

## Determinación de la cota máxima de inundación en la frontera colombo-ecuatoriana aplicando modelación numérica

### *Determination of the maximum flood level in the colombo-ecuadorian border by applying numerical modeling*

DOI: 10.26640/22159045.446

Fecha de recepción: 2018-05-31 / Fecha de aceptación: 2018-07-12

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

Vásquez, L., Iriarte, J. y Sánchez, R. (2018). *Determinación de la cota máxima de inundación en la frontera colombo-ecuatoriana aplicando modelación numérica*. Bol. Cient.CIOH (37):3-16. ISSN 0120-0542 e ISSN en línea 2215-9045. DOI: 10.26640/22159045.446

## RESUMEN

En el presente estudio, se determinó la Línea de Más Alta Marea para el área comprendida entre las poblaciones de Candelillas de la Mar y Salahondita, ubicada sobre el Litoral Pacífico Colombiano (LPC), Pacífico Sudeste. Se efectuó un análisis armónico a las series de tiempo de nivel del mar medidas in situ, y a las que se generaron a partir de modelamiento numérico (considerando la escasa información disponible del nivel de mar en esta área). La marea meteorológica fue simulada empleando técnicas estadísticas de Montecarlo; considerando la naturaleza estocástica de esta variable. El comportamiento descrito por las series medidas in situ y modeladas, se analizó a partir del Test de normalidad (test de Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk). Posteriormente, estas fueron correlacionadas por medio del método de correlación de Spearman, donde los cambios en la morfología de la costa y la ausencia de información batimétrica de algunas áreas, condicionó el comportamiento de los coeficientes obtenidos. Para el cálculo de los regímenes medio y extremal, se aplicaron las metodologías establecidas, tomando como base los coeficientes obtenidos en estudios anteriores (Otero, 2005). A partir de los resultados obtenidos, se determinaron las cotas máximas de inundación para cada uno de los puntos de estudio, que sirvieron como base para el trazado de la Línea de Más Alta Marea en el área de estudio.

**PALABRAS CLAVES:** marea astronómica, marea meteorológica, análisis armónico, modelación numérica, nivel del mar, frontera colombo-ecuatoriana.

## ABSTRACT

*The highest tide line was determined for the area between Candelillas de la Mar and Salahondita, located on the southern Colombian Pacific littoral (CPL). The study was made by means of a harmonic analysis, time series of sea level measured in-situ, and the series that were generated from numerical modeling (considering the limited information available of sea level in this area). The meteorological tide was simulated using statistical Montecarlo techniques; considering the stochastic character of this variable. The behavior described for the series measured in-situ and modeled. It was analyzed with a normality test (Kolmogorov-Smirnov and Shapiro-Wilk test), these were subsequently correlated through the Spearman Correlation Method, where the geomorphological changes in the coast and the limited bathymetric information in some areas, conditioned the behavior of the coefficients obtained. For the calculation of the average and extreme regimes, standard methodologies were applied, based on the coefficients obtained by Otero (2005). From this results, the highest flood levels for each study points were determined, which served to draw the highest tide line in this zone.*

**KEYWORDS:** Astronomical tide, meteorological tide, harmonic analysis, numerical modeling, sea level, colombian-ecuadorian border

\* 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

Los efectos del calentamiento global ocasionado principalmente por las actividades humanas, es uno de los problemas que aquejan al mundo entero hoy en día. El aumento en el nivel medio del mar (durante los últimos 100 años, se ha incrementado entre 10 y 25 cm del promedio global), es quizás una de las consecuencias más evidentes de este proceso, la cual tiene altas repercusiones principalmente en las zonas aledañas a la costa (Cardona, Fernández, Botero y Gómez, 2003).

La determinación periódica del nivel del mar permite dimensionar los impactos socioeconómicos y ambientales que se puedan presentar en ecosistemas y sistemas productivos ubicados en las zonas costeras, y con ello generar procedimientos que permitan mitigar la vulnerabilidad ante estos cambios. Asimismo, permite delimitar el territorio de uso público, sirviendo como herramienta a entidades como la Dirección General Marítima (Dimar) para establecer su jurisdicción en las costas Colombianas. Según lo estipulado en el *decreto ley 2324 del 18 de Septiembre de 1984 (Ley N° 2324, 1984)*.

La comprensión de los procesos oceánicos y costeros, se constituyen en la principal necesidad de las naciones costeras de todo el mundo. El mejoramiento continuo del conocimiento científico en este ámbito permite a estos países elaborar y aplicar políticas de ordenamiento territorial más apropiadas a las necesidades reales de la población civil que habita sobre estas áreas altamente sensibles. A través de estas herramientas los Estados ribereños garantizan un mejor aprovechamiento de los recursos disponibles, proyectando un desarrollo sustentable más apropiado de los océanos y zonas costeras bajo su jurisdicción.

El nivel del mar en cualquier instante se ve afectado principalmente por dos procesos naturales: la marea astronómica, generada por la fuerza de atracción gravitacional que ejerce la luna y el sol sobre la masa de agua terrestre; y la marea meteorológica, la cual responde principalmente a las variaciones del nivel del mar ocasionadas por los cambios

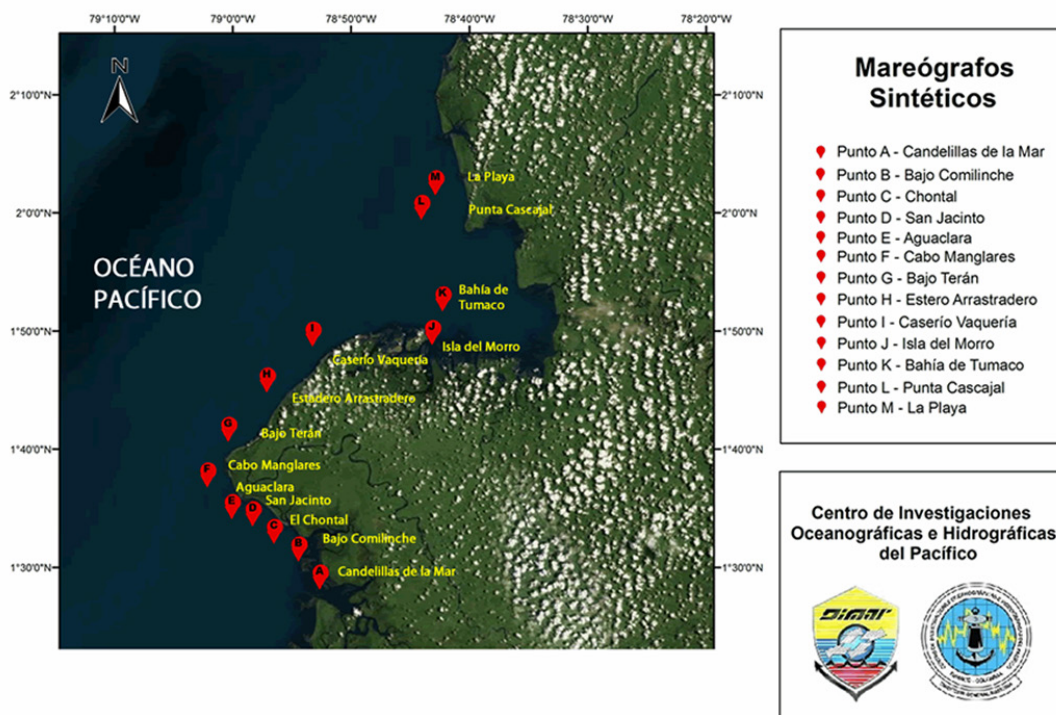
barométricos, por la interacción del viento sobre la superficie del agua, por factores relacionados con la configuración de la costa y la batimetría de la zona por donde se propaga la onda de marea (Valls y Maria, s.f.). Otros fenómenos de menor frecuencia, de diferente escala temporal y de poco efecto local, igualmente pueden generar cambios en el nivel del mar; como: tsunamis, fenómeno de El Niño o descargas fluviales de grandes ríos. Por tanto, en una determinada zona el nivel del mar es un proceso que involucra tanto variables deterministas (marea astronómica), como variables estocásticas (marea meteorológica) (Otero, 2005).

En el presente trabajo se realizó un análisis por separado de estas variables, y siguiendo metodologías establecidas para tal fin, 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). Así mismo, se realizó un análisis de correlación de las series simuladas con las series medidas in-situ, para validar la información simulada, y así obtener las cotas máximas inundación, las cuales hacen parte del procedimiento para la determinación de la línea de más alta marea en zonas costeras.

## ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se ubica al suroeste de Colombia, abarcando parte del litoral y la plataforma continental del departamento de Nariño, desde el corregimiento de Candelillas de la Mar hasta el corregimiento de Salahondita, con una longitud en línea recta sobre la costa de aproximadamente 160 km y profundidades que varían entre 2 y 2200 m.

A lo largo de la zona costera en estudio, se encuentran los municipios de Francisco Pizarro y Tumaco, que presentan una dinámica mareal muy variada, dependiendo de la configuración costera y la batimetría del sitio, por lo tanto se establecieron 13 puntos de monitoreo en el presente estudio, como se muestra en la Figura 1 y sus respectiva ubicación geográfica (Tabla 1).



**Figura 1.** Puntos de monitoreo sobre el área de estudio [Fuente: Mapa base ESRI].

**Tabla 1.** Puntos de interés seleccionado en el área comprendida entre Candelillas de la Mar y Salahondita, Nariño.

| Puntos de Interés     | Ubicación  |           |
|-----------------------|------------|-----------|
|                       | Longitud W | Latitud N |
| Candelillas de la Mar | -78.8778   | 1.4735    |
| Bajo Comilínche       | -78.9075   | 1.5132    |
| Chontal               | -78.9421   | 1.5381    |
| San Jacinto           | -78.9718   | 1.5629    |
| Aguaclara             | -79.0014   | 1.5728    |
| Cabo Manglares        | -79.0360   | 1.6175    |
| Bajo Terán            | -79.0064   | 1.6821    |
| Estero Arrastradero   | -78.9520   | 1.7516    |
| Caserío Vaquería      | -78.8877   | 1.8162    |
| Isla del Morro        | -78.7047   | 1.8112    |
| Bahía de Tumaco       | -78.7047   | 1.8659    |
| Punta Cascajal        | -78.7344   | 1.9950    |
| La Playa              | -78.7146   | 2.0298    |

## METODOLOGÍA

La determinación de la Línea de Más Alta Marea (LMAM), requirió realizar un análisis por separado de las variables determinísticas (marea astronómica), y estocásticas (marea meteorológica) que influyen directamente el comportamiento del nivel del mar (Otero, 2005). A continuación, se presenta la metodología empleada para la obtención de estas variables, así como el cálculo de los regímenes medio y extremal del nivel del mar.

Debido a la limitación existente en el área de estudio, a excepción del municipio de Tumaco, en cuanto a registros instrumentales de nivel del mar, se empleó el modelo hidrodinámico H2D, para generar las series de marea sobre los lugares en donde no se contó con información de nivel del mar.

### Cálculo de la marea astronómica

A partir del despliegue del satélite TOPEX / Poseidón, extensas bases de datos con información altimétrica del nivel del mar han sido creadas. Estas bases de datos han sido empleadas en los últimos años y han servido como soporte principal para el desarrollado de numerosos modelos, cuya finalidad es caracterizar la onda de marea a nivel global (Fu y Cazenave, 2001).

La marea astronómica obtenida para el área de estudio, se generó empleando el modelo hidrodinámico H2D, desarrollado por el GIOC (Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas de la Universidad de Cantabria), este modelo utiliza el método de interpolación global de contornos del modelo AG95.1 desarrollado por Andersen, Woodworth y Flather (1995), que utiliza la base de datos "Grenoble". Esta base de datos funciona empleando 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. La información proporcionada por la base Grenoble fue aplicada a la zona de estudio, a partir de un algoritmo de interpolación en cada uno de los puntos de monitoreo escogidos.

Cabe resaltar que algunas de las batimetrías empleadas en el presente estudio fueron cedidas

por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCCP), bajo los protocolos de confidencialidad estipulados por la Dimar. Asimismo, para las áreas donde no se contaba con información batimétrica propia, se empleó la información batimétrica disponible por GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans, 2013).

A partir de la información base (batimetría y línea de costa), se configuró una malla de cálculo, para la cual se generaron contornos de 6 años de nivel del mar (1985-1990). El modelo se ejecutó durante un tiempo total de 3130 horas, estableciendo un incremento de tiempo (Condición de Courant) adecuado para garantizar la estabilidad numérica del modelo. Este cálculo fue efectuado mediante la expresión (1):

$$\Delta t \leq \frac{c_r \Delta x}{\sqrt{g D_{max}}} \quad (1)$$

Donde

$c_r = 1$ , valor para tener en cuenta los términos no lineales en la transformación de la onda de marea en aguas someras.

$D_x$  es el espaciamiento entre celda y celda.

$g$  la aceleración de la gravedad.

$D_{max}$  es la profundidad máxima en la malla de estudio.

Los parámetros físicos determinados fueron los coeficientes de Chezy y de viscosidad de remolino 0.01 m y 55 m<sup>2</sup>/s, respectivamente.

La Tabla 2 muestra un resumen de la configuración empleada en la generación de marea astronómica para la zona comprendida entre Candelillas de la Mar y Salahondita.

### Análisis de armónicos

A cada serie simulada de datos horarios de marea astronómica se le efectuó el análisis armónico, utilizando la herramienta computacional T\_Tide, este paquete se incorpora a las herramientas de análisis computacional de Matlab, como está escrito en Fortran (Foreman, 1977), ajustando los

componentes de marea por el método de mínimos cuadrados teniendo en cuenta las frecuencias preestablecidas del mismo. La forma como el T\_TIDE resuelve este problema y en general los

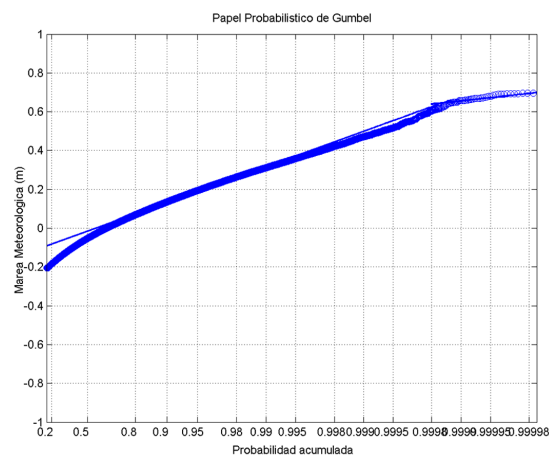
aspectos de la determinación de parámetros de mareas son discutidos por Rosenfeld, Shulman, Cook, Paduan y Shulman (2009).

**Tabla 2.** Parámetros de configuración de modelo H2D para generación de marea astronómica en área comprendida entre Candelillas de la Mar y Salahondita.

| Variable                                      | Candelillas de La Mar, Salahondita |
|---|------------------------------------|
| <b>Parámetros de la malla</b>                 |                                    |
| Límite superior izquierdo                     | -79.4960 ; 2.2235                  |
| Límite superior derecho                       | -78.5218 ; 2.2235                  |
| Límite inferior izquierdo                     | -79.4960 ; 1.4090                  |
| Límite inferior derecho                       | -78.5218 ; 1.4090                  |
| $\Delta X$ (metros)                           | 550                                |
| $\Delta Y$ (metros)                           | 550                                |
| No. Nodos X                                   | 198                                |
| No. Nodos Y                                   | 165                                |
| <b>Parámetros físicos</b>                     |                                    |
| Coficiente de Chezy $K_s$ (m)                 | 0.01                               |
| Viscosidad de remolino $\epsilon$ ( $m^2/s$ ) | 55                                 |
| <b>Parámetros de ejecución</b>                |                                    |
| Tiempo total de ejecución (s)                 | 3600                               |
| Incremento del tiempo $\Delta t$ (s)          | 3                                  |

### Cálculo de la marea meteorológica

Para este caso se adoptaron los parámetros obtenidos por Otero (2005) en el análisis hecho a las series históricas de nivel del mar de las estaciones de monitoreo de Tumaco, Buenaventura y Panamá. En este análisis se determinaron los regímenes de sobreelevación para la marea meteorológica de Tumaco, Buenaventura y Naos (Panamá), con base en el residuo meteorológico obtenido a partir de series históricas de marea continua, disponible en los litorales de Colombia y Panamá. A partir de los cuales se calculó el residuo meteorológico y las curvas de regímenes medio y extremal de sobreelevación por marea meteorológica en Buenaventura, con el fin de determinar los parámetros de localización y escala (Otero, 2005). En la Figura 2 y la Tabla 3 se presentan los resultados obtenidos.



**Figura 2.** Régimen de sobreelevación por marea meteorológica en Buenaventura (Otero, 2005).

**Tabla 3.** Parámetros de localización y escala de los regímenes extremal y medio.

| Régimen                      | Parámetro                | Valor       |
|------------------------------|--------------------------|-------------|
| Medio                        | Localización $\lambda_m$ | -045256623  |
|                              | Escala $\delta_m$        | -0.07870149 |
| Extremal                     | Localización $\lambda_e$ | 0.43567796  |
|                              | Escala $\delta_e$        | -0.02389298 |
| Probabilidad                 | $F_p$                    | 0.99984541  |
| Nivel de marea meteorológica | $S_{mm}$                 | 0.645       |

**Régimen medio de nivel del mar**

El régimen medio del nivel del mar, representa el comportamiento que tiene el mismo en un año medio. Para poder construirlo fue necesario generar 100 series de 500 años de marea meteorológica utilizando técnicas estadísticas de Montecarlo y reconstruir una serie de 500 años de marea astronómica con base a las constantes armónicas calculadas. La suma de estas series da como resultado 100 series de nivel del mar, que al ser promediadas y organizadas en forma ascendente determinan la curva de distribución del régimen medio (Otero, 2005). Los resultados obtenidos se presentan 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:

$$N = 8760(1 - F) \tag{2}$$

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

**Régimen extremal del nivel del mar**

El régimen extremo del nivel del mar, tiene gran aplicación en construcción de infraestructuras costeras. Su forma de cálculo, es muy similar a la del régimen medio, la diferencia es que en este caso la función de distribución del régimen extremal se obtiene a partir de los máximos anuales de cada una de las 100.

Asimismo, se calculó la desviación estándar y la media para cada valor de probabilidad, para estimar las bandas de confianza del 90 %, así:

$$\left( \bar{x} - 1.645\hat{s}\sqrt{\frac{n}{a}}, \bar{x} + 1.645\hat{s}\sqrt{\frac{n}{b}} \right) \tag{3}$$

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). Los valores de  $a$  y  $b$  se presentan en la Tabla 4.

**Tabla 4.** 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 |



Los resultados del régimen extremal son presentados en doble escala: probabilidad acumulada y periodo de retorno. La relación entre ambas escalas es:

$$R = \frac{1}{1-F} \quad (4)$$

Donde  $R$  es el periodo de retorno (años) y  $F$  es la probabilidad acumulada. El periodo de retorno no es más que el tiempo medio que tarda en retornar un suceso.

### Test de normalidad

Con el fin de conocer la distribución de los datos obtenidos para determinar el tratamiento que se le debe aplicar a esta información, se aplicó el test de normalidad, Kolmogorov-Smirnov, el cual detecta las diferencias en la localización y forma de la distribución. El valor de  $Z$  está basado en la diferencia absoluta máxima entre la distribución acumulativa observada a la distribución normal (teórica), así:

$$Z = \sup_{x \in R} \left| \hat{F}(x) - F_o(x) \right| \quad (5)$$

Donde:  $\hat{F}(x)$  es la frecuencia acumulada observada,  $F_o(x)$  es frecuencia acumulada teórica.

Una forma alternativa de realizar la prueba de Kolmogorov-Smirnov, puede llevarse a cabo mediante el empleo del  $p$ -valor asociado al estadístico  $Z$  observado. Se define como:

$$p\text{-valor} = P(Z > Z_{obs} / H_o \text{escierta}) \quad (6)$$

Si el  $p$ -valor es grande significa que, siendo cierta la hipótesis nula  $H_0$  (distribución normal de los datos), el valor observado del estadístico  $Z$  era esperable. Por tanto no hay razón para rechazar dicha hipótesis. Por el contrario, si el  $p$ -valor es pequeño, indica que, siendo cierta la hipótesis nula, es difícil que se produzca el valor de  $Z$  observado, lo cual pone en duda y rechaza la hipótesis nula. De esta forma, para un nivel de significación  $\alpha$ , la regla de decisión para este contraste:

$$\begin{aligned} Si \text{ } p\text{-valor} \geq \alpha &\Rightarrow \text{Aceptar } H_0 \\ Si \text{ } p\text{-valor} < \alpha &\Rightarrow \text{Rechazar } H_0 \end{aligned} \quad (7)$$

Para este caso, eligiendo un nivel de significancia del 5 %, si  $p\text{-valor} < 0.05$ , la curva de distribución difiere de la normal, y si por el contrario,  $p > 0.05$  muestra que los datos se ajustan a una curva gaussiana (normal) (Marques, 2001).

### Correlación de Spearman

La intensidad de la relación lineal que existe entre dos variables cuantitativas medidas, cuando estas no tienen una distribución normal, puede ser evaluada mediante el coeficiente de correlación de Spearman ( $r_s$ ), el cual se define mediante la siguiente expresión:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (8)$$

Donde  $n$  es el número de parejas de datos y  $di$  es la diferencia de los rangos  $X_i$  y  $Y_i$ , la cual se obtiene sustituyendo en la fórmula de correlación de Pearson (Marques, 2001). Este coeficiente puede obtener valores entre 1 y -1, pasando por cero 0, como se muestra en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Coeficiente de correlación de Spearman.

| Coeficiente       | 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   |

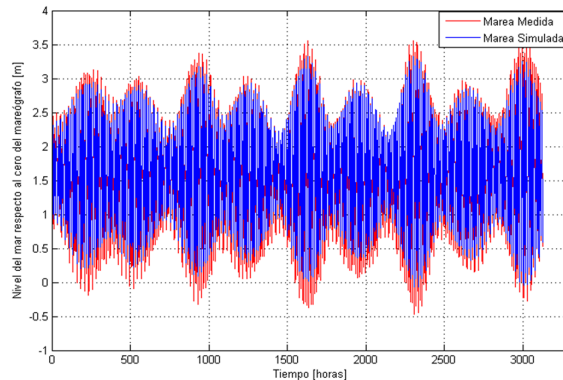
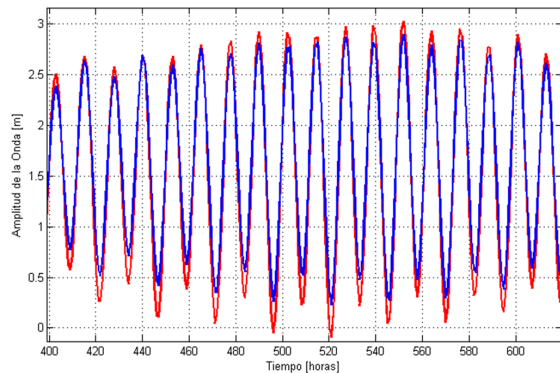
Donde valores próximos a 1 indican una correlación positiva fuerte, valores próximos a -1 indican una correlación negativa fuerte y valores próximos a 0 indican asociación no lineal (Lehman, O'Rourke, Hatcher y Stepanski, 2013).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con base en los resultados obtenidos de las simulaciones de marea astronómica y meteorológica en los puntos anteriormente mencionados (Tabla 1), se calcularon los regímenes extremal y medio.

Con el fin de evaluar la correlación existente entre la marea astronómica obtenida por simulación y la marea obtenida por mediciones in-situ, se identificó la estación mareográfica más cercana a la zona de estudio, eligiendo el mareógrafo del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (Ideam), ubicado en la sociedad portuaria en

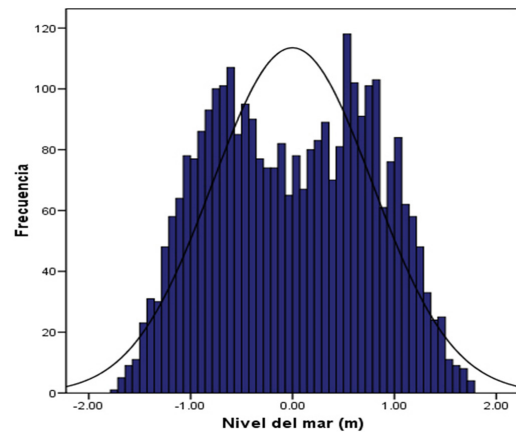
la Isla del Morro, en el municipio de Tumaco (1°49' 0.9"N - 78° 43'49"), la cual posee largos periodos de monitoreo del nivel del mar en esta área (1952-2013). Para la correlación se eligió la serie del año 1985, teniendo en cuenta que es una de las series más completa según la base de datos de la University Hawaii Sea Level Center (UHSLC), la cual aplica políticas de aseguramiento y calidad de la información suministrada. En la Figura 3 se muestra en azul la serie de tiempo medida y en rojo la serie de tiempo simulada del punto identificado como bahía de Tumaco, durante un periodo de 3130 horas; evidenciado un comportamiento similar entre las dos series.



**Figura 3.** Serie de marea medida y simulada del año de 1985, Tumaco-Nariño.

Para determinar la relación existente entre la serie medida y las series obtenidas por simulación, se realizó un test de normalización (Kolmogorov-Smirnov), evidenciando un comportamiento diferente a la distribución normal (Figura 4), por lo que se aplicó la correlación de Spearman.

Los análisis estadísticos realizados a los datos de las series simuladas, mostraron una correlación débil, moderada positiva y fuerte positiva, con respecto a la serie observada, como se relaciona a continuación (Tabla 6). La variación en la correlación se presenta en zonas donde hay cambios en la morfología de la costa o donde no se contó con suficiente información batimétrica.



**Figura 4.** Distribución de los datos obtenidos de la serie simulada en Candelillas de la Mar.



**Tabla 6.** Correlación de spearman asociada a las series de marea simuladas con respecto a la marea observada.

| Punto de interés      | $r_s$   |
|-----------------------|---------|
| Candelillas de la Mar | 0.99598 |
| Bajo Comilínche       | 0.97700 |
| Chontal               | 0.89807 |
| San Jacinto           | 0.81597 |
| Aguaclara             | 0.70871 |
| Cabo Manglares        | 0.50641 |
| Bajo Terán            | 0.20916 |
| Estero Arrastradero   | 0.02730 |
| Caserío Vaquería      | 0.08119 |
| Isla del Morro        | 0.99665 |
| Bahía de Tumaco       | 0.99602 |
| Punta Cascajal        | 0.97197 |
| La Playa              | 0.98644 |

Se generaron 100 series de tiempo de 500 años de nivel del mar, como se mencionó anteriormente, tomando como nivel medio de referencia, el determinado para el puerto de Tumaco de 1.61m (Ideam, 2013). Las figuras 5, 6 y 7 muestran los resultados obtenidos para tres puntos seleccionados dentro del área de estudio, logrando mostrar el comportamiento del nivel del mar en el norte, centro y sur de la zona de interés.

De los análisis realizados, se puede inferir que la altura máxima del nivel del mar en un año medio es de 3.0790, 2.2995 y 3.0484 metros para Candelillas de la Mar, Cabo Manglares y la Isla del Morro, respectivamente, con una probabilidad de no excedencia del 99 %. Asimismo, se puede observar de la curva del régimen extremal para los mismos puntos, que en un periodo de retorno de 20 años existe una probabilidad del 90 % que el nivel del mar sobrepase los 3.6350, 2.8080, 3.6070 metros, respectivamente. En la Tabla 7 se muestra las cotas máximas de inundación para todos los puntos en estudio.

**Tabla 7.** Cota máxima de inundación para los puntos en estudios.

| Punto de interés      | Nivel del mar (m) |
|-----------------------|-------------------|
| Candelillas de la Mar | 3.0790            |
| Bajo Comilínche       | 2.7990            |
| Chontal               | 2.6627            |
| San Jacinto           | 2.4971            |
| Aguaclara             | 2.4058            |
| Cabo Manglares        | 2.2995            |
| Bajo Terán            | 2.1807            |
| Estero Arrastradero   | 2.1498            |
| Caserío Vaquería      | 2.1380            |
| Isla del Morro        | 3.0484            |
| Bahía de Tumaco       | 2.9307            |
| Punta Cascajal        | 2.5915            |
| La Playa              | 2.7191            |

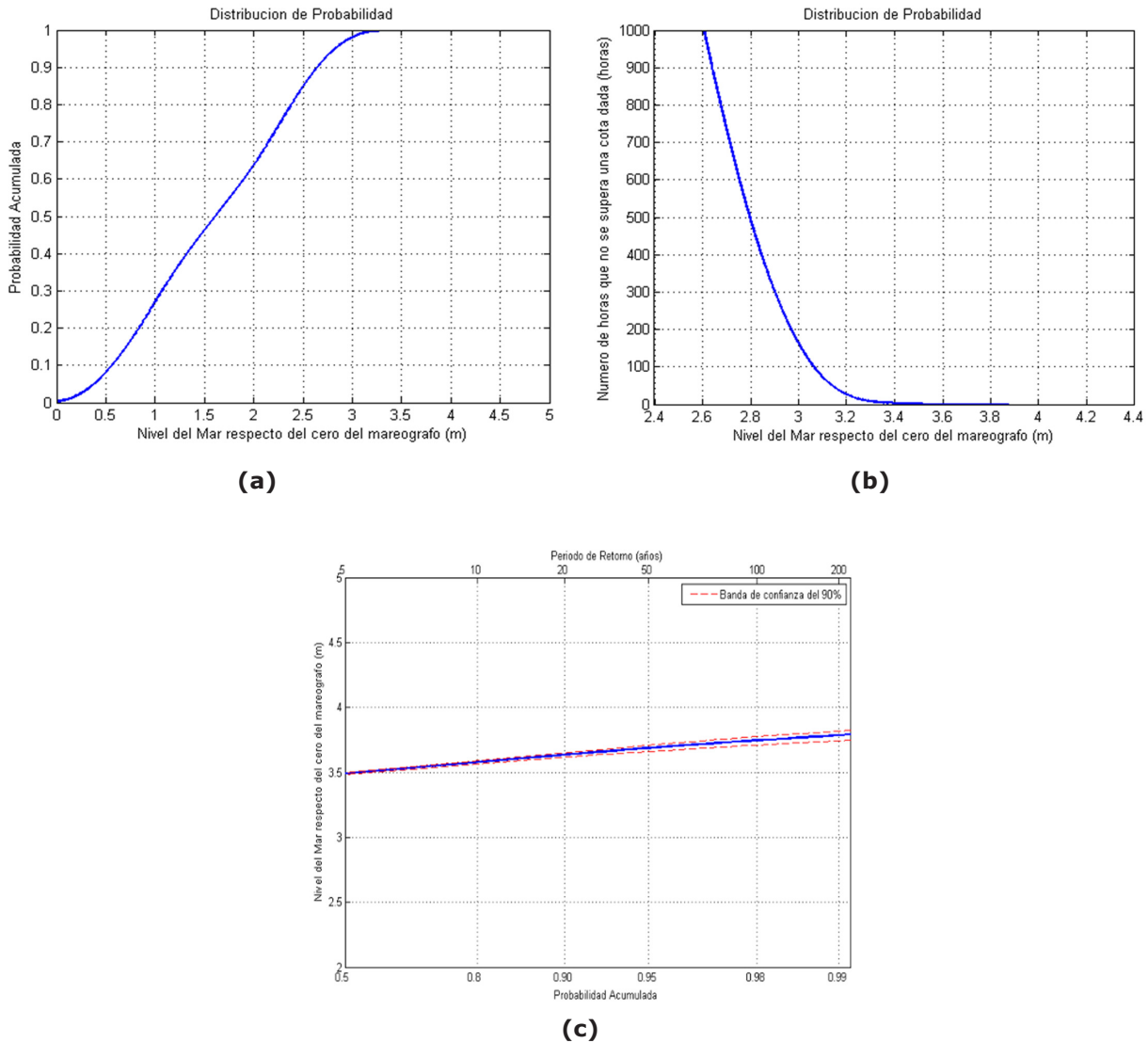
Según las cotas máximas obtenidas con base en la simulación se puede determinar que siempre y cuando la configuración de la costa no sufra cambios bruscos como bahías, canales, deltas de ríos, entre otros; el nivel del mar en dichas zonas será similar (Sánchez, 2008), como lo demuestra los resultados obtenidos para Candelillas de la Mar y la bahía de Tumaco a pesar de tener una configuración geomorfológica costera es diferente.

Los resultados obtenidos fueron comparados con trabajos anteriores que se han realizado (Sánchez, 2008), evidenciando para el caso de la Isla del Morro, una diferencia en la cota máxima de inundación de 0.5859 m, debido a que en estudios pasados no se contaba con información base detallada referente al nivel medio del mar para el puerto de Tumaco.

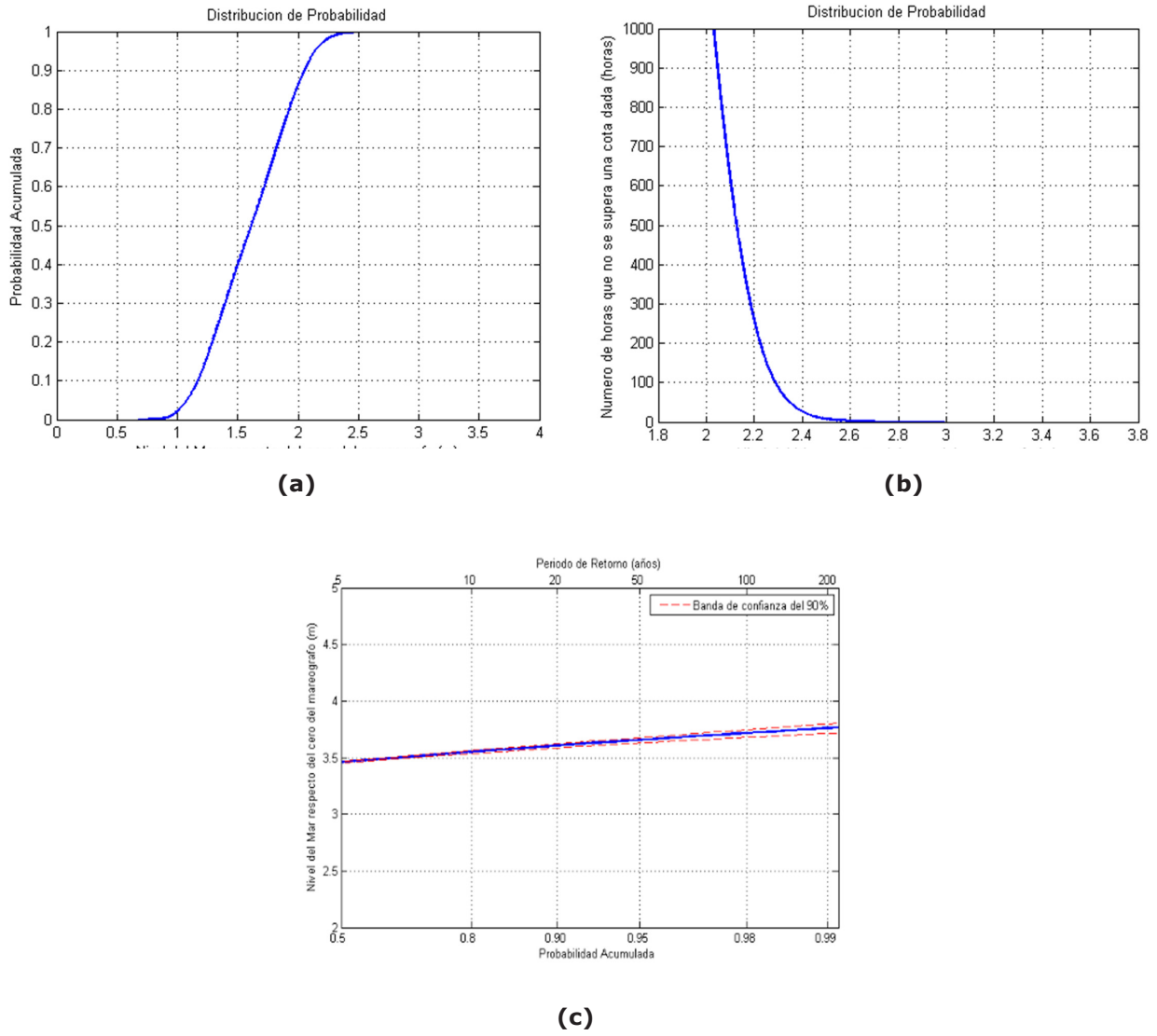
Para determinar la línea de más alta marea es necesario determinar la altura elipsoidal del cero de la regla mareográfica. Para el casco urbano de Tumaco se estableció una altura de 13.99 m, mediante un proceso de corrección de alturas desarrollado en el CCCP en el Área de Manejo

Integrado de Zona Costera (Sánchez, 2008). Esta altura se sumó a las cotas máximas de inundación obtenidas, para trazar isolíneas sobre el modelo ráster de suelo del área en análisis. Esta información en conjunto con las condiciones geomorfológicas, coberturas vegetales reinantes

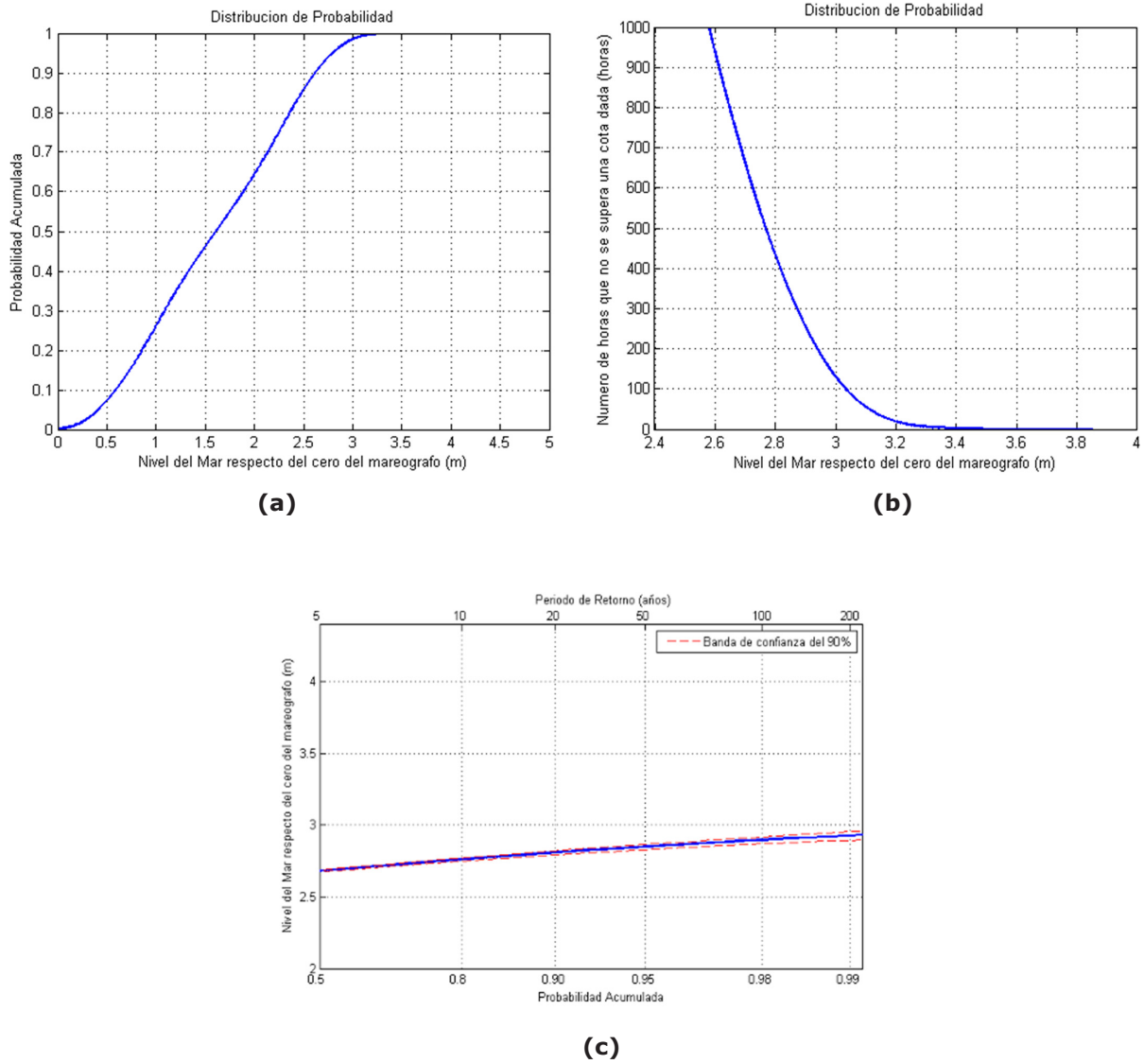
en la zona costera del pacífico colombiano, y geoprocesos, fueron los criterios empleados para determinar el trazado de la línea de más alta marea sobre zona de estudio (CCCP, 2013). En la Figura 8, se muestra la línea de más alta marea definida para la zona.



**Figura 5.** a) y b) Características del régimen medio. c) Régimen extremal para el punto seleccionado en Candelillas de la Mar.



**Figura 6.** a) y b) Características del régimen medio. c) Régimen extremal para el punto seleccionado en Cabo Manglares.



**Figura 7.** a) y b) Características del régimen medio. c) Régimen extremal para el punto seleccionado en Isla del Morro.

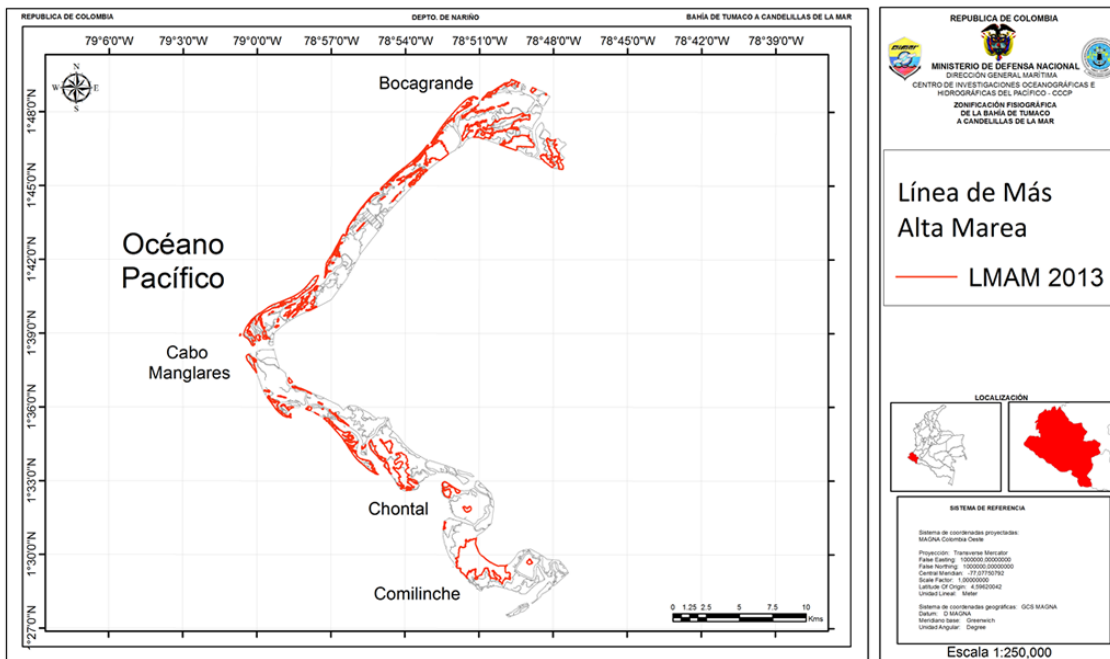
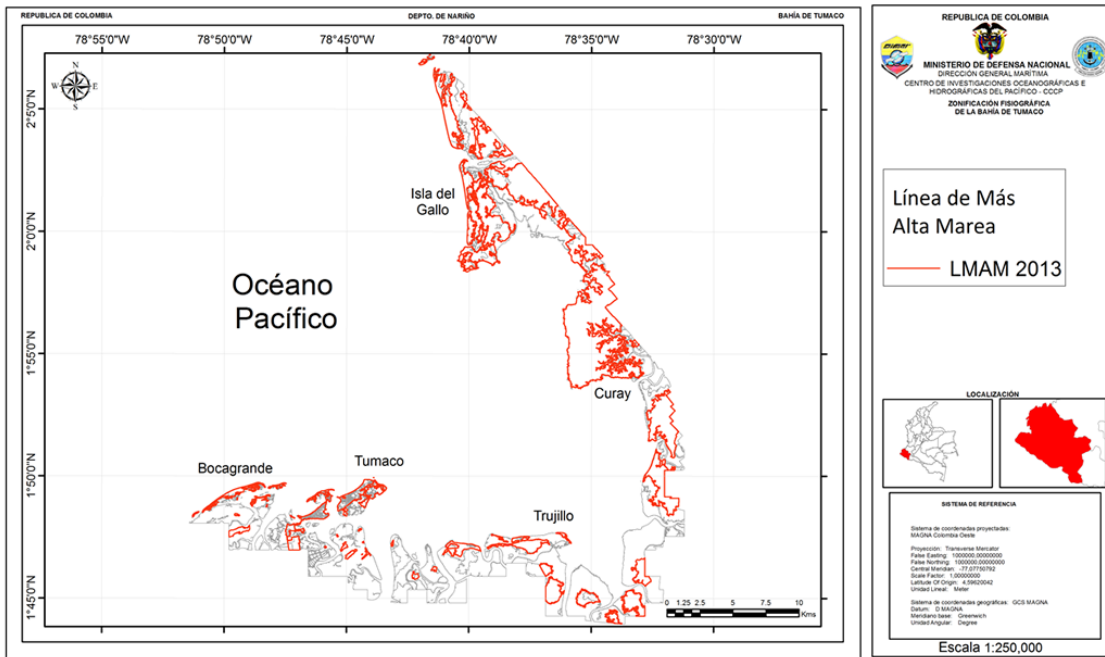


Figura 8. Línea de más alta marea para la zona de estudio comprendida entre Candelillas de la Mar y Salahondita, Nariño.

## CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos del régimen medio del nivel del mar, se puede concluir que las cotas máximas de inundación para Candelillas de la Mar, Cabo Manglares e Isla del Morro es de 3.0709, 2.2995 y 3.04874 respectivamente, con una probabilidad de no excedencia del 99 %, la cual se tomó como referencia para el trazado de la línea de más alta marea.

Las alturas máximas de nivel del mar de las series simuladas que presentan una baja correlación debido a la carencia de batimetría de detalle en la zona, fueron igualmente tenidas en cuenta, para el trazado de la línea de más alta marea en la zona ya que, su trazado también es delimitado por las coberturas vegetales y por los cambios en la topografía.

La alta correlación que se muestra entre las ondas simuladas en los diferentes puntos de interés ubicados en el sur del Pacífico nariñense respecto a la marea observada en el mareógrafo, corrobora un comportamiento muy similar de las mismas, siempre y cuando no haya un cambio brusco en la configuración geomorfológica de las costas.

## 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.
- Cardona Y., Fernández J., Botero M. y Gómez M. (2003). *El mundo marino de Colombia: Investigación y desarrollo de territorios olvidados*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Castillo, E. y Pruneda, R. (2001). *Estadística aplicada*. Santander, España: Moralea.
- Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico -CCCP.(2013). *Zonificación Fisiográfica del Litoral Pacífico Colombiano*. (Informe Técnico). Tumaco, Colombia: Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico.
- Foreman, M. G. (1977). *Manual for tidal height analysis and prediction*, Pacific marine science report, 77(10), Victoria-B.C., Canadá: Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay.
- Fu, L-L. y Cazenave, A. (Eds). (2001). *Satellite Altimetry and Earth Sciences: A handbook of techniques and Applications* (pp 342-347). San Diego, Estados Unidos: Academic Press.
- Gebco.net. (Updated 2013 July 16; cited 2013 May 20). *General Bathymetric Chart of the Oceans*. Recuperado de: <http://www.gebco.net>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2013). *Pronóstico de Pleamares y Bajamares Costa Pacífica Colombiana*. Bogotá, Colombia.
- Lehman A., O'Rourke N., Hatcher L. y Stepanski E. (2013). *JMP for Basic Univariate and Multivariate Statistics: A Step-by-step Guide* (pp.146-147). Carolina del Norte, USA: SAS Institute.
- Marques, M. (2001). *Estadística Básica: un enfoque no Paramétrico*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ministerio de Defensa. (1984). *Decreto Ley N° 2324*. Colombia.
- Otero L., (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.
- Rosenfeld, L., Shulman, I., Cook, M., Paduan, J. y Shulman, L. (2009). *Methodology for a regional tidal model evaluation, with application to central California deep sea research part II, Tropical studies in oceanography*, 56(3-5) 199-218. New Orleans, USA.
- Sánchez, R. (2008). *Determinación de la línea de más alta marea para el litoral pacífico colombiano, aplicando métodos de modelación numérica*. (Informe técnico). Tumaco, Colombia: Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico.
- Valls P. & Maria J. (s.f.) *Medición del nivel medio del mar: Principio y métodos*. Cataluña, España: Universidad Politécnica de Cataluña. Recuperado de <http://www.tabuladecimal.info:8080/jspui/bitstream/123456789/1054/1/Medicion%20nivel%20medio.pdf>