the use of the functions of the ArcGis 9.0 for the generation of the DTM's; the

compile of information about the quantity of population and its housings; the determination of the risk and finally, the evaluation of the quantity of affected population. The results of the investigation in addition, of the utility for the National Maritime Authority, they provide useful information for the knowledge, analysis and administration of the risk due sea level rise in the Colombian Caribbean coasts to national, regional and local authorities, responsables of to formulate and to start up social and economic policies.

Key words: LIDAR, Digital aerial photography, La Boquilla, Inundation, Sea level rise.

Introducción

La Dirección General Marítima, a través del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, se encuentra adelantando la determinación técnica de la jurisdicción en el Caribe colombiano que le confiere el Decreto Ley 2324 de 1984. Para ello, ha desarrollado un Marco Conceptual dentro del cual, luego de una amplia exploración de posibilidades, ha encontrado conveniente y apropiado utilizar la combinación de tecnología LIDAR y aerofotografías métricas digitales, lo que permite generar modelos de terreno a partir de la información espacial de los datos LIDAR, como una herramienta adecuada para la producción de cartografía de zonas inundables con una exactitud altamente confiable, de manera que se puedan tomar decisiones técnicamente sustentadas, para la administración de la zona costera. De esta forma, se buscó determinar espacialmente, las zonas del litoral que se inundarían en el sector de la Boquilla, así como la población y las construcciones localizadas dentro de estas áreas, para finalmente, establecer los niveles de riesgo de acuerdo con una escala preestablecida.

Los resultados de la investigación son aplicables directamente en el modelo conceptual utilizado por la Autoridad Marítima Nacional - DIMAR para el control y administración de los litorales que se encuentran bajo su jurisdicción [4]. Adicionalmente, los resultados pueden ser utilizados en la adopción de medidas de mitigación, prevención y control de esta amenaza, dentro de un marco general de gestión del riesgo, especialmente por parte de las autoridades regionales, locales y los Comités de Atención y Prevención de Desastres en sus diferentes niveles de acción.

Área de estudio

La zona denominada “La Boquilla”, es una franja costera en dirección noreste - suroeste que se extiende desde la playa inmediatamente al Sur de Punta Manzanilla hasta la obra de protección costera de la Bocana Estabilizada de Mareas de la Ciénaga de la Virgen o de Tesca, Municipio de Cartagena de Indias, Departamento de Bolívar en el Caribe colombiano. Al noroeste limita con el mar Caribe y al sureste con la Ciénaga de la Virgen (figura 1).

Geológicamente, el área de la Boquilla hace parte de la formación de la zona de Cartagena, la cual ha sido identificada como una zona de transición entre las placas del Pacífico, Sur América y el Caribe [2]. La formación de la zona se encuentra muy ligada a la influencia del río Magdalena. La cantidad de elementos detríticos que transporta el río hacia el mar Caribe, son suficientemente importantes para influenciar la sedimentación dentro de toda la cuenca del Caribe colombiano; hasta el punto de considerarse que el principal material reciente que compone la costa de la zona de Cartagena, proviene de la sedimentación ocasionada por el río.

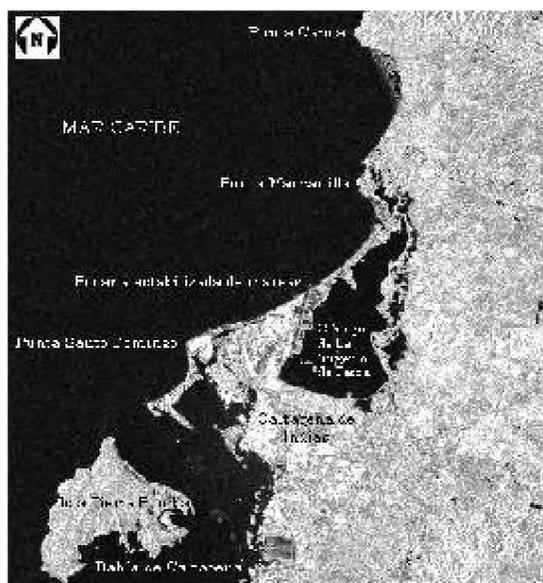


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

Desde el punto de vista geológico litoral, se destacan accidentes importantes en la dinámica litoral del sector [10]. El primero de ellos, Punta Canoa y la larga playa que le sucede al sur, por ser punto de inflexión en la dirección de la dinámica. El segundo es Punta Manzanilla, última saliente litoral, antes de la ciudad de Cartagena que se encuentra dividida en 3 cabos rocosos denominados los Morros. Al sur de estos aparece la gran acumulación arenosa que forma cordones litorales y flechas que encierran la ciénaga de la Virgen o de Tesca y el sistema de caños y lagunas que comunican con la bahía de Cartagena. Estas acumulaciones arenosas son el sustrato de los sectores sobre la costa denominados la Boquilla, Crespo y Marbella. El siguiente punto importante es Punta Santo Domingo, de origen arrecifal, que constituye un punto duro sobre el cual se edificó lo que actualmente se conoce como la ciudad amurallada de Cartagena de Indias. Al sur de este punto igualmente se encuentran acumulaciones arenosas que forman la zona costera denominada Bocagrande.

Por otra parte, las observaciones de las diferentes facies litorales y su repartición, han

mostrado la existencia de vestigios de un ascenso del nivel del mar reciente. La datación por el método de radiocarbono, promedió entre 2500 a 3500 años B. P., que ha dejado sus huellas sobre la costa al sur de Cartagena. Estos hallazgos se soportan en las facies arrecifales más antiguas, las cuales sugieren la ubicación del nivel del mar por encima del nivel actual.

En la zona de estudio, se presenta una boca que comunica la Ciénaga de La Virgen con el mar Caribe. Análisis morfológicos efectuados, muestran que esta boca natural de marea se encuentra en un estado de estabilidad dinámica pobre; es decir, que la combinación entre el transporte litoral, la fuerza de marea y el aporte de aguas dulces de la ciénaga, es tal que la Boca no es permanente, sino que se cierra y abre según la estación del año que se presente.

Metodología

1. Planteamiento del problema

El problema a resolver es la ausencia de estimaciones cuantitativas actualizadas y exactas acerca del impacto sobre la población humana y los bienes materiales, de un aumento en el nivel medio del mar en los litorales del Caribe colombiano. Es por esta razón que la presente investigación se orientó hacia el planteamiento y aplicación de una metodología que permitiera establecer claramente por una parte, el límite de la planicie de inundación y por otra, la cuantificación de viviendas y población potencialmente afectadas por esta clase de amenaza natural, empleando técnicas de sensoramiento remoto y funciones de análisis espacial de un Sistema de Información Geográfica (SIG).

2. Marco teórico y estado del arte

El LIDAR (**L**ight **D**etection **A**nd **R**anging) o escaneo laser, es un sistema de sensoramiento activo, que permite efectuar mediciones a

distancia sobre la superficie terrestre, a partir de un sensor dispuesto en el interior de una aeronave. El sensor obtiene puntos tridimensionales (x, y, z), a partir de los cuales se pueden generar Modelos Digitales de Elevación (DEM). La tecnología se basa en el principio LASER (Light Amplification by Stimulated Emisión of Radiation), que amplifica la luz por simulación de emisión y radiación.

La tecnología de un sistema LIDAR está conformada por los siguientes componentes: aeronave, unidad de GPS, Unidad de Movimiento Inercial y, Unidad Laser (sensor LIDAR). Mediante la combinación de estos elementos, se obtienen puntos de elevación a través de la emisión de señales de luz que viajan desde la fuente (sensor) hasta los objetos en la superficie terrestre, regresando nuevamente al sensor. El tiempo de regreso queda registrado en el sistema y a partir del sistema GPS y la Unidad de Movimiento Inercial - UMI, se calcula la posición (x, y, z) de cada punto.

La Unidad de Movimiento o de Medida Inercial (UMI), es un dispositivo que integra giróscopos y acelerómetros junto con un reloj para medir valores con respecto de un marco de referencia inercial. Permite la medición de los tres posibles giros de la aeronave durante el vuelo: viraje, cabeceo y balanceo.

Por otra parte, la fotografía aérea digital, empleando cámara métrica digital, ha sido una técnica relativamente reciente, que ha encontrado en la información obtenida con el sensor LIDAR, un buen nivel de complementación, especialmente para la modelación y análisis del terreno. Las fotografías aéreas digitales entre otras ventajas, presentan la de su estabilidad dimensional, ya que no les afectan las variaciones de temperatura del medio ambiente y no son objeto de una manipulación directa por parte de los usuarios. Sin embargo, la principal ventaja de la fotografía aérea digital es la representación pictórica de grandes extensiones del terreno, lo que facilita en gran

medida, las labores de fotointerpretación y análisis del terreno por parte de los técnicos y profesionales de diversas áreas del conocimiento.

La complementariedad de las técnicas de sensoramiento LIDAR y fotografía aérea digital, ya es reconocida en varios campos de aplicación, entre los que se destacan los estudios de ascenso del nivel del mar en varias partes del planeta. A este respecto, es de anotar que los cambios en la temperatura global afectan los componentes del ciclo hidrológico global en diferentes formas. A su vez, las altas temperaturas incrementan la cantidad de vapor de agua en la atmósfera, alterando los patrones de precipitación y el caudal de los ríos, para finalmente producir una expansión general del agua oceánica [15].

Los cambios del nivel del mar en cualquier sitio del planeta, son afectados por la combinación de factores locales, regionales y globales. Por otra parte, las variaciones entre diferentes estaciones de medición, también son afectadas, aparte de la calidad y longitud de las series de mediciones, por los cambios meteorológicos, oceanográficos y tectónicos. Desafortunadamente, en términos generales, se puede afirmar que no se dispone de registros instrumentales de una buena cantidad de sitios, distribuidos adecuadamente a lo largo y ancho del planeta. A pesar de lo anterior, las estimaciones realizadas durante el pasado y presente siglo en relación con el ascenso del nivel medio del mar en el planeta, oscilan entre 5 y 22.7 cm por siglo y otras, prevén aumentos de 30 cm para el periodo entre el año 2000 y el 2025 y, de más de 100 cm para el periodo 2000 a 2100 [8].

Desde el punto de vista económico, el ascenso del nivel medio del mar extiende sus efectos en la población, pesquerías, agricultura, recreación y productividad biológica. Se verán amenazadas la vida humana, las actividades agrícolas, la ganadería y las estructuras construidas por el hombre para su protección y abrigo. Adicionalmente, tendrá impacto directo

sobre el aumento de la profundidad del agua (inundación de las zonas más bajas y erosión de las playas), la modificación de las zonas intermareales (alteración del rango de mareas), y los diversos efectos sobre los ecosistemas costeros (intrusión del agua de mar hacia los acuíferos y suelos). Es por estas razones que un buen entendimiento de los procesos físicos y biológicos y el conocimiento detallado de la topografía de estas zonas, se requiere para un adecuado pronóstico y evaluación de los impactos locales, dentro de un marco general de evaluación del riesgo.

2.3. Hipótesis

La hipótesis que se planteó en la presente investigación fue: “La información altimétrica de los litorales del Caribe colombiano proporcionada por el sensor LIDAR, en combinación con la información planimétrica de detalle de la fotografía aérea digital y los datos instrumentales sobre ascenso del nivel medio del mar, relacionados a través de herramientas de análisis espacial y despliegue de un Sistema de Información Geográfica SIG, permiten establecer las planicies de inundación por ascenso del nivel del mar y evaluar los niveles de riesgo en los que potencialmente, se encontrarían los habitantes y los recursos materiales asentados en las zonas litorales”.

3. Metodología

3.1. Alistamiento de los sensores, diseño del vuelo y toma de datos

Con el fin de garantizar el óptimo funcionamiento de los sensores LIDAR Leica ALS40 y la cámara métrica digital DACS (Digital Airborne Camera System) con matriz de 4080 x 4080 y distancia focal de 55.127 mm, éstos fueron sometidos a los procedimientos de calibración pre-vuelo requeridos.

Una vez realizados estos procedimientos de calibración, se efectuó el diseño geométrico del vuelo sobre el área de estudio, con el fin de garantizar los requerimientos de cubrimiento

Panamá. Para efectos de cálculo, se tomó como aumento, el promedio de estos dos valores, correspondiente a 2.795 mm/año. Es de anotar que este cálculo corresponde solamente al efecto del aumento del mar; no al aumento del nivel de la Ciénaga de La Virgen, ya que no se dispone de datos instrumentales en este sector específico.

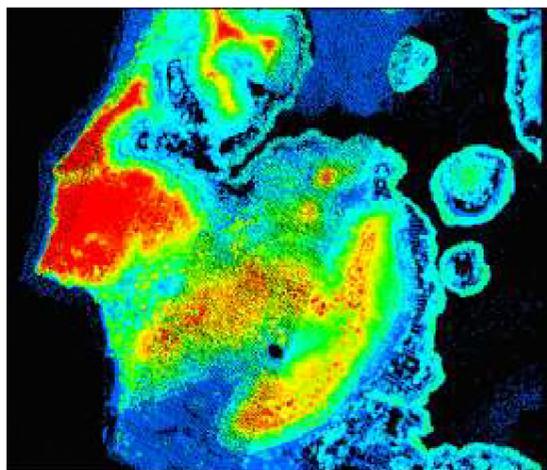


Figura 3. Ejemplo de nube de puntos capturados con el sensor LIDAR ALS40 en la zona Norte del área de estudio.

Complementariamente, dado que no es posible predecir de forma confiable, la totalidad de población y bienes que podrían ser afectados a futuro por un aumento en el nivel medio del mar, se adoptaron dos escenarios que comprendieron básicamente variables socioeconómicas y ambientales que facilitaron una descripción hipotética del posible desarrollo de las zonas litorales en el Caribe colombiano.

Estos escenarios correspondieron a los años 2030 y 2100 [7]. Sin embargo, en esta investigación, los valores esperados de ascenso del nivel medio del mar para el año 2030 fueron calculados tomando como base la altura elipsoidal (referida al elipsoide WGS84) calculada en el año 2006 [5] del nivel medio del mar para Cartagena (-5.644 m) a la cual se le adicionó el valor del incremento del nivel medio en 24 años (2030 -2006)

correspondiente a 0.0670 m calculado como $(0.002795 \text{ m/año}) \cdot (24 \text{ años})$. Esto dio como resultado, que la altura elipsoidal del nivel del mar para el año 2030 será de -5.577 m. Por su parte, para el año 2100, también se tomó la altura elipsoidal del nivel medio del mar como -5.644 m a la que se le adicionó el valor del incremento del nivel medio en 94 años (2100-2006) correspondiente a 0.262 m calculado como $(0.002795 \text{ mm/año}) \cdot (94 \text{ años})$, resultando que la altura elipsoidal del nivel del mar para el año 2100 será de -5.382 m.

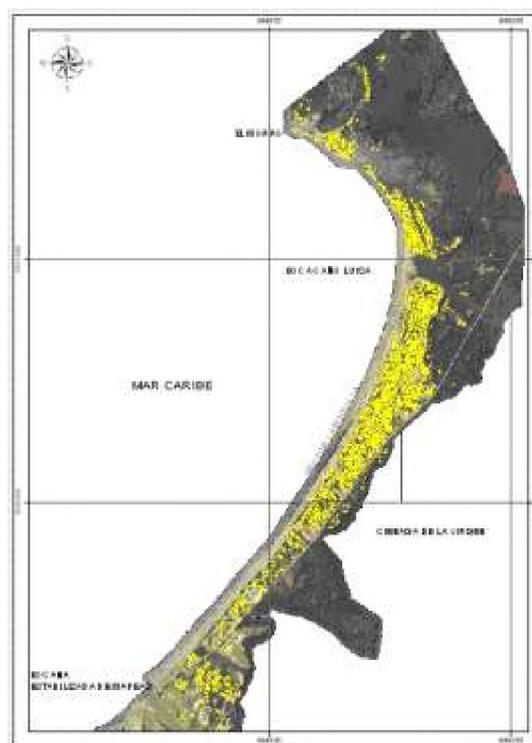


Figura 4. Ortofotomosaico digital de la zona de estudio. En color amarillo se observa la capa correspondiente a las unidades construidas presentes.

3.4. Estimación de la extensión de la inundación y determinación de la gravedad de las consecuencias de la amenaza

Para la determinación del área correspondiente a la planicie de inundación por ascenso del nivel medio del mar, se utilizó el software ArcGis versión 9.0. En ArcMap se cargaron los

archivos shapefile correspondientes a los puntos (X, Y, Z) del terreno, previamente filtrados que provenían de la masa de puntos LIDAR de la zona de estudio.

Con el fin de estar acorde con el nuevo sistema de referencia espacial utilizado en Colombia, se utilizaron las facilidades de ArcMap y ArcToolbox correspondientes a “Projections and Transformations” para definir y asignar el sistema de coordenadas MAGNA-SIRGAS con el origen Bogotá-MAGNA a los archivos shapefile anteriormente mencionados.

Con base en los archivos shapefile, se empleó el módulo “3D_Analyst” de ArcMap para generar un TIN (Triangulated Irregular Network) de la zona de trabajo. Posteriormente, se convirtió este archivo TIN a formato raster a través de la función “Convert TIN to Raster” del módulo 3D_Analyst”. Esto último, permitió contar con Modelos Digitales del Terreno rasterizados, lo que facilitó las operaciones posteriores de determinación de las planicies de inundación.

En el DTM rasterizado, se asignó manualmente el valor de “1” a los intervalos de altura del terreno comprendidos desde el primero hasta el que comprendiera el valor correspondiente a la altura del ascenso del nivel del mar (-5.577 m para el periodo 2006-2030 y; -5.382 m para el periodo 2006-2100). Adicionalmente se asignó también manualmente, “0” a los demás intervalos. Esto permitió generar un archivo con zonas inundadas y zonas no inundadas por el ascenso del nivel del mar, a las cuales se les asignó colores azul y café respectivamente en ArcMap.

Una vez obtenida la planicie de inundación, se almacenó como un “layer file” y se creó en ArcCatalog un nuevo “Feature Dataset”, dentro del cual se importó la capa correspondiente a las unidades de construcción presentes en la zona identificadas con base en las fotografías aéreas de la zona de estudio.

Para convertir en polígono la capa de planicie de inundación, en ArcMap se creó un mapa nuevo (archivo. mxd) y se cargó la capa o layer correspondiente a la planicie de inundación. Posteriormente, utilizando la opción “Conversión Tools” de ArcToolbox, se utilizó la opción “Raster to Polygon” para poligonizar la planicie de inundación y almacenarla en el nuevo “Feature Dataset” creado anteriormente.

Bajo ArcMap, se creó un nuevo mapa en blanco y se adicionaron las capas correspondientes al polígono de la planicie de inundación y la de unidades de construcción presentes en la zona con su respectiva topología de polígonos.

Utilizando la opción “Analysis Tools” de ArcToolbox, se efectuó el overlay o intersección entre las capas de unidades de construcción y la del polígono de planicie de inundación. Posteriormente, se utilizaron las opciones de “Selection” de ArcMap para seleccionar y obtener las estadísticas de las unidades de construcción que intersectaban y se encontraban por dentro del polígono de la planicie de inundación. Esto permitió obtener las cifras estadísticas de cantidad de unidades construidas potencialmente afectables por la inundación.

3.5. Determinación del índice de vulnerabilidad

Para la determinación del Índice de Vulnerabilidad (IV) se tuvieron en cuenta las consecuencias, específicamente en lo relacionado con pérdida de vidas y pérdidas de viviendas.

El Índice de Vulnerabilidad (IV) se definió como una función de dos variables: la cantidad de unidades de construcción afectadas y, la cantidad de habitantes de dichas unidades. De acuerdo con la cantidad de unidades de construcción afectadas, se estableció arbitrariamente un puntaje (Tabla 1). Así mismo de acuerdo con la cantidad de habitantes

afectados se estableció otro puntaje (tabla 2).

Tabla 1. Puntajes para el IV de acuerdo con la cantidad de unidades de construcción afectadas por la inundación.

Cantidad de unidades de construcción afectadas en la zona de trabajo	Puntaje
0-10	2
10-20	4
20-50	6
50-80	8
80-120	10
120-250	12
250-500	14
Más de 500	16

Tabla 2. Puntajes para el IV de acuerdo con la cantidad de personas afectadas por la inundación.

Cantidad de personas afectadas	Puntaje
0-30	2
30-60	4
60-150	6
150-240	8
240-360	10
360-750	12
750-1500	14
Más de 1500	16

Para el cálculo de Índice de Vulnerabilidad (IV) se utilizó la siguiente expresión de acuerdo con las cifras obtenidas con la herramienta "Analysis Tools" de ArcMap.

$$IV = \text{Puntaje por cantidad de UMCDs afectadas} + \text{Puntaje por cantidad de personas afectadas}$$

3.6. Determinación del riesgo

El Riesgo (R) se definió como una función de dos variables: la amenaza y la vulnerabilidad.

La influencia de la amenaza en esta relación, se determinó por las zonas de inundación establecidas como tal. Por su parte, la influencia de la vulnerabilidad se determinó a través del Índice de Vulnerabilidad (IV).

De esta forma, para el cálculo del riesgo se utilizó la siguiente expresión:

$$R = \text{Puntaje por UMCDs afectadas} + \text{Puntaje por cantidad de personas afectadas.}$$

Para la clasificación del riesgo, se estableció la siguiente clasificación:

Tabla 3. Niveles de riesgo adoptados por efecto de ascenso del nivel del mar.

Nivel de riesgo	Valor de riesgo asociado
ALTO	Mayor o igual que 24 y menor o igual que 32
MEDIO	Mayor o igual que 16 y menor que 24
MODERADO	Mayor que 4 y menor que 16
BAJO	4

Los niveles de riesgo obtenidos fueron espacializados en una capa digital de acuerdo con la cartografía base (ortofotomapas), generando de esta manera, los correspondientes mapas de riesgo para los dos escenarios adoptados.

Resultados y Discusión

Las áreas inundadas para los dos escenarios considerados en la presente investigación se ilustran en las figuras 5 y 6 respectivamente.

Dentro de la determinación de la gravedad de las consecuencias de la inundación, en el área de trabajo se consideró una población total de 9661 habitantes, de conformidad con los datos suministrados por la Oficina de Planeación Municipal de Cartagena con base en el censo del SISBEN del año 2005. La cantidad total de unidades de construcción presentes en la zona de estudio de acuerdo con las aerofotografías de 2005, correspondió a 2314.

Con esta información, se asumió que en cada unidad construida habitaban 4 personas, cifra resultante de dividir la cantidad total de población entre la cantidad total de unidades de construcción presentes en la zona (9661/2314).

Para los dos escenarios adoptados, se asumió igualmente una tasa de crecimiento de la población del sector de 1.6% anual de acuerdo con estimaciones de la FAO. De esta manera, para el escenario 2006-2030, las unidades de construcción que se verían afectadas por la planicie de inundación correspondieron a 584 (suponiendo que no se construyan más viviendas en la zona de trabajo durante este periodo). Este valor fue multiplicado por la cantidad de 4 habitantes, resultando una población afectada por ascenso del nivel medio del mar de 2192 personas. Sin embargo, dado que la población presenta una tasa de crecimiento anual supuesta de 1.6%, dicha población afectada, finalmente será de 3034 personas.

En el caso del escenario 2006-2100, las unidades de construcción que se verían afectadas por la planicie de inundación correspondieron a 1114 (igualmente suponiendo que no se construyan más viviendas en la zona de trabajo durante este periodo). Este valor fue multiplicado por la cantidad de 4 habitantes, resultando una población afectada por ascenso del nivel medio

del mar de 4456 personas. Sin embargo, al igual que en el escenario anterior, dado que la población presenta una tasa de crecimiento anual de 1.6%, dicha población afectada, finalmente será de 11157 personas.

Con base en los resultados anteriores, el Índice de Vulnerabilidad (IV) para cada uno de los dos escenarios considerados, presentó un valor de 32, lo que de acuerdo con la escala de nivel de riesgo adoptada, corresponde a zonas que se encuentran en riesgo alto por ascenso del nivel del mar en los dos escenarios adoptados. Estos resultados permiten afirmar que la hipótesis planteada en la presente investigación, ha sido verificada con datos reales en una zona geográfica específica del litoral Caribe colombiano.

Como era de esperarse, en los dos escenarios se inundan las zonas más bajas (sectores aledaños a la Boca que comunica la Ciénaga de la Virgen con el Mar Caribe y los sectores aledaños a la Ciénaga de Juan Polo) y se salvaguardan, aquellas que corresponden a las zonas más altas del sector; normalmente los sectores que han sido objeto de alta intervención antrópica en términos de rellenos sobre bienes de uso público (playas y terrenos de bajamar).

No obstante lo anterior, es necesario tener en cuenta que existe un margen de error en las estimaciones del riesgo por inundaciones, debido al error intrínseco que llevan los datos históricos sobre periodos de retorno, longitudes de las áreas inundadas y alturas del oleaje que llega a la costa y en general, de todos aquellos datos en los que se basa la estimación del riesgo. Sin embargo, estas estimaciones deben despertar al mismo tiempo, la confianza de los ejecutores de la administración pública. En última instancia se trata de la combinación de la modelación cartográfica y del planeamiento espacial para llevar a cabo una toma de decisiones técnicamente sustentada.

Uno de los principales inconvenientes en los estudios de ascenso del nivel del mar, radica en

la limitada cantidad de datos actualizados de las zonas costeras, más aún si se tiene en cuenta lo dinámico de estos ambientes. Sumado a lo anterior se encuentra la baja resolución de los datos del terreno, especialmente en las alturas, lo que no permite efectuar cálculos de inundación de forma confiable. Sin embargo, la presente investigación, conforma una evaluación a escala local (área de trabajo) de forma detallada al incluir, por una parte, la información pictórica de la fotografía aérea digital con una resolución espacial de 25 cm y por otra, la información altimétrica proveniente del sensor LIDAR con exactitud vertical centimétrica.

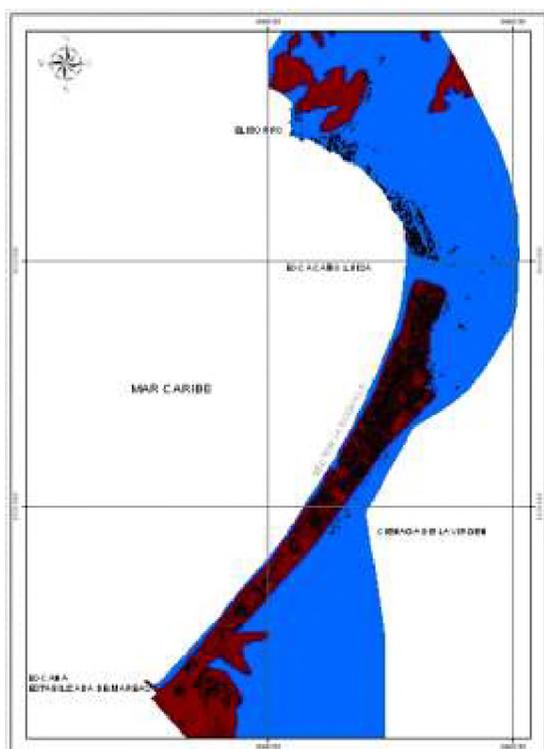


Figura 5. En color azul las áreas actualmente emergidas con posibilidad de inundación por ascenso del nivel medio del mar en el escenario 2006 2030.

Los resultados de la presente investigación, tanto espaciales como cuantitativos, pueden ser utilizados en el desarrollo de estrategias ante el incremento del nivel medio del mar en la zona de estudio, tales como la estrategia de

“retroceso” para aquellos casos en los que no se puedan tomar acciones para proteger la zona contra el ataque del mar, debido a costos excesivos de las obras de protección y/o por consideraciones de preservación de los ecosistemas costeros y marinos presentes. En otro tipo de estrategia como la de “acomodación”, los resultados de la presente investigación se pueden utilizar directamente en el análisis de las medidas de protección de los terrenos en riesgo, tales como levantamientos de muros, conversión de terrenos para ser trabajados en pesquerías o las explotaciones de especies resistentes a las altas salinidades. Es de anotar que cada una de las dos estrategias mencionadas anteriormente, tendrá implicaciones ambientales, económicas, sociales, culturales y legales que deberán ser tenidas en cuenta en el momento de la toma de decisiones.

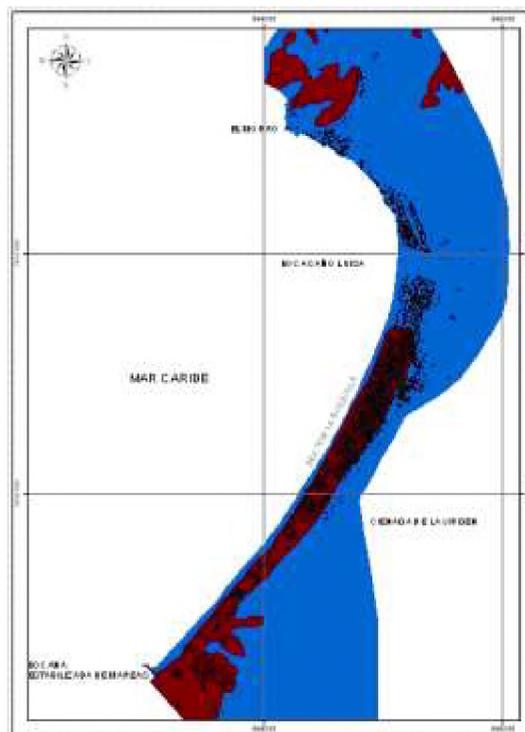


Figura 6. En color azul las áreas actualmente emergidas con posibilidad de inundación por ascenso del nivel medio del mar en el escenario 2006 2100.

No obstante lo anterior, la metodología de trabajo y los resultados de esta investigación, también pueden ser útiles en acciones específicas para la estimación de los costos directos de los daños causados [3] y, en la prevención de los efectos adversos del ascenso del nivel medio del mar, además de facilitar la comunicación entre los planificadores y los técnicos dentro de un marco de toma de decisiones [9]. En primer lugar, son aplicables en las acciones de identificación de las áreas costeras en riesgo y en la evaluación de las implicaciones de las medidas que se adopten. Igualmente útiles son los presentes resultados para la definición y adopción de las medidas que permitan asegurar que el desarrollo social y económico de esta zona costera, no incremente la vulnerabilidad de la población ante el aumento del nivel medio del mar. Adicionalmente, la presente investigación puede también ser aplicada en la revisión de mecanismos de emergencia y de respuesta, de tal forma que se reduzca la vulnerabilidad de los recursos humanos y materiales, a través de planes de evacuación y el desarrollo de mecanismos de defensa de la zona de estudio ante el incremento en el nivel del mar.

Aplicaciones similares de la fotografía aérea digital y datos tridimensionales capturados por el sensor LIDAR para determinar los posibles impactos de un ascenso en el nivel medio del mar, han sido efectuados con éxito en Maine (Estados Unidos) durante el año 2004 [11]; en la costa Noreste de Florida utilizando imágenes SPOT, software ArcInfo y el modelo SLAMM (Sea Level Affecting Marshes Model) [12]; y en la zona Norte de Holanda [14]. Otros estudios efectuados en Australia, han utilizado el modelo CRM (Coastal Recession Model), el Hibrid-Brunn, el Aggravation y el Translation Model, pero sin ser verificados con datos reales.

Referencias bibliográficas

- [1] Afanador F, Camacho H. Establecimiento de la aptitud de uso como característica de calidad de la cartografía digital costera generada por el CCCP. Boletín Científico CCCP. 2004; 11: 50-64.
- [2] Burel T. Caracterisation de modalités d'évolution recente de la Marge Continentale Nord-Colombienne [PhD Thesis]. Bordeaux: Université de Bordeaux; 1982.
- [3] Darwin R, Tol R. Estimates of the economic effects of sea level rise. Environmental and Resources Economics. 2001; 19: 113-129.
- [4] DIRECCIÓN GENERAL MARÍTIMA. Procedimiento técnico para la generación de la base cartográfica digital. Cartagena: 2005.
- [5] DIRECCIÓN GENERAL MARÍTIMA. Estudio para determinar la jurisdicción de la DIMAR en el litoral Caribe colombiano, Municipio de Cartagena, sector de La Boquilla. Anexo 7. Memoria técnica establecimiento de la línea de más alta marea. Cartagena: 2006.
- [6] DIRECCIÓN GENERAL MARÍTIMA. Estudio para determinar la jurisdicción de la DIMAR en el sector del Golfo de Morrosquillo. Anexo 1. Memoria técnica de la generación de la base cartográfica. Cartagena: 2006.
- [7] INSTITUTO DE INVESTIGACIONES MARINAS Y COSTERAS "José Benito Vives De Andreis". Programa holandés de asistencia para estudios en cambio climático: Colombia. Informe técnico No. 3. Definición de escenarios. Santa Marta: 2003.
- [8] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate change. The IPCC response strategies. 1990.
- [9] Klein J, Staudt M, Schmidt P. Sea level change and spatial planning in the Baltic Sea region: findings of the SEAREG project. Managing the Baltic Sea. Coastline Reports. 2004; 2.
- [10] Lesueur P. Sediments et milieux sédimentaires dans la Baie de Cartagena (Colombia) [PhD Thesis]. Bordeaux: Université de Bordeaux; 1979.
- [11] Slovinsky P, Dickson S. Impacts of future sea level rise on the coastal floodplain. Maine Geological Survey. 2006.

[12] Slinko C. Sea-level rise and GIS modelling [homepage on the Internet]. 2003. Available from: http://www.edc.uri.edu/nrs/classes/NRS409/509_2003/slinko.pdf.

[13] Torres R. Variación del nivel medio del mar en el Caribe colombiano. *Boletín Científico CIOH*. 2007; 24.

[14] Van der Meulen F, Witter J, Arens S. 1991. The use of GIS in assessing the impacts of sea level rise on nature conservation along the Dutch coast: 1990-2090. *Landscape Ecology*. 1991; 6: 105-113.

[15] Warrick R, Jäger J, Doos B, editor. The greenhouse effect climate change and ecosystems. John Wiley and Sons; 1986.