

Determinación de las cotas máximas de inundación, mediante modelación numérica, en Bahía Solano Chocó

Determination of the maximum flood heights using numerical modeling in Bahía Solano-Chocó

DOI: 10.26640/22159045.447

Fecha de recepción: 2018-06-08 / Fecha de aceptación: 2018-07-31

Laura M. Vásquez L.*, **José D. Iriarte S.**** y **Ronald E. Sánchez E.*****

Vásquez, L., Iriarte, J. y Sánchez, R. (2018). *Determinación de las cotas máximas de inundación, mediante modelación numérica, en Bahía Solano Chocó* *Cotas de inundación Bahía Solano-Chocó*. Bol. Cient.CIOH (37):17-34. ISSN 0120-0542 e ISSN en línea 2215-9045. DOI: 10.26640/22159045.447

RESUMEN

En el presente trabajo se determinó el régimen medio y extremal de nivel del mar en Bahía Solano, sobre el litoral del departamento de Chocó, mostrando una cota máxima de inundación promedio de 3.9997 m. Los resultados obtenidos son uno de los insumos principales para la construcción de la Línea de Más Alta Marea (LMAM) para la región anteriormente mencionada. Para la elaboración de los regímenes se partió de las siguientes hipótesis: (i) el nivel del mar en un instante dado está representado por la suma de la marea (componente astronómica) y el residuo de marea (componente meteorológica), (ii) el componente astronómico es considerado una variable determinista, mientras que al residuo mareal se le considera como variable aleatoria, siguiendo una distribución aproximadamente normal, (iv) ambos componentes son tratados como variables estadísticamente independientes. Así, teniendo en cuenta lo anterior, en el análisis llevado a cabo para cada componente por separado en el área de estudio, se emplearon herramientas de análisis, de tipo armónico, modelado numérico y métodos indirectos basados en técnicas de Montecarlo, aplicadas de acuerdo con el comportamiento determinista y estocástico que presentó cada variable.

PALABRAS CLAVES: Bahía Solano, Pacífico colombiano, máximo nivel de inundación, análisis espectral.

ABSTRACT

The middle and extreme regime of sea level in Bahia Solano, on the coast of the department of Chocó, was determined, showing an average maximum flooding level of 3.9997 m. The results are one of the main inputs for construction of the Highest Tide Line (HTL) for the above region. For the elaboration of the regimes the following assumptions were made: (i) the sea level at a given time is represented by the sum of the tide (astronomical component) and the residual tide (meteorological component), (ii) The astronomical component is considered a deterministic variable, while the tidal residue is considered as a random variable, following an approximately normal distribution, (iv) both components were treated as statistically independent variables. Considering the above, analysis for each components were carried out in the study area using analysis tools, harmonic analysis numerical modeling and indirect methods based on Montecarlo techniques and applied according to the deterministic and stochastic behavior presented by each variable.

KEYS WORDS: Bahía Solano, Colombian Pacific, maximum flooding level, spectral analysis.

* Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCP), Tumaco. Correo: lvasquez@dimar.mil.co.

** Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCP), Tumaco. Correo: jiriarte@dimar.mil.co.

*** Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCP), Tumaco. Correo: rsanchez@dimar.mil.co

INTRODUCCIÓN

El comportamiento del nivel del mar, en un instante cualquiera, está definido por dos factores principalmente, la marea astronómica y la marea meteorológica, esta última debida a las oscilaciones de la presión atmosférica y viento; asimismo, la configuración de la costa y la batimetría de la zona donde se propaga esta onda de largo periodo, también juegan un papel importante. No obstante, existen otros fenómenos de menor periodicidad, en escalas temporales diferentes o con poco efecto regional, que pueden llegar a modificar el nivel del mar de forma considerable; como el caso de los tsunamis, algunas variaciones de largo plazo asociadas al cambio climático global, anomalías del nivel medio como consecuencia del fenómeno de El Niño, o descargas fluviales de grandes ríos (Otero, 2004).

El forzamiento astronómico que genera las mareas, produce una periodicidad en su ascenso y descenso. De modo que teniendo en cuenta la frecuencia en que esto ocurre, las mareas se pueden clasificar como marea tipo diurna, semidiurna o mixta. Durante una marea diurna se observa una pleamar y una bajamar al día, una marea semidiurna produce dos pleamares y dos bajamares de magnitud casi igual cada día, mientras que una marea mixta está caracterizada por una notable desigualdad diurna en la elevación de las pleamares y bajamares entre ciclos de marea sucesivos (SHOA, 1992).

Cuando se trabaja con datos de mareas es importante conocer que la pleamar media en un lugar determinado, está definida como la elevación media del agua en pleamar durante una época de mareas; similarmente, la bajamar media es conocida como la elevación media del agua en bajamar durante una época de mareas. La época de mareas consiste en un período de 19 años de oscilaciones sobre un lugar específico, correspondiendo al ciclo nodal lunar completo que se requiere para pasar por un ciclo completo de las principales fuerzas generadoras de mareas (Ideam, 2014).

Conocer el comportamiento del nivel del mar en un lugar determinado, es una necesidad que cobra importancia en el diseño y construcción de

obras marítimas, el manejo integrado de zonas costeras, para la seguridad marítima, entre otras. De esta necesidad se tiene conciencia principalmente, en aquellas zonas donde el rango de variación del nivel del mar es significativo, y su desestimación puede traer consecuencias en las "Cotas de diseño de obras" o construcción de infraestructura costera (Kjerfve, 1981). De acuerdo con lo anterior, el estudio y análisis del comportamiento del nivel del mar al interior de una bahía adquiere una significativa relevancia, ya que sirve como herramienta para disminuir la vulnerabilidad a la que se ven expuestos los centros poblados que habitan sobre las zonas costeras.

El objetivo principal de este trabajo es la obtención de las cotas máximas de inundación en el área de Bahía Solano (Chocó), como insumo para la elaboración de la LMAM, este procedimiento se efectúa a partir del conocimiento previo de la dinámica mareal en esta área. El resultado final servirá para que Dimar realice el trazado de su jurisdicción en el entorno costero de la zona de estudio, ejerciendo así con propiedad el control de los bienes de uso público que se encuentren bajo su jurisdicción, a su vez, el trazado de la LMAM suministra a los investigadores una referencia para la elaboración de mapas de riesgos para mitigar los efectos de la inundación por situaciones extremas de sobreelevación del nivel del mar, y se convierte en una herramienta para el diseño de proyectos de ingeniería marina y de costas.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se ubica al noroccidente de Colombia, sobre la Cuenca Pacífica Colombiana, abarcando parte del litoral costero del departamento de Chocó, sobre la bahía interna del corregimiento de Ciudad Mutis (Bahía Solano), extendiéndose aproximadamente 4.4 km de longitud de línea de costa.

La zona de estudio es una bahía abierta, caracterizada por un frente montañoso que se eleva abruptamente desde el mar. Sobre algunos sectores se observan sitios de forma dentada, combinada con tramos costeros rectilíneos, asociados a los bordes rocosos, arcos de piedra, cavernas y remates de roca aislados, conformando pequeñas islas (Banco de Occidente, 2002).

Las playas de ensenada o bahías de la zona de interés, se encuentran bordeando áreas internas y formando arcos; por efecto de las mareas estas llegan a tener entre 150 a 200 m de ancho, destacándose las de Bahía Solano, entre otras (Banco de Occidente, 2002). Esta área, presenta un rango mareal promedio de 2.6 metros de altura,

en períodos de mareas de sicigias el rango mareal promedio oscila entre 3.3 y 3.5 metros y entre 2.0 y 2.2 metros durante mareas de cuadraturas. Al considerar lo anterior se establecieron cinco (5) puntos de monitoreo en el presente trabajo (Figura 1), con el fin de caracterizar con mayor propiedad la zona de estudio.

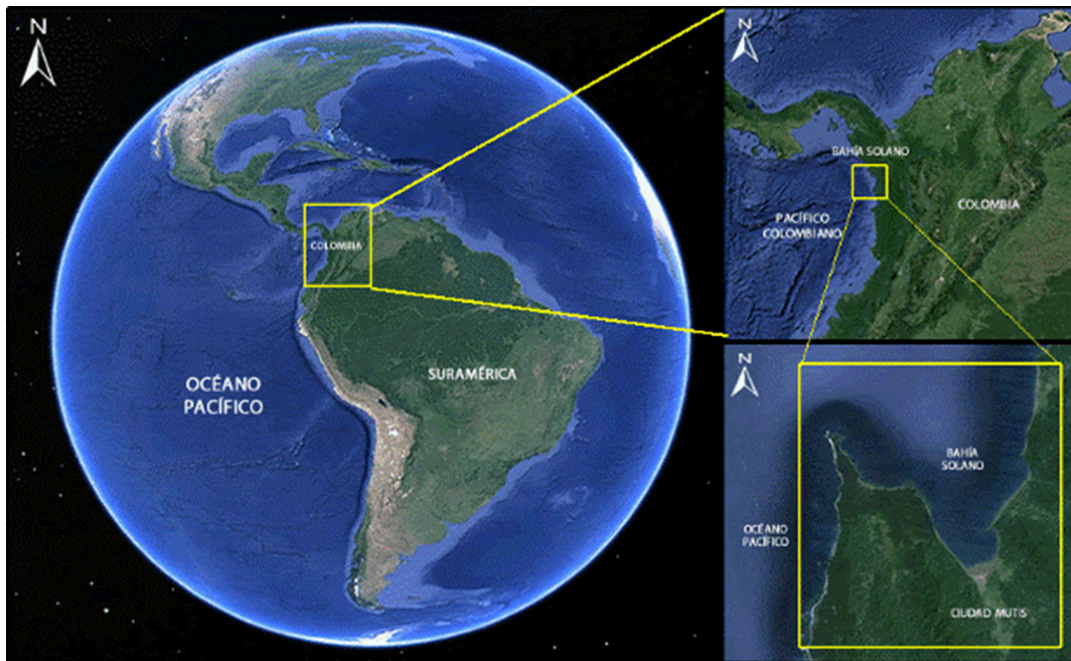


Figura 1. Área de estudio [Google Earth].

MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente trabajo se realizó un análisis por separado de la marea astronómica y meteorológica, siguiendo las metodologías establecidas para tal fin (Otero, 2005), por tanto se determinaron la marea astronómica y meteorológica empleando modelos numéricos, análisis de componentes armónicos y métodos indirectos de simulación basados en técnicas de Montecarlo (simulación estadística).

Para obtener el régimen medio y extremal, a partir del cual se obtienen las cotas máximas de inundación, se empleó la metodología detallada a continuación.

Determinación de marea astronómica

La marea astronómica es considerada como el movimiento de ascenso y descenso generado por la fuerza de atracción que ejerce la Luna y el Sol sobre la tierra con periodos de 12 o 24 horas aproximadamente, debido a que la Luna gira alrededor del centro de masas en común del sistema Tierra-Luna durante un periodo de 28 días (Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales, 2012-2013).

Para el caso en estudio, se contó con poca información instrumental para cumplir con el objetivo del presente trabajo, por tanto, se recurrió a la modelación numérica como alternativa para generar series de tiempo de

marea astronómica y propagarlas hasta la costa, usando el modelo hidrodinámico H2D (GIOC, 2001), el cual utiliza como fuente de información la base de datos global de nivel del mar *Grenoble*, que emplea 13 armónicos característicos de la onda de marea (M2, S2, K2, L2, N2, T2, MU2, NU2, 2N2, K1, O1, P1 y Q1), a través de puntos en una malla equidistante de 0.5° x 0.5° de resolución, para generar los contornos de marea en las zonas de interés (Andersen, Woodworth y Flather, 1995).

La información batimétrica fue suministrada por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCCP); y la configuración y calibración del modelo se realizaron de acuerdo a la metodología establecida por Otero (2005).

Con el fin de obtener una marea astronómica que represente mejor las fases lunares, teniendo en cuenta que las series de marea simuladas tienen un corto periodo de tiempo, se realizó un análisis armónico para pronosticar la marea durante el tiempo deseado.

Este análisis consiste en obtener a partir de un registro horario de datos del nivel del mar, las amplitudes y fases de las ondas componentes, mientras que el periodo se puede determinar de información astronómica, ya que coinciden con movimientos periódicos entre la Tierra, Luna y Sol (Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales, 2012-2013). Para el análisis armónico se empleó el método elaborado por Dronkers (1964), basado en mínimos cuadrados, donde la marea astronómica se aproxima a la suma de esas ondas constituyentes.

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

Donde:

a_0 es la amplitud del nivel medio de referencia

a_i es la amplitud de la onda i

ω_i es la frecuencia de la onda componente i

φ_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

La extracción de los armónicos se realizó empleando la herramienta desarrollada por Pawlowicz (T_Tide), la cual ajusta los componentes de marea por el método de mínimos cuadrados teniendo en cuenta las frecuencias preestablecidas del mismo (Rosenfeld *et al.*, 2009). Los constituyentes son seleccionados basados en su importancia relativa esperada, frente a la serie de tiempo de mediciones y la posibilidad de separación de la frecuencia (Pawlowicz *et al.*, 2002; Leffler y Jay, 2009; Kang *et al.*, 2009).

Determinación marea meteorológica

La marea meteorológica es la respuesta del nivel del mar ante las tensiones tangenciales inducidas por el viento y los esfuerzos normales generados por los campos de presión atmosférica, los cuales pueden generar una sobre-elevación del nivel medio (Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales, 2012-2013).

Esta marea se puede representar a través del 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, 2002).

Al no contar con suficientes registros instrumentales de nivel del mar, en Bahía Solano, se procedió a analizar los datos de los residuos meteorológicos de series medidas de nivel del mar de las estaciones más cercanas al área de interés, bajo la hipótesis de que los factores meteorológicos, como el viento y los campos de presión, ejercen su influencia en una escala espacial bastante amplia en el océano. A partir de este análisis desarrollado en el documento "Metodología para establecer la línea de más alta marea en aguas abrigadas cuando no se cuenta con registros instrumentales", se establecieron los parámetros de localización y escala (Tabla 1), empleados para generar la marea meteorológica utilizando técnicas estadísticas de Montecarlo (Otero, 2005).

Tabla 1. Parámetros de localización y escala.

Régimen	Parámetro	Valor
Medio	Localización λ_m	-0.45256623
	Escala δ_m	-0.07870149
Extremal	Localización λ_e	0.43567796
	Escala δ_e	-0.02389298
Probabilidad asociada al punto de intersección	F_p	0.99984541
Nivel de marea meteorológica asociado a la probabilidad	S_{mm}	0.645

Coefficiente de Spearman

La intensidad de la relación que existe entre dos variables, cuando estas no tienen una distribución normal, puede ser evaluada mediante el coeficiente de correlación de Spearman (r_s). Este coeficiente puede obtener valores entre 1 y -1, pasando por cero 0, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Coeficiente de correlación de Spearman.

Coefficiente	Correlación
Entre -1 y -0.9	Fuerte inversa
Entre -0.9 y -0.5	Moderada inversa
Entre -0.5 y 0	Débil inversa
Entre 0 y 0.5	Débil positiva
Entre 0.5 y 0.9	Moderada positiva
Entre 0.9 y 1	Fuerte positiva

Donde valores próximos a 1 indican una correlación positiva fuerte, valores próximos a -1 indican una correlación negativa fuerte y valores próximos a 0 indican asociación no lineal (Lehman *et al.*, 2013).

Para evaluar la calidad de las señales de marea astronómica obtenidas mediante modelación numérica, utilizando el modelo hidrodinámico H2D, se escogió como referencia, la serie de marea observada de la estación mareográfica más cercana al lugar de estudio. La estación pertenece a la Dimar y se encuentra ubicada

a 6°13' 58.02"N y 77° 24'44.13" W. Para realizar la correlación, se seleccionó una serie de 720 horas, con un 0.4 % de datos faltantes, comprendida entre el 1 de enero de 2014 y el 31 de enero de 2014.

Análisis espectral

El análisis espectral de series temporales es una técnica estadística que permite, entre otras aplicaciones, la descomposición de una serie temporal en sus componentes frecuenciales con el objetivo de descubrir componentes cíclicas inmersas en ruido (Kurmyshev, 2003; Pardo y Rodríguez, 2013). Esta serie temporal ($f(t)$), al ser una sucesión finita de números reales, pueden escribirse como una combinación lineal de senos y cosenos de la siguiente forma (ecuación 2):

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos \omega_n t + b_n \sin \omega_n t) \quad (2)$$

Donde $\omega_n = 2\pi n/T$ son las frecuencias naturales y las amplitudes a_0, a_k, b_k se determinan a partir de:

$$\begin{aligned}
 a_0 &= \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \cdot dt \\
 a_n &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \cos \omega_n t \, dt \\
 b_n &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \sin \omega_n t \, dt
 \end{aligned} \quad (3)$$

Siendo la función ($f(t)$) periódica con periodo T .

Reemplazando el grupo de ecuaciones 3 en la ecuación 2 y utilizando procesos matemáticos se obtiene la integral de Fourier (ecuación 4).

$$f(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} d\omega \int_{-\infty}^{\infty} f(\lambda) \cdot \cos[\omega_n(t - \lambda)] \cdot d\lambda \quad (4)$$

Reemplazando en la anterior ecuación, las amplitudes (ecuaciones 3) en función de la frecuencia, se obtiene:

$$a(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\lambda) \cos(\omega\lambda) d\lambda \quad ; \quad b(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\lambda) \sin(\omega\lambda) d\lambda \quad (5)$$

Y realizando algunos procesos aritméticos, se puede llegar a la transformada de Fourier (ecuación 6), la cual permite evaluar la presencia de patrones o ciclos en el comportamiento de una serie temporal, ya que descompone en una serie de armónicos cualquier función periódica, y sus amplitudes se determinan integrando en el intervalo de la función (Kurmyshev, 2003; Manzano *et al.*, 2007).

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (6)$$

Para el caso en estudio se obtuvieron las frecuencias dominantes tanto para la serie simulada como para la serie medida en un punto en común sobre Bahía Solano (Chocó), con el fin de evaluar la calidad de la serie simulada.

Coeficiente de Courtier

A partir de las amplitudes de los principales componentes armónicos de la serie temporal de marea, se obtiene mediante el coeficiente de Courtier, el comportamiento mareal correspondiente a la zona de estudio (ecuación 7) (Fierro, 2000; Pugh, 2004).

$$F = \frac{H_{k1} + H_{o1}}{H_{M2} + H_{S2}} \quad (7)$$

Si : $0 < F < 0.25$ Régimen semidiurno

Si : $0.25 < F < 1.50$ Régimen mixto semidiurno

Si : $1.50 < F < 3.00$ Régimen mixto diurno

Si : $3.00 \leq F$ Régimen diurno

Régimen medio

El régimen medio de nivel del mar describe el comportamiento de esta variable en un año medio (GIOC, 2002). Para su determinación, es preciso definir parámetros como: los componentes armónicos de marea astronómica, las horas al año y el tiempo (años) a simular; y los parámetros de distribución y escala para la sobreelevación por marea meteorológica (Otero, 2005; GIOC, 2002).

La obtención de este régimen se basa plenamente en la metodología establecida en Dimar (Otero, 2005), para lo cual se requiere reconstruir a partir de las componentes armónicas una serie de marea astronómica y simular una serie de marea meteorológica a partir de los parámetros de distribución y escala, mediante técnicas estadísticas de Montecarlo. Estas dos series se suman para obtener una serie de nivel del mar; este proceso se repite para 100 series de 500 años y finalmente, aplicando técnicas estadísticas se obtiene una serie promedio, la cual se ordena de forma ascendente y es representada en función de la distribución y el número de horas al año que se supera una cota determinada, mediante la siguiente relación (ecuación 8).

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

Régimen extremal

El régimen extremal de nivel del mar es un modelo estadístico que permite describir con qué probabilidad el nivel del mar puede superar un cierto valor de riesgo (Puertos del Estado, Ministerio de Fomento, s.f.). Esta información tiene gran aplicación en construcción de infraestructuras costeras para garantizar un cierto nivel de seguridad en obras expuestas a la acción del mar.

La forma como se obtienen el régimen extremal se basó en la metodología establecida en los centros de investigaciones de Dimar (Otero, 2005; GIOC, 2002), para lo cual se simuló 100 series de 500 años de marea meteorológica, a cada una se le sumó la serie de marea astronómica de 500 años, reconstruida

a partir de las componentes armónicas. Se determinaron los máximo anual de cada una de las series de nivel del mar; y se obtuvieron la media y la desviación estándar para cada valor de probabilidad, con los que se estimaron las bandas de confianza del 90 % (ecuación 9), para construir el régimen extremal.

$$\left(\bar{x} - 1.645\hat{s}\sqrt{\frac{n}{a}}, \bar{x} + 1.645\hat{s}\sqrt{\frac{n}{b}} \right) \quad (9)$$

Donde \bar{x} es el estimador puntual de la media, \hat{s} es el estimador puntual de la desviación estándar, n es el tamaño de la muestra y a y b son coeficientes que consideran una variabilidad en la desviación estándar y que depende de n (Castillo y Pruneda, 2001). Esta información se representa en doble escala: probabilidad

acumulada y periodo de retorno, mediante la siguiente relación:

$$R = \frac{1}{(1-F)} \quad (10)$$

Donde R es el periodo de retorno (años), que es un modo intuitivo de evaluar frecuencia de ocurrencia de un suceso y F es la probabilidad acumulada.

RESULTADOS

Para construir los regímenes medio y extremal de nivel del mar, en Bahía Solano (Chocó), se escogieron cinco puntos de interés, de acuerdo con la geomorfología de la costa. La ubicación en puntos coordenados se muestra a continuación (Figura 2 y Tabla 3).



Figura 2. Ubicación geográfica de los puntos de interés sobre Bahía Solano [Mapa Base ESRI].

Tabla 3. Ubicación geográfica de los puntos de interés sobre Bahía Solano.

Identificador	Ubicación	
	Longitud W	Latitud N
1	-77.4242	6.2548
2	-77.4161	6.2399
3	-77.4065	6.2344
4	-77.3984	6.244
5	-77.4038	6.2508

Se realizó un análisis de correlación de *Spearman* (Lehman *et al.*, 2013), teniendo en cuenta que la distribución de las series de marea no es normal. Los coeficientes de *Spearman* (r_s) obtenidos para cada una de las cinco series simuladas se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Coeficientes de correlación de Spearman para cada punto de interés.

Punto de interés	Coef. Correlación respecto a marea observada
1	0.8077
2	0.8063
3	0.8053
4	0.8055
5	0.8068

La tabla muestra que los coeficientes de correlación están por encima del 80 % lo cual indica que la marea simulada guarda una gran similitud respecto a la marea real, a pesar de que ambas series no corresponden a la misma época. La Figura 3 muestra la semejanza entre la marea simulada (azul) y la medida (rojo) en uno de los puntos seleccionados en la zona de interés.

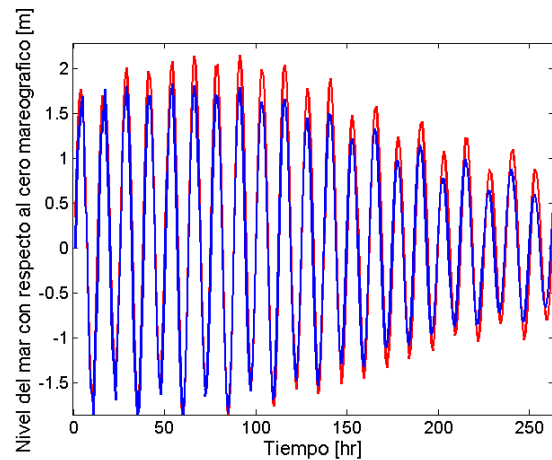
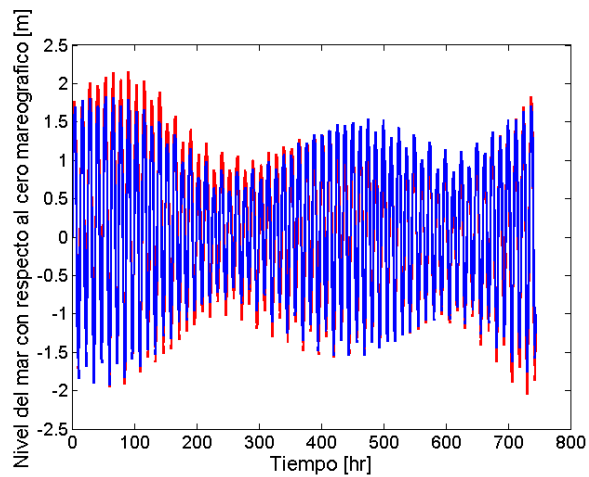


Figura 3. Semejanza entre serie de marea simulada y medida del año de 2014, Ciudad Mutis.

Análisis espectral de la marea en Bahía Solano

Mediante el análisis espectral descrito anteriormente (transformada rápida de Fourier (FFT)), aplicado a las serie de marea registrada por el mareógrafo de la Dimar (desde el 1 de Enero de 2014 hasta el 29 de Abril de 2014), y a las series de marea astronómica reconstruidas, se obtuvieron los principales espectros de frecuencias para cada una de las series (Figura 4), con relación a sus componentes armónicos principales (Godin, 1972; Beer, 1997).

A partir de la Figura 4 se puede observar que tanto para las series simuladas como para la real, las frecuencias dominantes se presentan en $0.042f$, $0.08f$ y $0.083f$ (Tabla 5), teniendo en cuenta que la frecuencia de muestreo de la señal es cada hora, se obtienen periodos de 23.93 h, 12.42 h y 12.04 h, correspondiendo a las componentes diurnas K1 (Declinación Luni-solar), semidiurnas M2 (Lunar principal) y S2 (Solar principal respectivamente).

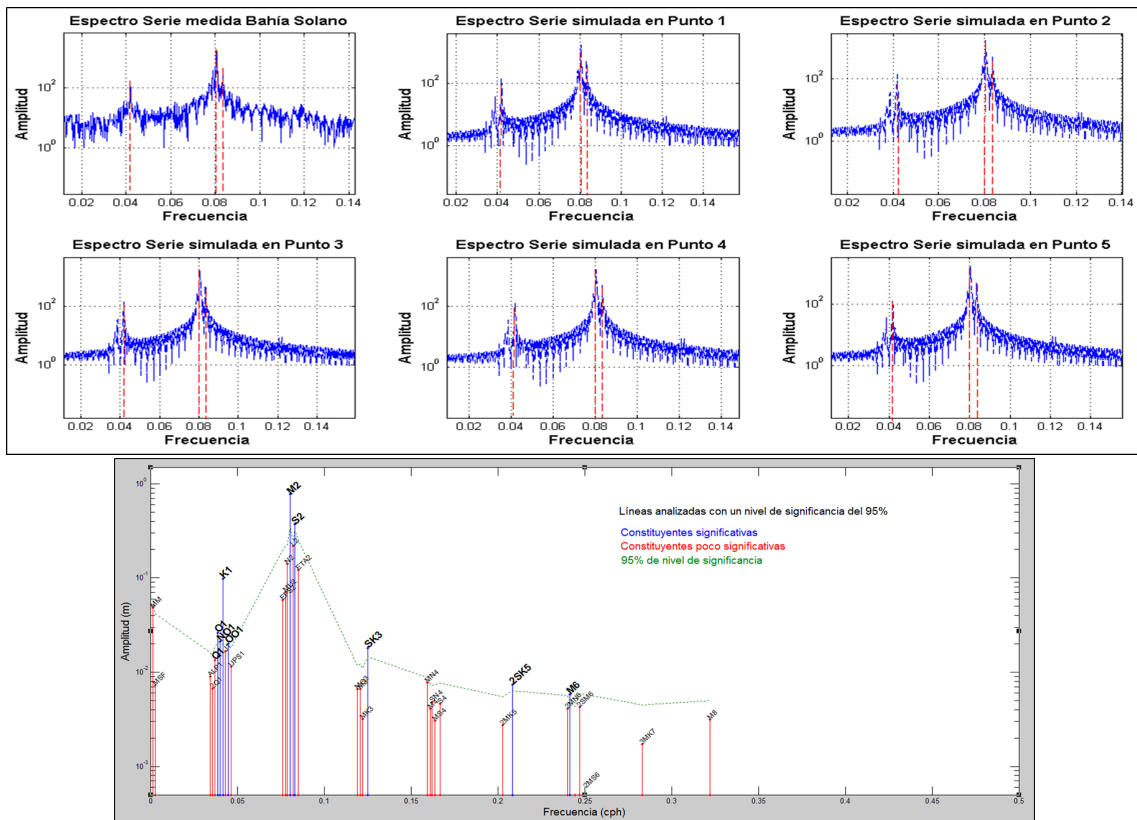


Figura 4. Análisis espectral para las series simuladas y observada en Bahía Solano.

Tabla 5. Principales componentes armónicos de la onda de marea.

Grupos componentes armónicos		
Componentes de largo período	Símbolo	Frecuencia en horas solares
Quincenal lunar	M_f	327.9
Mensual lunar	M_m	661.3
Semianual solar	S_{sa}	4383
Solar anual	S_a	8766
Componentes diurnas	Símbolo	Frecuencia en horas solares
Declinación luni-solar	K_1	23.93
Diurna lunar principal	O_1	25.82
Diurna solar principal	P_1	24.07
Elíptica lunar mayor	Q_1	26.87
Componentes semidiurnas	Símbolo	Frecuencia en horas solares
Lunar principal	M_2	12.42
Solar principal	S_2	12.00
Elíptica lunar mayor	N_2	12.66
Declinación luni-solar	K_2	11.97

Lo anterior corrobora que las series simuladas siguen un comportamiento ajustado al real, sirviendo como insumo en la obtención de las cotas máximas de inundación en lugares donde no se cuenta con registros instrumentales para el área de estudio.

Los principales armónicos obtenidos, a partir del análisis armónico en Bahía Solano se muestran en la Tabla 6:

Tabla 6. Principales componentes armónicas obtenidas en el área de estudio.

Nombre armónico	Frecuencia [cph]	Amplitud [m]	Fase [°]
MM	0.0015122	0.0485	294.48
MSF	0.0028219	0.0073	143.81
ALP₁	0.0343966	0.0090	128.10
2Q₁	0.0357064	0.0067	342.79
Q₁	0.0372185	0.0134	268.06
O₁	0.0387307	0.0262	164.36
NO₁	0.0402686	0.0210	38.30
*K₁	0.0417807	0.0975	61.27
J₁	0.0432929	0.0167	125.27
OO₁	0.0448308	0.0201	90.88
UPS₁	0.0463430	0.0114	332.20
EPS₂	0.0761773	0.0584	154.92
MU₂	0.0776895	0.0709	328.07
N₂	0.0789992	0.1400	293.31
*M₂	0.0805114	0.7700	16.28
L₂	0.0820236	0.2194	99.87
S₂	0.0833333	0.3707	77.25
ETA₂	0.0850736	0.1219	249.92
MO₃	0.1192421	0.0066	200.80
M₃	0.1207671	0.0067	336.37
MK₃	0.1222921	0.0032	25.06

Nombre armónico	Frecuencia [cph]	Amplitud [m]	Fase [°]
SK₃	0.1251141	0.0179	294.33
MN₄	0.1595106	0.0077	175.10
M₄	0.1610228	0.0041	102.90
SN₄	0.1623326	0.0048	142.13
MS₄	0.1638447	0.0031	157.76
S₄	0.1666667	0.0046	198.94
2MK₅	0.2028035	0.0027	167.64
2SK₅	0.2084474	0.0074	129.98
2MN₆	0.2400221	0.0041	224.12
M₆	0.2415342	0.0058	190.84
2MS₆	0.2443561	0.0003	296.65
2SM₆	0.2471781	0.0043	217.03
3MK₇	0.2833149	0.0017	88.55
M₈	0.3220456	0.0031	34.45

* Armónicos representativos de la serie.

Coefficiente de Courtier

A partir de los principales componentes armónicos de la zona evaluada, y aplicando el coeficiente de *Courtier*, se obtuvo un coeficiente de 0.10, evidenciando un régimen mareal semidiurno en la zona de estudio.

$$\frac{K1 (0.0975) + O1 (0.021)}{M2 (0.7700) + S2 (0.3707)} = 0.10 \text{ Semidiurno}$$

Régimen medio y extremal de marea en Bahía Solano

Para el cálculo del régimen medio y extremal, fue necesario reconstruir 500 años de marea astronómica para cada una de las series simuladas a partir de las componentes armónicas obtenidas para cada una.

Asimismo, se simularon 100 series de 500 años de marea meteorológica con base en los parámetros de localización y escala usando el método de Montecarlo. A continuación se muestra el régimen medio y extremal obtenido para los cinco puntos de interés seleccionados (figuras 5-9).

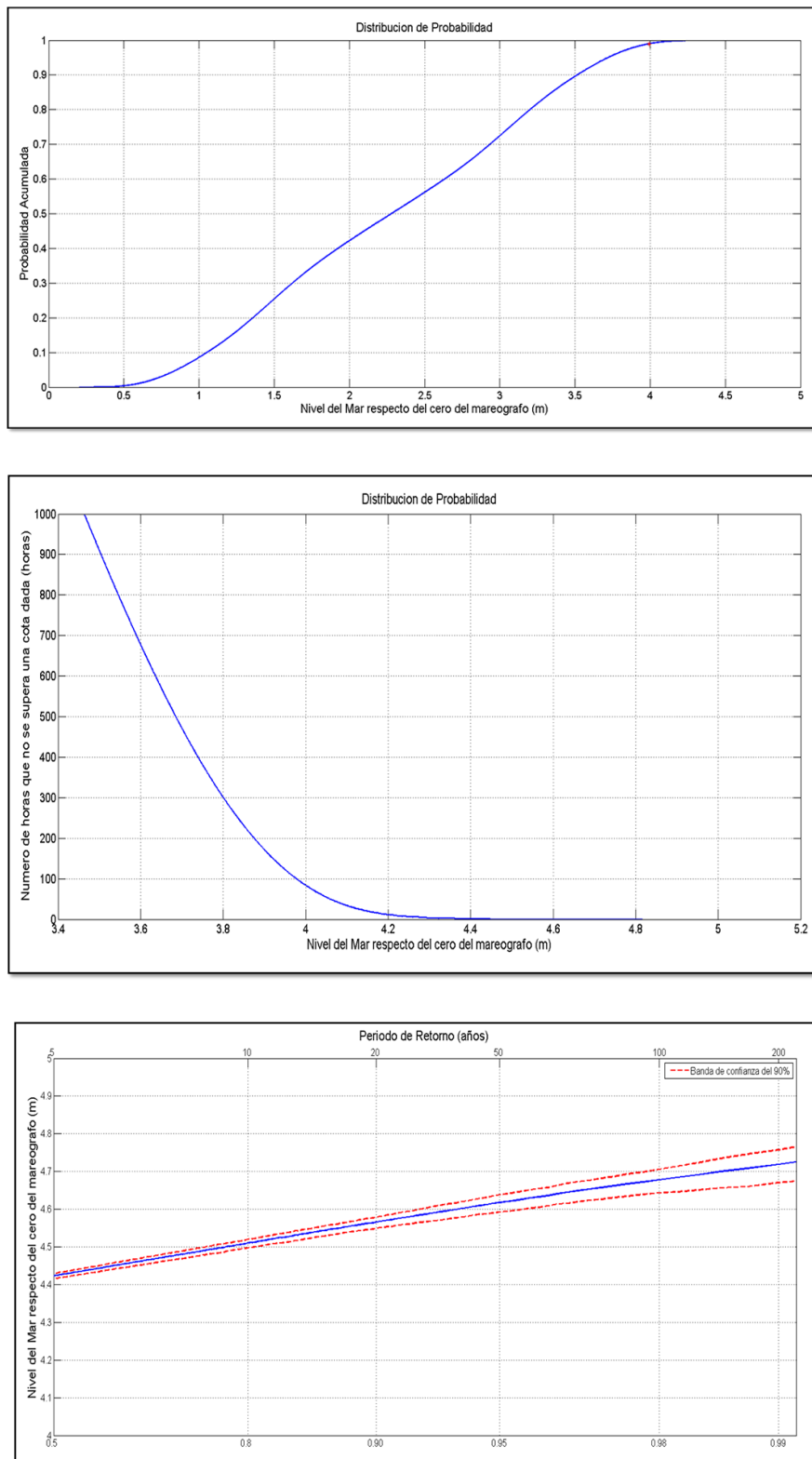


Figura 5. Régimen medio y extremal punto 1.

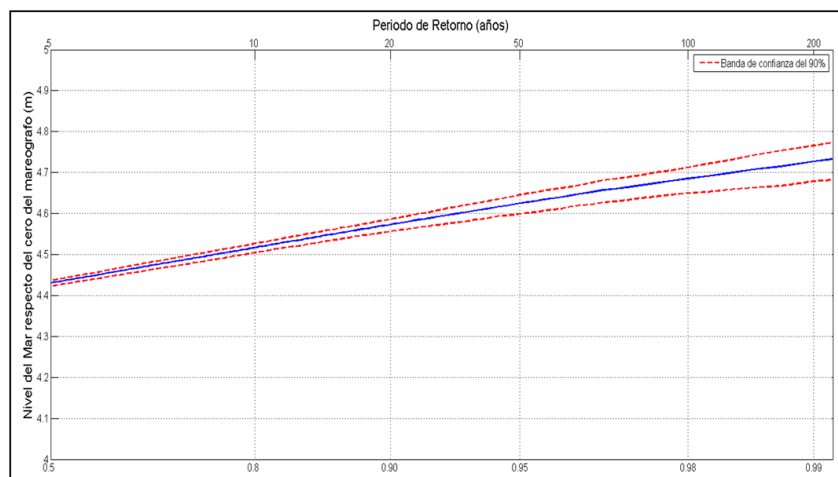
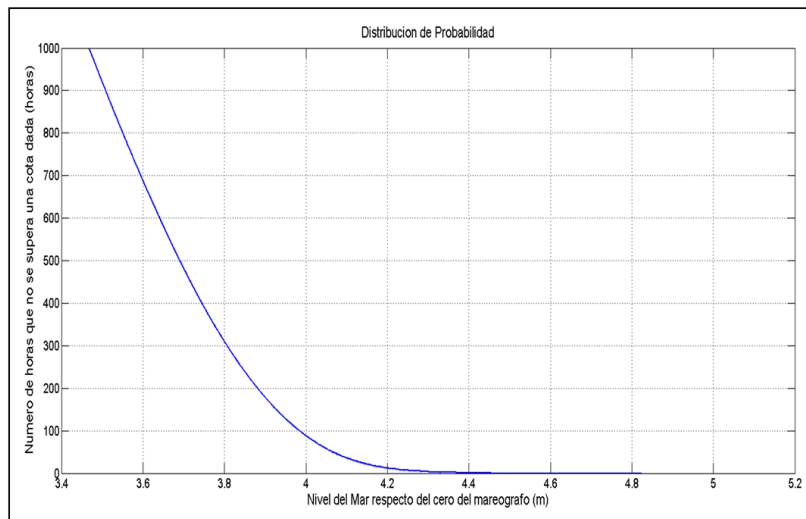
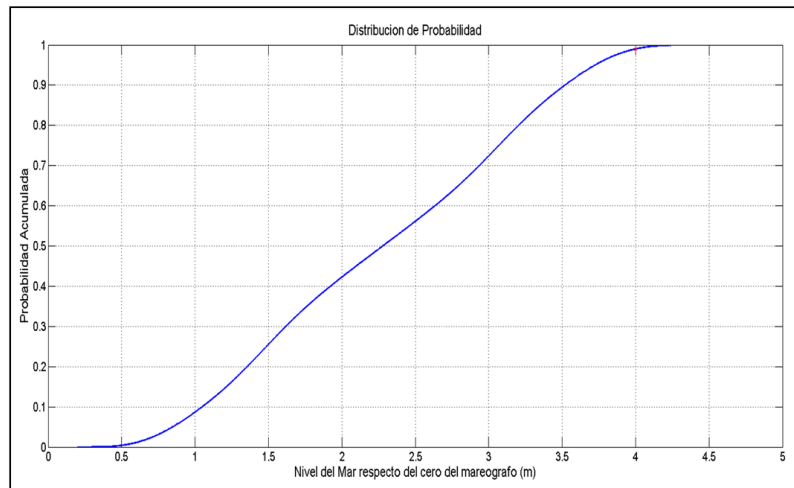


Figura 6. Régimen medio y extremal punto 2.

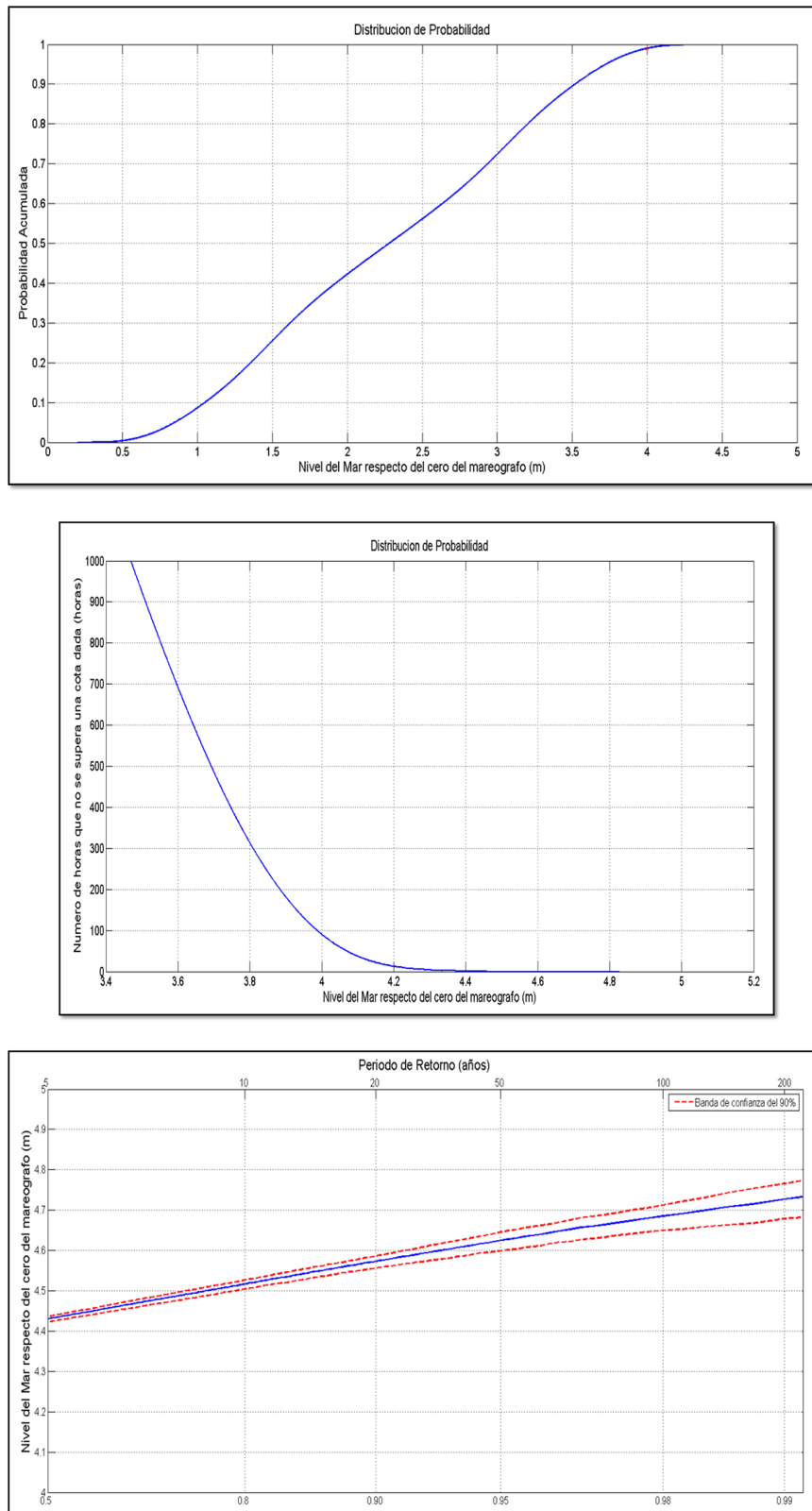


Figura 7. Régimen medio y extremal punto 3.

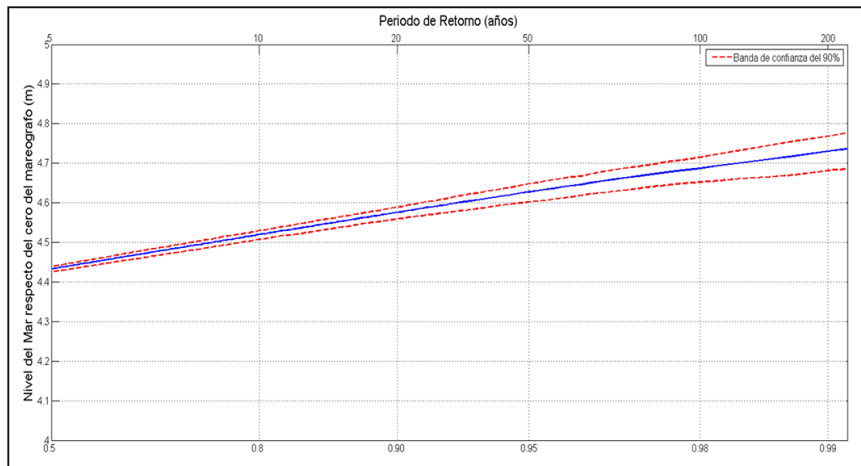
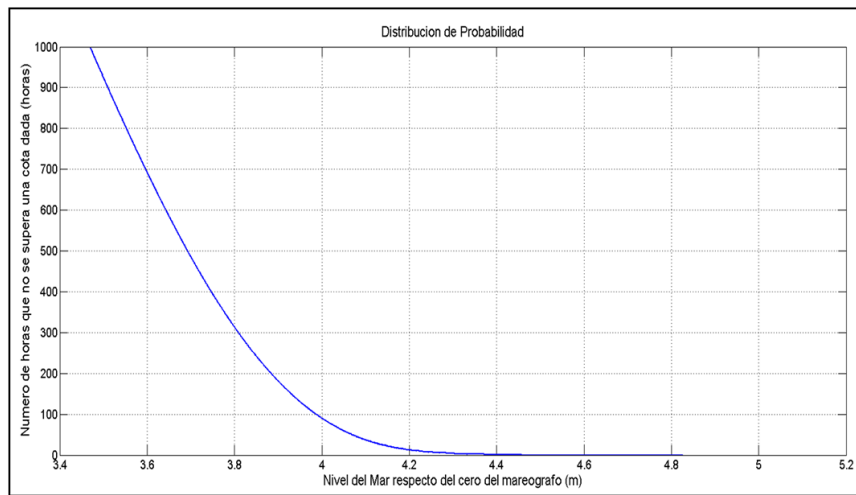
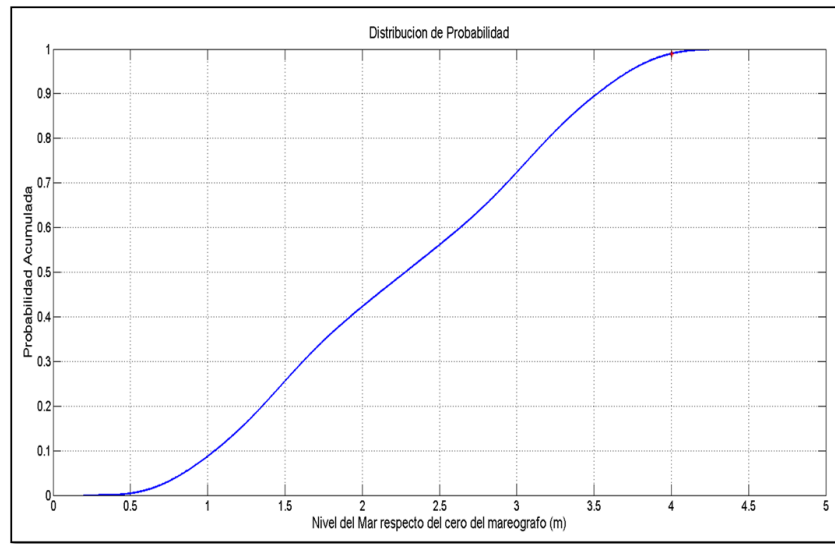


Figura 8. Régimen medio y extremal punto 4.

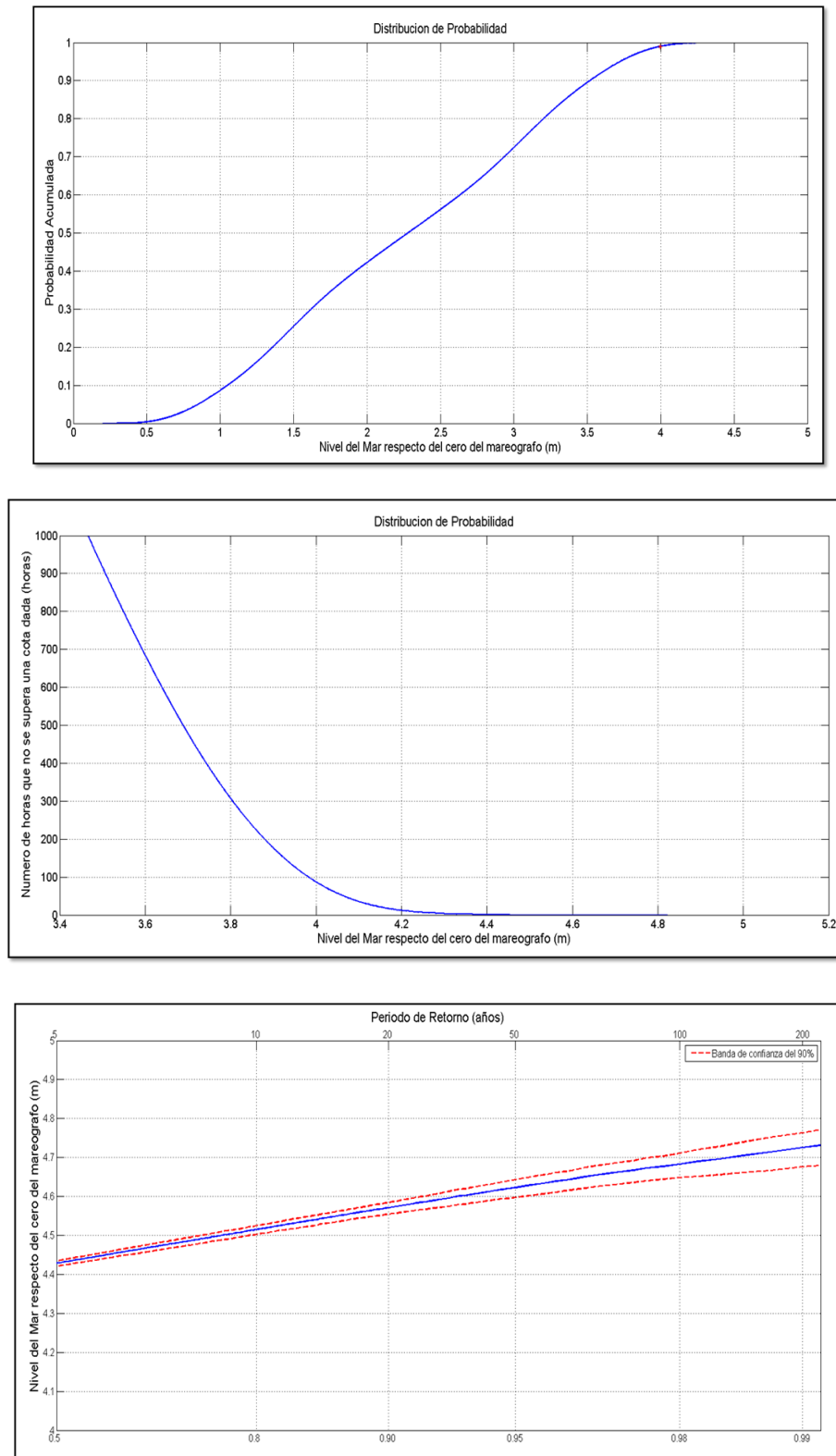


Figura 9. Régimen medio y extremal punto 5.

Con base en lo anterior, se puede inferir que las cotas máximas de inundación en un año medio para la zona bajo estudio son: 3.9937 m, 4.0003 m, 4.0033 m, 4.0028 m y 3.9985 m, respectivamente (Tabla 7), con una probabilidad de no excedencia del 99 %. Es decir, que en esta bahía la altura máxima del nivel del mar es en promedio 3.9997 m con una desviación de 0.0039 m.

Tabla 7. Cotas máximas de inundación y extremales para los puntos de interés.

Punto de interés	Cota máxima de inundación [msnm]	Extremal [msnm]
1	3.9937	4.5660
2	4.0003	4.5730
3	4.0033	4.5760
4	4.0028	4.5760
5	3.9985	4.5710

CONCLUSIONES

- De acuerdo con los espectros obtenidos, se puede evidenciar que las frecuencias dominantes tanto para la serie de marea medida como para las series simuladas son las semidiurnas M_2 , S_2 y diurna K_1 ; con periodos de 12.42 h, 12.04 h y 23.93 h, respectivamente.
- Teniendo en cuenta que el coeficiente de *Courtier* (factor de forma) obtenido en el área de estudio de 0.10, se concluye que Bahía Solano está bajo la influencia de un régimen mareal de tipo semidiurno.
- El índice de correlación de *Spearman* mayor al 80 % obedece a una correlación moderada positiva, lo que indica que tanto las series simuladas como la serie real tienen una buena semejanza, validando el proceso de modelación realizado para generar las series de marea en los puntos de interés seleccionados donde no se contaba con registros instrumentales.
- Las cotas máximas de inundación obtenidas en esta zona de estudio tienen un valor promedio de 3.9997 m con una desviación de 0.0037, y una probabilidad de no excedencia del 99 %; indicando que la variación en la altura máxima del nivel del mar en un año medio, en los puntos de interés seleccionados no presenta un cambio marcado. Con lo que se puede concluir que la dispersión de los datos es mínima, es decir que en esta zona la variación en las cotas máximas de inundación será muy poca.

REFERENCIAS

- Andersen, O., Woodworth, L. y Flather, A. (1995). *Intercomparison of recent global ocean tide models*. Journal of Geophysical Research Oceans, 100 (C12), 25261-25282. Doi: 10.1029/95JC02642.
- Banco de Occidente. (2002). Libros de la Colección Ecológica del Banco de Occidente: Golfos y Bahías de Colombia. Cali, Colombia: Banco de Occidente. Recuperado de <http://www.ime-ditores.com/banocc/golfos/presentacion.htm>
- Beer, T. (1997). Tides. En Beer, T. *Environmental Oceanography*. (2nd Ed.). (pp. 87-115). Bosa Roca, USA: Taylor & Francis Inc.
- Castillo, E. y Pruneda, R. (2001). *Estadística aplicada*. Santander, España: Moralea.
- Fierro, J., Bravo, M. y Castillo, M. (2000). *Caracterización del régimen de mareas y corrientes a lo largo del canal de Moraleda*, Ciencia y Tecnología del Mar, 23. 3-14. Valparaíso, Chile: Comité Oceanográfico Nacional.
- Godin, G. (1972). *The Analysis of Tides*. Pp. 264. Toronto, Canadá: University of Toronto Press.
- Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales. (2012-2013). *Ingeniería Marítima, oscilaciones de largo periodo: Marea Astronómica*. Granada, España: Universidad de Granada.
- _____. (2012-2013). *Ingeniería Marítima, oscilaciones de largo periodo: Marea Meteorológica*. Granada, España: Universidad de Granada.

- Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas (GIOC). (2001). *Aqualab, Manual de referencia*. Santander, España: Universidad de Cantabria.
- _____. (2002). *Atlas de inundación del litoral peninsular español*. Documento temático. Santander, España: Ministerio de Medio Ambiente y Universidad de Cantabria.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2014). *Pronóstico de Pleamares y Bajamares Costa Pacífica Colombiana*. Bogotá, Colombia.
- Kang, W., Park, S., Moon, S. y Lee, K. (2009). Analyzing sea level rise and tide characteristics change driven by coastal construction at Mokpo Coastal Zone in Korea, *Ocean Engineering*. 36(6) 415-425. Doi: 10.1016/j.oceaneng.2008.12.009. Estados Unidos: Elsevier.
- Kjerfve, B. (1981). Tides of the Caribbean Sea, *Journal of Geophysical Research*. 86(C5), 4243-4247. Estados Unidos.
- Kurmyshev E. (2003). *Fundamentos de métodos matemáticos para física e ingeniería*. México: Editorial Limusa S.A.
- Leffler, K y Jay, D. (2009). Enhancing tidal harmonic analysis: Robust (hybrid L1=L2) solutions, *Continental Shelf Research*, 29(1), 78-88. Doi: 10.1016/j.csr.2008.04.011. Estados Unidos: Elsevier.
- Lehman A., O'Rourke N., Hatcher L. y Stepanki E. (2013). *JMP for Basic Univariate and Multivariate Statistics: A Step-by-step Guide* (pp.146-147). Carolina del Norte, USA: SAS Institute.
- Manzano F., Corchete V. y Lastra X. (2007). Análisis espectral del registro de marea en la estación de Ceuta. España.
- Otero, L. (2004). Determinación del nivel medio y extremal del nivel del mar para la bahía de Buenaventura. *Boletín Científico: Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico* No. 11, 30-41. Tumaco, Colombia.
- _____. (2005). Metodología para establecer la línea de más alta marea en aguas abrigadas (bahías, estuarios, etc.) cuando no se tienen registros instrumentales. (Informe técnico). Tumaco, Colombia: Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico.
- Pardo, E. y Rodríguez, F. (2013). Análisis espectral de series temporales de variables geológicas con muestreo irregular. *Boletín Geológico y Minero*, 124(2) 323-327. Doi: 10.21701/bol-geomin. Granada, España.
- Pawlowicz, R., Beardsley, B. y Lentz, S. (2002). Classical tidal harmonic analysis with errors in matlab using t-tide, *Computers & Geosciences*, 28(8), 929-937. Doi: 10.1016/S0098-3004(02)00013-4. Estados Unidos: Elsevier.
- Pugh, D. (2004). *Changing sea level, Weather and Climate*. Pp.256. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, SHOA. (1992). *Glosario de Marea y Corrientes*. 2da Ed. Valparaíso, Chile: SHOA.