

MODELACIÓN NUMÉRICA DE LA MAREA METEOROLÓGICA EN EL PACÍFICO COLOMBIANO

Numerical Modeling of the Meteorological Tide in the Colombian Pacific

Marco Cruz Bedoya¹
Jahir Andrés Robledo Leal²

Recibido: 19/07/2017

Aceptado: 01/08/2018

Resumen

El propósito de este trabajo es determinar la dinámica de la marea meteorológica en las áreas costeras de Bahía Solano, Buenaventura y Tumaco en el pacífico colombiano mediante la simulación numérica en una serie temporal de 20 años (1991-2010), a través de la implementación de una base de datos con campos de viento, presión, batimetría y datos meteorológicos que, se utilizaron como datos de entrada para el modelo H2D, poniendo en ejecución los conocimientos adquiridos durante el curso de complementación profesional y soportándose en herramientas para el análisis gráfico de contraste y estadístico para determinar el coeficiente de arrastre y de este modo, poder calibrar el modelo. Como resultado de la modelación se obtuvo regímenes medios y extremos de la marea meteorológica, lo que permitió evaluar su comportamiento y afectación sobre las variaciones del nivel del mar,

generando una metodología para la obtención de la marea meteorológica en cualquier punto del pacífico colombiano.

Palabras Clave: marea meteorológica, marea astronómica, simulación numérica, modelo hidrodinámico (H2D).

Abstract

The purpose of this work is to determine the dynamics of the meteorological tide in the coastal areas of Bahia Solano, Buenaventura and Tumaco in the Colombian Pacific by numerical simulation in a time series of 20 years (1991-2010), through the implementation of a database with wind fields and pressure, bathymetry and meteorological data which were used as input data for the H2D model, implementing the knowledge acquired during the professional completion course and relying on graphical contrast analysis tools and statistical analysis to determine the drag coefficient and calibrate the

¹Oceanógrafo Físico. Escuela Naval Almirante Padilla, Cartagena de Indias - Marco.cruz@armada.mil.co

²Oceanógrafo Físico. Escuela Naval Almirante Padilla, Cartagena de Indias - Jahir.robledo@armada.mil.co

model. As a result of the modeling we obtained average and extreme regimes of the meteorological tide, which allowed us to evaluate its behavior and affectation on sea level variations, generating a methodology to obtain the meteorological

tide at any point in the Colombian Pacific.

Keywords: meteorological tide, astronomical tide, numerical simulation, HSD hydrodynamic model.

Introducción

El evidente cambio climático mundial y sus consecuencias, han llevado a la comunidad científica a debatir diferentes teorías de causa y efecto; por un lado, tenemos las teorías oficiales del calentamiento global, que aseguran que el nivel del mar está subiendo alarmantemente o subirá de forma catastrófica en los próximos años, mientras que, por otro, están los que niegan la existencia de una aceleración significativa en el aumento del nivel del mar (Wenzel & Schröter, 2010).

Como vemos, ya sea para sostener una u otra teoría, el punto de partida es el estudio y análisis de las variaciones del nivel del mar, para que de este modo, sea posible validar estos datos y documentarlos con el fin de elaborar predicciones de marea.

No obstante, incluso con las predicciones de marea más cuidadosamente estudiadas, los niveles observados son diferentes a los que predicen las tablas de las mismas; la causa de esto es que existen cambios que se deben a los efectos del clima; estos cambios en el nivel del mar se deben a la marea meteorológica, que podemos definir como la oscilación del nivel del mar debido a la acción conjunta de la presión atmosférica y el arrastre del viento.

Es muy importante establecer la magnitud y dinámica de la marea meteorológica, ya que en mayor o menor medida tiene efecto sobre los cambios en el nivel del mar; la magnitud de su influencia depende del lugar o instante específico en el que se presentan los efectos del viento y presión, llegando en algunos casos a ser de mayor importancia y con valores superiores a la marea astronómica (Silva Rodríguez & Orejarena Rondón, 2009); especialmente durante el sobrevenir de fenómenos climatológicos extremos como las tormentas tropicales y los huracanes.

La marea meteorológica se puede obtener a partir de mediciones reales mediante el análisis del residuo meteorológico de la serie del nivel del mar medido por los mareógrafos. Se debe mencionar que, hay una falta de mareógrafos en el área de estudio seleccionada, que correspondiente al litoral Pacífico colombiano (Buenaventura, Tumaco y Bahía Solano). De esta manera, teniendo en cuenta que no es posible extrapolar o asimilar los datos de marea meteorológica obtenidos de algún mareógrafo al resto del litoral, puesto que las condiciones climáticas a lo largo este son muy variables, se hace necesario recurrir a otros métodos, siendo la mejor opción, una simulación numérica que permita hacer aproximaciones para obtener esta variable.

El propósito del estudio consiste en obtener datos de los campos de viento y presión de los últimos veinte años y a partir de estos simular numéricamente las variaciones del nivel del mar, con respecto a la marea meteorológica, utilizando el Modelo Hidrodinámico Bidimensional (H2D) calibrado, con el fin de analizar su dinámica e influencia en las principales costas del litoral Pacífico Colombiano.

Método

Procesamiento y configuración de los datos de entrada

Datos mareográficos

Los datos fueron recolectados de los mareógrafos ubicados en Balboa (Panamá) y Tumaco (Colombia), que fueron obtenidos de la University of Hawaii Sea Level Center UHSLC, (fuente: University of Hawaii Sea Level Center-1997. <http://ilikai.soest.hawaii.edu/uhsclc/>). Estos datos se emplearon para realizar la calibración de modelo.

Para la calibración se analizaron todos los datos disponibles de ambos mareógrafos, pero se escogieron los 3 años donde la información tenía un mejor calidad y cobertura temporal, siendo los años de 1990, 1993 y 1996 del mareógrafo de Tumaco.

Datos de viento y presión

Se empleó información proveniente del proyecto “Re-análisis” de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos (NOAA). Los archivos utilizados se encuentran en formato NETCDF y han sido simulados en series de tiempo desde el año 1948 para la superficie terrestre; En ellos se encuentra información de campos meteorológicos de viento (U y V) y presión atmosférica, comprendida de 4 tomas de datos diarias (cada seis horas), con una cobertura que se encuentra espaciada cada 2.5°.

Batimetría

Se determinó el área geográfica, que para nuestro caso es todo el Pacífico Colombiano; en esta área se generó una malla general de cálculo entre las latitudes 1° N – 9° N y longitudes 77° W – 82° W, separadas entre celdas de 0.05°.

La batimetría usada en el presente trabajo de grado esta soportada por la información que suministra la National Geothermal Data System (NGDS), la cual recopila los documentos y base de datos de estudios realizados a lo largo de la historia, almacenando datos batimétricos generados por ecosondas multihaz, sondeos hidrográficos y estimaciones de altimetría por satélite. Esta información se encuentra en las Cartas Batimétricas Generales de los Océanos (GEBCO).

Calibración del Modelo

Antes de modelar los veinte años de marea meteorológica para cada uno de los puertos, debemos calibrar el modelo hidrodinámico bidimensional H2D. Para lograr esto, cuando se requiere modelar la marea meteorológica, se establece como parámetro el coeficiente de arrastre del viento (C_a) de la zona de estudio, ya que este parámetro establece la relación del efecto de tensión del viento sobre la superficie del océano.

Determinación del coeficiente de arrastre

Teniendo en cuenta que la determinación del coeficiente de arrastre (C_a) se hará mediante ensayos de prueba y error con varias corridas del modelo, lo primero que se debe establecer son los datos reales y conocidos con los cuales se van a comparar los resultados del modelo; para esto, se descargó de la página de “University of Hawaii Sea Level Center” los datos de nivel del mar de los mareógrafos de Tumaco (Colombia) y Balboa (Panamá). Los datos descargados son los comprendidos entre 1991 hasta 2010; posteriormente se crea una rutina en Matlab con la que se analizaron todos estos años y se escogen las series reales de mejor calidad y cobertura temporal, siendo las de los años 1990, 1993 y 1996 del mareógrafo de Tumaco (Figura 18).

Con los datos del nivel del mar escogidos (1990, 1993 y 1996) se realizó un análisis armónico mediante la herramienta de Matlab “T_tide”, que efectúa la descomposición de los componentes armónicos de la onda de marea, cuyos períodos están plenamente establecidos, ya que coinciden con los períodos de algunos movimientos astronómicos; Así con esto, se obtiene la marea astronómica; posteriormente se resta esta marea astronómica a la serie de nivel del mar original para hallar el residuo o marea meteorológica real.

Para las corridas del modelo (H2D) con diferentes coeficientes de arrastre, se determinó un coeficiente de arrastre de 0,021 como punto de partida de la bibliografía existente. Este valor de referencia se obtuvo de la bibliografía existente, principalmente del trabajo denominado “Simulación numérica de marea meteorológica en el Mar Caribe colombiano” (Silva Rodríguez & Orejarena Rondón, 2009), donde establecen este valor como coeficiente de arrastre para el Caribe colombiano; las simulaciones se realizan con los campos de viento y presión correspondientes a los años de 1990, 1993 y 1996 variando el coeficiente de arrastre desde 0,021 hasta 0,036. Con esto se logró realizar iteraciones con la simulación, cambiando el coeficiente de arrastre del viento hasta obtener una amplitud de marea meteorológica modelada muy similar a la de la gráfica real; los resultados gráficos más representativos de este proceso fueron los siguientes:

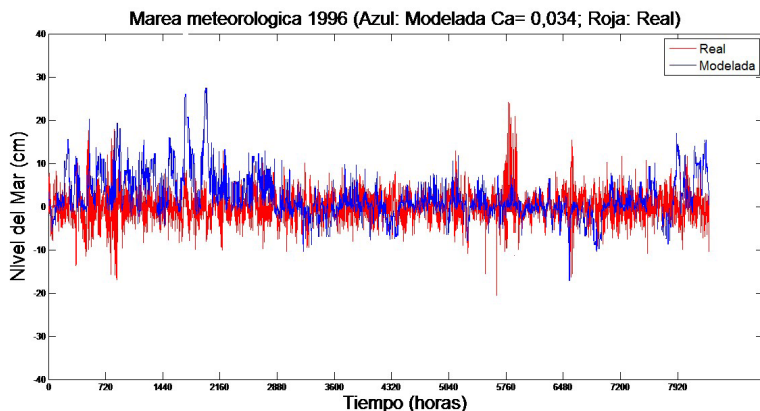


Figura 1. Marea meteorológica real vs. Marea meteorológica modelada con H2D con $Ca=0,034$ (Año 1996).

Fuente: Propia; Matlab

Finalmente, después de analizadas las gráficas comparativas de las series modeladas que arrojó el (H2D) con diferentes coeficientes de arrastre, contra las mareas meteorológicas reales de cada año seleccionado, se logró determinar gráficamente que el coeficiente de arrastre que más ajusta es 0,034; no obstante, con el fin de soportar este análisis gráfico se realizó un análisis estadístico.

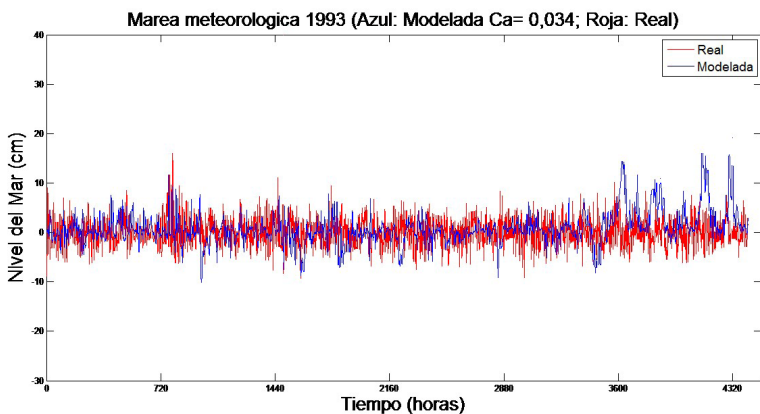


Figura 2. Marea meteorológica real Vs. Marea meteorológica modelada con H2D con $Ca=0,034$ (Año 1993).

Fuente: Propia; Matlab

Análisis estadístico de la calibración del modelo

El primer paso antes de realizar el análisis estadístico, fue verificar la existencia de independencia o dependencia entre las muestras (series de marea meteorológica); para

este caso, se tomó como sujeto experimental la parcela de agua de la que se obtienen los datos de nivel del mar; esto, genera la imposibilidad de saber si la parcela de agua medida por el mareógrafo es la misma parcela de donde se obtienen los parámetros de entrada del modelo numérico. Estas diferencias en las técnicas de muestreo que se emplean para cada una de las series de tiempo a comparar, hacen que las escalas temporales y espaciales de muestreo sean diferentes. De esta manera, de los análisis anteriores podemos concluir que hay una independencia entre nuestras muestras.

Una vez se determinó que las muestras son independientes, el siguiente paso fue definir entre aplicar pruebas estadísticas paramétricas o no paramétricas, teniendo en cuenta que determinar la gaussianidad de los datos es parte fundamental para definir la aplicación de un análisis estadístico paramétrico o no paramétrico; se realizó además otra prueba de normalidad conocida como Kolmogorov – Smirnov, esta prueba compara la función de distribución acumulada empírica (ECDF) de los datos de la muestra con la distribución esperada. En el caso de que los datos fueran normales, si esta diferencia observada es adecuadamente grande, la prueba rechaza la hipótesis nula de normalidad en la población; si el valor p de esta prueba es menor que el nivel de significancia (α) elegido, se puede rechazar la hipótesis nula y concluir que se trata de una población no normal.

La prueba de Kolmogorov – smirnov se realizó para un nivel de confianza del 95% y un $\alpha = 0.05$, por lo cual si el P-Valor es mayor a 0.05, no se rechaza la hipótesis nula y se puede decir que los datos se ajustan a una distribución normal; los resultados gráficos obtenidos de esta prueba fueron los siguientes:

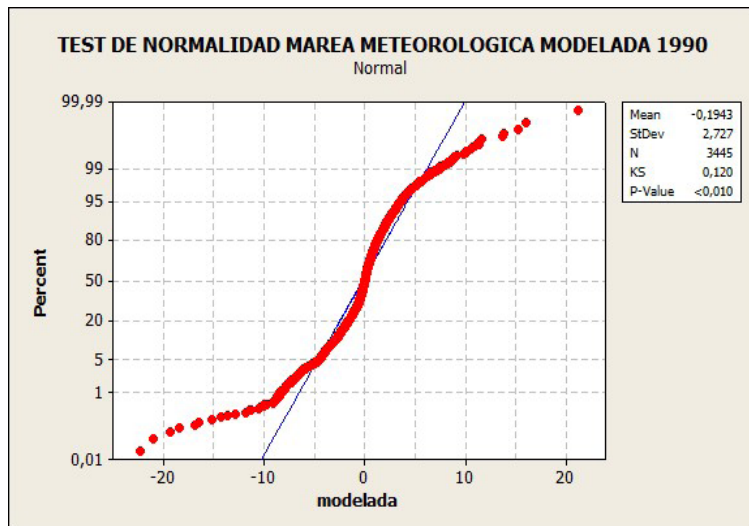


Figura 3. Test de normalidad de Kolmogorov-Smirnov aplicado a datos de Marea meteorológica modelada 1990.

Fuente: Propia; Matlab

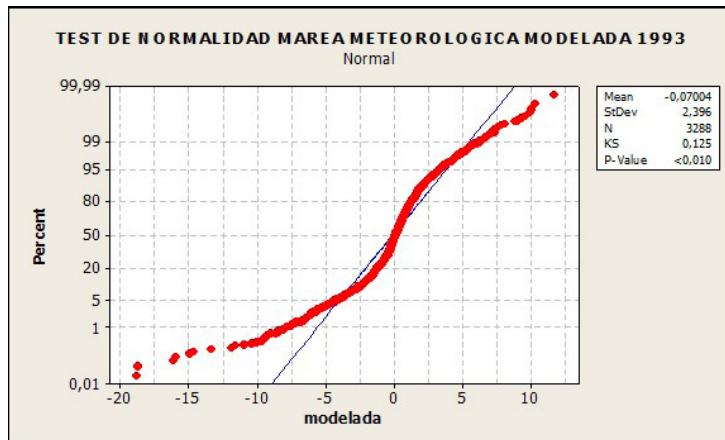


Figura 4. Test de normalidad de Kolmogorov-Smirnov aplicado a datos de Marea meteorológica modelada 1993.

Fuente: Propia; Matlab

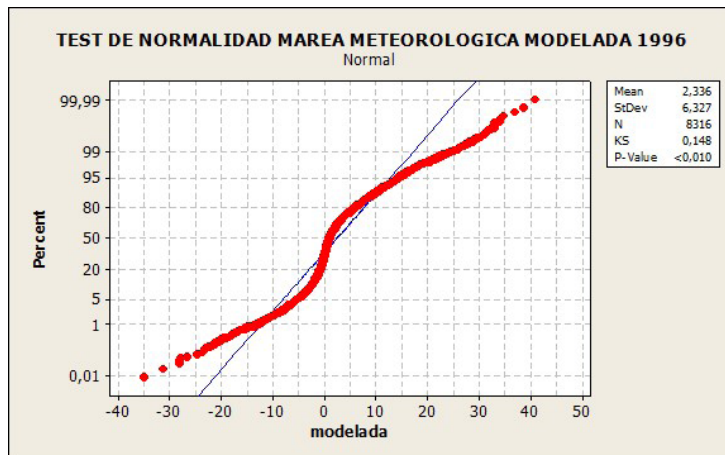


Figura 5. Test de normalidad de Kolmogorov-Smirnov aplicado a datos de Marea meteorológica modelada 1996.

Fuente: Propia; Matlab

Una vez obtenidos los resultados de las pruebas QQ y Kolmogorov-smirnov aplicadas a todas las muestras de diferentes años, se construyó el siguiente resumen de resultados, así:

Tabla 1.
Resultados pruebas de normalidad.

N°	Datos	R_Pearson	R_Critico QQ	P-Valor	Gaussianidad
1	Marea meteorológica real -1990	0,9973	0,9984	0,01	NO
2	Marea meteorológica modelada-1990	0,9419	0,9984	0,01	NO
3	Marea meteorológica real -1993	0,9785	0,9984	0,01	NO
4	Marea meteorológica modelada -1993	0,9230	0,9984	0,01	NO
5	Marea meteorológica real -1996	0,9720	0,9984	0,01	NO
6	Marea meteorológica modelada -1996	0,9391	0,9984	0,01	NO

Una vez realizadas las pruebas anteriores se estableció que ninguna de las muestras se ajusta a una distribución normal, se verificó así la existencia de valores extremos en cada muestra, para lo cual se utilizó una transformada “Z”, creando una rutina de Matlab con la formula $Z = \frac{x - \bar{x}}{\sigma}$, en la que se determina que hay valores extremos si ($\max Z > 3$ y/o $\min Z < -3$), obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 2.
Resultado prueba de valores extremos.

N°	Datos	Valores Extremos
1	Marea meteorológica real -1990	SI
2	Marea meteorológica modelada -1990	SI
3	Marea meteorológica real -1993	SI
4	Marea meteorológica modelada-1993	SI
5	Marea meteorológica real -1996	SI
6	Marea meteorológica modelada-1996	SI

De las pruebas anteriores es posible concluir que las muestras no son gaussianas y tienen valores extremos, por lo cual se realizó la aplicación de la prueba no paramétrica para muestras independientes. Así, la mejor opción para nuestro caso, es la prueba de Mann-Withney también conocida como la prueba de suma de rangos de Wilcoxon.

Prueba No Paramétrica de Mann Withney para muestras independientes

También es conocida como la prueba de suma de rangos de Wilcoxon y es una opción alterna a la prueba “t” para comparar dos medias usando muestras independientes. La hipótesis nula es entonces que, la mediana de las dos poblaciones es igual y la hipótesis alterna es que la mediana de la población 1 es distinta de la mediana de la población 2.

Tabla 3.
Resultado prueba de Mann Whitney

N°	Datos	Suma Rangos	Promedio de Rangos	Mediana	P-Valor
1	Marea meteorológica real - 1990	11.959.688	3.471,607	-0,0504	0,2760
	Marea meteorológica modelada – 1990	11.779.807	3.419,392	0,0020	
2	Marea meteorológica real - 1993	10.785.479	3.280,255	0,0181	0,7247
	Marea meteorológica modelada – 1993	10.839.697	3.296,744	0,0785	
3	Marea meteorológica real – 1996	22.829.250	4.785,003	0,1033	0,6321
	Marea meteorológica modelada – 1996	22.700.403	4.757,996	0,1280	

Para determinar el cumplimiento de la hipótesis nula se verificaron dos condiciones: la primera es que los promedios de los rangos en cada una de las series sean aproximadamente iguales y la segunda que el P-valor sea mayor a alfa (α).

La prueba se realizó para un $\alpha = 0,05$ para un intervalo de confianza de 95,0% y como se observa en la tabla 3, el “P-valor” es mayor a 0.05 en todos los casos, igualmente se puede observar que los promedios de los rangos son aproximadamente iguales; de los resultados anteriores concluyendo que se aceptó la hipótesis nula que no hay diferencia estadísticamente significativa entre las medianas de las dos muestras.

Con todo este proceso estadístico se logró comprobar que no existe diferencia significativa entre las dos muestras, lo que indica que la marea meteorológica modelada con un coeficiente de 0.034 se ajusta a la marea meteorológica real obtenida del mareógrafo, lo que le da sustento estadístico al modelo para ser utilizado en diferentes puntos del Pacífico colombiano.

Simulación numérica con el modelo (H2D)

Simulación numérica de los tres principales puertos del Pacífico colombiano

Una vez calibrado el modelo (H2D), se realiza la modelación numérica de la marea meteorológica, para lo cual, se escogieron los tres principales puertos del Pacífico colombiano como son Tumaco, Buenaventura y Bahía Solano; esta se realiza con una serie de tiempo de 20 años la cual va desde el año 1991 hasta el 2010 y para su corrida se configuran los siguientes parámetros, así:

1. Tiempo ejecución: Teniendo en cuenta la capacidad de procesamiento y la gran extensión de las series de tiempo a modelar, se decidió hacer cinco modelaciones con longitudes de tiempo de 4 años por serie, aumentándole a cada una un periodo de tres meses de estabilización del modelo; con lo que se pudo inferir que el tiempo de ejecución de cada serie es de 37.224 horas, lo que corresponde a la cantidad de horas de 4 años y 3 meses incluyendo un año bisiesto. Coeficiente de arrastre por viento: Se utilizó el determinado en la calibración del modelo que fue de 0.034.

2. Coeficiente de arrastre por viento: Se utilizó el determinado en la calibración del modelo que fue de 0.034.

3. Campos de viento y presión: Se emplearon ficheros de viento y presión con datos cada seis horas, recortados e interpolándolos al tamaño de la malla de estudio.

4. Batimetría: Malla desde 1° N hasta 9° N y desde 77° W hasta 82° W; las características de la malla se pueden ver con mayor precisión, también, en el capítulo Procesamiento y configuración de los datos de entrada.

5. Salida de resultados: Se obtuvo como salida los horarios de nivel del mar en centímetros, para los tres puntos escogidos, que pueden ser observados en la figura 6.

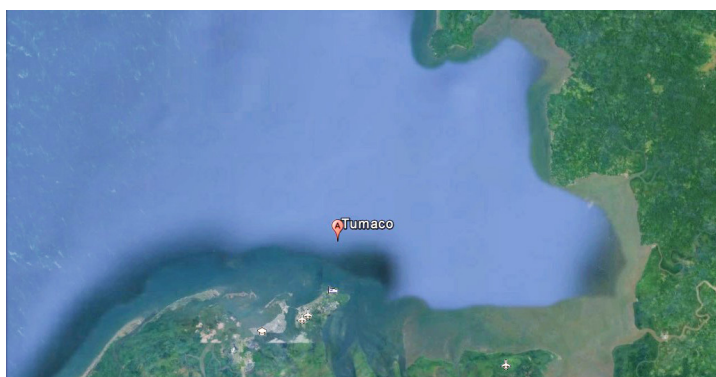
Una vez obtenidos los archivos de resultados, en los que se puede observar una longitud de 4 años y 3 meses cada uno, se utilizó la herramienta Matlab para cargar los datos, recortar los primeros 3 meses que se usaron para estabilizar el modelo en la corrida de cada serie y unir todos los archivos, obteniendo así la serie de tiempo final, la cual queda con un tamaño de 175.320 datos horarios, lo que corresponde a 20 años incluyendo 5 años bisiestos.



*Figura 6. Ubicación geográfica de los puntos de modelación.
Fuente: Tomada de Google Earth.*

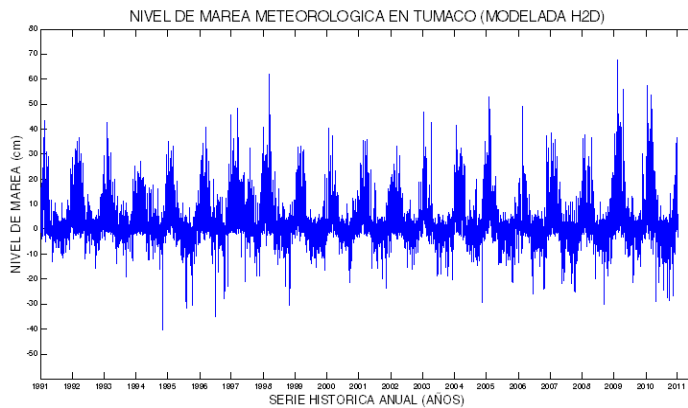
Marea meteorológica modelada en Tumaco

En la figura 7 se muestra el punto exacto donde fue realizada la modelación de la marea meteorológica para el puerto de Tumaco, que corresponde a la posición en coordenadas geográficas latitud 1.86° N – longitud 78.73° W, lo que para la malla de batimetría son las coordenadas 328 en X y 84 en Y.



*Figura 7. Ubicación geográfica lat. 1.86° N – long. 78.73° W - Modelación de Marea meteorológica en Tumaco.
Fuente: Tomada de Google Earth.*

En la figura 8 se muestra la gráfica de la marea meteorológica modelada para el puerto de Tumaco, empleando el modelo hidrodinámico bidimensional H2D; esta es una serie de tiempo de 20 años que va desde el año 1991 hasta el 2010; el nivel de marea meteorológica se muestra en centímetros y tiene una variabilidad máxima en sus alturas en un rango entre menos treinta (-30) y sesenta (60) centímetros.

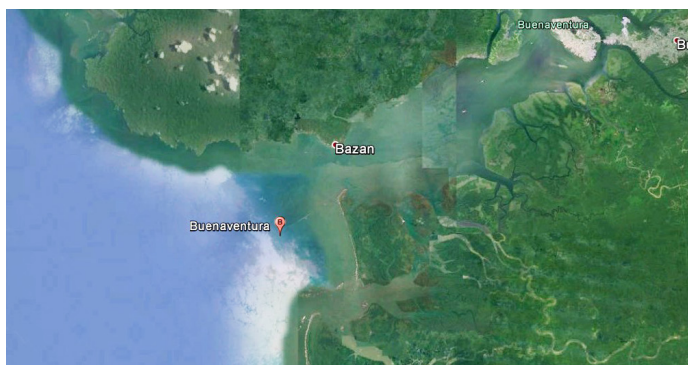


*Figura 8. Marea meteorológica modelada en Tumaco, con el modelo H2D.
Fuente: Propia; Matlab*

Marea meteorológica modelada en Buenaventura

En la figura 9 se muestra el punto exacto donde fue realizada la modelación de la marea meteorológica para el puerto de Buenaventura, que corresponde a la posición en coordenadas geográficas latitud 3.79° N – longitud 77.21° W, lo que para la malla de batimetría son las coordenadas 480 en X y 280 en Y.

La figura 10 muestra la gráfica de la marea meteorológica modelada para el puerto de Buenaventura, empleando el modelo hidrodinámico bidimensional H2D; esta, es una serie de tiempo de 20 años que va desde el año 1991 hasta el 2010, y en ella se puede ver que el nivel de marea meteorológica se muestra en centímetros y tiene una variabilidad máxima en sus alturas en un rango entre menos cuarenta (-40) y setenta y cinco (75) centímetros.



*Figura 9. Ubicación geográfica lat. 3.79° N – long. 77.21° W - Modelación de Marea meteorológica en Buenaventura.
Fuente: Tomada de Google Earth.*

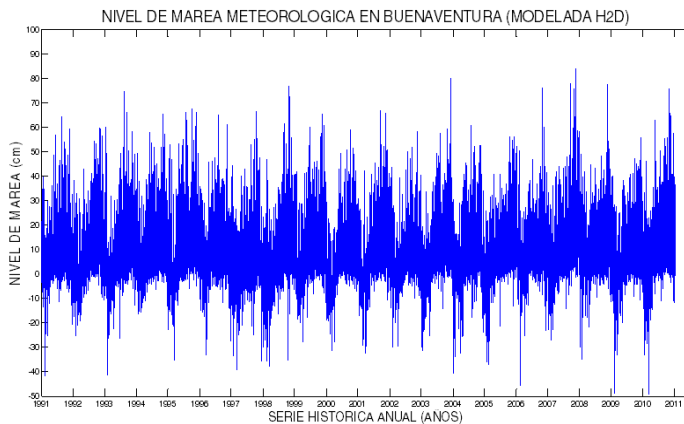


Figura 10. Marea meteorológica modelada en Buenaventura, con el modelo H2D.

Fuente: Propia; Matlab

Marea meteorológica modelada en Bahía Solano

En la figura 11 se muestra el punto exacto donde fue realizada la modelación de la marea meteorológica para el puerto de Bahía Solano, el cual corresponde a la posición en coordenadas geográficas latitud 6.30° N – longitud 77.40° W, lo que para la malla de batimetría son las coordenadas 461 en X y 529 en Y.

Al analizar la marea meteorológica modelada para el puerto de Bahía Solano, se observó que el nivel de marea meteorológica tiene una variabilidad máxima en sus alturas en un rango entre menos doce (-12) y quince (15) centímetros.

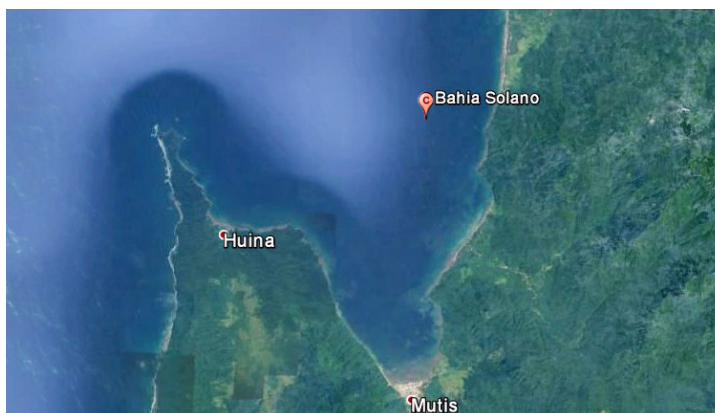


Figura 11. Ubicación geográfica lat. 6.30° N – long. 77.40° W - Modelación de Marea meteorológica en Bahía solano.

Fuente: Tomada de Google Earth.

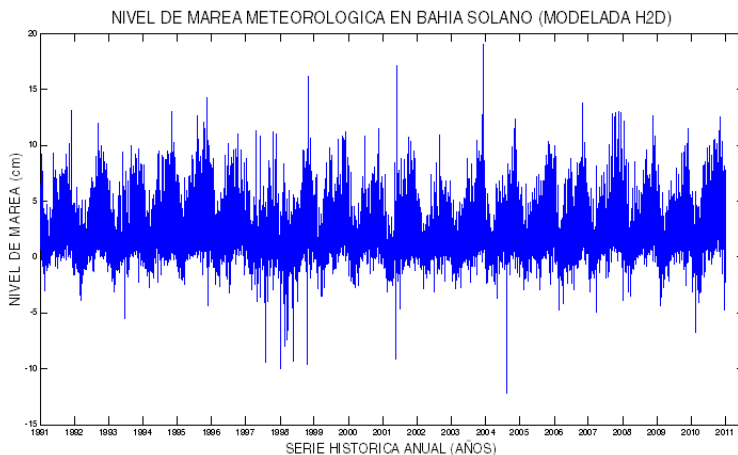


Figura 12. Marea meteorológica modelada en Bahía solano, con el modelo H2D.

Fuente: Propia; Matlab

Regímenes medios de la marea meteorológica

Una vez realizadas las simulaciones de la marea meteorológica para los 20 años (1991-2010) en Tumaco, Buenaventura y Bahía Solano, se procedió a determinar sus regímenes medios, con el fin de representar, en función de la probabilidad, su comportamiento medio durante un periodo de tiempo.

Para determinar estos regímenes medios se organizaron los datos de cada serie de tiempo de menor a mayor, se calculó la probabilidad y se graficaron las curvas de probabilidad acumulada, obteniendo los resultados que se muestran a continuación.

El régimen medio de la marea meteorológica para el área de Tumaco es de 0.41 m, con valores máximos entre 0.56 y 0.80 metros para probabilidades de no excedencia de 95% y 99.9% respectivamente.

El régimen medio de la marea meteorológica para el área de Buenaventura es de 0.55 m, con valores máximos entre 0.76 y 1.06 metros, para probabilidades de no excedencia de 95% y 99.9% respectivamente.

El régimen medio de la marea meteorológica para el área de Bahía solano de 0.14 m, con valores máximos entre 0.17 y 0.22 metros, para probabilidades de no excedencia de 95% y 99.9%, respectivamente.

En la figura 13 se realizó una comparación gráfica de los regímenes medios de

los tres puntos modelados, en la que se puede apreciar que el comportamiento medio de la marea meteorológica en el puerto de Buenaventura, presenta una amplitud mayor de la onda de marea que en los puertos de Tumaco y Bahía Solano, siendo este último el que presenta la menor amplitud.

Al correlacionar estos resultados con las Figuras N° 6, 7, 9 y 11, que muestran la ubicación geográfica donde se realizó cada modelación, es posible determinar que la onda de marea era afectada por la línea de costa y por los contornos del lugar donde se modela; por ejemplo para el caso de Bahía Solano, en la Figura 9 se puede observar que el punto de modelación está dentro de la bahía, lo que afecta la amplitud de la onda de marea y hace que esta sea mucho menor que en los otros puertos; similar situación ocurre en Tumaco donde el punto de modelación aunque no esta tan encerrado como el de Bahía Solano, también está dentro de la bahía; finalmente para el caso de Buenaventura se puede ver que el punto de modelación esta por fuera de la bahía y por ende es el que presenta la mayor amplitud.

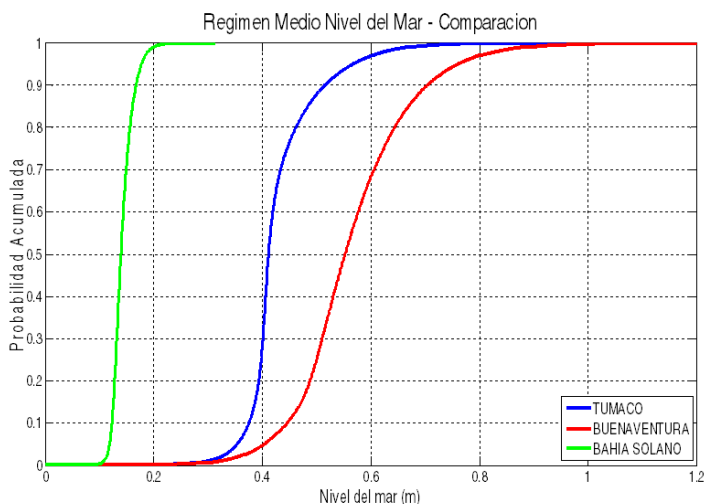


Figura 13. Comparación de regímenes medios del nivel del mar por marea meteorológica modelada en Tumaco, Buenaventura y Bahía Solano.
Fuente: Propia; Matlab

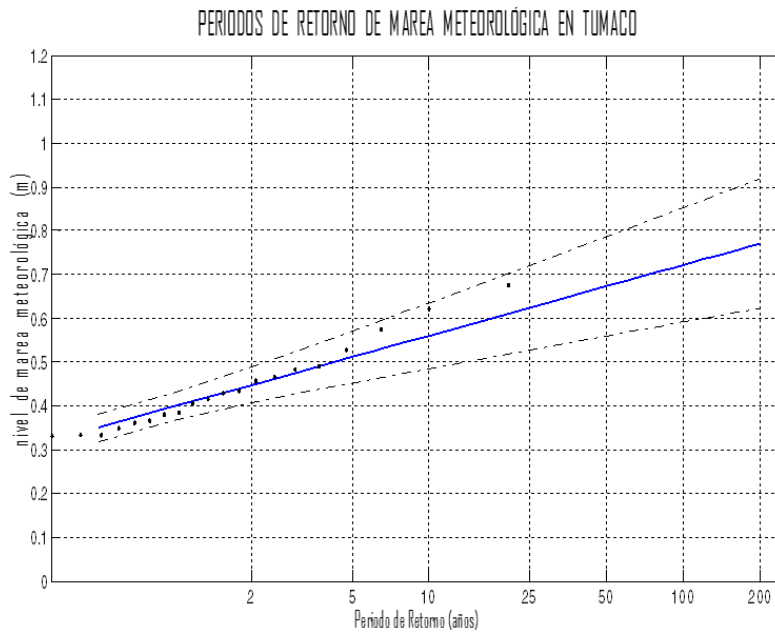
Tabla 4.
Valores de probabilidad de no excedencia

Puerto	95%	99%	99,9%
Tumaco	0.567 m	0.671 m	0.800 m
Buenaventura	0.760 m	0.886 m	1.063 m
Bahía Solano	0.177 m	0.199 m	0.229 m

Regímenes extremos de la marea meteorológica

Para determinar el comportamiento del nivel de marea meteorológica por valores extremos para toda la serie de tiempo modelada, fueron generados los regímenes extremos de la marea meteorológica, representándolos en un régimen de probabilidades. Para esto se empleó la distribución de Gumbel, que se utiliza para calcular valores extremos, lo que nos resulta conveniente para representar la distribución de los máximos niveles de la marea meteorológica a partir de los 20 años de datos que se modelaron.

El método empleado consiste en: dividir la serie temporal en unidades de un año seleccionando los valores máximos de esa variable en el tiempo, logrando obtener una serie continua de valores extremos independientes a lo largo del tiempo. Habiendo determinado estos valores extremos, se procede a ajustarlos a la función de distribución de Gumbel para determinar los períodos de retorno de las alturas del nivel del mar (Orejarena, 2013).



*Figura 14. Regímenes extrémales de la marea meteorológica modelada en Tumaco.
Fuente: Propia; Matlab*

En la Figura 14 se muestra el comportamiento de la marea meteorológica en Tumaco, donde se tienen alturas de 0.56 m para periodos de retorno de 10 años, de 0.68 m para periodos de retorno de 50 años, de 0.71 m para periodos de retorno de 100 años y de 0,78 m para periodos de retorno 200 años.

En la Figura 15 se muestra el comportamiento de la marea meteorológica en Buenaventura, donde se tienen alturas de 0.80 m para periodos de retorno de 10 años, de 0.90 m para periodos de retorno de 50 años, de 0.97 m para periodos de retorno de 100 años y de 1,0 m para periodos de retorno 200 años.

En la Figura 16 se muestra el comportamiento de la marea meteorológica en Bahía Solano, donde se tienen alturas de 0.15 m para periodos de retorno de 10 años, de 0.175 m para periodos de retorno de 50 años, de 0.185 m para periodos de retorno de 100 años y de 0,19 m para periodos de retorno 200 años.

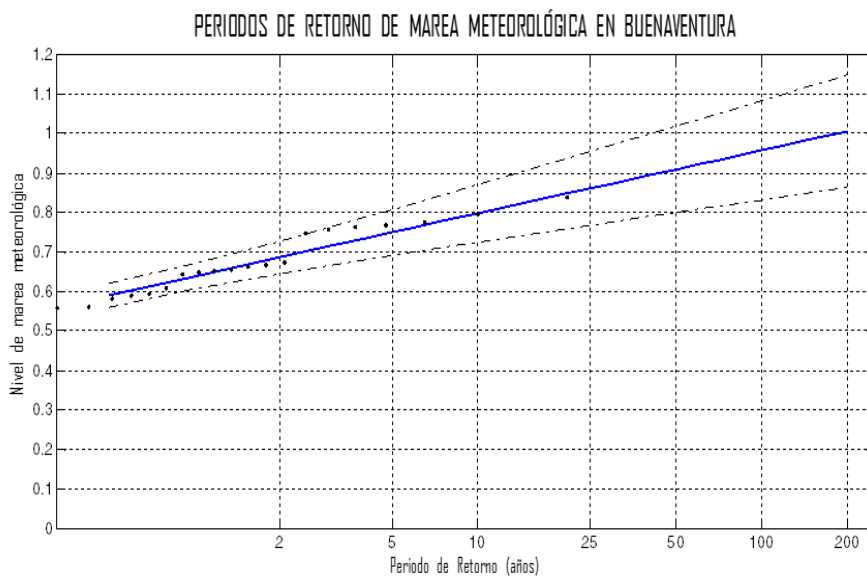
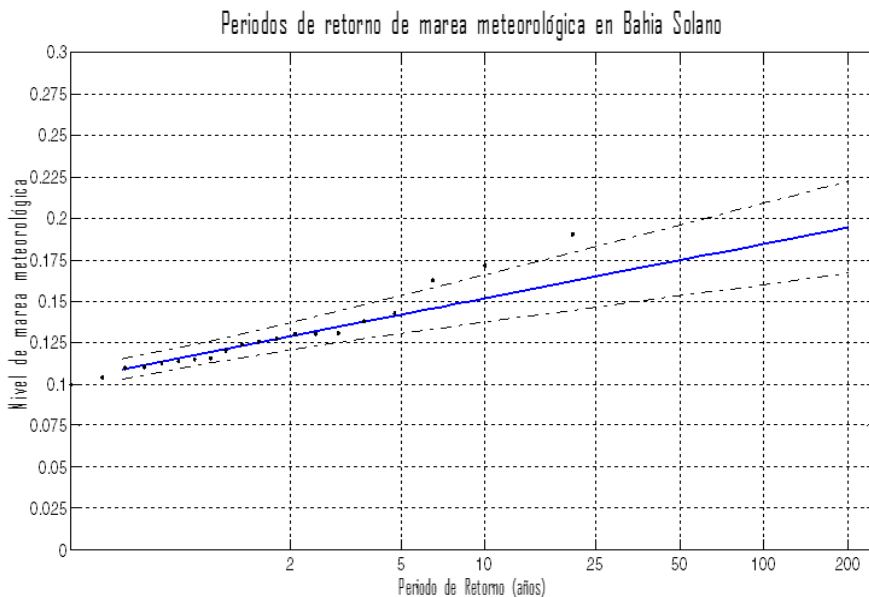


Figura 15. Regímenes extremales de la marea meteorológica modelada en Buenaventura.

Fuente: Propia; Matlab



*Figura 16. Regímenes extremales de la marea meteorológica modelada en Bahía Solano.
Fuente: Propia; Matlab*

Conclusiones

Se organizó, procesó y configuró una base de datos conformada por campos meteorológicos de viento y presión, malla de batimetría y datos mareográficos del nivel del mar, que puede ser utilizada como datos de entrada y calibración para modelar la marea meteorológica en cualquier punto del océano Pacífico Colombiano.

También, se configuró y calibró el modelo hidrodinámico bidimensional H2D para la generación de marea meteorológica a partir de la base de datos procesada, logrando determinar en la calibración que el valor del coeficiente de arrastre del viento que se ajusta a la zona de estudio es de 0.034. Esta calibración y determinación del coeficiente de arrastre comprendió un análisis gráfico de contraste entre series de marea modelada y real que se corrobora con un análisis estadístico, que permitió determinar que las series de tiempo de marea meteorológica real y modelada con las que se realizó la calibración del modelo son independientes. Esto, debido a que no se ajustaron a una distribución normal y con valores extremos, por lo que se tomó la decisión de aplicar la prueba estadística no paramétrica de Mann - Withney, que, finalmente, arrojo como resultado que no hay diferencia estadísticamente significativa entre las medianas de las dos series de tiempo.

Utilizando el modelo numérico H2D, se logró simular numéricamente las variaciones del nivel del mar debido a la marea meteorológica para el periodo comprendido entre los años 1991 al 2010, para las principales poblaciones costeras del litoral Pacífico Colombiano: Buenaventura, Tumaco y Bahía Solano.

Con las modelaciones realizadas se construyeron los regímenes medios y extremos de la marea meteorológica, lo que permitió evaluar su comportamiento y determinar la importancia y afectación que esta tiene sobre las variaciones del nivel del mar en las poblaciones costeras del litoral Pacífico colombiano (Buenaventura, Tumaco y Bahía Solano).

El régimen medio de la marea meteorológica para el área de Tumaco es de 0.41 m, con valores máximos entre 0.56 y 0.80 metros para probabilidades de no excedencia de 95% y 99.9% respectivamente. Por otra parte, el régimen extremal nos muestra alturas de 0.56 m para periodos de retorno de 10 años y de 0.71 m para periodos de retorno de 100 años.

El régimen medio de la marea meteorológica para el área de Buenaventura es de 0.55 m, con valores máximos entre 0.76 y 1.06 metros, para probabilidades de no excedencia de 95% y 99.9% respectivamente. Por otra parte, el régimen extremal nos muestra alturas de 0.80 m para periodos de retorno de 10 años y de 0.97 m para periodos de retorno de 100 años.

El régimen medio de la marea meteorológica para el área de Bahía Solano es de 0.14 m, con valores máximos entre 0.17 y 0.22 metros, para probabilidades de no excedencia de 95% y 99.9% respectivamente. Por otra parte, el régimen extremal nos muestra alturas de 0.15 m para periodos de retorno de 10 años y de 0.185 m para periodos de retorno de 100 años.

Al comparar el comportamiento medio de la marea meteorológica en los diferentes puertos, se ve claramente que en el área de Buenaventura se presenta una amplitud mayor de la onda de marea que en los puertos de Tumaco y Bahía Solano; situación que se correlaciona con la ubicación geográfica donde se realizó cada modelación. De este modo, debido a que la onda se ve afectada por la línea de costa y por los contornos, sería lógico pensar que en los puntos de modelación ubicados dentro de bahías (Tumaco y Bahía Solano) la amplitud de la onda de marea sea menor.

Por todo lo anterior, se puede afirmar que con el presente estudio se plantea una metodología para la obtención de la Marea Meteorológica en cualquier punto del litoral Pacífico colombiano.

La metodología planteada en este trabajo para obtener la marea meteorológica y determinar su régimen medio y extremo, podría ser parte inicial para un estudio mayor, que pueda complementarse con un análisis de oleaje, que permita establecer los regímenes

de inundación costera debida al efecto combinado del oleaje extremo y el aumento del nivel del mar. Un hallazgo tal, sería de gran ayuda para la implementación de planes de manejo integrado en la zona costera.

Referencias

- Acuña, E. (2008). *Pruebas estadísticas*. Mayarquez.
- Bolaños. (2006). *Tormentas de oleaje en el mediterráneo*. España: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Castillo Gutiérrez, S., & Lozano Aguilera, E. D. (2007). Q-Q Plot Normal. Los puntos de posición gráfica. *Iniciación a la investigación, 1-7*.
- Escudero López, J. M. (2003). Manual de energía eólica. En J. M. Escudero López, *Energías renovables (pág. 71)*. Madrid: Mundi prensa.
- Estrada, C. (2002). *Primer seminario virtual de ciencias del mar - OANNES 2002*. Obtenido de Mareas: <http://www.oannes.org.pe/seminario/02oceanografEstrda-Mareas.htm>
- Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales. (2009). Pronóstico de pleamares y bajamares costa pacífica colombiana 2010. En S. mareográfico, *Pronóstico de pleamares y bajamares costa pacífica colombiana 2010 (págs. 5-21)*. Bogotá: IDEAM.
- León, F. M. (febrero de 2006). *Variaciones del nivel del mar generadas por la alta presión atmosférica*. Obtenido de El efecto del barómetro invertido: <http://www.tiempo.com/ram/2352/el-efecto-del-barmetro-invertido/>
- Leyva, A. (1993). Colombia pacífico tomo I. En A. Leyva, & A. Leyva (Ed.), *Colombia pacífico tomo I (Vol. I, págs. 21-22)*. Bogotá: Fondo para la Protección del Medio Ambiente “José Celestino Mutis”.
- Malikov, I. (2001). *Determinación de las componentes de una onda de marea y aproximación de la onda en una línea externa de la ensenada de Tumaco*. Boletín Científico CCCP No. 8, 63-69.
- Orejarena, A. (2013). *Metodología para la determinación de la cota de inundación debido a eventos extremos en playas naturales*.

- Organización Hidrográfica Internacional. (2005). *Manual de hidrografía*. En O. H. Internacional, *Publicación C13* (Primera ed., págs. 259-274).
Mónaco: Bureau hidrográfico internacional.
- Otero Díaz, L. J. (2005). *Aplicación de un modelo hidrodinámico bidimensional para describir las corrientes y la propagación de la onda de marea en la bahía de Buenaventura*. *Boletín Científico CCCP No. 12*, 9-21.
- Pedlosky, J. (1987). *Geophysical Fluid Dynamics*. New York: Springer - Verlag.
- Ramírez Stout, O., & Candéla Pérez, J. (2003). *Respuesta del nivel del mar al forzamiento atmosférico en las costas del golfo de México*. Serie oceanológica No. 1, 77.
- Silva Rodríguez, E. A., & Orejarena Rondón, A. F. (2009). *Simulación numérica de marea meteorológica en el mar caribe colombiano*. Trabajo de grado. Bucaramanga: Universidad industrial de Santander.
- Tejada Vélez, C. E., Devis Morales, A., García Hansen, I., Malikov, I., & Villegas Bolaños, N. L. (2003). *Compilación oceanográfica de la cuenca pacífica colombiana*. En C. C. Colombiano, *Compilación oceanográfica de la cuenca pacífica colombiana* (págs. 7-29). San Andrés de Tumaco: DIMAR.
- Torres Parra, R. R., Gómez López, J. C., & Afanador Franco, F. (2006). *Variación del nivel medio del mar en el caribe colombiano*. *Boletín científico CIOH No. 24*, 64-72.
- Wenzel, M., & Schröter, J. (2010). *Reconstruction of regional mean sea level anomalies from tide gauges using neural networks*. JGR.



La tradición de las gaitas, vinculada desde el año 1938.



Espada del Oficial Naval.
