



## 5 DISCUSION

### 5.1 NIVEL MEDIO DEL MAR

El factor más importante es la referencia geodésica que este nivel debe poseer, este valor o referencia espacial no existe para el Caribe colombiano, ninguno de estos mareógrafos cuenta con dicho nivel pues las entidades que están a cargo de administrar los datos desconocen la referencia con que se miden estos niveles. Este hecho resalta la importancia de la utilización de estos resultados en el cálculo de la cota de inundación ya que antes de realizar cualquier interpretación de estos valores se debe ir al dato local y llevar este nivel a uno de referencia conocido y así georeferenciarlo adecuadamente.

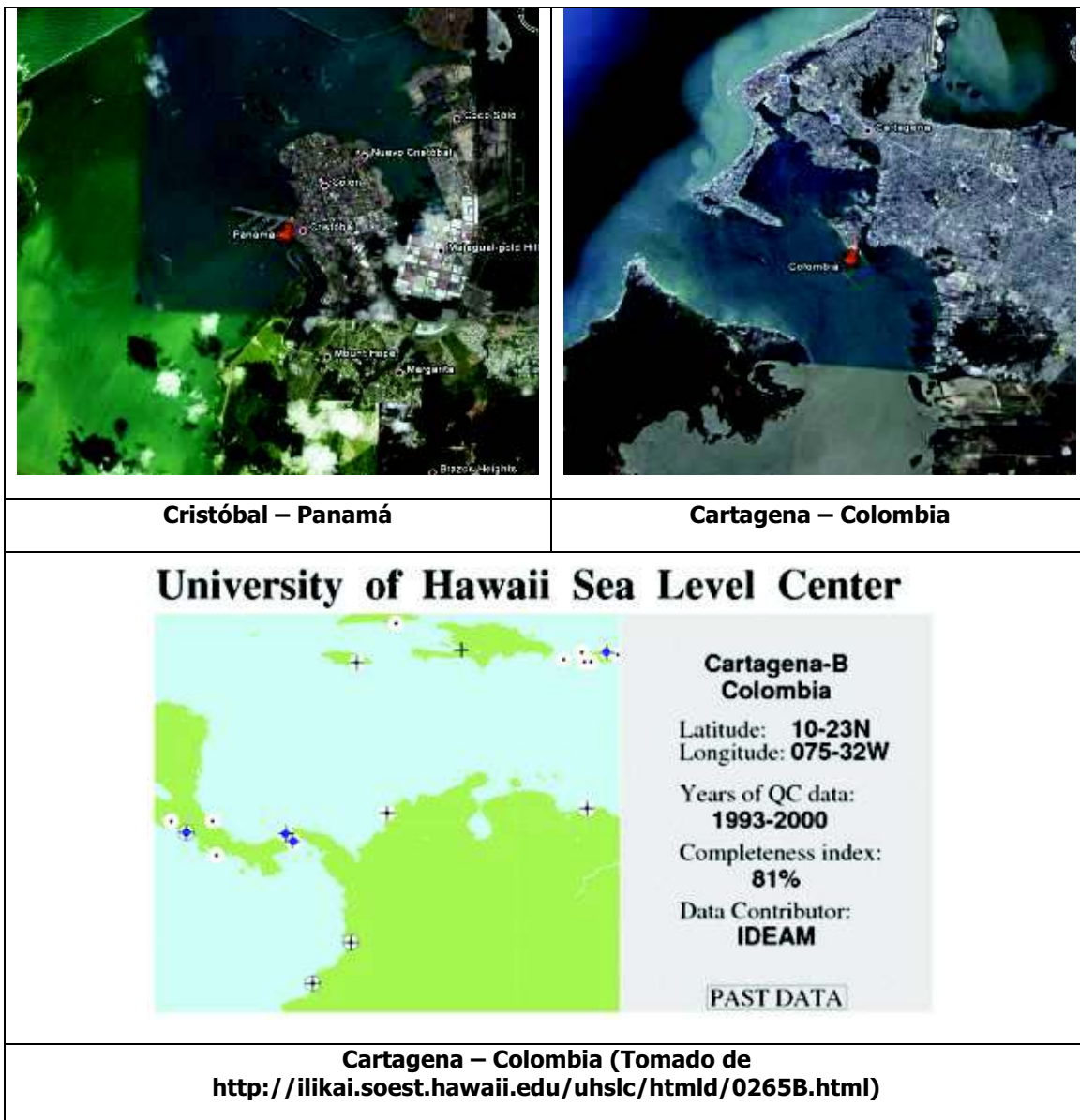
Es por ello que los resultados de este estudio se deben entender como referidos al cero local de cada mareógrafo utilizado, esta misma interpretación fue asumida por el GIOC (2002) en el cálculo de la cota de inundación para el litoral español y Agudelo (2004) en el cálculo de la cota de inundación para el Pacífico colombiano. Es necesario entonces amarrar estos niveles a esta red para tener menor margen de error en la utilización final de estos cálculos.

Las series de nivel con que se realizó el cálculo, son series que poseen porcentajes de faltantes aceptables, lo ideal es que fueran series continuas y que dado esto, permitieran a nivel horario contar con todas las bajamares y pleamares con que se define el cálculo del nivel medio del mar, como lo explica Pugh (1996).

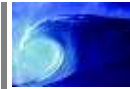
Las series son cortas, salvo Panamá, donde la ubicación del mareógrafo se encuentra muy retirada del Caribe colombiano y está encajada entre dos diques en un muelle en la bahía de San Cristóbal. Para Cartagena la ubicación del mareógrafo se encuentra dentro de una bahía y como se explicó anteriormente, no tiene referencia geodésica, no es continua en el tiempo y no es una sola serie. Adicionalmente, en la bahía se presentan efectos locales relacionados con el viento, ondas de largo plazo (surf beat) y descargas del canal del dique que no fueron tenidas en cuenta en los cálculos. La serie de Riohacha a pesar de contar con una longitud de registro apenas en el límite de las hipótesis que la definición de nivel medio del mar exige y posee un porcentaje de valores faltantes mínimo, presenta dos inconvenientes importantes: no es una serie horaria, es una serie mensual, entonces las bajamares y pleamares aparecen promediadas en el tiempo, y no se conoce su ubicación espacial. Los primeros investigadores que trabajaron con esta serie fueron Polacos y sólo informan que su ubicación se encuentra al frente de la descarga del río Ranchería.



En la Figura 75 se observa la ubicación espacial de los mareógrafos anteriormente mencionados, dicha ubicación esta referenciada al Sistema Geodésico Mundial 1984 (WGS 84) y esquematizado en Google Earth, las coordenadas de los mareógrafos utilizados fueron extraídas de la página de la Universidad de Hawaii donde reposa la información de las series históricas de nivel del mar. Como se observa en la figura las coordenadas que tiene The University of Hawaii Sea Level Center, se limitan a dos decimas de grados, es por ello que no es posible tener la ubicación exacta del mareógrafo, solo una aproximación al lugar donde se encuentra ubicado.



**Figura 75. Ubicación mareógrafos (Tomado de Google Earth)**



El nivel medio del mar calculado a partir de estas series plantea la primera zonificación importante para tener en cuenta en el cálculo de cota de inundación, ya que se observa un aumento del nivel medio a lo largo de costa del Caribe colombiano.

Por ser un valor tomado como el promedio de todas las bajamares y pleamares en una serie de nivel continua de al menos 19 años y refiriéndose a un nivel  $z$  conocido, el nivel medio del mar es un valor que en términos estrictos resulta bastante complicado en definir; los valores presentes en este estudio como se quiere aclarar son preliminares.

El nivel del mar posee numerosos cambios de corto periodo no incluidos que afectan su cálculo, cambios que los modelos numéricos y los mareógrafos por estar encajados en bahías y puertos no permiten reproducir.

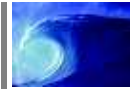
Para el cálculo de la cota de inundación dos de los estudios más importantes (Agudelo, 2004 y GIOC, 2002) tienen en cuenta las mismas hipótesis y utilizan las mismas formulaciones para el cálculo de este nivel. Es de aclarar que para los valores encontrados estos aportan información importante para reconstruir y evaluar si existe o no un cambio de nivel medio del mar en el Caribe colombiano, ya sea debido a movimientos del fondo marino o que de hecho se presenta un ascenso significativo en las costas colombianas.

## 5.2 MAREAS

### 5.2.1 MAREA ASTRONÓMICA

Las series de marea astronómica cuentan con suficiente longitud de registro (28 años, resolución horaria) y distribución espacial adecuada para las costas colombianas (6 puntos en total). Estos resultados aportan información importante a la base de datos de variables oceanográficas del Caribe colombiano, ya que pueden ser utilizados para el desarrollo de múltiples estudios de tipo oceanográfico, ambiental, portuario y marítimo en general.

Se calculó el error cuadrático medio promedio para las series obtenidas en los diferentes mareógrafos donde se contaba con series de marea astronómica para la calibración del modelo y los resultados de estos errores son del orden del 0.02 m lo que permite establecer que los resultados son apropiados. Sin embargo, y a pesar ello, se debe tener cuidado con el tamaño de las mallas en zonas donde se realicen estudios detallados con cambios significativos en la batimetría, zonas cercanas a las costas, penínsulas, golfos y descargas de ríos donde los valores de nivel estimados en las celdas de dichas mallas pueden ser importantes.



Los resultados encontrados mediante la utilización del modelo H2D acoplado con el modelo FES2004 se encaminaron a la calibración de los parámetros  $\varepsilon$  y  $k_s$ . El valor de  $\varepsilon$  con el cual se calibro el modelo fue de  $300 \text{ m}^2/\text{s}$ , se comprobó su influencia mínima sobre las simulaciones realizadas. El valor del parámetro  $k_s$  utilizado fue 1 m este fue el valor utilizado para el cálculo de los niveles que permitió un menor valor del error cuadrático medio calculado. Además, los valores utilizados anteriormente son del orden de los reportados en la literatura (Tabla 4), razón por la cual se aceptan los valores obtenidos.

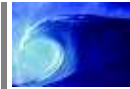
Para la utilización del modelo H2D en un amplio número de días se utiliza un cluster de computadores que dispuso la Universidad Nacional para realizar dichos simulaciones, ya que existe una restricción a la hora de hacer modelaciones extensas (Toro, 2006). Sin embargo teniendo en cuenta que 28 es el número mínimo de días en el cual puede ser estudiada una onda de marea semidiurna, dado que es la menor longitud para un desarrollo satisfactorio de las componentes principales de marea para las calibraciones se simularon registros de 720 horas (30 días = 1 mes).

Para las simulaciones anuales se propone descartar 10 días luego del inicio de la simulación debido a que para largos periodos de modelación, como se realizó en este estudio, la sensibilidad del modelo en los primeros días no permite que la onda de marea alcance la estabilidad adecuada, aunque con el fin de definirlo de una mejor manera deben realizarse análisis de sensibilidad sobre diferentes simulaciones donde se tenga en cuenta diferentes tamaños de mallas.

Existen en el mundo varios modelos globales que reconstruyen los armónicos de la marea astronómica y varios estudios aplican el mismo concepto que se desarrolló en este estudio. El acoplamiento de modelos para aumentar la escala de las simulaciones y poder discretizar más aun las mallas de cómputo para especializar la información a reconstruir en mallas de mayor detalle. En Re (2006) se determinaron los mapas de riesgo de inundaciones para las condiciones actuales, y para posibles escenarios futuros. El modelo utilizado es un modelo hidrodinámico que cuenta con la imposición de la onda de marea astronómica como condición de contorno en el borde sur del modelo, esta condición se construye a partir de análisis realizados con el modelo global de marea RSC94.

Los rangos para la marea astronómica la clasifican con una marea de tipo micromareal, con máximos valores de 0.45 m y mínimos de -0.45 m. Las carreras de marea alcanzan valores de 0.90 m. En términos espaciales, la variación es poco significativa con valores máximos en el Golfo de Urabá donde se presentan carreras de marea de casi 0.90 m y mínimos en Riohacha, donde las carreras de marea son del orden de los 0.60 m.

La validación del modelo FES2004 contó con la reconstrucción de las series de nivel de marea astronómica para 14 armónicos principales. Estos 14 armónicos son suficientes para la reconstrucción de esta serie ya que representan más del 90% de la variabilidad



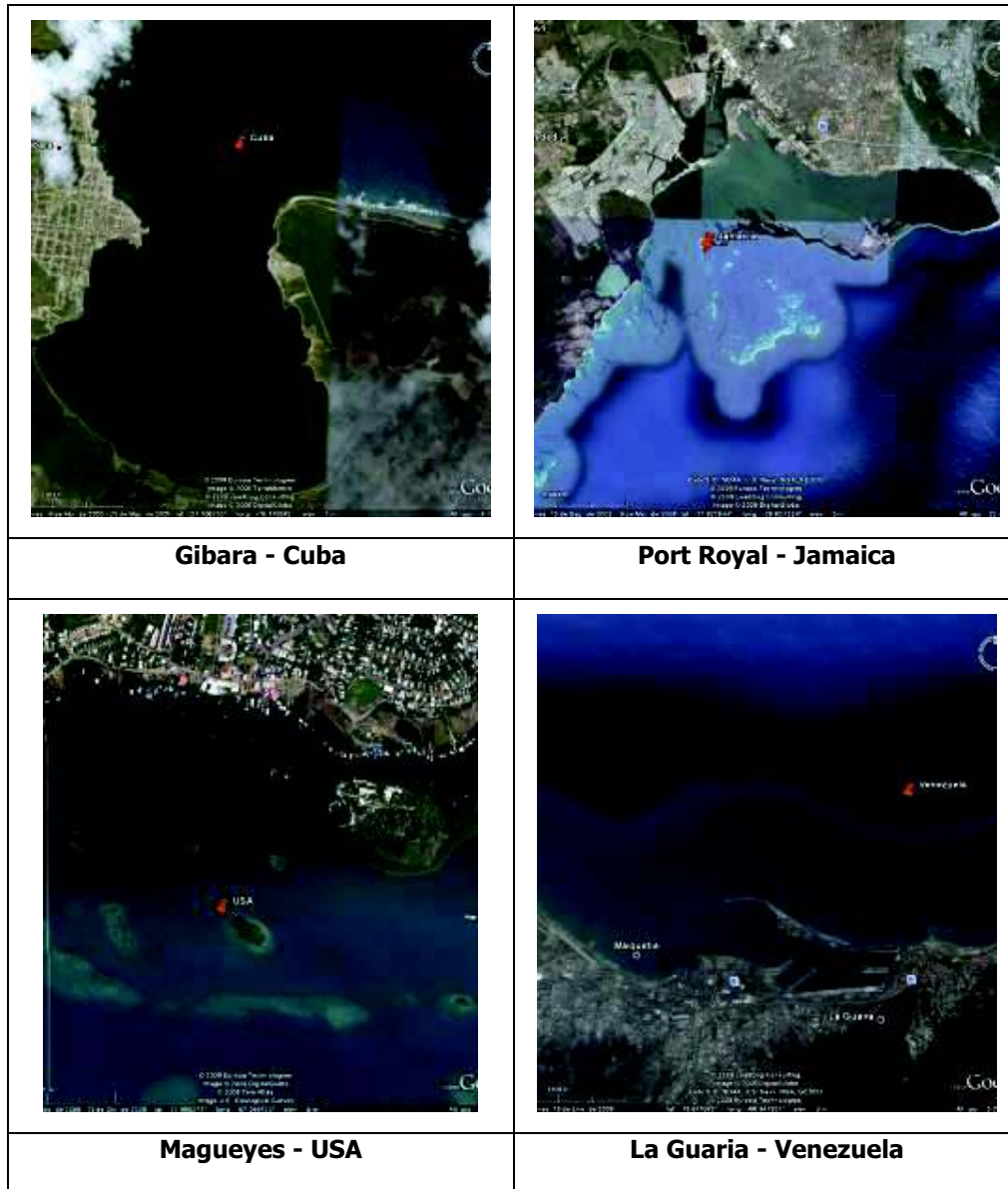
de la serie de nivel. Es por ello que en la tablas que se recopilan en el capítulo 4.2.1 sólo se presentan estos armónicos.

La construcción de los mapas comareales y de número de forma para el Caribe colombiano calculados con base en el modelo FES2004, fueron corroborados con anteriores mapas presentados en la literatura (Kjerfve, 1981) sin presentarse mayores diferencias en términos de magnitud y ubicación de los valores recientemente encontrados. Con los mapas comareales presentados en el capítulo 4.2.1 se definieron con mayor exactitud los valores de los diferentes armónicos y la ubicación de los puntos anfdrómicos en el Caribe con mayor precisión, no sólo para los que reporta Kjerfve, 4 armónicos, si no para los 9 armónicos principales. El cambio en las mareas astronómicas se debe principalmente a que la onda de marea viaja en este sentido desde la zona sur hasta la zona norte.

En la serie reconstruida se evidencian segmentos donde el modelo no alcanza a explicar completamente el fenómeno, esto se debe a que este modelo no reproduce completamente ciertos subarmónicos que contienen las series de los mareógrafos ubicados en zonas cercanas a batimetrías complejas o de cambios bruscos de pendientes.

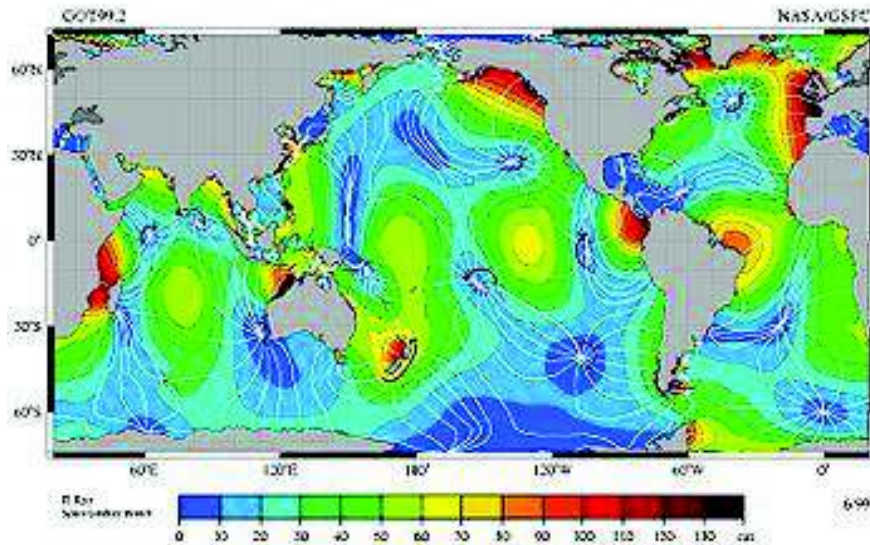
Para las pequeñas variaciones que muestra la serie existen razones para explicar el por qué el modelo no reproduce exactamente dichos segmentos, una de ellas y principal causante de que la serie se comporte de dicha forma se relaciona con las series de los mareógrafos tenidos en cuenta en este estudio, pues estos mareógrafos se encuentran muy afectados por fondo, ya que cuando la batimetría cambia abruptamente el modelo no alcanza a representar esos cambios, pues la propagación de las mareas en la zona costera es dominado por la batimetría (Liu, S. K. 1997). Otro posible factor es que estos mareógrafos se encuentran localizados al interior de bahías de puertos y configuraciones de costa bastante variable que le introducen ruido a la serie, factor que el modelo no simula. Las ubicaciones de los mareógrafos se muestran en la Figura 75 y la Figura 76. Es así como al interior de las configuraciones batimétricas la onda de marea sufre procesos de retroceso temporales por las condiciones batimétricas mencionadas.





**Figura 76. Ubicación mareógrafos (Tomado de Google Earth)**

Con el fin de relacionar el patrón de mareas se utilizó un mapa de puntos anfifrómicos y de líneas de cofase en el mundo (Figura 77). Éstos muestran como es la propagación de la onda de marea en el mundo, para el sector de del Caribe colombiano es de sur a norte (según las líneas comareales).



**Figura 77. Mapa comareal del mundo, puntos anfídromicos y líneas de cofase.**

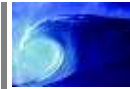
(Tomado de [http://www.columbia.edu/itc/ldeo/v1011x-1/jcm/Topic2/cotidal\\_map.jpg](http://www.columbia.edu/itc/ldeo/v1011x-1/jcm/Topic2/cotidal_map.jpg))

Los datos de estos mareógrafos y sus ubicaciones fueron obtenidos de la página de la Universidad de Hawaii y sus ubicaciones están en grados y minutos. Esto supone un error significativo ya que cualquier incremento en 1' equivale a 1.9 Km, que ya es bastante importante, pues como se observa en las anteriores figuras, la ubicación de los mareógrafos son puertos y bahías en casi todos los casos y en estas configuraciones la complejidad aumenta ya que los parámetros para la utilización de los modelos utilizados no fueron considerados para este detalle batimétrico.

### 5.2.2 MAREA METEOROLOGICA

Las sobreelevaciones que afectan este nivel no son sólo debido a la presión y al viento, sino a otras ondas de frecuencias diferentes, que la formulación no puede reproducir y que a su vez pueden afectarlo, como son las descargas de ríos, pasos de tormentas tropicales o huracanes, efectos locales de la zona de estudio, etc. Es por ello que este valor de marea meteorológica se estimo como una primera aproximación, es importante que estos valores se manejen con especial cuidado y teniendo en cuenta las anteriores apreciaciones.

La poca "sensibilidad" del modelo H2D ante esta variable se pudo verificar en los análisis realizados. La resolución batimétrica que se posee y las condiciones impuestas



de viento no sobreevelan este nivel pues la batimetría no es de una resolución detallada y por ende el modelo solo reproduce la variación de este nivel debido a la presión, para poder tener en cuenta el nivel meteorológico aportado por el viento se necesita mayor resolución batimétrica ya que el modelo necesita niveles de calado de pequeñas magnitudes para que se produzca una elevación del nivel.

Pues si se observa la ecuación que resuelve el modelo en el apartado 3.2.1 está implícito en el término  $\frac{C_a P_a W^2 \cos \psi}{\rho H}$  que al tener un denominador mucho mayor (H, o

profundidad batimétrica) este factor se verá afectado tanto así que no contribuye a la sobreelevación por viento. La resolución del modelo en términos batimétricos fue pensado para aguas intermedias a profundas y para el cálculo de la sobreelevación por viento el modelo debe ser simulado en aguas someras, es por ello que a pesar de que se hicieron múltiples simulaciones variado el coeficiente  $C_a$  no se obtuvieron resultados apropiados que complementaran el nivel simulado y que al comparar el nivel real fueran apropiados.

En Re, M (2006) el software de base utilizado fue el HIDROBID II, que resuelve numéricamente las ecuaciones hidrodinámicas para aguas someras. El paso de resolución espacial es de 2,5 m, siendo necesario un paso temporal de cálculo de 60 segundos para mantener una precisión adecuada en los resultados, a esta resolución el modelo utilizado en por este autor simula los vientos de manera adecuada, queda como trabajo futuro la implementación de mallas anidadas para bajar la resolución del modelo a aguas someras y calcular la sobreelevación por viento. Esta simplificación, según la literatura revisada, subestima la inundación en un 10% del valor total del nivel de marea meteorológica.

Otro factor importante fueron los forzadores con que se contó, pues dada la ausencia de datos no se pudieron comparar los forzadores del viento y presión del NCEP/NCAR con valores reales tomados en estaciones dentro de la zona de estudio, pues las series de viento y sobretodo la serie de presión son bastante escasas en el país, además los efectos en tierra donde normalmente se encuentran dichas series son muy significativos y hacen que estas series pierdan fiabilidad, pues normalmente se encuentran en aeropuertos y sitios de mucha variabilidad local, es por ello que se asumió que los valores del NCEP/NCAR no poseían error alguno y esto además de que solo se cuentan con este tipo de forzadores cada 3 horas es ya una hipótesis bastante gruesa e importante.

Con respecto a los campos de vientos extremos, aunque se obtuvieron ocho datos diarios (Kalnay et al, 1996) en todo el tiempo de simulación, fue posible utilizar la serie completa de registros del modelo H2D al cargar el archivo. En comunicación con investigadores y desarrolladores del modelo que han trabajado en la Universidad de





Cantabria, España, se encontró que este tipo de archivos no ha sido comúnmente usados y en general son utilizadas pantallas de viento constantes.

Los resultados obtenidos por medio de la simulación con el modelo empírico se compararon con series filtradas de los mareógrafos que se encuentran en ubicaciones en el Caribe colombiano (Cartagena) y aunque la comparación de las series modeladas con las reales no fue la esperada, alcanza los órdenes de magnitud de la serie real.

Las zonas donde se reconstruyeron las series para el cálculo de la cota de inundación se encuentran cerca a las costas colombianas. Al igual que las series de marea astronómica, las series de marea meteorológica cuentan con suficiente longitud de registro (28 años, resolución horaria), distribución espacial adecuada para las costas colombianas (6 puntos en total) y que aportan a la base de datos de variables oceanográficas información importante para el desarrollo de múltiples estudios de tipo oceanográfico, ambiental, portuario y marítimo en general.

Según la literatura revisada, el nivel aportado por la marea meteorológica corresponde a un valor cercano al 12% del valor total del nivel de cota de inundación.

La contribución por el apilamiento de agua debida al viento perpendicular a la costa es inferior al centímetro. En cuanto a la sobrelevación producida por la presión sería esta la más importante en este cálculo pero dada la escasa variación en los valores de presión que fueron registrados, el descenso de 20 milibares produciría una elevación algo inferior a los 20 cm.

### 5.3 RUN UP

Ya se cuenta con una base de datos de oleaje espacialmente distribuido y con longitud de registro suficientemente larga para realizar análisis y el cálculo de los estadísticos básicos para las variables altura de ola, periodo y dirección. Este avance permite una buena caracterización de los regímenes del oleaje y esboza una nueva percepción del oleaje con respecto a lo que antes se tenía en la zona de estudio, pues se contaba con pocos estudios y los que existen son muy particulares y no permitían entender el clima marítimo del Caribe colombiano.

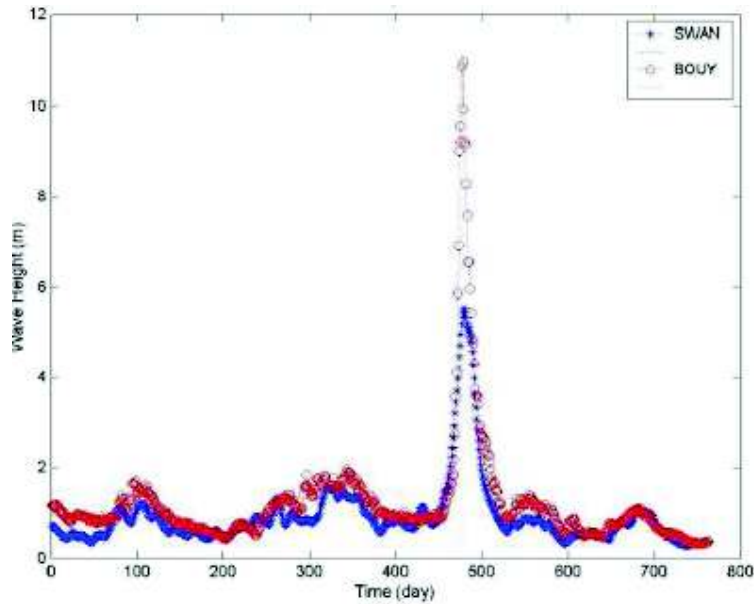
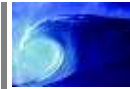
Se trabajó con un modelo cuyos resultados son datos de oleaje en aguas profundas. Se cuenta con series de 28 años de datos con resolución horaria en diferentes localidades del Caribe colombiano, para esto se calcularon los errores cuadráticos medios de las series simuladas con las series de oleaje con que se contaba: Barranquilla y Puerto Bolívar, encontrándose para Barranquilla errores del orden de los 0.40 m para Hs y de 1.30 s para Tp, para Puerto Bolívar los errores son del orden de 0.32 m para Hs y de 1.36 para Tp. Con estos resultados se concentró con especial



atención en corregir los valores simulados de  $H_s$  y  $T_p$  con respecto a los valores de las boyas. Para la dirección del oleaje no se realizó ninguna calibración. Para el cálculo del oleaje a pesar que se obtuvieron resultados aceptables solo se contó con dos boyas para la calibración y la corrección de las series, debido a esto se propuso una zonificación para la corrección de las series de oleaje del modelo.

Al comparar los datos del modelo SWAN con los datos del modelo WWIII para la zona del Caribe colombiano (Mesa, 2009), se encontraron notables diferencias entre las alturas de ola, a pesar de que la metodología que desarrolló Mesa en 2009 cuenta con un reanálisis del oleaje a partir de diferentes fuentes de datos (boyas, barcos en ruta, satélite y resultados de un modelo), los valores que se presentan en términos de altura de ola, son bastante mayores a los encontrados en las series de Barranquilla y Puerto Bolívar y para el periodo pico el modelo no permite obtener una serie fiable que pueda ser utilizada para cálculos posteriores como es el del Run Up. Es por ello que se optó por utilizar los resultados del modelo SWAN que permitieron tener con mayor certeza series de oleaje para toda la zona de estudio con valores de altura de ola y periodos más cercanos a la realidad.

El valor del viento que fue utilizado a partir del reanálisis que realizó el NCEP/NCAR. Este viento fue tenido en cuenta sin contar con los errores que el modelo posiblemente pueda tener y muy posiblemente los posea ya que no se tienen serie confiables de viento en las costas colombianas para calibrar esta variable y menos en mar adentro donde se generan los oleajes que estima el modelo ya que la formulación asume que el oleaje es de fondo o Swell y no admite vientos locales o que generen oleaje de Sea que se presenta particularmente en zonas cercanas a la costa y no en aguas profundas donde se generaron las series de oleaje. Además, se realizaron comparaciones de los valores de velocidad de viento que se presentan en la trayectoria de varios huracanes tenidos en cuenta en este estudio con los valores que presenta el NCEP/NCAR y se encontró que el NCEP/NCAR capta la intensidad del fenómeno (Algunos huracanes particulares, Figura 78) y permite que estos resultados sean tenidos en cuenta para los cálculos realizados.



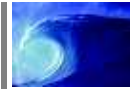
**Figura 78. Altura de ola significativa modelada con SWAN vs Altura de ola significativa medida en la boya ubicada en Jamaica para el huracán Dean (Tomado de Salinas, 2009).**

Dado que el objetivo de la tesis es calcular el run up en zonas muy amplias donde la geomorfología no es caracterizable de una manera simple, solo se tuvo en cuenta la formulación de Hollman con un valor de pendiente  $Tan\beta=0.10$  ya que en dicha formulación la pendiente no es tan significativa como el resto de los parámetros involucrados allí para su cálculo. Otro factor importante es que los valores calculados por esta formulación representan una aproximación importante pero no infalible ya que esta formulación fue probada en laboratorios por medio de ensayos y montajes realizados a partir de datos tomados en playas que no corresponden necesariamente a las condiciones locales, tanto geomorfológicas, de pendiente y tipos granos del Caribe colombiano.

#### 5.4 COTA DE INUNDACION

Es importante resaltar que estos resultados sirven para caracterizar la cota de inundación a una escala regional y ver su variabilidad espacial y temporal general. Para aplicaciones específicas es necesario ajustar los valores de la pendiente en cada caso.

Los regímenes de inundación calculados constituyen una información de indudable valor para el diseño de actuaciones en el litoral. No obstante, es importante recordar



que la elaboración de la información se ha realizado con limitaciones en los datos y/o admitiendo una serie de simplificaciones que el usuario debe tener en cuenta al momento de aplicar correctamente los resultados presentes.

Las series de cota de inundación presentadas en este estudio varían en su nivel a lo largo de la costa. Los mayores niveles se presentan en las localidades de Santa Marta y Riohacha, al ser estas las dos zonas del Caribe más expuestas a la acción del oleaje. Las localidades que siguen son Barranquilla y Cartagena, la primera se encuentra expuesta pero por estar en cercanías a una bahía su efecto se amortigua, la segunda está más abrigada que el resto de las localidades, por ello el oleaje presenta menores valores y debido a eso presentan menores valores. En último lugar se encuentran los Golfos de Morrosquillo y de Urabá. Estas series se encuentran en dos golfos, lo que brinda un abrigo significativo que reduce el efecto de oleaje.

Estos resultados deben entenderse referidos al cero del mareógrafo local. Los resultados de estas modelaciones no tuvieron en cuenta las descargas de grandes ríos presentes en la zona de estudio: Magdalena, Sinú, Atrato, Canal del Dique.

Aplicando entonces la metodología propuesta a los puntos definidos anteriormente se calculó el nivel de inundación a nivel horario, basado en dos modelos que resuelven las ecuaciones que gobiernan la marea y el oleaje, suponiendo adicionalmente que el remonte del oleaje es constante y que no varía espacialmente.

Los eventos extremos reportados por la literatura y prensa son representados por la cota de inundación. La serie de cota de inundación muestra ascensos significativos con estos fenómenos, definiendo un nivel de cota de inundación que indica que en el Caribe hay un mar de leva y a partir de 1.14 m. Este valor se calculó teniendo en cuenta la formulación de run up de Hollman (1989), es por ello que el valor calculado varía si se tiene en cuenta alguna otra metodología para esta variable. Las épocas en que se presentan dichos fenómenos son los siguientes meses: Noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo.

El método propuesto proporciona una herramienta ingenieril para la determinación de la cota máxima de inundación basándose en registros de las variables, en reconstrucción de series de datos basados en técnicas estadísticas y en modelos numéricos. Esta estimación ha considerado gran parte de las variables que intervienen en el proceso del cálculo de cota de inundación. Variables como descargas de ríos, vientos locales, onda de largo plazo no se han considerado ya que no se cuenta con información primaria suficiente para considerar las variaciones que estas variables aportarían a la serie de cota de inundación.

En el Caribe Colombiano se presentan diferencias que en lo que respecta a los niveles de inundación y los efectos de las variables involucradas de acuerdo con las características oceanográficas de cada zona. La metodología propuesta ha sido aplicada al litoral con características físicas muy diferentes. Para aplicarla, se



diferenciaron tres zonas con una configuración de la plataforma continental similar, temperaturas, características morfológicas y con oleaje de distinta magnitud, la incidencia de los vientos e incluso el efecto marea presentan diferencias, debido a las distintas orientaciones de la costa y a las características oceanográficas a las que están sometidas.





## 6 CONCLUSIONES

Se ha propuesto una metodología para determinar la serie de cota de inundación en la costa Caribe colombiana, basada en las metodologías existentes, el uso de modelos de onda larga, reanálisis de variables océano – atmósfera y la información disponible para la región.

Una vez analizada la información en las tres zonas propuestas para zonificar el Caribe colombiano, se realizó una comparación de los resultados en ellas, con el fin de establecer que se presentan diferencias en los niveles de inundación y los efectos de las variables involucradas de acuerdo con las características oceanográficas de cada zona.

La propuesta metodológica y aplicativa de la metodología es aceptable, ya que los resultados de cada modelo independiente para cada una de las variables reconstruidas fueron aceptables. Cada una de las variables presentó comportamientos similares con respecto a los valores reales.

Los mayores niveles de cota de inundación se presentan en las localidades de Santa Marta y Riohacha, al ser estas las dos zonas del Caribe más expuestas a la acción del oleaje. Las localidades que siguen en orden de magnitud son Barranquilla y Cartagena. La primera se encuentra expuesta, pero por estar en cercanía a una bahía su efecto se amortigua un poco, la segunda está un poco más abrigada que el resto de las localidades por eso presenta menores valores. En último lugar se encuentran los Golfos de Morrosquillo y de Urabá. Estas series están muy abrigadas y el efecto de oleaje no es tan directo.

Se realizó un análisis de las metodologías para el cálculo de la cota de inundación en zonas costeras, y se planteó e implementó una metodología adecuada, clara y concisa para el cálculo de la cota de inundación con base en la información disponible en el Caribe.

El método propuesto proporciona una herramienta de ingeniería para la determinación de la cota máxima de inundación basándose en registros de las variables y en modelos numéricos.

Estas series pueden ser utilizadas para estudios particulares en costas o puertos teniendo en cuenta que dichas variables son fiables y que la reproducción de resultados a partir de estas es un insumo con que no contaba el país y la región para futuros estudios en zonas de interés.

El papel de los eventos extremos reportados por la literatura y prensa son representados por la cota de inundación.



## 7 TRABAJO FUTURO

El estudio de los factores involucrados en el fenómeno de cota de inundación para el Caribe colombiano ha puesto en evidencia que es necesario continuar con algunos trabajos para el complemento de éste.

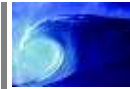
Hacer un estudio adecuado del cálculo del nivel medio del mar, indicando la referencia geodésica de series a lo largo de la costa del Caribe, con trabajo de campo y mediciones directas de esta variable de al menos un mes de datos tomados en cada una de las localidades.

La propagación de los datos de oleaje desde aguas indefinidas es necesaria para establecer los procesos de refracción, difracción, asomeramiento y rotura que presentan en las costas del Caribe, esto permitirá establecer un límite real y tangible de cuál es el nivel físico de cota de inundación en las playas colombianas. Es por ello también que se requiere de un estudio integrado que de pautas para establecer criterios de la clasificación de playas desde el punto de vista geomorfológico en el país y la región.

El trabajo con datos modelados y no con datos reales no es lo ideal, pero es otra buena aproximación al problema de la falta de información en la zona de estudio. Es por ello que para una mejor aproximación al tema y a la resolución de las diferentes variables involucradas en este cálculo se requieren en un futuro, la toma de datos en más localidades y así establecer con más fiabilidad la cota de inundación.

Los efectos locales de las configuraciones batimétricas y de costas es un tema importante que posiblemente con unas buenas bases de aproximación al problema aporte mejores resultados y permita que la serie de cota de inundación sea mejor calculada.

Desarrollar un estudio de la sensibilidad del modelo H2D a valores de viento variables sobre mallas con celdas pequeñas (menores de 100 m) y con batimetrías someras.



## 8 BIBLIOGRAFIA

**Agudelo, P., González, M., y Medina, R.** (2004). Determinación de la cota de inundación del pacífico colombiano. XXI *Congreso Latinoamericano de Hidráulica* São Pedro, Estado de São Paulo, Brasil. pp. 1-5.

**Álvarez-León, R., Mendoza-Mazzeo, L.A. y Vernetto, G.** (2003). Factores de formación de las lagunas costeras del suroeste del caribe colombiano. *Acta Científica Venezolana*, Vol.54, no.3, pp.180-188. ISSN 0001-5504.

**Andrade A., C. A.** (1993). Análisis de la velocidad del viento en el mar Caribe. *Bol. Cient. CIOH* N° 13. Cartagena de Indias. pp. 33 - 43.

**Aubrey, D.** (1988). Changing coastal levels of South America and the Caribbean region from tide-gauge records. *Tectonophysics*, 154. Woods Hole Oceanographic Institution. pp. 269-284.

**Battjes, J.A.** (1971). Run-up distributions of waves breaking on slopes. *Journal of the Waterways, Harbours and Coastal Eng. Div., ASCE*, Vol. 97, ww1, pp. 91-114.

**Benavente et al.** (2007). Sobreelevación debida a temporales y cambios producidos en las playas del litoral NE Marroquí. *Rev. C. & G.*, 21 (1-1), 13-25.

**Bernal G., G. Poveda, P. Roldán y C. Andrade.** (2006). Patrones de variabilidad de las temperaturas superficiales del mar en la Costa Caribe Colombiana. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 30 (115): pp 195- 208.

**Booij et al.** (1996). SWAN User Manual - A third-generation wave model for coastal regions - Model description and validation. Faculty of Civil Engineering, Delft University of Technology, Delft, Netherlands. pp. 1-15.

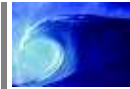
**Cannon, J.** (2007). Northern New England Coastal Flooding. NOAA/National Weather Service Forecast Office. pp 1-5.

**Cardona, Y. Fernández, J. M.** (2001). Análisis de señales de mareas por el método de la descomposición en armónicos. Medellín. Trabajo de Grado (Ingeniero Civil). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente.

**Castanedo, S.** (2000). Desarrollo de un modelo hidrodinámico tridimensional para el estudio de la propagación de ondas largas en estuarios y zonas someras. Santander, España. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. pp. 274.



- Castillo, M.C.** (1998). Desarrollo de una metodología para la obtención de un atlas de cota de inundación en playas en el litoral español. Tesina de master. Universidad de Cantabria, Santander (España). pp. 1-30.
- CIOH.** (2004). Boletín meteomarinero del Caribe colombiano - Abril, Central de pronósticos meteorológicos y oceanográficos. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, Boletín del mes de abril, pp. 5 - 13.
- CIOH.** (2007). Metodología para establecer la línea de más alta marea en aguas abrigadas (bahías, estuarios, etc.) cuando no se tienen registros instrumentales, pp. 1 - 35.
- Conner, W.C, Kraft, R.H. and Harris, D.L.** (1957). Empirical Methods for Forecasting the Maximum Storm Tide Due to Hurricanes and Other Tropical Storms. Mon Weather Rev. 85(4):113-116.
- DHI Water and Environment.** (2005). MIKE 21 Flow Model, Hydrodynamic Module. Scientific Documentation.
- Díaz-González, G.** (1999). Influencia del oleaje y deriva litoral en la región costera de Cartagena de Indias (Sector la boquilla el laguito). pp. 1-12.
- DIMAR.** (2002). Sistema de Modelado Costero para Colombia, SMC-COL. Dirección General Marítima y Universidad de Cantabria. pp. 1-45.
- Dixon, M.J. y Tawn, J.A.** (1994). Extreme sea-levels at the UK A-class sites: Site-by-site analyses. Proudman Oceanographic Laboratory, internal document No 65. pp. 18.
- Donoso, M. C.** (1990). Circulación de las aguas en el mar Caribe. Seminario Nacional de Ciencias y Tecnologías del Mar (Memorias). Comisión Colombiana de Oceanografía. Santiago de Cali. pp. 345 - 356.
- GESHA** (Grupo de Emisarios Submarinos e Hidráulica Ambiental). (2002). AQUALAB, Manual de referencia. Santander, España. 91 p. Universidad de Cantabria. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Disponible en: < <http://www.emisarios.unican.es/herramientas.htm> >.
- Gerritsen, H. De Vries, H y Philippart, M.** (1995). The Dutch Continental Shelf Model. Daniel Lynch and Alan Davies, editors. Quantitative Skill Assessment for Coastal Ocean Models. Volume 47 of Coastal and Estuarine Studies. American Geophysical Union. pp. 1-24.
- GIOC.** (2001). Atlas de inundación del litoral peninsular español. Documento complementario. Ministerio de Medio Ambiente y Universidad de Cantabria. pp. II2-II15.
- GIOC.** (2002). Atlas de inundación del litoral peninsular español. Documento complementario. Ministerio de Medio Ambiente y Universidad de Cantabria.



- Graff, J.** (1981). An investigation of the frequency distributions of annual sea level maxima at ports around Great Britain. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 18, pp. 389-449.
- Gumbel, E.J.** (1958). *Statistics of extremes*. New York: Columbia University Press. pp. 1-24.
- Guza y Thornton** (1981). Wave setup on natural beaches. *J Geophys. Res* 86. (C5). pp. 4133-4137.
- Harris, D.L.** (1963). Characteristics of the Hurricane Storm Surge. U.S. Department of Commerce Weather Service Technical Paper No. 48. x pp.
- Horikawa, K.** (1988). Nearshore dynamics and coastal processes. University of Tokio. pp. 1-15.
- Horrillo Caraballo J., Maza Chamorro M., Rejtman Orozco P.** (sf). "Análisis de oleaje para la zona del caribe colombiano con información escasa. Universidad de Cartagena - Instituto de Hidráulica y Saneamiento Ambiental - I.H.S.A. pp 10-11.
- Hoover, R.A.** (1957). Empirical Relationships of the Central Pressures in Hurricanes to the Maximum Surge and Storm Tide, *Mon Weather Rev.* 81(8):167-174.
- Huguett G, A.** (1988). Resumen del estudio hidrogeológico de Media y Baja Guajira. En: *Boletion Geologico INGEOMINAS*, vol. 29 N°1, pp. 45-83.
- IDEAM.** (2001). Vulnerabilidad y adaptación de la zona costera colombiana al ascenso acelerado del nivel del mar. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. pp. 1-27.
- INVEVAR.** (2003). Programa Holandés de asistencia para estudios en Cambio Climático: Colombia. Definición de la vulnerabilidad de los sistemas bio-geofisicos y socioeconómicos debido a un cambio en el nivel del mar en la zona costera colombiana (Caribe, Insular y Pacifica) y medidas para su adaptación.
- Jelesnianski, C.P.** (1972). SPLASH (Special Program to List Amplitudes of Surges From Hurricanes) I. Landfall Storms. U.S. Department of Commerce NOAA Technical Memorandum NWS TDL-46.
- Jelesnianski, C.P, Chen, J., Shaffer, W.A.** (1992). SLOSH: Sea, Lake, and Overland Surges from Hurricanes. U.S. Department of Commerce NOAA Technical Report NWS 48. pp. 1- 13.
- Kjerfve, B.** (1981). Tides of the Caribbean Sea. Belle I Baruch Institute for Marine Biology and Coastal Research, Marine Science Program, and Department of Geology, University of South Carolina, Columbia, South Carolina.

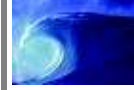




- Kommen, G.J.**, (1984): On the existence of a fully developed wind-sea spectrum, *J. Phys. Oceanogr.*, 14, 1271-1285.
- Lennon, G.W. (1963)**. A frequency investigation of abnormally high tidal levels at certain west coast ports. *Proc. Instn. Civ. Engrs.*, Vol. 25, pp. 451-484.
- Liu, S. K.** (1997). Using coastal models to estimate effects of sea level rise. *Ocean & Coastal Management*, Vol. 37, No. 1, pp. 85-94.
- Luetlich, R.A. Jr., Westerink, J.J. and Scheffner, N.W.** (1992). ADCIRC: An Advanced Three-Dimensional Circulation Model for Shelves, Coasts, and Estuaries – Report 1: Theory and Methodology. Technical Report DRP-92-6, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS. pp. 1-5.
- Lyard, F., F. Lefèvre, T. Letellier and O. Francis.** (2006). Modelling the global ocean tides: A modern insight from FES2004, *Ocean Dynamics*, 56, 394-415.
- Martínez A. y Robertson D.** (1997). Proyecto Morfodinámica del litoral Caribe, variaciones cuaternarias del nivel del mar y sus implicaciones en las amenazas litorales del Caribe colombiano. IDEAM y UNAL. pp. 24-34.
- Martínez, M.** (1993). Geomorfología y amenazas geológicas de la línea de costa del Caribe central colombiano (Sector Cartagena - Bocas de Ceniza). *Publ. Geol. Esp. Ingeominas*, N 19. Santafé de Bogotá. p. 1 - 62.
- Massey, W et al.** (2007). *History of Coastal Inundation Models*. Spring. Volume 41, Number 1. pp. 7-15.
- Mesa, J** (2009). Metodología para el reanálisis de series de oleaje para el Caribe colombiano. UNAL.
- Medina, R., F.J. Méndez y M.C. Castillo.** (1997). Determinación de la cota máxima de inundación en una playa. *Jornadas Españolas de Puertos y Costas, Cádiz*. pp. 789-801.
- Ministerio del Medio Ambiente (MMA).** (2000). Política nacional ambiental para el desarrollo sostenible de los espacios oceánicos y las zonas costeras e insulares de Colombia, pp. 63.
- Montgomery, R.B.** (1955). The Present Position of the Study of Exchange Across the Ocean- Atmosphere Interface. *Geophysical Research Papers* No. 19. pp. 1-12.
- Nielsen, P. and D.J. Hanslow** (1991). Wave run-up distributions on natural beaches. *Journal of Coastal Research*. Vol. 7, No 4, pp. 1139-1152.
- Ortega, S.** (2010). Estudio de aprovechamiento de la energía del oleaje en Isla Fuerte en el Caribe colombiano. UNAL.



- Ortiz, J.C.** (2006). Los huracanes en el Caribe Colombiano y los peligros que representan para los ecosistemas. Universidad del Norte. pp. 1-29.
- Ovadia, D.C.** (1980). A regression model for the statistical prediction of extreme sea levels at Liverpool. Institute of Oceanographic Sciences. Report No. 102. pp. 1-10.
- Palacio, C.A.** (2002). Metodología para la validación de modelos hidrodinámicos utilizando amplia información de campo: aplicación a la Bahía Meldorf en la costa del Mar del Norte alemán. Medellín. Tesis doctoral en Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. 181 p.
- Pérez, B. y O. Serrano.** (1997). Primeros resultados de análisis extremal del nivel del mar en la costa española. Jornadas Españolas de Puertos y Costas, Cádiz, pp. 101-115.
- Pugh, D.** (1996). Tides, Surges and Mean Sea Level. Ed. John Wiley and Sons, Wiltshire. pp. 472.
- Pugh, D.T. and J.M. Vassie.** (1978). Extreme sea level from tide and surge probability. Proc. 16th Coastal Eng. Conference, Hamburg. ASCE, Vol. 1, pp. 911-930.
- Re, M y Menéndez Á.** (2006). Impacto del cambio climático en las costas del río de la Plata. Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 7(1) 25.
- Rodi, W.** (1984). Turbulence models and their applications in hydraulics - a state of the art review. IAHR, The Netherlands: 2nd edition. 104 p.
- Salinas, J.** (2009). Simulación de oleaje durante huracanes y su impacto en zonas costeras. SEMARNAT. Segundo curso internacional de Huracanes. Acapulco 2009.
- Smith, T.** (1982). The Sefton Coast Database, Universidad de Liverpool and the Borough Engineer and Surveyor of Sefton Metropolitan Borough Council, Part 1, pp. 1-9, 38-40.
- Smith, R.L.** (1989). Extreme value analysis of environmental time series: an application to trend detection in ground level ozone. Statist. Sci. Vol. 4, pp. 367-393.
- Sobey, R.J.** (1996). Correlation between individual waves in a real sea state. Coastal Engineering, Vol. 27. En: Documento Temático - Cota De Inundación: Atlas de inundación en el litoral peninsular Español. GIOC Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas. Universidad de Cantabria. pp. 223-242
- Steer, R., Arias-Isaza F., Ramos A., Sierra-Correa P., Alonso D., Ocampo P.** (1997). Documento base para la elaboración de la Política Nacional de Ordenamiento Integrado de las Zonas Costeras Colombianas. Documento de consultoría para el Ministerio del Medio Ambiente. Serie publicaciones especiales No.6. pp 8.2.
- Suzunaga L., J. O.; Molina M., A.; Pelgrain D., A. y C. Parra LI.** (1990). Estudio de la oceanografía costera de la región de Cartagena y sus alrededores aplicando la



percepción remota. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas - Misión Técnica Francesa. Cartagena de Indias. p. 2 - 14; 30 - 35.

**Tawn, J.A. and J.M. Vassie** (1989). Extreme sea-levels: the joint probabilities method revisited and revised. Proc. Instn. Civ. Engrs. Part 2, Vol. 87, pp. 429-442.

**Tawn, J.A. and J.M. Vassie.** (1991). Recent improvements in the joint probability method for estimating extreme sea levels. In Tidal Hydrodynamics.. Ed. Bruce B. Parker John Wiley & Sons, Inc. pp. 813-828.

**Tawn, J.A.** (1988). An extreme value theory model for dependent observations. J. Hyd. Vol. 101, pp. 227-250.

**Tejada, C.; M. Gonzáles y L. Otero.** (2004). Desarrollo de un modulo informático para el manejo de datos de oleaje visual para aguas jurisdiccionales colombianas. XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Sao Pedro, estado Sao Paulo, Brasil. 11p.

**Torres, R. Gómez, J.C. Afanador. F.** (2006). Variación del nivel medio del mar en el Caribe Colombiano. Boletín científico CIOH No 24, ISSN 0120-0542, pág. 64-75.

**Vernette, G.** (1985). La plate-forme continentale caraibe de Colombie importance du diapirisme argileux sur la morphologie et la sedimentation. Tesis de Doctorado en Ciencias. Universidad de Burdeos. pp.385.

**Wigley, T.M.L. y S.C.B. Raper.** (1993). Futures changes in global mean temperature and sea level in: Climate and Sea Level Change. Ed. R.A. Warrick, E.M. Barrow and T.M.L. Wigley, pp. 111-133.

**Zapata, O.** (en preparación). Estudio histórico del mar de leva y evento extremas en el Caribe colombiano. Facultad de historia, UNAL.