

## DETERMINACIÓN DEL RÉGIMEN MEDIO Y EXTREMAL DEL NIVEL DEL MAR PARA LA BAHÍA DE BUENAVENTURA

Capitán de Corbeta Luis Jesús Otero Díaz \*

División de Zona Costera, Centro Control Contaminación del Pacífico - CCCP  
Vía El Morro, Capitanía de Puerto, San Andrés de Tumaco, Nariño, Colombia  
Tél: +57 (2) 727 26 37, Fax: +57 (2) 727 11 80, AA. 187  
e-mail: cccp@cccp.org.co  
lotero@cccp.org.co \*

*Recibido en mayo de 2004; aceptado en julio de 2004*

### RESUMEN

El nivel del mar en la bahía de Buenaventura, en un instante dado, está determinado por la marea astronómica y la marea meteorológica debidas, principalmente, a presión y viento. En el presente trabajo, a partir del análisis por separado de estas dos variables, se determinan los regímenes medio y extremal del nivel del mar para la bahía de Buenaventura. La metodología aplicada comprende la utilización del análisis armónico para la marea astronómica y métodos indirectos de simulación, basados en técnicas de Monte Carlo para la marea meteorológica. Lo anterior permitió obtener ajustes lineales en un papel probabilístico Gumbel para máximos, con un muy buen ajuste ( $R^2 > 0.95$ ) de funciones de distribución para los regímenes medio y extremal del nivel del mar, con sus respectivas bandas de confianza del 90%.

**Palabras claves:** Marea Astronómica, Marea Meteorológica, Nivel del Mar, Monte Carlo, Distribución de Gumbel, Regimen Medio, Regimen Extremal.

### ABSTRACT

The sea level at a given moment is determined by the astronomical tide and meteorological tide due to pressure and wind. In the present work, from the analysis separately of these two variables, have been determined the average and extremal regimes of the sea level for Buenaverntura Bay. The methodology applied includes, by a side the use of the harmonic analysis for the astronomical tide and indirect methods of simulation, based on techniques of Monte Carlo for the meteorological tide. This have allowed to obtain lineal fits in a Gumbel probability paper, with a very good fit ( $R^2 > 0.95$ ), of the distribution functions for the average and extremal regimes of the sea level with its 90% confidence intervals.

**Key words:** Astronomical Tide, Meteorological Tide, Sea Level, Monte Carlo, Gumbel Distribution, Average Regime, Extremal Regime.

## INTRODUCCIÓN

El estudio y análisis del comportamiento del nivel del mar al interior de la bahía adquiere una importante connotación al delimitarse la zona habitable de dominio público marítimo-terrestre. Éste permite, de igual forma, determinar las áreas habitadas que puedan estar en riesgo de sufrir los efectos de la inundación por situaciones extremas de sobreelevación del nivel del mar.

Pero, las consecuencias que traen consigo las variaciones del nivel del mar no sólo se circunscriben a las afecciones humanas; también es necesario conocer los regímenes del nivel del mar para el diseño de obras de protección e instalaciones costeras y para el estudio de las comunidades biológicas intermareales.

El nivel del mar, en un instante cualquiera, está determinado por la marea astronómica y la marea meteorológica, debida a presión y viento, por la configuración de la costa y la batimetría de la zona donde se propaga. No obstante, fenómenos de menor frecuencia, escalas temporales diferentes o con poco efecto regional, pueden modificar el nivel del mar; es este el caso de los tsunamis, las variaciones de largo plazo asociadas a cambio climático global, las anomalías del nivel medio como consecuencia del fenómeno de El Niño o descargas fluviales de grandes ríos. Algunos de estos factores no han sido tenidos en cuenta en el desarrollo metodológico del presente trabajo por diversas razones; pues la respuesta de la costa ante sus efectos puede estar manifiesta en otra variable o se ha considerado despreciable su efecto sobre la costa o, simplemente, porque supera el alcance de este trabajo.

El efecto de los tsunamis en las variaciones del nivel del mar se dejó de lado debido a que el registro mareográfico del puerto de Buenaventura no es lo suficientemente largo para obtener información sobre este fenómeno, únicamente se tienen datos del evento ocurrido en diciembre de 1979. La variación del nivel medio del mar de largo período tiene asociados procesos que se manifiestan en una escala regional, por lo que sería necesario un estudio más detallado para tenerla en cuenta, excediendo el alcance del presente estudio.

Los aportes de grandes ríos pueden contribuir a la variación de este nivel a escala local. La bahía de Buenaventura recibe, principalmente, los aportes de los ríos Dagua y Anchicayá, con un caudal medio

de 66 y 98 m<sup>3</sup>/s, respectivamente. Para efectos del presente estudio se asumió como hipótesis que las variaciones causadas por estas descargas fluviales están contenidas en la información del residuo meteorológico del registro del mareógrafo del puerto. Las variaciones del nivel medio del mar causadas por el fenómeno El Niño ya han sido consideradas en la sobreelevación por marea meteorológica.

Teniendo en cuenta lo anterior, es posible establecer que el nivel del mar para la bahía de Buenaventura está definido por la marea astronómica, relacionada con las fuerzas que ejercen los planetas sobre la masa líquida de la Tierra, y por la marea meteorológica, debida a las tensiones tangenciales del viento y la presión atmosférica. A partir del análisis, por separado, de estos dos fenómenos, el presente estudio tiene por objeto determinar los regímenes medio y extremal del nivel del mar para el área estudiada, tomando como punto de partida los registros históricos del mareógrafo localizado en el terminal petrolero del puerto (Fig. 1).

Para la determinación del régimen medio y extremal del nivel del mar en Buenaventura se ha seguido la metodología propuesta por Castillo (1998) y Medina *et al.* (1997), aplicada en el Atlas de Inundación del Litoral Español por el Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas de la Universidad de Cantabria, GIOC (2002c) y en el Atlas de Cota de Inundación del Litoral Pacífico Colombiano por Agudelo (2003).

Debido a la aleatoriedad de los procesos involucrados, una secuencia determinada de eventos oceanográficos rara vez se repite. La generación sintética de secuencias utilizando métodos de Monte Carlo es usada para buscar una serie con un comportamiento similar a la secuencia real. Asumiendo independencia entre los eventos y aplicando técnicas estadísticas paramétricas, la probabilidad de ocurrencia de un evento puede ser obtenida mediante la generación de una población de datos con base en las funciones de distribución de las variables que gobiernan dicha población, partiendo de la generación de números aleatorios y entrando en esas funciones para obtener los resultados (Agudelo, 2003). La ventaja de este método radica en que con registros cortos se puede generar información que permite obtener resultados de regímenes extremales.

El presente trabajo se ha organizado de la siguiente manera: la primera parte describe la metodología de cálculo empleada para analizar la marea astronómica y la marea meteorológica, por separado, con sus respectivas hipótesis de cálculo; seguidamente se construyen los regímenes medios y extremales del nivel del mar, para, finalmente, presentar el análisis de los resultados obtenidos para el nivel del mar en la bahía de Buenaventura.

### ÁREA DE ESTUDIO

La bahía de Buenaventura está localizada sobre la cuenca del Pacífico colombiano, en las costas de Suramérica, entre las latitudes 3°44'00" N y 3°56'00" N y las longitudes 77°01'00" W y 77°20'00" W. Su ancho varía entre 3.4 km (en la entrada del mar) y 5.5 km (en la parte interior de la bahía). Su longitud es de 20 km, aproximadamente (Fig. 1).

La bahía posee características de estuario, donde se combinan fenómenos fluvio-marinos, originados por las acciones del mar, los ríos y esteros que convergen en la zona. En ella se encuentra ubicado el principal puerto de Colombia sobre el océano Pacífico, que lleva su mismo nombre, el cual registra el mayor tráfico marítimo internacional como nacional; y es el puerto por donde Colombia importa el mayor porcentaje de la carga que entra al país (DIMAR, 2002).

Según registros del Departamento Administrativo Nacional de Estadística, DANE, Buenaventura cuenta con una población aproximada de 270000 habitantes, constituyéndose en el mayor centro urbano del litoral Pacífico colombiano. Gran parte de esta población vive en construcciones de tipo palafítico y en áreas de bajamar, catalogadas como bienes de uso público de acuerdo con la Constitución Política Colombiana y el Decreto Ley 2324 de 1984.

### METODOLOGÍA

La serie de marea histórica empleada en este trabajo consta de registros horarios comprendidos entre el 12 de mayo de 1953 y el 31 de diciembre de 2000. El porcentaje de datos faltantes corresponde al 8.2% del total de la serie.

### Marea astronómica

Definida como el conjunto de movimientos regulares de ascenso y descenso del nivel del mar con períodos próximos a las 12 ó 24 horas que se producen por los efectos gravitacionales del sistema Tierra-Luna-Sol. Desde el punto de vista práctico, es necesario conocer el comportamiento de la onda de marea, para predecir la amplitud de la misma en un instante y lugar determinado.

La descripción y predicción de la marea en una localización dada puede hacerse mediante un análisis armónico de mareas, el cual consiste en descomponer los registros de nivel del mar en un número finito de ondas, cuyo período y fase han sido perfectamente establecidos, dado que coinciden con los períodos de algunos de los movimientos astronómicos relativos entre la Tierra, la Luna y el Sol. En líneas generales, el método del análisis armónico consiste en medir el nivel del mar durante cierto período de tiempo y obtener, a partir de dicho registro las amplitudes y fases de las ondas componentes (GIOC, 2002a). A estos parámetros se les llama componentes armónicas, debido a la suposición implícita de que las respuestas de mares y océanos a las fuerzas de marea no cambian en el tiempo.

Para el caso en cuestión, se abordó el método elaborado por Dronkers (1964), basado en los mínimos cuadrados. La marea astronómica se aproxima, entonces, a la suma de esas ondas constituyentes de la siguiente manera:

$$S_{MA}(t) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cos(\omega_i t + \varphi_i) \quad (1)$$

donde,

$a_0$  es la amplitud del nivel medio de referencia,

$a_i$  es la amplitud de la onda  $i$ ,

$\omega_i$  es la frecuencia de la onda componente  $i$ ,

$\varphi_i$  es el desfase de la onda componente  $i$ ,

$t$  es el instante en que se calcula la marea,

$n$  es el número de componentes consideradas.

Este método trata de ajustar esa sumatoria de constituyentes, que representa la marea astronómica, a los datos observados del nivel del mar, minimizando el cuadrado de la diferencia entre ambas series. Para el análisis y predicción de la marea se deben distinguir las componentes que son importantes y las que no lo son tanto, para lo cual se diferencian seis grupos (GIOC, 2002a):

- El primer grupo (I) siempre es necesario para la predicción de la marea (Tabla 1).
- Generalmente, el segundo grupo (II) es también tenido en cuenta.
- El tercer grupo (III) son, teóricamente, las componentes de menos importancia.
- El cuarto grupo (IV) son componentes de largo período, las cuales son tenidas en cuenta para predicciones de mayor exactitud y de largo período.
- Las constituyentes del quinto grupo (V) son consideradas cuando es necesario contar con predicciones exactas.
- El sexto grupo (VI) está conformado por las constituyentes que se generan debido a los efectos no lineales en aguas someras, es decir, son aquellas cuyo origen no es astronómico.

Con miras a determinar el mayor número de constituyentes armónicas posibles, se buscó en toda la base de datos disponible aquellos registros con los que se completase una serie de tiempo continua con al menos 369 días o más. Al verificar los datos se comprobó la existencia de un período comprendido entre el 9 de julio de 1979 y el 7 de febrero de 1987, y otro período entre el 7 de agosto de 1996 y el primero de mayo de 2000.

Se optó por seleccionar el segundo período, atendiendo los siguientes criterios:

- Es un período de medida más reciente.
- Se presentaron condiciones de fenómenos El Niño, La Niña y de normalidad, con lo cual el residuo meteorológico tendría información relativa a estas condiciones.

Al tramo de serie seleccionado se le efectuó el análisis armónico, utilizando el programa ARM, desarrollado por el GIOC para la obtención de las componentes armónicas de la marea astronómica.

### Marea meteorológica

La marea meteorológica se define como la respuesta del nivel del mar a las tensiones tangenciales inducidas por el viento y los campos de presiones. La marea meteorológica se puede representar mediante el residuo meteorológico que se obtiene tras la realización del análisis armónico a una serie de nivel del mar. Dicho residuo tiene carácter aleatorio y su régimen medio sigue una

distribución aproximadamente normal (GIOC, 2002b). Debido a que, precisamente, el residuo meteorológico presenta un comportamiento aleatorio, su análisis requiere hacerse por separado del análisis de marea astronómica, para lo cual se hace necesario plantear las siguientes hipótesis:

- Todo el residuo del análisis armónico se debe a marea meteorológica.
- Se ajustan las ramas medio-alta y extremal del residuo a distribuciones de Gumbel de máximos, por ser la distribución que mejor se ajusta a los resultados (GIOC, 2002b).

Para el ajuste de los datos de marea meteorológica a una distribución de Gumbel, se empleó la serie completa de marea para el puerto de Buenaventura, es decir los datos horarios comprendidos entre los años de 1953 y 2000. Para obtener el residuo meteorológico de la serie total, se reconstruyó la serie de marea astronómica a partir de las componentes armónicas calculadas en el análisis armónico. Esta serie reconstruida fue restada de la serie real total, obteniéndose de esta manera el residuo meteorológico. Los datos de la serie total de residuo meteorológico se ordenaron en forma ascendente y a cada uno de ellos se les asignó una probabilidad acumulada:

$$i / (n + i)$$

donde,

$i$  es el original del dato,

$n$  es el número total de datos

Se dibujaron en papel probabilístico de Gumbel de máximos la pareja de datos:

$$\Sigma - \log \left[ -\log \left( \frac{i}{n+i} \right) \right], S_{MM}(i) \quad (2)$$

Se ajustaron dos rectas, una para régimen medio y otra para régimen extremal. Para encontrar el punto en donde se interceptan las dos rectas ajustadas, el cual será necesario conocer para la construcción del régimen medio y extremal del nivel del mar más adelante, se igualan las ecuaciones de las rectas ajustadas a cada uno de los regímenes del siguiente modo:

$$F_p = \exp \left[ -\exp \left( \frac{S_{mm} - \lambda_m}{\delta_m} \right) \right]$$

(función de distribución de Gumbel, régimen medio)

despejando queda,

$$S_{mm} = \lambda_m - \delta_m \ln [-\ln(F_p)]$$

$$F_p = \exp \left[ -\exp \left( \frac{S_{mm} - \lambda_e}{\delta_e} \right) \right] \quad (3)$$

(función de distribución de Gumbel, régimen extremal)

despejando queda,

$$S_{mm} = \lambda_e - \delta_e \ln [-\ln(F_p)] \quad (4)$$

Igualando 3 y 4 queda,

$$F_p = \exp \left[ -\exp \left( \frac{\lambda_e - \lambda_m}{\delta_e - \delta_m} \right) \right] \quad (5)$$

donde,

$p$  hace referencia al punto de intersección de los dos regímenes,  $\lambda_m$  y  $\lambda_e$  son los parámetros de localización del régimen medio y extremal de marea meteorológica, respectivamente,

$\delta_m$  y  $\delta_e$  son los parámetros de escala del régimen medio y extremal de marea meteorológica, respectivamente.

### Régimen medio del nivel del mar

Con el fin de representar el nivel de marea en un régimen de probabilidades, se simuló esta variable considerando tanto la marea astronómica como la marea meteorológica, siguiendo la metodología propuesta por el GIOC (2002b). Para llevar a cabo este procedimiento se plantearon las siguientes hipótesis:

- El nivel de marea está constituido por la suma entre la marea astronómica y la marea meteorológica.
  - La marea astronómica es una serie temporal de carácter determinista.
  - La marea astronómica y la marea meteorológica son variables estadísticamente independientes.

La marea meteorológica se simula mediante técnicas de Monte Carlo.

Posteriormente se definen los siguientes datos:

- Las constantes armónicas de la marea astronómica y la referencia del cero del mareógrafo al nivel medio del mar.
- El número de horas al año (8760) y el número de años a simular.
- La cota máxima permitida.
- Los parámetros de ajuste de la distribución de Gumbel para la sobre elevación por marea meteorológica.

Entonces, se generan tantos números aleatorios como horas se quieran simular y se obtiene la marea meteorológica, a partir de las ecuaciones de las rectas ajustadas a cada uno los regímenes presentados en el apartado anterior. Para la marea astronómica se construyó una serie horaria a partir de las componentes armónicas halladas. Para obtener el nivel del mar, en un instante dado, se suman las dos variables anteriormente calculadas. Este procedimiento se hace para  $n$  series, de las cuales se calcula la media para cada valor de probabilidad. En total se simularon 100 series de 1000 años cada una. Estos datos se ordenan y se obtiene la función de distribución del régimen medio de nivel de marea.

### Régimen extremal del nivel del mar

Los datos necesarios para el cálculo del régimen extremal de nivel de marea son los mismos que para el régimen medio y el procedimiento de cálculo es idéntico, asumiendo las mismas hipótesis de partida, sólo que aquí se usa el máximo valor anual del nivel de marea. Se generan  $n$  series que servirán para obtener la media y la desviación estándar para cada valor de probabilidad, con las que se estimarán las bandas de confianza del 90%. Con estos valores máximos anuales obtenidos de todos los años simulados se construye el régimen extremal de nivel de marea. Para una población normalmente distribuida, las bandas de confianza del 90% se pueden calcular como (Castillo y Pruneda, 2001):

$$\left( \bar{x} - 1.645 \hat{\sigma} \sqrt{\frac{n}{a}}, \bar{x} + 1.645 \hat{\sigma} \sqrt{\frac{n}{b}} \right) \quad (6)$$

donde,

$\bar{x}$	es el estimador puntual de la medida,
$\hat{s}$	es el estimador puntual de la desviación estándar,
$n$	es el tamaño de la muestra,
$a$ y $b$	son coeficientes que consideran una variabilidad en la desviación estándar y que dependen de $n$ ,

Los valores de  $a$  y  $b$  se presentan en la Tabla 2. Se simularon 100 series de 1000 años para obtener los regímenes extremales de nivel de marea, que se expresan como una función de probabilidad.

## RESULTADOS

Mediante el análisis armónico efectuado se obtuvieron 54 constituyentes armónicas de la marea astronómica para Buenaventura, presentadas en la Tabla 1. Del análisis anterior, se puede destacar la aparición de armónicos de orden superior, los cuales se generaron cuando la onda de marea se propagó en profundidades donde se ve afectada por los contornos y los efectos no lineales condujeron a la interacción entre las diferentes componentes, dando lugar a nuevas componentes cuyas frecuencias difieren de las correspondientes a las originales.

Este resultado se encuentra estrechamente relacionado con el sitio donde se encuentra ubicado el mareógrafo del puerto de Buenaventura (Terminal Petrolero). Por tanto, se puede resumir que el efecto de los contornos cuando la onda se propaga a lo largo de la bahía de Buenaventura se traduce en la aparición de una serie de componentes que se pueden clasificar como:

- Sobremareas o componentes superarmónicas. Su velocidad angular son un múltiplo exacto de las componentes astronómicas que las originan. Para este caso cabe destacar las que provienen de origen lunar M4 y M8.
- Mareas compuestas. Su velocidad angular es la suma o diferencia de las velocidades de dos o más componentes astronómicas. Para el caso que nos ocupa, cabe destacar la aparición de las componentes MS4, MN4 y ZMS6.

Una vez establecidas las constituyentes de la marea para el puerto de Buenaventura, es

importante conocer el tipo de marea cuya identificación se basa en el factor de forma,  $F$ , que indica qué tipo de componente domina el registro de marea astronómica, de tal manera que la marea sea semidiurna si  $F = 0.00 - 0.25$ ; mixta, pero predominantemente diurna si  $F = 1.50 - 3.00$ , y diurna si  $F > 3.00$ . Este factor resulta del cociente entre la suma de las amplitudes de las dos componentes diurnas,  $K_1$  y  $O_1$  y la suma de las dos componentes semidiurnas,  $M_2$  y  $S_2$ , es decir:

$$F = \frac{AK_1 + AO_1}{AM_2 + AS_2} \quad (7)$$

Como resultado se tiene un factor de forma  $F = 0.063947$  que corresponde a una marea de tipo semidiurno.

En la Figura 2 se observan los resultados de la comparación realizada entre la marea medida durante los años 1996 a 2000 y la calculada a partir de las 54 constituyentes armónicas presentadas anteriormente. La serie resultante de la diferencia entre las dos series, marea medida y marea calculada, corresponde a la marea meteorológica, la cual se presenta en la parte baja de la figura, donde se aprecia su carácter aleatorio e irregular. En la Figura 3 se presenta el residuo meteorológico de la serie completa de nivel del mar para Buenaventura.

En la Figura 4 se presentan en papel probabilístico de Gumbel de máximos, los regímenes de sobre elevación por marea meteorológica en el puerto de Buenaventura, a partir de la serie completa de residuo meteorológico. En el ajuste de las rectas, para el régimen medio se obtuvo un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.967$  y para el régimen extremal de  $R^2 = 0.9589$ . Estos regímenes se diferencian por un punto de quiebre en la gráfica, debido a que los dos se ajustan a distribuciones de probabilidad diferentes y aquí se han representado en la misma para observar esa diferencia.

Los parámetros de localización  $\lambda$  y de escala  $\delta$  de la distribución de Gumbel de máximos hallados se representan en la Tabla 3.

A partir de la Ecuación 5, se obtuvo que al punto de intersección entre los dos regímenes, medio y extremal, le corresponde una probabilidad

$F_p = 0.999845$ ; la cual se encuentra asociada a un nivel de marea meteorológica  $S_{mm} = 0.645$  m. Los resultados obtenidos en el análisis de la marea meteorológica permiten establecer que el aporte de este factor es significativo en el régimen del nivel del mar en la bahía de Buenaventura, por lo que para pronósticos de mayor precisión del nivel del mar es importante tener en cuenta esta variable.

En la Figura 5 se presentan los resultados para el régimen medio del nivel del mar, obtenidos a partir de las simulaciones de marea astronómica y marea meteorológica en doble formato: función de distribución (probabilidad acumulada) y número de horas al año que se supera una cota dada. La relación entre ambos se establece de la siguiente manera:

$$N = 8760 (1 - F) \quad (8)$$

donde,

$N$  es el número de horas al año que se supera la cota dada,  
 $8760$  es el número de horas del año,  
 $F$  es la probabilidad acumulada.

El régimen medio del nivel del mar no es más que la representación del comportamiento que tiene dicha variable en un año medio.

Para el régimen extremal del nivel del mar se ha elegido presentar los resultados en papel probabilístico Gumbel de máximos y en una doble escala: probabilidad acumulada y período de retorno (Fig. 6). La relación entre ambas escalas es:

$$R = \frac{1}{1-F} \quad (9)$$

donde,

$R$  es el período de retorno (años),  
 $F$  es la probabilidad acumulada.

El período de retorno no es más que el tiempo medio que tarda en retornar un suceso. La importancia de éste radica en que muchos criterios de diseño están basados en períodos de retorno, es decir, se debe diseñar una obra para resistir una media de  $N$  años (normalmente 50, 100 o 500 años) (Castillo y Pruneda, 2001). Por ejemplo, para conocer cuál será la cota máxima que alcanzaría el nivel del mar en los próximos 50 años, se tienen en la Figura 6 datos que permiten prever que para dicho

período de retorno se tendrá un nivel máximo de 5.45 m con respecto al cero del mareógrafo.

## CONCLUSIONES

- Se identificaron 54 componentes armónicas de la marea astronómica para la bahía de Buenaventura.

- Se estableció la aparición de armónicos de orden superior, los cuales se generan cuando la onda de marea se propaga en profundidades donde se ve afectada por los contornos, y los efectos no lineales dan lugar a nuevas componentes cuyas frecuencias difieren de las originales.

- Se construyeron los regímenes medios y extremales de la marea meteorológica y se encontraron ajustes lineales en un papel probabilístico Gumbel de máximos. Ésta varía entre -0.2 y 0.6 m en Buenaventura, por lo que para pronósticos del nivel del mar de mayor precisión es importante tener en cuenta este fenómeno.

- Mediante las simulaciones de Monte Carlo se construyeron los regímenes medios y extremales del nivel del mar para la bahía de Buenaventura, con sus respectivas bandas de confianza del 90%. El régimen medio se presenta en doble formato: probabilidad acumulada de que un nivel dado sea excedido y números de horas al año en que un nivel dado es superado.

- Los resultados hallados en el presente trabajo facilitan la definición de criterios con respecto al nivel del mar, bien sea para el diseño de actuaciones en la bahía de Buenaventura, es decir, qué cota de altura deberá tener una obra para que no se inunde de acuerdo con una probabilidad de excedencia dada para un determinado nivel del mar; o, en su defecto, para establecer zonas en riesgo de inundación por sobreelevaciones del nivel del mar.

## AGRADECIMIENTOS

Al GIOC, por el apoyo y la transferencia tecnológica que permitieron la realización del presente trabajo, en especial a Pablo Agudelo, Mauricio González y Pedro Lomonaco.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Agudelo, P. 2003.** Cota de Inundación del Litoral Pacífico Colombiano. Tesina de máster. Universidad de Cantabria. Santander (España).

**Castillo, E y R. Pruneda. (2001).** Estadística Aplicada. Editorial Moralea. Santander (España).

**Castillo, M. 1998.** Desarrollo de una Metodología para la Obtención de un Atlas de Cota de Inundación en Playas en el Litoral Español. Tesina de máster. Universidad de Cantabria. Santander (España).

**DIMAR. 2002.** Informe de Gestión 2002. Ministerio de Defensa, Armada Nacional, Dirección General Marítima. Bogotá (Colombia).

**Dronkers, J. 1964.** Tidal Computations in Rivers and Coastal Waters. North- Holland Publishing Company. Amsterdam.

**GIOC. 2002a.** Documento de Referencia - Dinámicas, Volumen I. Ministerio de Medio Ambiente y Universidad de Cantabria. Santander (España).

**GIOC. 2002b.** Atlas de Inundación del Litoral Peninsular Español. Documento Complementario. Ministerio de Medio Ambiente y Universidad de Cantabria.

**GIOC. 2002c.** Atlas de Inundación del Litoral Peninsular Español. Documento Temático. Ministerio de Medio Ambiente y Universidad de Cantabria.

**Medina, R., F. Méndez y M. Castillo. 1997.** Determinación de la Cota Máxima de Inundación en una Playa. Jornadas Españolas de Puertos y Costas, Cádiz, Pp. 789-801.

## FIGURAS Y TABLAS

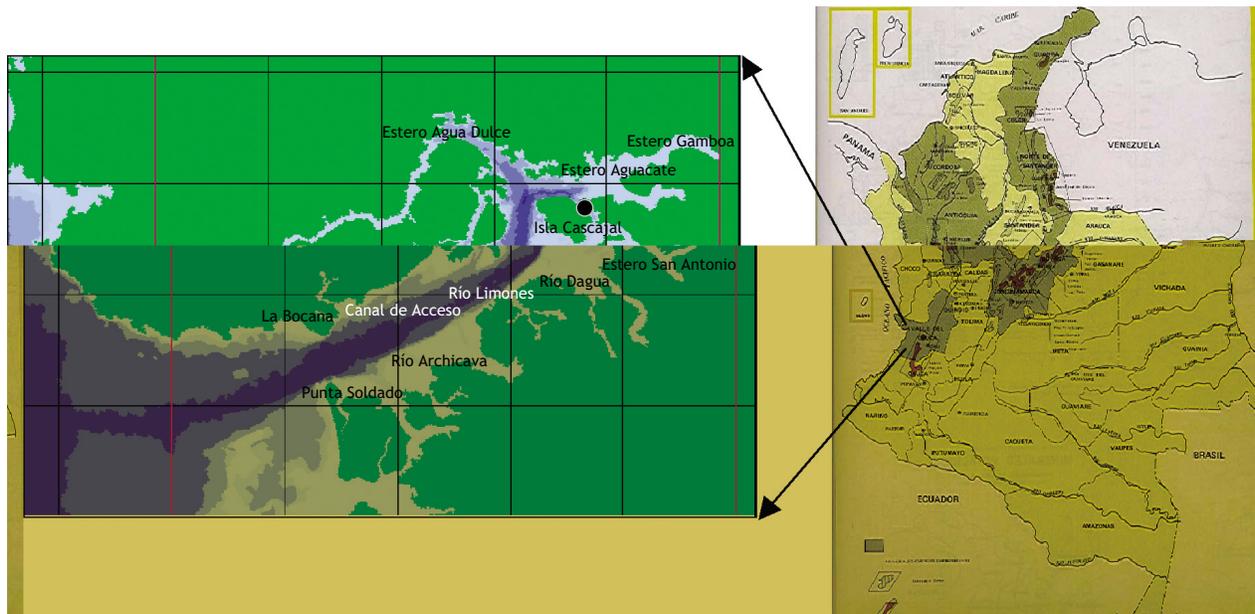


Figura 1. Localización de la bahía de Buenaventura. El punto indica la localización del mareógrafo.

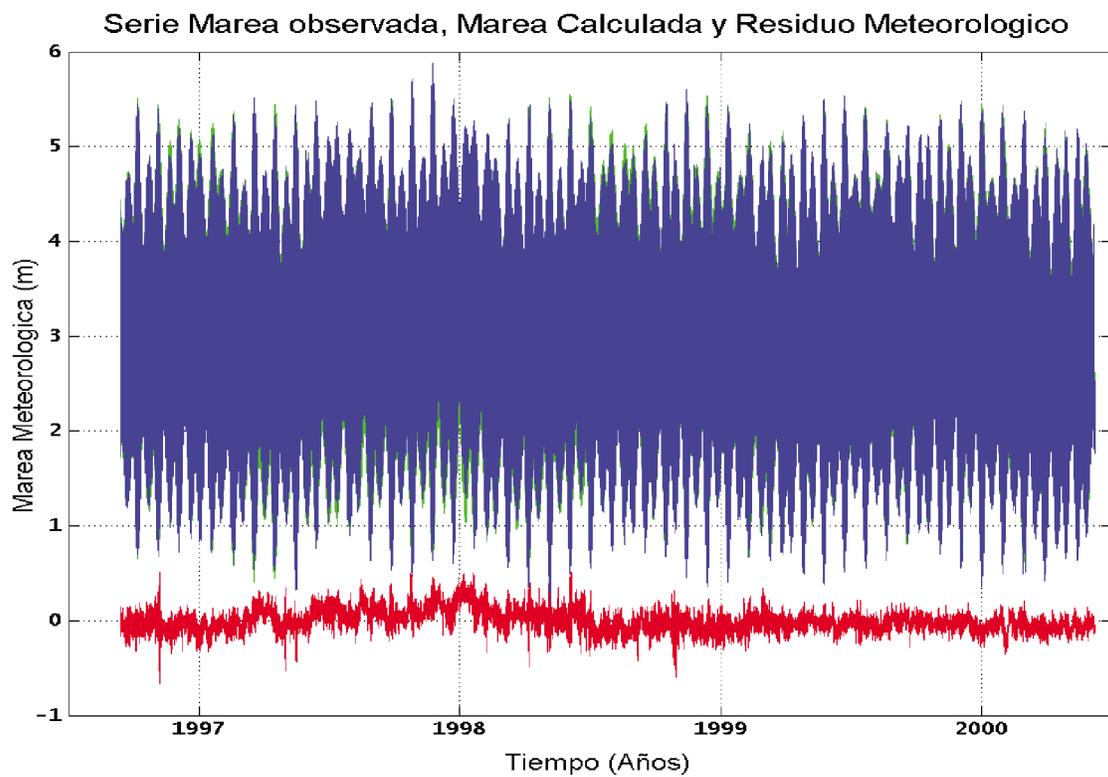


figura 2. Comparación marea observada (color azul) y calculada (color verde). En la parte baja (color rojo) la marea meteorológica.

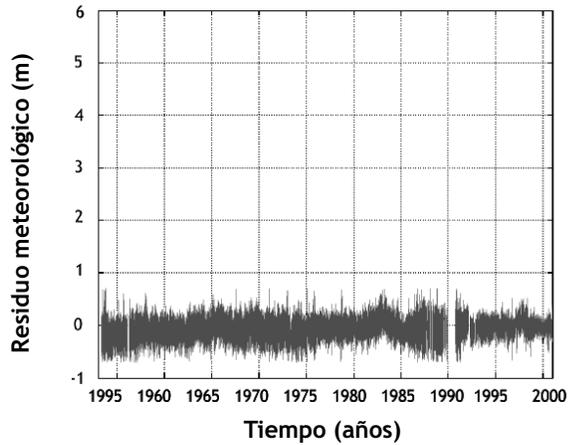


Figura 3. Residuo meteorológico histórico total.

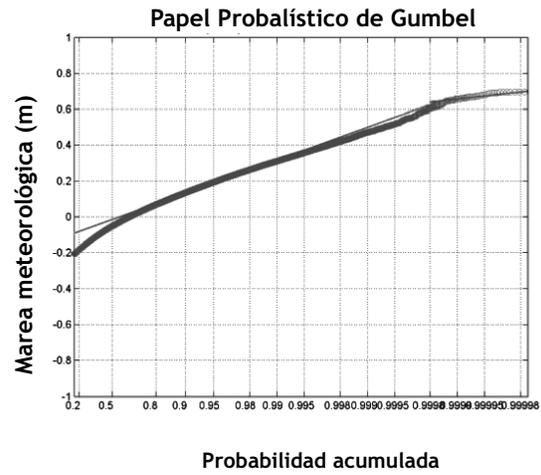


Figura 4. Régimen de sobreelevación por marea metereológica en Buenaventura.

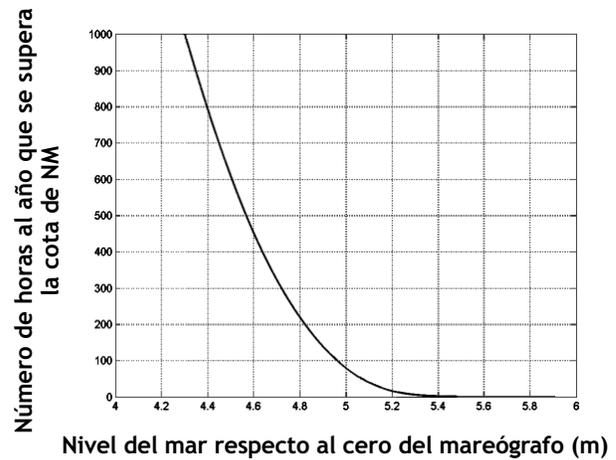
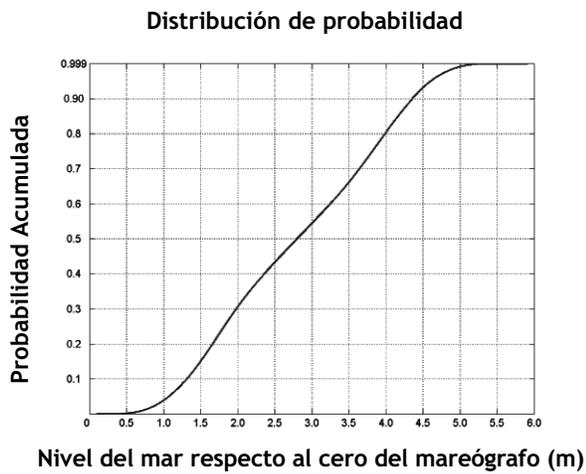


Figura 5. Régimen medio de nivel de marea en Buenaventura.

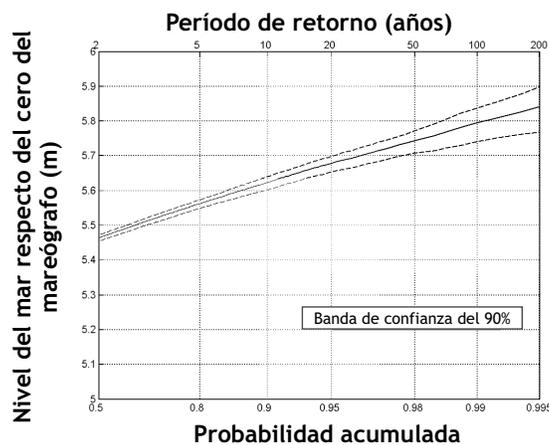


Figura 6. Régimen extremo de nivel de marea en Buenaventura

Tabla 1. Componentes armónicas marea astronómica, mareógrafo terminal de Buenaventura.

Grupo	Componente	Frecuencia (Grad/hr)	Periodo(h)	A(m)	B(m)	Amplitud (m)	Fase (°)
I	M2	28.984104	12.42	1.495090	-0.277645	1.520651	-10.52024
	S2	30	12.00	-0.389706	0.100693	0.402504	165.512667
	K1	15.041069	23.94	0.102221	-0.009579	0.102669	-5.353272
	O1	13.943036	25.80	-0.011562	-0.016699	0.020311	-124.698086
II	P1	14.958931	24.07	0.033535	-0.008179	0.034518	-13.705878
	S1	15.00000	24.00	0.002193	0.017349	0.017487	82.796648
	N2	28.43973	12.66	0.281644	-0.172332	0.330184	-31.461576
	K2	30.082137	11.97	0.080066	-0.006375	0.080319	-4.552123
III	Q1	13.398661	26.87	0.00299	-0.003157	0.004348	-46.547581
	L2	29.5285	12.19	-0.047291	0.017385	0.050385	159.815439
	R2	30.041	11.9836	-0.002379	0.001948	0.003075	140.695647
IV	Mf	1.098033	328	0.014219	0.000195	0.014221	0.785531
	Mm	0.544375	661	0.019331	0.007867	0.02087	22.14403
	Ssa	0.082137	4383	0.053336	-0.044342	0.069361	-39.739282
V	Sa	0.041067	8759	0.026986	0.067861	0.07303	68.314034
	Msm	0.471521	764	-0.002918	0.007873	0.008396	110.338642
	Msf	1.015896	354	-0.021056	-0.016513	0.026759	-141.895483
	Mtm	1.6424	219	0.002461	-0.000476	0.002506	-10.938637
	M1	14.496694	24.83	0.005122	0.002469	0.005686	25.733068
	Π1	14.9179	24.13	-0.000661	0.00055	0.00086	140.21167
	φ1	15.1232	23.80	-0.000586	0.001013	0.00117	120.043252
	J1	15.5854	23.10	0.008315	0.001768	0.008501	12.001879
	OO1	16.139	22.31	0.004513	-0.000324	0.004524	-4.103138
	2N2	27.8954	12.91	0.031102	-0.028259	0.042022	-42.257748
	μ2	27.968	12.87	-0.047736	-0.02534	0.054045	-152.038974
	ν2	28.512	12.63	-0.055217	-0.016088	0.057513	-163.755994
	λ2	29.455	12.22	0.002959	-0.01679	0.017049	-80.005925
T2	29.959	12.02	0.02578	-0.015608	0.030137	-31.193012	
VI	2Q1	12.854	28.0068	0.000445	-0.001257	0.001334	-70.496616
	p1	13.471	26.7241	-0.000458	-0.00012	0.000474	-165.337186
	MNS2	27.4238	13.1273	-0.015778	-0.008452	0.017899	-151.821039
	2SM2	31.015	11.6073	-0.002078	0.010889	0.011085	100.804223
	MK3	44.0252	8.1771	0.000959	0.004199	0.004308	77.134359
	M3	43.476	8.2804	0.006708	0.000106	0.006709	0.909472
	2MK3	42.927	8.3863	-0.000165	0.000951	0.000965	99.843498
	SK3	45.0411	7.9927	0.005862	-0.007374	0.009421	-51.516068
	SO3	43.943	8.1924	0.002305	-0.001697	0.002862	-36.369762
	M4	57.96821	6.2103	0.037746	0.058053	0.069245	56.968061
	MS4	58.984104	6.1033	-0.019975	-0.038832	0.043668	-117.220717
	MN4	57.423	6.2693	0.021116	0.021165	0.029898	45.066705
	MK4	59.0662	6.0949	0.001753	0.007064	0.007278	76.05933
	S4	60	6.0000	0.00097	0.008215	0.008272	83.263147
	M6	86.952312	4.1402	0.002961	-0.001523	0.00333	-27.21647
	2MS6	87.96821	4.0924	-0.009608	0.016498	0.019092	120.213984
	2MN6	86.4079	4.1663	0.002392	-0.003933	0.004604	-58.696907
	2MK6	88.0503	4.0886	0.000688	-0.0012	0.001383	-60.164619
	2SM6	88.9841	4.0457	-0.001375	-0.005073	0.005256	-105.163222
	MSN6	87.4238	4.1179	0.000949	0.005952	0.006027	80.943681
	S6	90	4.0000	-0.00167	-0.000394	0.000428	-112.947791
	M8	115.936	3.1052	-0.005105	0.007706	0.009243	123.525879
	3MS8	116.952	3.0782	0.003503	-0.007796	0.008546	-65.804786
	2MS8	117.968	3.0517	-0.000405	0.003057	0.003084	97.54273
2MSN8	116.407	3.0926	-0.000482	-0.004396	0.004422	-96.25924	
S8	120	3.0000	0.000123	-0.000779	0.000789	-81.0015	

**Tabla 2.** Valores de  $a$  y  $b$  que conducen a intervalos de confianza de amplitud mínima para bandas de confianza del 90%.

n	a	b
4	0.582	17.6
5	1.06	18.1
6	1.59	18.9
7	2.18	19.9
8	2.79	20.9
9	3.43	22.0
10	4.08	23.2
20	11.3	35.1
30	19.1	47.0
40	27.2	58.8
50	35.6	70.3
60	44.1	81.8
70	52.7	93.2
80	61.4	104.4
90	70.1	115.7
100	78.8	127.0

**Tabla 3.** Parámetros de la distribución Gumbel.

RÉGIMEN	PARÁMETRO	VALOR
Medio	$\delta_m$	0.0787
	$\lambda_m$	-0.04525
Extremal	$\delta_e$	0.0239
	$\lambda_e$	0.43567