

Evaluación de las principales características de la onda de marea al interior del golfo de Urabá

Evaluation of the main characteristics of the tidal wave inside the Gulf of Uraba

Recibido: 2021-08-03 / Aceptado: 2021-11-11

Ricardo Quintana Barranco¹; Manuela Higueta²; Luisa Fernanda Gutiérrez Acosta³; Vladimir Giovanni Toro Valencia⁴

DOI: 10.26640/22159045.2021.574

CITAR COMO:

Quintana, R.; Higueta, M.; Gutiérrez, L.; Toro, V. (2021). Evaluación de las principales características de la onda de marea al interior del golfo de Urabá. *Bol. Cient. CIOH*; 40(2): 35-46. ISSN impreso 0120-0542 e ISSN en línea 2215-9045. DOI: 10.26640/22159045.2021.574

RESUMEN

La onda de marea al ingresar a estuarios puede verse modificada por aspectos morfológicos y meteorológicos. El entendimiento del nivel del mar generado por la marea contribuye a la identificación de posibles zonas de inundación ante aumentos progresivos de dicho nivel asociados al cambio climático y/o cambios súbitos por efectos meteorológicos. El golfo de Urabá es un estuario caracterizado por tener un complejo sistema hidrodinámico afectado por agentes oceanográficos, atmosféricos y la presencia de la desembocadura del río Atrato; entre los agentes oceanográficos se encuentra la onda de marea. Con el fin de caracterizar la marea al interior del golfo de Urabá se analizaron registros de mareógrafos ubicados en el distrito de Turbo (Estación Guardacostas) y el municipio de Acandí (bahía de Sapzurro). Para la determinación de la marea astronómica se utilizó el análisis espectral con el cual se obtuvieron las amplitudes, periodos y fases asociadas a las constituyentes de mareas. Las constituyentes de marea con mayores amplitudes para ambos mareógrafos fueron K_1 y M_2 . Se identificó el comportamiento de la marea como mixta principalmente semidiurna. Para la caracterización de la marea meteorológica se usó la función de distribución de probabilidad, y usando datos de reanálisis de la presión atmosférica y campos de vientos provenientes de la plataforma ERA5 se evaluó la correlación que tienen estas dos variables frente a las variaciones del nivel del mar, cuyo carácter es irregular. Los resultados sugieren que un porcentaje importante de las variaciones del nivel del mar están asociadas a efectos locales como morfología del golfo (batimetría, forma del golfo).

PALABRAS CLAVES: golfo de Urabá, marea astronómica, marea meteorológica, armónicos de marea.

ABSTRACT

The tidal wave when entering to the estuaries can be modified by morphological and meteorological aspects. Understanding the sea level generated by the tide contributes to the identification of possible flood zones in the event of progressive increases in this sea level associated with climate change and / or sudden changes due to meteorological effects. The Gulf of Uraba is an estuary characterized by having a complex hydrodynamic system affected by oceanographic and atmospheric agents and the presence of the mouth of the Atrato River. Among the oceanographic is the tidal wave. In order to characterize the tide inside the Gulf of Uraba, tide-gauge records located in the district of Turbo (Coast Guard Station) and the municipality of Acandí (Bahía de Sapzurro) were analyzed. Spectral analysis was used to determine the astronomical tide, with which the amplitudes, periods and phases associated with the tidal constituents were obtained. The tidal constituents with the highest amplitudes for both tide gauges were K_1 and M_2 . The behavior of the tide was identified as mixed, mainly semi-diurnal. For the characterization of the meteorological tide, the probability distribution function was used and using data from the reanalysis of atmospheric pressure and wind fields from the ERA5 platform, the correlation of these two variables against variations in the sea level was evaluated. The results suggest that an important percentage of the sea level variations are associated with local effects such as gulf morphology (bathymetry, gulf shape).

KEYWORDS: Gulf of Uraba, astronomical tide, meteorological tide, tidal harmonics.

¹ Orcid: 0000-0002-3004-7390. Universidad de Antioquia, Sede de Ciencias del Mar. Correo electrónico: ricardo.quintana@udea.edu.co

² Orcid: 0000-0001-8349-2271. Universidad de Antioquia, Sede de Ciencias del Mar. Correo electrónico: manuela.higueta@udea.edu.co

³ Orcid: 0000-0001-9673-6722. Universidad de Antioquia, Sede de Ciencias del Mar. Correo electrónico: lufgutierrezac@unal.edu.co

⁴ Orcid: 0000-0003-4398-9472. Universidad de Antioquia. Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental (GIGA). Correo electrónico: vladimir.toro@udea.edu.co

INTRODUCCIÓN

La caracterización adecuada de la onda de marea permite avanzar en el entendimiento de procesos hidrodinámicos principalmente al interior de estuarios. Estos sitios son importantes dado que en su interior se desarrollan proyectos portuarios y en sus diseños es fundamental conocer la onda de marea, y en el largo plazo el ascenso del nivel del mar (Fierro, Bravo y Castillo, 2000). Estudios realizados muestran que la forma de la costa y del fondo de la zona estuarina pueden modificar la onda de marea, principalmente su amplitud, y esto a su vez afectar directamente procesos portuarios, pesqueros, socioeconómicos, dinámicos y costeros (Otero, 2004).

En Colombia se ha caracterizado el comportamiento de la marea utilizando instrumentos ubicados principalmente en pequeñas bahías; en el Caribe colombiano en Cartagena, Puerto Bolívar y Santa Marta (Malikov, 2010); mientras en el Pacífico colombiano se han realizado en Tumaco, Juanchaco y Buenaventura (Otero, 2004; Malikov, 2010). De las bahías mencionadas, Buenaventura es la que tiene una distancia mayor entre su entrada y la parte interior (aprox. 20 km). Otero (2004), muestra como en esta bahía la amplitud de la onda se incrementó en un 10 %, y se presentaron retardos de hasta 20 min para instantes de pleamar y bajamar entre La Bocana y punta Soldado. En el caso del golfo de Urabá, Hernández y Romaña (2018), utilizando registros del nivel del mar de Sapzurro sugieren que podría existir un desfase temporal de 90 minutos entre la entrada del golfo y la parte interior. Lo anterior evidencia que para sitios con las dimensiones de Buenaventura y Urabá la fricción del fondo y su morfología podrían influenciar estos desfases temporales.

En general, instituciones como el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) y la Dirección General Marítima (Dimar), que tienen a cargo mareógrafos, hacen pronósticos de la onda de marea para numerosos lugares en el Caribe y en el Pacífico. En el caso del golfo de Urabá existen algunos registros de estaciones en el exterior de este (Sapzurro), y en su interior (30 km al sur de su entrada) solo se instaló un mareógrafo a finales del año 2017.

Las variaciones periódicas del nivel del mar están moduladas por el efecto combinado de la marea astronómica y la marea meteorológica. La primera depende de la fuerza de atracción

gravitacional entre la Tierra, el Sol y la Luna. Y la segunda depende de la variación de la presión atmosférica, el esfuerzo tangencial del viento sobre la superficie del mar, el contorno batimétrico, la morfología de la línea de costa y la descarga de los ríos (Otero, 2004). La marea astronómica, al estar influenciada por la fuerza gravitacional de cuerpos celestes, es un fenómeno predecible. En cambio, la marea meteorológica tiene un carácter aleatorio, debido a que los fenómenos naturales que intervienen en ella no son del todo determinísticos.

Una manera de caracterizar la marea astronómica es por medio de sus constituyentes armónicas. Estas constituyentes son componentes constantes periódicas por medio de las cuales se puede expresar el forzamiento generador de la marea (García, Palacio y García, 2011). Estos son valores relacionados con la fuerza gravitacional combinada de la Tierra, el Sol y la Luna, y la rotación y traslación de la Tierra. Los efectos gravitacionales combinados y los movimientos mencionados le imprimen una oscilación específica a la superficie del mar (Gutiérrez, 2011). Un método utilizado para la cuantificación de las constituyentes armónicas de la marea astronómica es la transformada de Fourier. Este análisis permite identificar sobre una banda temporal o de frecuencias las amplitudes y fases de una señal conformada por movimientos regulares.

Con el fin de calcular las constituyentes de la marea astronómica en el golfo de Urabá se utilizaron mediciones de los mareógrafos instalados en las estaciones de Guardacostas del Distrito de Turbo y Sapzurro. La marea meteorológica se calculó por medio de funciones de densidad de probabilidad con las cuales se identificaron las fluctuaciones asociadas a efectos locales.

El comportamiento del nivel del mar de carácter irregular ha sido cuantificado a través del residuo meteorológico calculado como la resta entre la marea astronómica y las mediciones in situ del nivel del mar (Torres, Otero, Afanador y Marriaga, 2008). Para determinar las potenciales causas de las variaciones del nivel del mar, cuyo origen no sea astronómico, a través de datos con resolución de presión atmosférica y campos de vientos se aplicó el coeficiente de correlación (R^2) entre estas variables y las variaciones del nivel del mar de la marea meteorológica para identificar posibles dependencias.

ÁREA DE ESTUDIO

El golfo de Urabá se encuentra ubicado al suroeste del mar Caribe, cerca de la frontera entre Colombia y Panamá (Fig. 1). Presenta una forma alargada en la orientación sur-norte, con una longitud aproximada de 80 km, mientras que en su orientación este-oeste presenta anchos entre 15 km y 40 km. Su batimetría es relativamente somera, con una profundidad promedio de 30 m y valores máximos de 70 m en la frontera norte (Restrepo y López, 2008). En su costado oeste las pendientes de la batimetría son abruptas y en la costa opuesta las pendientes son suaves (Chevillot, Molina, Giraldo y Molina, 1993).

La hidrodinámica del golfo está altamente influenciada por la circulación oceánica regional, el oleaje y el régimen de vientos, con base en las dos épocas climáticas de la zona seca y húmeda (Toro, Mosquera, Barrientos y Bedoya, 2019). En cada una de las épocas se presentan comportamientos diferentes en términos de intensidad y frecuencia sobre los fenómenos hidrodinámicos. De la marea del golfo se han aproximado sus características por medio del análisis de datos mareográficos cercanos como Sapzurro, así como por medio de modelos globales (Hoyos, Alejandre y Tobón, 2008). Estos autores sugieren que la zona tiene una onda de marea semidiurna mixta con valores máximos entre ± 50 cm.

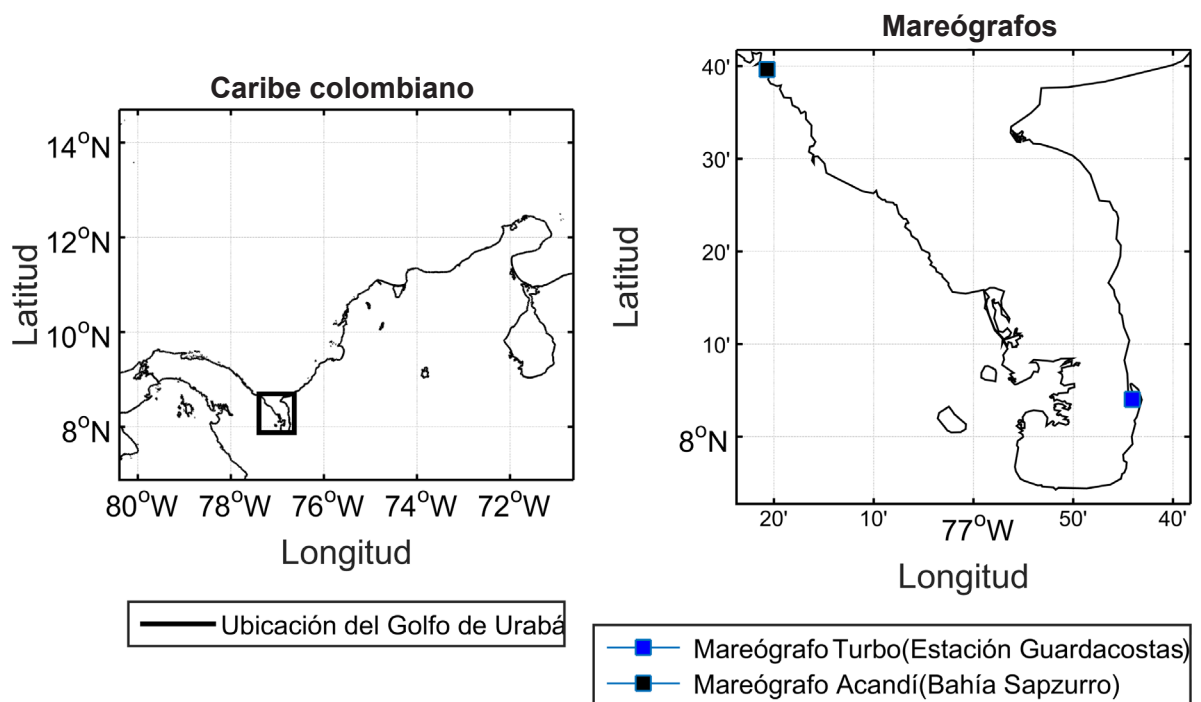


Figura 1. Zona de estudio y ubicación de los mareógrafos.

METODOLOGÍA

En esta investigación se emplearon registros del nivel del mar de la plataforma www.ioc-sealevelmonitoring.org/, en la cual se presentan datos del nivel del mar para Sapzurro, municipio de Acandí (izquierda, cuadro negro en la Fig. 1). El otro registro corresponde a una serie de marea suministrada por la Dimar de la Estación Guardacostas del Distrito de Turbo (derecha, cuadro azul en la Fig. 1). Ambos registros corresponden a mareógrafos que registran el continuo cambio de la columna de agua. Los

registros analizados del mareógrafo ubicado en Turbo son del 18 de diciembre de 2017 hasta el 28 de febrero de 2019. En el caso de Sapzurro se analizó información desde el 20 de junio de 2017 hasta el 7 de febrero de 2019. Ambos mareógrafos tenían datos con una resolución de 60 segundos. En total se analizaron 437 y 597 días de registros ininterrumpidos del nivel del mar para Turbo y Sapzurro, respectivamente.

Debido a que la variación del nivel del mar está conformada por la combinación de la marea astronómica y la marea meteorológica,

se emplearon distintos métodos para su identificación. En el caso de la marea astronómica se calcularon las constituyentes armónicas mediante el análisis espectral de Fourier. Aunque se calcularon todas las constituyentes, solo se escogieron las ocho más representativas. Se empleó el coeficiente de correlación (R^2) para determinar la bondad del análisis espectral entre los registros del nivel del mar analizados y la marea calculada a partir de los armónicos seleccionados.

El método de Fourier tiene un fundamento matemático que solo emplea algunas ecuaciones para su solución. Con este método se obtuvieron la frecuencia, amplitud y fase. Las componentes se identifican con una letra (o letras) y un subíndice que identifican el efecto predominante y el número de oscilaciones durante un día. Por ejemplo, la componente armónica M_2 representa el efecto de rotación de la Luna (Moon) con respecto a la Tierra con dos oscilaciones por día (semidiurna). La componente armónica S_2 describe el efecto

rotación del Sol (*Sun*) respecto a la Tierra y dos oscilaciones por día. De forma similar es posible definir componentes para describir la trayectoria elíptica de la Luna N_2 , los efectos de la declinación de la Luna K_2 y el Sol P_1 , entre otros.

La transformada de Fourier es una función matemática que descompone una señal en múltiples ondas con amplitudes, fases y periodos diferentes que sumados reproducen el registro original. De esta forma una serie de tiempo se puede analizar mediante la individualización de ondas, evitando la interferencia contenida en ella. Los valores de amplitud y fase que se obtienen a través la transformada de Fourier están asociados a una banda de frecuencias donde se encuentra la mayor energía de la señal. Estos valores permiten determinar los armónicos más influyentes que conforma la señal original.

La transformada de Fourier $F\{x(t)\}$ se utiliza en señales $x(t)$ mediante la siguiente ecuación definida para el dominio del tiempo:

$$F\{x(t)\} = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) e^{-2\pi i f t} dt \quad \text{(Ecu. 1)}$$

Donde, t es la variación del tiempo en que fueron tomados los registros de la serie, f corresponde a la banda de frecuencias sobre la cual se hallarán las constituyentes armónicas, T es el tiempo total sobre lo cual se tiene para el registro de la señal.

Una vez aplicada la transformada de Fourier, su solución se obtiene en el dominio de los números imaginarios, en donde también la ecuación (1) se puede reescribir mediante identidades trigonométricas así:

$$e^{-2\pi i f t} = \cos(2\pi f t) - i \sin(2\pi f t) \quad \text{(Ecu. 2)}$$

El factor $2\pi f$ puede ser reemplazado por la frecuencia angular ω , y de esta forma la

transformada de Fourier queda reescrita de la siguiente forma:

$$F\{x(t)\} = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) [\cos(\omega_n t) - i \sin(\omega_n t)] dt \quad \text{(Ecu. 3)}$$

La ecuación (3) es de datos discretos, y siendo una sumatoria de senos y cosenos pueden ser

calculada de ella los coeficientes de Fourier (a_n y b_n) usando las siguientes transformaciones:

$$a_n = \frac{2}{T} \sum_{i=0}^n x(t) \cos(\omega_n t) \Delta t \quad \text{(Ecu. 4)}$$

$$b_n = \frac{2}{T} \sum_{i=0}^n x(t) \sin(\omega_n t) \Delta t \quad \text{(Ecu. 5)}$$

Donde, Δt es la resolución temporal con la que cuentan el registro de la señal. De los

coeficientes de Fourier podemos obtener los valores de amplitud (A) y fase (φ) del espectro:

$$A = \sqrt{(a_n)^2 + (b_n)^2} \quad \text{(Ecu. 6)}$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{-b_n}{a_n} \right) \quad \text{(Ecu. 7)}$$

Usando los valores de amplitud y de fase de las ecuaciones es posible reconstruir la serie original usando la metodología

propuesta por Dronkers (1964), que resuelve la marea astronómica de la siguiente manera:

$$M_a(t) = A_0 + \sum_{i=1}^n A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i) \quad \text{(Ecu. 8)}$$

Donde, M_a es el valor de la marea astronómica, A_0 es la amplitud del nivel de referencia, A_i es la amplitud de la onda i , ω_i es la frecuencia de la componente armónica i , t es el instante en que se calcula la marea, φ_i es la fase de la onda i , y n es el número de armónicos considerados.

probabilidad de ocurrencia (frecuencia relativa) y probabilidad de acumulada (frecuencia acumulada). Para identificar el efecto de las algunas variables atmosféricas sobre la marea meteorológica se emplearon series de la presión atmosférica y, velocidad y dirección del viento, obtenidas de la base de datos de la plataforma ERA5 con resolución temporal horaria para evaluar la relación entre las oscilaciones del nivel del mar de la marea meteorológica y las variables mencionadas anteriormente.

La marea meteorológica agrupa todas las oscilaciones del nivel del mar cuya causa no proviene de las fuerzas provocadas por la interacción gravitacional entre el Sol, la Luna y la Tierra. Estas oscilaciones se caracterizan por tener un comportamiento irregular de manera que en algunos casos es complejo determinar su oscilación alrededor del nivel del mar. La marea meteorológica se calculó como la diferencia entre la serie de marea original y la astronómica. A partir de este resultado se construyó una función de distribución de probabilidad utilizando doce intervalos. Sobre cada uno de ellos se calculó su

En cuanto a la clasificación de las mareas, el criterio más empleado es por medio del factor de forma o factor de Courtier (f) (GIOC, 2002). Este es el resultado del cociente entre la suma de las amplitudes de las componentes K_1 y O_1 y la suma de las amplitudes de las componentes M_2 y S_2 .

$$\text{factor de Courtier} = \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2} \quad \text{(Ecu. 9)}$$

Donde, K_1, O_1 , son las amplitudes asociadas a efectos de la declinación del plano formado por la Luna y el Sol, y la declinación del plano formado por la Luna y la Tierra, respectivamente. De acuerdo con el valor del factor de Courtier la marea se puede clasificar de la siguiente forma:

- 0 – 0.25: marea semidiurna
- 0.25 – 1.5: marea mixta, predominantemente semidiurna

- 1.5 – 3.0: marea mixta, predominantemente diurna
- > 3.0: marea diurna

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Usando el análisis espectral en las series de marea de Turbo y Sapzurro se obtuvieron sus componentes armónicas (Fig. 2). Se observan picos con amplitudes importantes a las 12 h y 24 h, respectivamente.

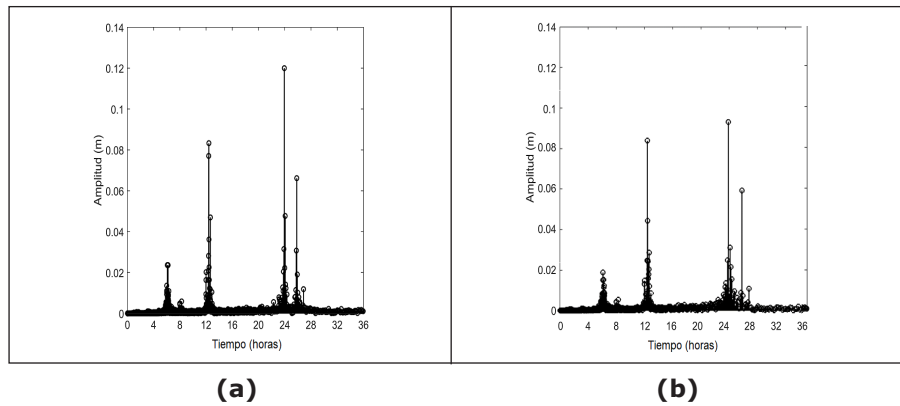


Figura 2. Espectro en función de la amplitud (m) y tiempo en horas. **(a)** Sapzurro; **(b)** Turbo.

Se calcularon los periodos (horas), amplitudes (metros) y fases (grados) de cada una de ellas a través del análisis espectral de la transformada de Fourier (Tabla 1). De estas se seleccionaron aquellas que tuvieran valores de amplitud (m) superiores a 1 cm. Con esta restricción se escogieron ocho componentes

a las cuales se les asoció un armónico por medio de su periodo. En ambos mareógrafos se encontró que tres armónicos de carácter diurno (K_1, O_1 y P_1) y cuatro armónicos de carácter semidiurno (M_2, K_2, S_2 y N_2) son los que gobiernan el comportamiento de la marea.

Tabla 1. Armónicos, periodo (horas), amplitud (metros) y fase (grados). **(a)** Estación Sapzurro; **(b)** Estación Turbo.

| Armónico | Periodo (horas) | Amplitud (metros) | Fase (grados) |
|----------|-----------------|-------------------|---------------|
| K_1 | 23.9 | 0.12 | 323.4 |
| M_2 | 12.4 | 0.08 | 63.0 |
| K_2 | 11.9 | 0.07 | 35.0 |
| O_1 | 26.0 | 0.06 | 243.6 |

| Armónico | Periodo (horas) | Amplitud (metros) | Fase (grados) |
|----------|-----------------|-------------------|---------------|
| K_1 | 23.9 | 0.09 | 137.9 |
| M_2 | 12.4 | 0.08 | 123.8 |
| O_1 | 25.8 | 0.06 | 309.5 |
| S_2 | 12.0 | 0.04 | 24.6 |

| Armónico | Periodo (horas) | Amplitud (metros) | Fase (grados) |
|----------|-----------------|-------------------|---------------|
| N_2 | 12.7 | 0.04 | 70.8 |
| S_2 | 12.0 | 0.04 | 267 |
| Q_1 | 26.9 | 0.03 | 243.8 |
| P_1 | 24.1 | 0.02 | 249 |

(a)

| Armónico | Periodo (horas) | Amplitud (metros) | Fase (grados) |
|----------|-----------------|-------------------|---------------|
| P_1 | 24.1 | 0.03 | 66.8 |
| K_2 | 11.9 | 0.03 | 199.5 |
| N_2 | 12.7 | 0.02 | 224.7 |
| Q_1 | 26.8 | 0.02 | 18.5 |

(b)

Las amplitudes estuvieron entre 0.12 m y 0.02 m, los periodos variaron entre 12 h y 27 h. Los resultados muestran cómo los armónicos K_1 y M_2 con periodicidad de 23.9 h y 12.4 horas, respectivamente, son aquellos que aportan mayor amplitud al nivel del mar. Con el fin de determinar la categorización de la marea se realizó el cálculo del factor Courtier (f) para ambos mareógrafos, utilizando los valores de las amplitudes de los armónicos K_1, O_1, M_2 y S_2 . Estos armónicos tienen valores similares, lo cual sugiere que el rango

mareal en todo el golfo es aproximadamente igual (Tabla 2). Los valores de f obtenidos para ambos mareógrafos son similares y su promedio es 1.3. Por lo tanto y para ambos sitios se define que la marea tiene un comportamiento mixto y predominantemente semidiurna. Eso quiere decir que se tiene dos mareas altas y dos mareas bajas. Con la particularidad de que dos mareas altas o bajas consecutivas no siempre tendrán los mismos valores de amplitud.

Tabla 2. Categorización de la marea en el golfo de Urabá usando el factor de Courtier (f).

| Mareógrafo | K_1 | O_1 | M_2 | S_2 | f | Clasificación de marea |
|------------|-------|-------|-------|-------|------|-------------------------------------------|
| Sapzurro | 0.12 | 0.06 | 0.08 | 0.04 | 1.5 | Marea mixta, predominantemente semidiurna |
| Turbo | 0.09 | 0.06 | 0.08 | 0.04 | 1.25 | |

Para evaluar la bondad del análisis espectral se realizó una reconstrucción de la onda de marea con los ocho armónicos seleccionados para cada uno de los mareógrafos, a esta se le llamo marea astronómica. Se calculó el coeficiente de correlación (R^2) y el error cuadrático medio (RMSE) en tre la marea medida por los mareógrafos y la marea astronómica. Los resultados muestran valores de R^2 de 0.84 y 0.92, de 0.06 y 0.07 en RMSE Turbo y Sapzurro, respectivamente (Fig. 3). En el caso del mareógrafo de Turbo los resultados sugieren

que factores locales como la batimetría, la forma de la costa, el régimen de vientos y el oleaje podrían estar afectando la variación en el nivel del mar al interior del golfo. Por el contrario, en el caso de Sapzurro se observa un mejor ajuste comparado con Turbo al tener variaciones del nivel menores al 10 %. En este caso, debido a que el mareógrafo se encuentra ubicado cerca a la boca del golfo, los efectos locales mencionados no tendrían una afectación importante en los valores del nivel del mar.

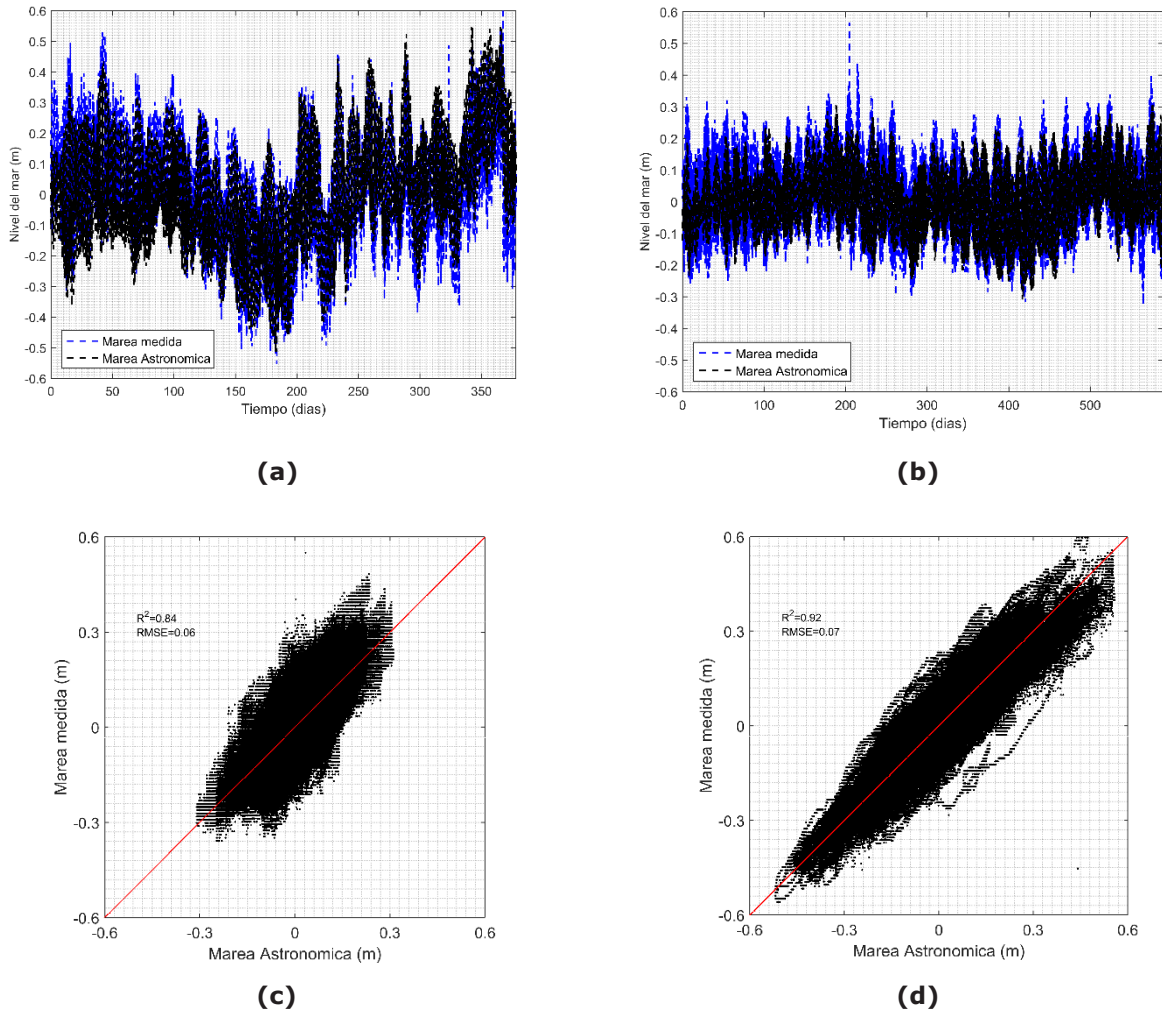
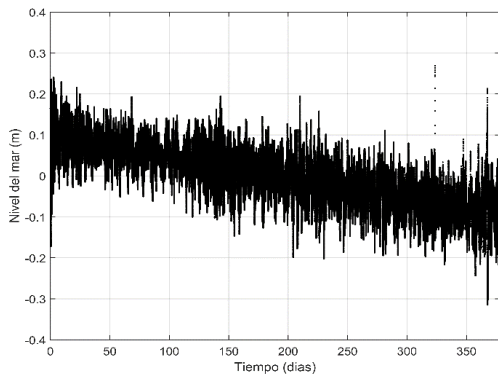


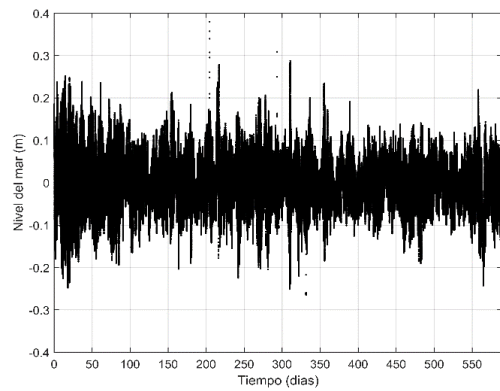
Figura 3. Comparación entre la marea medida y la astronómica: Turbo (izq.); Sapzurro (der.) **(a)** y **(b)** Series de datos, marea medida (línea negra), marea astronómica (azul). **(c)** y **(d)** valores de R^2 , RMSE.

La marea meteorológica fue calculada como la diferencia entre la marea medida y la marea astronómica (figuras 4a y 4b). Las distribuciones de las series de datos de ambos mareógrafos se aproximan a una función normal con media centrada en cero (figuras 4c y 4d). Utilizando doce

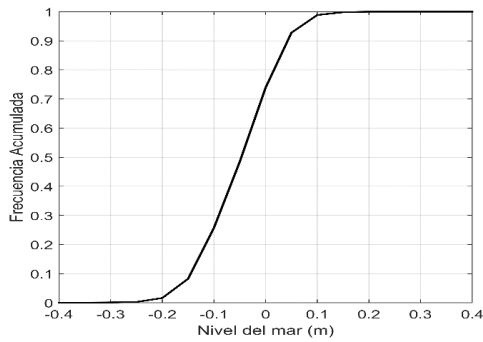
intervalos sobre la distribución se obtuvieron que para Turbo y Sapzurro el nivel del mar, debido a aspectos meteorológicos, varía en un intervalo entre ± 0.05 m con una frecuencia máxima de ocurrencia de 25 % y 30 %, aproximadamente, para Turbo y Sapzurro, respectivamente.



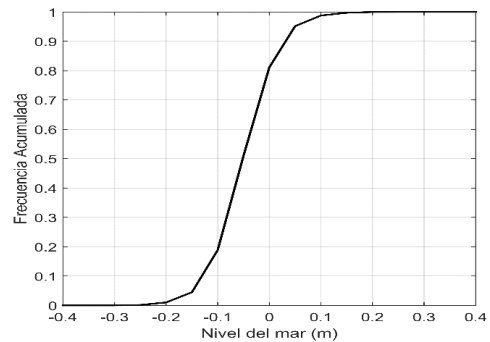
(a)



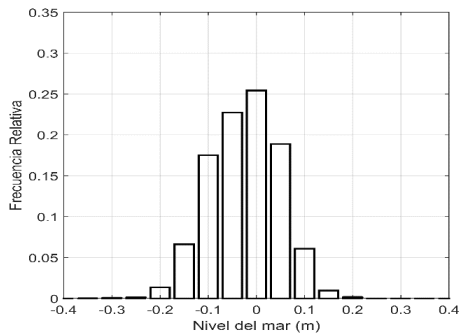
(b)



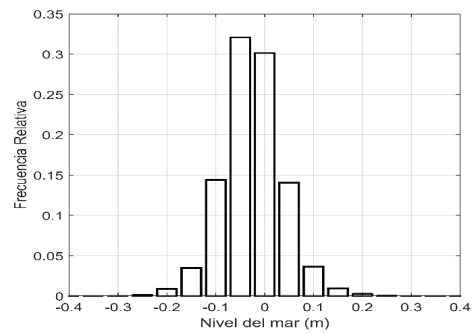
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4. Marea meteorológica: Turbo (izq.); Sapzurro (der.). **(a)** y **(b)** series de tiempo. **(c)** y **(d)** función de distribución de probabilidad. **(e)** y **(f)** frecuencia relativa en función del nivel del mar.

Los valores del nivel del mar de Turbo presentan mayor dispersión que los registrados para el sector de Sapzurro; esto sugiere que en el interior del golfo de Urabá la marea se encuentra más sujeta a la influencia de factores locales (morfológicos, la descarga del río Atrato y las variaciones de las condiciones atmosféricas). Los resultados obtenidos del cálculo de los parámetros R^2 y RMSE demuestran que para Sapzurro el cálculo de la marea astronómica ofrece una mayor exactitud sobre el nivel del mar de este sector. El comportamiento del nivel del mar caracterizado y el cálculo de las principales constituyentes de la marea astronómica en

este trabajo, siendo el constituyente K_1 el más influyente para la marea, coinciden con estudios realizados por el Ideam (Malikov, 2010).

Al evaluar el coeficiente de correlación (R^2) entre la marea meteorológica y la presión atmosférica se evidencia que para ambas series su valor es de -0.02 (Fig. 5). La naturaleza de este valor negativo corresponde al efecto de la disminución en el nivel medio del mar frente a incrementos de la presión atmosférica; no obstante, la magnitud de este valor refleja una tenue relación entre el comportamiento de la marea meteorológica y la presión atmosférica.

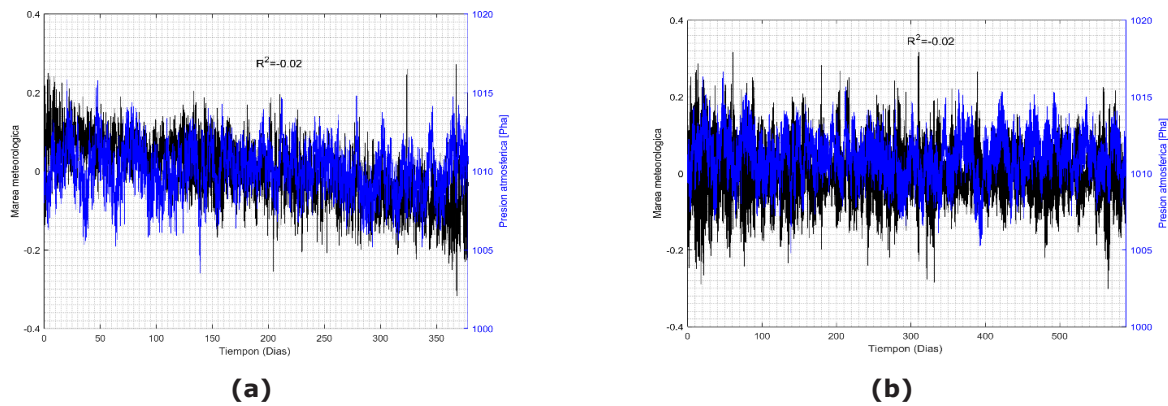


Figura 5. Coeficiente de correlación entre la marea meteorológica y la presión atmosférica: Turbo (izq.); Sapzurro (der.). (a) y (b) series de tiempo, marea meteorológica (línea negra), presión atmosférica (línea azul).

Los campos de vientos de reanálisis de la plataforma ERA5 en el golfo Urabá para el periodo correspondiente al tiempo de muestreo de ambos mareógrafos contemplan que para la zona norte del golfo la dirección predominante del viento es el norte, como es el caso de la bahía de Sapzurro; en cambio, para el sector de

Turbo predomina la dirección sur-sureste (Fig. 6). El cálculo del coeficiente de correlación para las 16 direcciones principales denota valores que no demuestran una influencia de los campos de vientos sobre las variaciones de la marea meteorológica (Tabla 3).

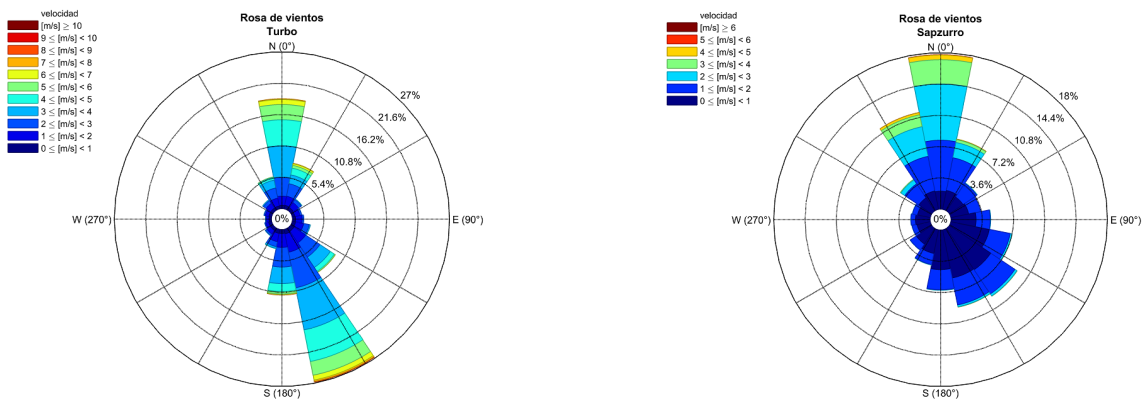


Figura 6. Rosa de vientos: Turbo (izq.); Sapzurro (der.).

Tabla 3. Dirección del viento, probabilidad de ocurrencia, velocidad promedio (m/s) y coeficiente de correlación (R^2) entre la marea meteorológica y la velocidad del viento. **(a)** Estación Turbo; **(b)** Estación Sapzurro.

| Dirección | Probabilidad | Velocidad promedio (m/s) | Coefficiente de correlación (R^2) | Dirección | Probabilidad | Velocidad promedio (m/s) | Coefficiente de correlación (R^2) |
|-----------|--------------|--------------------------|---------------------------------------|-----------|--------------|--------------------------|---------------------------------------|
| N | 0.19 | 3.74 | 0.07 | N | 0.18 | 2.15 | -0.01 |
| NNE | 0.08 | 3.01 | 0.13 | NNE | 0.08 | 1.55 | -0.04 |
| NE | 0.02 | 1.67 | -0.09 | NE | 0.04 | 1.02 | -0.05 |
| ENE | 0.02 | 1.43 | -0.15 | ENE | 0.04 | 0.90 | -0.07 |
| E | 0.02 | 1.38 | 0.01 | E | 0.05 | 0.89 | -0.11 |
| ESE | 0.03 | 1.75 | -0.20 | ESE | 0.07 | 0.93 | -0.06 |
| SE | 0.09 | 2.58 | -0.17 | SE | 0.09 | 0.96 | -0.02 |
| SSE | 0.27 | 3.48 | -0.12 | SSE | 0.09 | 0.95 | 0.01 |
| S | 0.11 | 2.85 | -0.02 | S | 0.07 | 0.87 | -0.01 |
| SSW | 0.03 | 1.78 | -0.17 | SSW | 0.04 | 0.85 | -0.02 |
| SW | 0.02 | 1.47 | -0.01 | SW | 0.03 | 0.82 | -0.03 |
| WSW | 0.01 | 1.27 | -0.05 | WSW | 0.02 | 0.79 | -0.11 |
| W | 0.01 | 1.37 | 0.08 | W | 0.02 | 0.75 | -0.06 |
| WNW | 0.01 | 1.35 | -0.03 | WNW | 0.02 | 0.83 | 0.02 |
| NW | 0.02 | 1.68 | -0.16 | NW | 0.04 | 1.24 | -0.16 |
| NNW | 0.06 | 2.53 | 0.13 | NNW | 0.11 | 1.94 | -0.10 |

(a)

(b)

Las diferentes direcciones del viento correlacionadas con la marea meteorológica evidencian que para las series analizadas el efecto que puede causar el esfuerzo o empuje del viento sobre la superficie del mar no expone sobreelevaciones causadas por esta interacción.

Al evaluar la correlación entre la marea meteorológica, la presión atmosférica y los campos de vientos diferenciados en sus direcciones, se contempla que para las dos series del nivel del mar no se evidencian marejadas

producto de eventos atmosféricos extremos en la zona de estudio durante el tiempo de muestreo de la marea.

CONCLUSIONES

La variación de la marea en el golfo de Urabá es de ± 50 cm respecto al nivel medio del mar. Los resultados del análisis de la descomposición de armónicos por medio de la transformada de Fourier demuestran que para el golfo de Urabá los armónicos K_1 y M_2 son los que mayor

influencia poseen para la marea astronómica. El comportamiento de la marea obtenida es marea mixta, predominantemente semidiurna.

El análisis de los campos de vientos y la presión atmosférica, y su relación con la marea meteorológica demuestran una relación débil entre estas variables. Los resultados sugieren que a medida que la onda de marea se propaga desde la cuenca del Caribe colombiano hasta el golfo de Urabá y de allí hasta su interior, los cambios batimétricos, la forma de la línea de costa y la descarga de ríos podrían tener una influencia sobre el comportamiento de la marea.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue realizada gracias a la colaboración de la Dimar y de manera específica de la Capitanía de Puerto de Turbo. Los datos analizados de la Estación de Guardacostas de Turbo fueron proporcionados por la Dimar, mediante un convenio vigente con la Universidad de Antioquia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chevillot, P.; Molina A.; Giraldo L.; Molina C. (1993). Estudio geológico e hidrológico del golfo de Urabá. *Bol. Cient. CIOH*; 14: 79-89. <https://doi.org/10.26640/22159045.62>
- Dronkers, J. (1964). *Tidal computations in rivers and coastal waters*. North Holland: Amsterdam.
- Fierro, J.; Bravo, M.; Castillo, M. (2000). Caracterización del régimen de mareas y corrientes a lo largo del canal Moraleta (43°54' S - 45°17' S). *Ciencia y tecnología del mar*; 23: 3-14.
- García, F.; Palacio, C. y García, U. (2011). Constituyentes de marea en la bahía de Santa Marta, Colombia. *Dyna*, 78(167): 142-150.
- GIOC (2002). *Documento de referencia. Dinámicas*. Volumen I. Cantabria, España: Universidad de Cantabria.
- Gutiérrez, F. (2011). Determinación del régimen medio y extremo del nivel del mar, en esteros y ríos con dinámica mareal en la bahía de Tumaco. *Bol. Cient. CIOH*; 29: 110-121. <https://doi.org/10.26640/22159045.234>
- Hernández, D.; Romaña, Y. (2018). *Patrones de circulación superficial entre los sistemas costeros de punta Las Vacas y bahía El Uno, Turbo, Antioquia*. Tesis de pregrado. Universidad de Antioquia, Colombia.
- Hoyos, I. C. R.; Alejandre, T. R. F.; Tobón, C. A. P. (2008). Caracterización del patrón de circulación de las bahías Sapzurro y Capurganá mediante la implementación de un modelo hidrodinámico en dos dimensiones. *Bol. Cient. CIOH*; (26): 47-58. <https://doi.org/10.26640/22159045.176>
- Malikov, I. (2010). *Régimen de la marea en diferentes puntos de las costas colombianas*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). Bogotá, D.C.
- Otero, L. (2004). Determinación del régimen medio y extremal para el nivel del mar para la bahía de Buenaventura. *Bol. Cient. CCCP*; 11: 30-41. https://doi.org/10.26640/01213423.11.30_41
- Restrepo, J.; López, S. (2008). Morphodynamics of the Pacific and Caribbean deltas of Colombia, South America. *Journal of South American Earth Sciences*; 25: 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2007.09.002>
- Toro, V.; Mosquera, W.; Barrientos, N.; Bedoya, Y. (2019). Circulación oceánica del golfo de Urabá usando campos de viento de alta resolución temporal. *Bol. Cient. CIOH*; 38(2): 26-35. <https://doi.org/10.26640/22159045.2019.516>
- Torres, R.; Otero, L.; Afanador, F.; Marriaga, L. (2008). Comportamiento del nivel del mar en el litoral Caribe colombiano. *Bol. Cient. CIOH*; (26): 8-21. <https://doi.org/10.26640/22159045.172>