

Análisis de los modos propios de oscilación de la bahía de Cartagena (Colombia)

Analysis of the natural modes of oscillation of Cartagena Bay (Colombia)

Recibido: 2019-01-28 / Aceptado: 2019-04-17

José Manuel Calderón Burgos¹; Keiner José Ruiz Murillo²; Vladimir Giovanni Toro Valencia³

Calderón-Burgos, J.; Ruiz-Murillo, K.J.; Toro, V.G. (2019). Análisis de los modos propios de oscilación de la bahía de Cartagena (Colombia). *Bol. Cient. CIOH*, 38(1): 31-41. ISSN impreso 0120-0542 e ISSN en línea 2215-9045. <https://doi.org/10.26640/22159045.2019.515>.

RESUMEN

Las bahías naturales, al igual que los recintos portuarios, presentan modos de oscilación ante el forzamiento realizado por ondas incidentes. Cartagena es una de las bahías naturales del Caribe colombiano, importante por su desarrollo portuario y con características particulares tanto ambientales como físicas por causa de la desembocadura, en su interior, del canal del Dique y la comunicación con el mar Caribe. Son las dos entradas de la bahía con las que se comunica con el Caribe, las que permiten que algunos fenómenos físicos del océano modulen sus procesos físicos al interior. Uno de los procesos físicos que se presentan en las bahías naturales, principalmente en los puertos, y que tiene implicaciones negativas son los seiches. Los seiches son el producto de dos ondas largas que viajan en sentidos opuestos, y que, debido a su movimiento oscilatorio se superponen positivamente en algunos sitios causando cambios abruptos del nivel del mar. Teniendo en cuenta la importancia de este fenómeno dentro de las bahías naturales y sus posibles repercusiones en los puertos ubicados al interior, este trabajo determinó y analizó los modos naturales de oscilación de la bahía de Cartagena. Utilizando el modelo teórico de Merian (Wilson, 1972) se determinaron los primeros once modos de oscilación, los cuales se encontraron entre 0.04 horas a 0.81 horas. Con esta información se realizaron simulaciones numéricas con los modelos H2D (GIOC, 2001) y WAPO (Silva, 2010). Se propusieron doce casos donde se utilizaron los primeros cuatro modos de oscilación, amplitudes de 0.5 m, 1 m y 1.5 m, y la altura de onda de 1 m, 2 m y 3 m. A partir de los resultados obtenidos se identificaron 7 puntos al interior de la bahía, donde se observaron variaciones significativas del nivel del mar. Este análisis permitió evidenciar la presencia de seiches en los puntos 1, 2, 3, 4, 5, 7 y la reflexión de onda para el punto 6. Por otra parte, a pesar de las ventajas numéricas del modelo WAPO con respecto al modelo H2D, este no es adecuado para la propagación de ondas largas. Se realizó un análisis de la marea como agente forzador por medio de la técnica de la transformada de Fourier, los resultados sugieren que la marea no es un mecanismo generador de seiches al interior de la bahía de Cartagena.

PALABRAS CLAVE: bahía de Cartagena, modos propios de oscilación marea, transformada de Fourier, modelos numéricos.

ABSTRACT

Natural bays, like port enclosures, present oscillation modes due to forcing by incident waves. Cartagena is one of the natural bays of the Colombian Caribbean. It is important for its port development, with particular environmental and physical characteristics since the Bay has the El Dique Canal delta inside and two communications with the Caribbean Sea. The Bay entrances, with which it communicates with the Caribbean, allow that some physical phenomena from the ocean modulate its physical processes. One of those physical processes that occur naturally in bays and ports with negative implications are seiches. Seiches are the product of two long waves traveling in opposite directions, and which, due to their oscillatory motion, overlap positively at some places causing abrupt changes in sea level. Attending to the importance of this phenomenon within natural bays and its possible repercussions on Inland ports, this work determined and analyzed the natural modes of oscillation of Cartagena Bay. Using the Merian theoretical model (Wilson, 1972), the first 11 modes of oscillation were found between 0.04 to 0.81 hours. Numerical simulations were carried out with this information using H2D (GIOC, 2001) and WAPO (Silva, 2010) models. Twelve cases were proposed with the first 4 oscillation modes, amplitudes of 0.5, 1 and 1.5 meters, and wave height of 1.2 and 3 meters. Seven points were identified within the bay, where significant sea level variations were observed. This analysis revealed the presence of seiches at points 1, 2, 3, 4, 5, 7 and wave reflection for point 6. On the other hand, despite the numerical advantages of the WAPO with respect to the H2D model, this seems not suitable for long-wave propagation. An analysis of the tide as a forcing agent by means of the Fourier transform technique suggests that the astronomical tide is not a mechanism that generates seiches within the bay of Cartagena.

KEYWORDS: Cartagena Bay, Natural modes of oscillation Tide, Fourier transform, Numerical models.

1 Universidad de Antioquia (UdeA), Sede Ciencias del Mar. Correo electrónico: josemanuelcalel@gmail.com

2 Universidad de Antioquia (UdeA), Sede Ciencias del Mar. Correo electrónico: keiner.ruizm@gmail.com

3 Grupo GISMAC. Universidad de Antioquia (UdeA), Sede Ciencias del Mar. Correo electrónico: vladimir.toro@udea.edu.co

INTRODUCCIÓN

La propagación de energía en el océano se da principalmente debido a la presencia de ondas superficiales. Los mecanismos que se encargan de inyectar esta energía en el océano son fundamentalmente el esfuerzo del viento, las perturbaciones atmosféricas, sismos, la atracción planetaria, entre otros (GIOC, 2000). Estos mecanismos permiten la formación de ondas que se encargan de transportar la energía hacia las costas. Luego en la costa, la configuración batimétrica y morfológica modifica la intensidad de las ondas y por lo tanto su energía.

Las modificaciones en términos de disipación/concentración de energía de las ondas son más evidentes en lugares cerrados o semicerrados como las bahías (Palacio y Restrepo, 1999; Agudelo, Posada y Roldán, 2002).

Al interior de una bahía se puede producir la superposición de una onda incidente y una onda reflejada. Esta superposición produce una onda larga estacionaria, conocida como seiche, cuyo período y longitud de onda dependen de las características geométricas de la bahía. El conjunto de frecuencias propias de un seiche y sus estructuras modales asociadas son una propiedad característica de cada bahía y son independientes del mecanismo forzador (Rabinovich, 2009). En los puertos estas oscilaciones pueden producir movimientos verticales significativos y por lo tanto un aumento repentino del nivel del mar, acompañados por grandes movimientos horizontales. La combinación de movimientos en las dos direcciones puede producir rompimiento de las líneas de amarre y por lo tanto daños en las embarcaciones ancladas en el puerto (Rabinovich, 2009). La identificación de los períodos propios de oscilación de las bahías y los puertos es de gran importancia porque brinda información para entender la transferencia de energía proveniente del océano y establecer las zonas vulnerables. En Colombia se han realizado estudios de resonancia en sitios sobre el océano Pacífico, mas no para el mar Caribe.

En el Caribe colombiano se han realizado investigaciones principalmente en la bahía de Cartagena, debido a su desarrollo portuario y a la importancia de los procesos ambientales y físicos

que allí suceden. En esta bahía se han hecho estudios que han permitido caracterizar las variables oceanográficas mediante información *in situ* medida por un ADCP y una estación meteorología automática (Rueda, 2010); identificar el régimen de marea como el forzante que predomina en la bahía y la modulación del viento sobre la capa superficial (Rueda, Otero y Pierini, 2013); analizar las principales características de la circulación de las aguas, así como su influencia en el transporte de contaminantes flotantes (Lonin y Giraldo, 1995); describir los patrones de dispersión de la pluma turbia del canal del Dique mediante el análisis de imágenes SPOT y simulación numérica (Lonin, Parra, Andrade y Thomas, 2004). Estas investigaciones demuestran la importancia de la bahía en el ámbito ambiental, social y económico. Teniendo en cuenta lo anterior, es necesario conocer la respuesta de la bahía ante posibles eventos naturales que produzcan seiches en su interior.

Una de las herramientas que ha ayudado en análisis de la resonancia en bahías naturales son los modelos numéricos. Los modelos utilizados en estos estudios utilizan la solución de las ecuaciones de pendiente suave (MSP, por sus siglas en inglés) obtenida por Berkhoff (1972). La cual considera la variación suave del fondo en términos de una longitud de onda. En este sentido, Chen y Mei (1974) desarrollaron un modelo en elementos finitos para calcular ondas y sus fuerzas asociadas dentro de un puerto comunicado con mar abierto.

El objetivo de este trabajo fue analizar los modos propios de oscilación de la bahía de Cartagena mediante el uso de un modelo numérico con condiciones de frontera sintéticas. Con este fin se usó principalmente el modelo numérico H2D, el cual es un modelo bidimensional que resuelve las ecuaciones de onda larga en aguas someras y es comúnmente utilizado en estudios hidrodinámicos (GIOC, 2001). Este modelo se usó para propagar ondas sintéticas desde el Caribe hasta la bahía de Cartagena. Se utilizaron ondas de diferentes características con el fin de encontrar aquellas que fueran estadísticamente significativas en el cálculo de los modos propios de oscilación de la bahía de Cartagena. Los resultados del modelo numérico fueron alturas y períodos de onda que podrían generar resonancia

dentro de la bahía. Finalmente, se realizó un análisis de Fourier (Thomson y Emery, 2014) para un posible forzante natural, como lo es la marea, con el objetivo de identificar procesos naturales que pudieran inducir resonancia en la bahía.

MARCOTEÓRICO

Las bahías naturales pueden ser entendidas como la entrada del mar, océano o lago en el continente, formada generalmente por procesos erosivos. La forma de las bahías es de gran importancia ya que cumplen funciones de protección contra temporales, entre otras. Además son zonas muy productivas donde habitan innumerables especies de plantas y animales. Y, en algunos países, sus tierras alledañas tienen beneficios económicos para las comunidades locales mediante la explotación tradicional de sus recursos naturales (Agudelo, 2014).

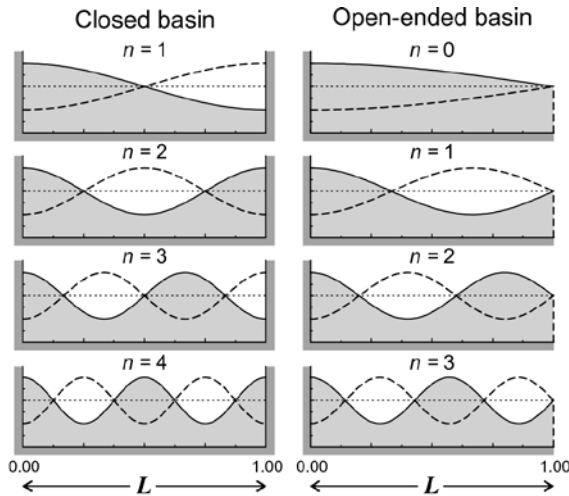


Figura 1. Perfiles de la superficie para los primeros cuatro modos de oscilación en cuencas rectangulares cerradas y abiertas de profundidad uniforme. [Tomado de Rabinovich 2009].

Un aspecto importante de la dinámica de las bahías son los períodos en los cuales oscila sin la influencia de un agente externo. Estos son conocidos como períodos propios o naturales de oscilación. En la Figura 1 se observa, por ejemplo, como el modo fundamental ($n = 1$) tiene una longitud de onda igual al doble de la longitud de la cuenca (L); una bahía que oscila

de esta manera se conoce como un oscilador de media onda. Otros modos (armónicos principales o fundamentales) tienen longitudes de onda iguales de la mitad, un tercio, un cuarto y así sucesivamente de la longitud de onda del modo fundamental (Rabinovich, 2009).

Cuando estas oscilaciones son producidas por un agente externo (forzador) y las longitudes de ondas coinciden con estos períodos naturales se forman los seiches. Un seiche es una onda estacionaria que afecta a un cuerpo de agua cerrado o semicerrado, y se considera como la suma de dos ondas de igual longitud de onda que viajan en sentidos opuestos. Los seiches inicialmente se observaron en lagos, pero también ocurren en bahías, estuarios o puertos (Rabinovich, 2009). El término seiche fue utilizado por primera vez en 1890 por François-Alphonse Forel, luego de realizar observaciones en el lago de Ginebra, en donde evidenció que el agua oscilaba. Estas oscilaciones tienen un período propio, el cual define las características de la onda dentro de las bahías. La frecuencia más alta que podemos obtener de nuestras observaciones se llama la frecuencia de Nyquist N y esta definida por:

$$N = \frac{1}{2\Delta t} \quad (1)$$

Entre los modelos utilizados se encuentran el H2D (GIOG, 2001) y WAPO (Silva, 2010), el modelo H2D resuelve las ecuaciones de continuidad y de momentum promediadas en vertical. Las ecuaciones de gobierno del modelo son: conservación de momentum (Ecu. 2) y conservación de la masa (Ecu. 3).

$$\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = -\vec{\nabla} p + \rho \vec{F} + \frac{\tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

Donde, ρ es la densidad del fluido, \vec{u} es el vector velocidad del fluido, p es la presión, \vec{F} son las fuerzas de volumen (gravedad), t es el tiempo y τ_{ij} son las tensiones tangenciales sobre el plano i en la dirección j .

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(UH)}{\partial x} + \frac{\partial(VH)}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

Donde, $H = h + \eta$, siendo h la profundidad del fondo con respecto al nivel del mar, η la sobrelevación de la columna de agua con respecto al nivel medio del mar y (U,V) las componentes de la velocidad media en las direcciones x, y , respectivamente.

Por otra parte, el modelo numérico WAPO está basado en la ecuación "mild slope" en su forma elíptica, obtenida por Berkhoff (1972). Luego, Massel (1993), Kirby y Dalrymple (1994) y Chamberlain y Porter (1995) la modificaron para utilizarla en geometrías complejas. En esta ecuación se supone un flujo incompresible, homogéneo e irrotacional sobre un fondo $h(x,y)$, siendo x e y las coordenadas cartesianas horizontales.

$$\nabla_h^2 \Phi + \frac{\partial \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (4)$$

$$-h(x,y) \leq z \leq 0$$

Donde $\Phi(x, y, z)$ es el potencial de velocidad que describe el flujo y z es la profundidad. El modelo resuelve el sistema de ecuaciones y calcula los potenciales de velocidades locales a lo largo y ancho de una malla computacional.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Modos libres de oscilación

Haciendo uso de la Ecu. 5 (Dean y Dalrymple, 1991) se obtienen cuatro primeros modos libres de oscilación (Tabla 1).

$$T_n = \frac{4L}{(2n + 1)\sqrt{gh}} \quad (5)$$

con $g = 10 \text{ m/s}$ y $n = 1, 2, 3$,

Tabla 1. Modos libres de oscilación de la bahía de Cartagena organizados en función del tiempo.

Modelo de oscilación	Período de oscilación		
	Segundos	Minutos	Horas
0	2 909.3	48.5	0.81
1	969.8	16.2	0.27
2	581.9	9.7	0.16
3	415.6	6.9	0.12

Los cuatro primeros períodos representan una onda larga, según la escala espacio-temporal de las ondas en el océano; se considera como onda larga aquella con un período mayor a 5 minutos (Agudelo, 2014).

Análisis del espectro de frecuencia

A partir de una serie de tiempo de elevación de marea del año 1961 en la bahía de Cartagena se calcula el espectro en frecuencias mediante análisis de Fourier. En el espectro de frecuencias (Fig. 2) se pueden observar los mayores valores de energía cercanos a $10^0 \frac{\text{m}^2}{\text{cph}}$ asociados a las componentes de la marea diurna (24 h) y semidiurna (12 h).

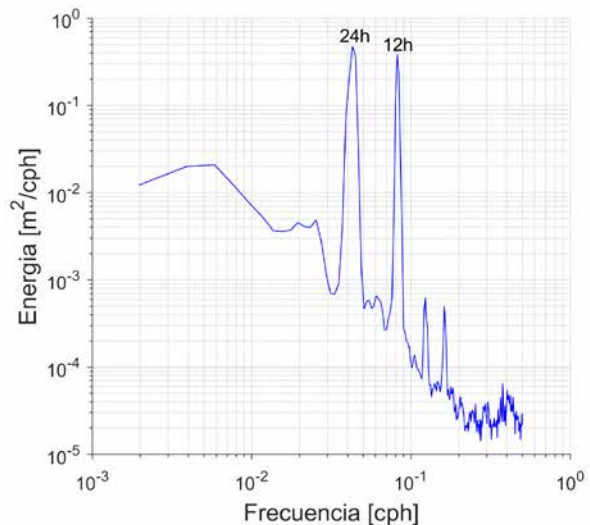


Figura 2. Espectro de frecuencias de la serie de datos de elevación demarea para el año 1961 en la bahía de Cartagena.

MODELACIÓN NUMÉRICA

Batimetría

La batimetría se muestra en la Figura 3. Las principales características de la malla de cálculo fueron definidas en función del cálculo de la longitud de onda (L) asociada al primer período (T) de oscilación obtenido teniendo en cuenta la profundidad en aguas someras $L = T(gh)^{\frac{1}{2}}$. Utilizando esta expresión se obtuvo una longitud de 25 km, el cual será el ancho máximo de la malla. Vale la pena notar que para la ejecución de los modelos HD2 y WAPO se utilizó la misma malla. En el primer caso se usó una única malla y con WAPO se usaron dos mallas anidadas, una para aguas profundas y otra para aguas someras.

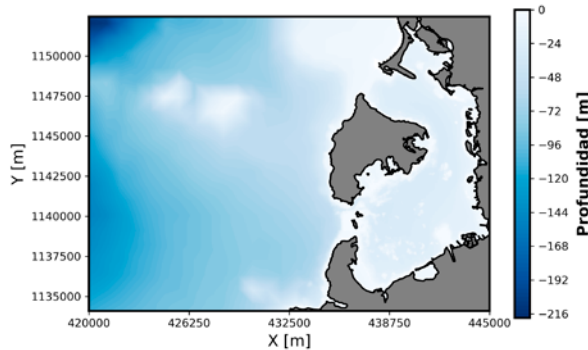


Figura 3. Batimetría de la bahía de Cartagena y zona del Caribe adyacente utilizada para la ejecución de los modelos numéricos.

Modelo H2D

Para este modelo se ejecutaron un total de doce casos. Los valores de períodos de oscilación y amplitud (altura) de onda se aprecian en la Tabla 2. Luego de realizar los experimentos numéricos, se identificaron los sitios con un aumento significativo respecto al nivel medio de mar (Fig. 4).

Con respecto al caso 1, los sitios en donde se presentó una amplificación considerable dentro y fuera de la bahía de Cartagena (Fig. 4) fueron los puntos 1 (al interior de la bahía de Bocagrande), 6 (en frente de la isla de Tierrabomba) y 7 (cerca de Playa Blanca). En las zonas cercanas a estos sitios se pueden identificar incrementos en la amplitud de la onda de hasta 0.9 m.

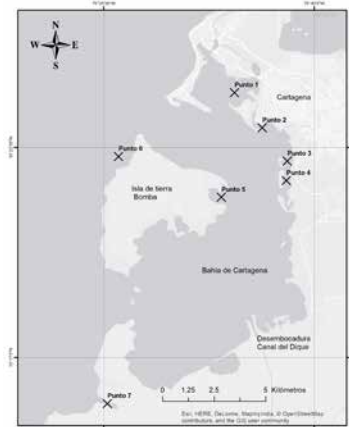


Figura 4. Los sitios marcados con la letra "X" corresponden a cada uno de los puntos en los cuales se identificó una variación significativa del nivel medio del mar.

En la Figura 6 se aprecia que los puntos 1 y 6 presentan incrementos en la superficie libre de aproximadamente ± 10 cm en comparación con la línea roja. Sin embargo, el punto 7, fuera de la bahía, presenta un incremento de ± 40 cm, lo cual se traduce en una amplitud de onda de aproximadamente 0.9 m. Este resultado sugiere que se presenta una reflexión con superposición de ondas fuera de la bahía, pues teóricamente solo se considera resonancia al fenómeno que ocurre en cuerpos de agua semicerrados. Por otra parte, los resultados para los puntos 1 y 6 muestran incrementos periódicos que sugieren procesos de resonancia en dichos lugares. Los desfases mostrados por cada una de las ondas están relacionados con la ubicación de cada uno de los sitios.

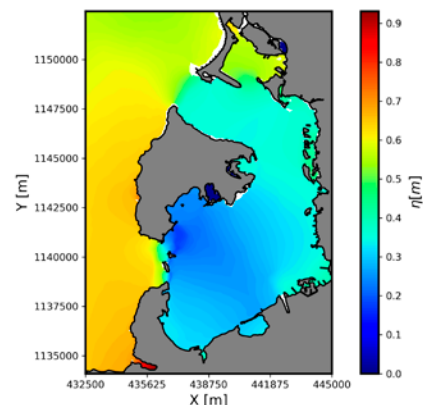


Figura 5. Variación del nivel medio del mar. Caso 1, $H = 1$ m, períodos 2 909 s, amplitud 0.5 m.

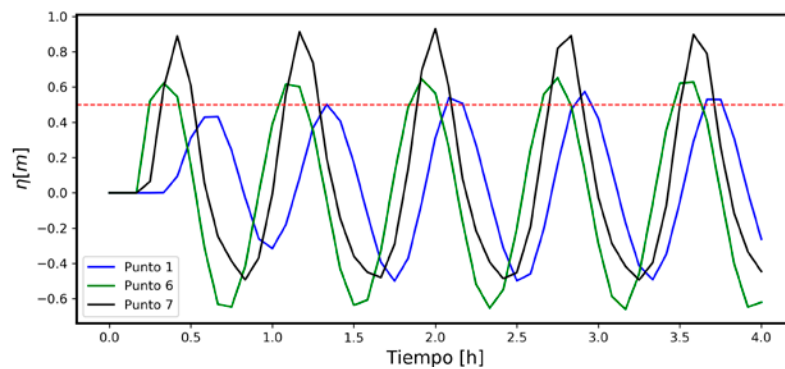


Figura 6. Variación del nivel medio del mar. Caso 1, $H = 1$ m, períodos 2 909 s, amplitud 0.5 m.

Tabla 2. Casos simulados en el modelo H2D.

Modo de oscilación	Periodo de oscilación [s]	# Caso	Amplitud de onda [m]	Altura de onda [m]
0	2 909	1	0.5	1
		2	1	2
		3	1.5	3
1	969.8	4	0.5	1
		5	1	2
		6	1.5	3
2	581.9	7	0.5	1
		8	1	2
		9	1.5	3
3	415.6	10	0.5	1
		11	1	2
		12	1.5	3

Es importante mencionar que para el caso 9 (Fig. 7) se utilizó una amplitud de onda de 1.5 m y un períodos más corto (581.9 s). En la Figura 8a y para los puntos 4 y 5, Figura 8b se observa que en la mayoría de los puntos se presenta resonancia alrededor de 2 m. En comparación con el caso 1 se presenta un comportamiento diferente, ya que el tren de onda incidente no alcanza a salir de la bahía cuando ya está llegando el siguiente. Este comportamiento se observa en todos los puntos dentro de la bahía. Para el punto 6 el comportamiento de la onda sugiere que esta se refleja al llegar a la línea de costa y su forma depende de la reflexión de la onda en el dominio numérico.

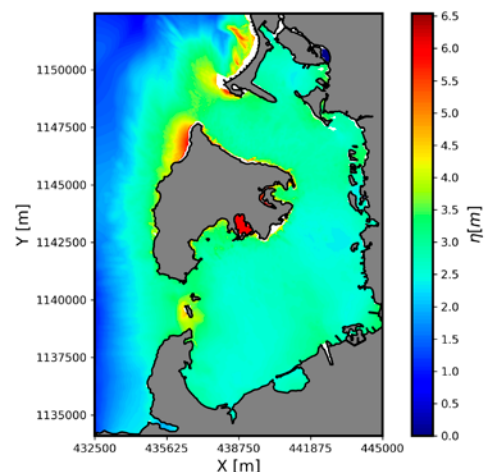


Figura 7. Variación del nivel medio del mar. Caso 9, $H = 3$ m, períodos 581.9 s, amplitud 1.5 m.

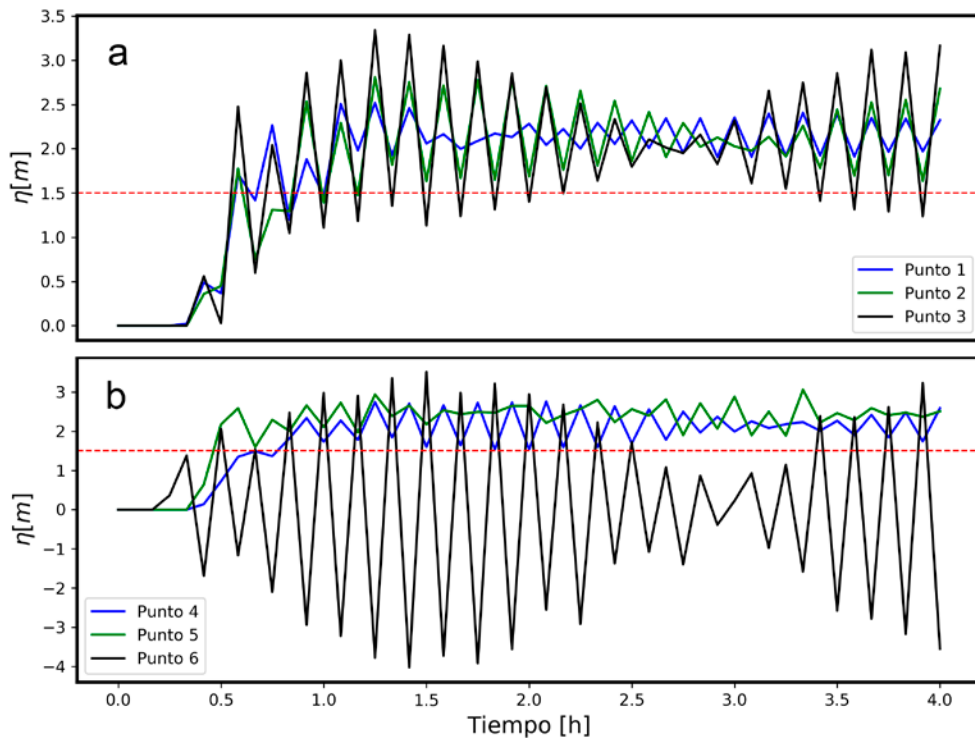


Figura 8. Serie de tiempo de la superficie libre Caso 9, amplitud 1.5 m. (a) Puntos 1, 2 y 3. (b) Puntos 4, 5 y 6. La línea discontinua roja marca la amplitud de onda que se propagó (1.5 m).

Para el caso 11 (Tabla 2) los valores calculados por el modelo numérico sugieren que en general toda la bahía está resonando con valores de superficie libre de ± 2.5 m, aproximadamente.

En este caso (Fig. 9) se utilizó una amplitud de onda de 1 m y un período de 415.6 s. En la Figura 10a el comportamiento de la serie sugiere que en todos los puntos se presenta resonancia. En este caso, al igual que en el caso 9, el tren de onda incidente no alcanza a salir de la bahía cuando ya está llegando el siguiente. Esto explica el porqué todos los valores de superficie libre sobrepasan el valor de amplitud de onda que se propagó, principalmente en los puntos al interior de la bahía. Sin embargo, el punto 7 (Fig. 10b) no alcanza valores altos, en comparación con los otros puntos, pues toma un valor máximo para superficie libre de 1.8 m.

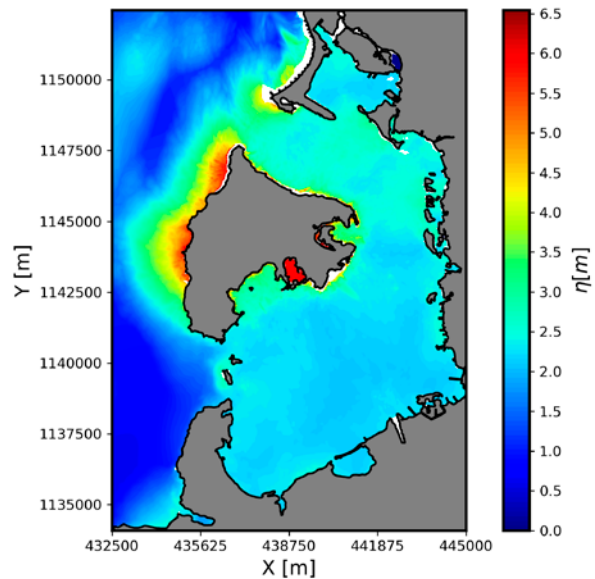


Figura 9. Variación del nivel medio del mar. Caso 11, $H = 2$ m, períodos 415.6 s, amplitud 1 m.

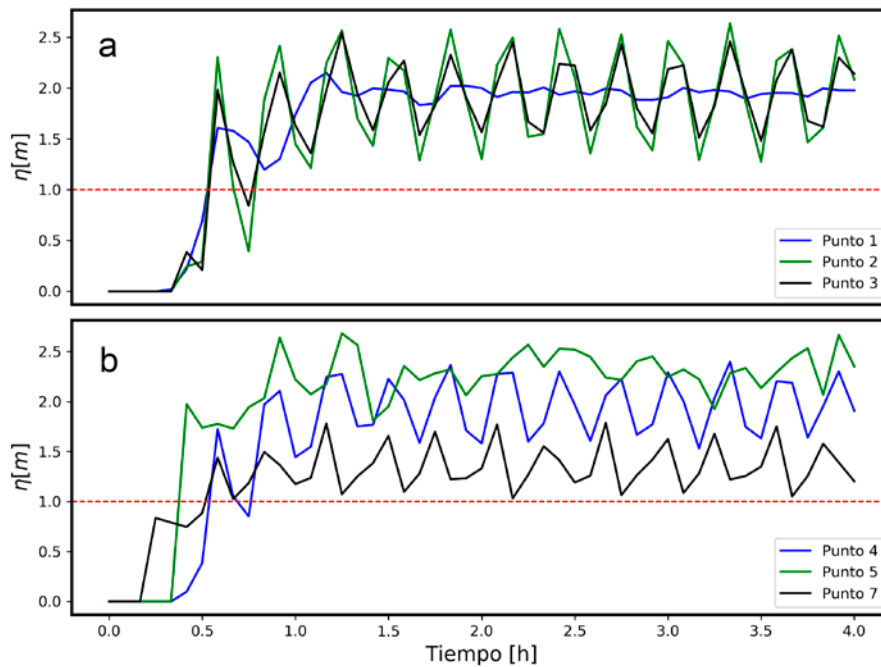


Figura 10. Caso 11, amplitud 1 m. Serie de tiempo de la superficie. (a) Puntos 1, 2 y 3. (b) Puntos 4, 5 y 7. La línea discontinua roja marca la amplitud de onda que se propagó (1 m).

Modelo WAPO

Tabla 3. Casos de modelación con el modelo numérico WAPO.

Modo de oscilación	Período de oscilación [s]	# Caso	Amplitud de onda [m]	Altura de onda [m]
1	969.8	1	0.5	1
		2	1	2
		3	1.5	3
2	581.9	4	0.5	1
		5	1	2
		6	1.5	3
3	415.6	7	0.5	1
		8	1	2

Las características de los casos que se simularon con este modelo se observan en la Tabla 3. En este caso se realizaron solo ocho experimentos.

De acuerdo con la Tabla 3, solo se corrieron algunos casos en comparación con el modelo

H2D, debido a que la versión del modelo numérico WAPO que se utilizó solo permite propagar ondas con un período máximo de 999 s.

En la Figura 11 se presentan los valores de nivel del mar para el caso 1 con el modelo WAPO. Se observa como por fuera de la bahía

se presenta una variación significativa del nivel del mar con un comportamiento extraño en la frontera oeste.

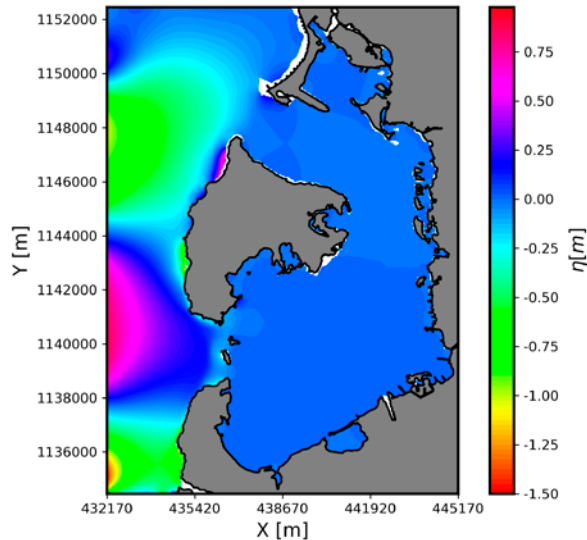


Figura 11. Variación del nivel medio del mar. $H = 1$ m, $T = 969.8$ s.

DISCUSIÓN

Tierrabomba es un obstáculo con el cual choca el frente de onda, evidenciándose reflexión de onda justo en frente de la isla. Las amplificaciones de onda producidas en dicha zona no son consideradas como resonancia, debido a que este concepto solo es aplicable en cuerpos de agua semicerrados.

En la serie de datos de marea no fue posible encontrar algún armónico que correspondiera a los modos principales de oscilación, debido a la limitación por la frecuencia fundamental, puesto que se tienen mediciones cada hora.

Es de notar que en este estudio se hace una aproximación utilizando series sintéticas, pues hasta el momento no se tiene una red de monitoreo que registre los cambios en la superficie libre para este tipo de ondas y con el nivel de detalle requerido, lo cual sin duda sería de utilidad para la validación de los resultados obtenidos. Por otra parte, es importante mencionar que aunque numéricamente se demuestre que la bahía resuena, en la actualidad no se tienen registros visuales de seiches o meteotsunamis, además de

que no existe algún otro estudio acerca de este fenómeno en la bahía de Cartagena.

El planteamiento y modelación numérica de escenarios de cada uno de los valores asociados a los modos de oscilación para la bahía de Cartagena es una aproximación valiosa, que hasta el momento es el único acercamiento para este sitio que permite analizar el comportamiento de este tipo de ondas.

El modelo numérico WAPO no representó el fenómeno tal como se evidenció en los resultados, posiblemente porque desde su código fuente se diseñó con el limitante de períodos de onda máximos de 999 s, pero durante la implementación se modificó el código en conjunto con los desarrolladores para que admitiera períodos mayores de hasta 9 999 s. Otra restricción del modelo WAPO es que las profundidades máximas son de -999 m, lo cual impuso un limitante al dominio numérico. Debido a esto se disminuyó la longitud en el área de estudio (en dirección oeste-este), con lo cual se logró que la batimetría estuviera por encima de los valores límite.

Por otra parte, el modelo H2D representó adecuadamente el fenómeno con un bajo rendimiento, ya que 1 hora de tiempo simulado tardó 1 hora de tiempo de máquina por dos razones: extensión del dominio utilizado para la bahía y la ausencia de paralelización. En este sentido se recomienda implementar modelos con mallas no estructuradas y que permitan correr en paralelo tales como Artemis (Durand, Bourdand y Tozer, 2018).

CONCLUSIONES

Los períodos en los cuales se presentaron variaciones significativas del nivel del mar, debido al fenómeno de resonancia dentro de la bahía de Cartagena, corresponden a los cuatro principales modos de oscilación. Estos períodos de onda son 2909 s, 969.8 s, 581.9 s y 415 s, lo cuales están en el intervalo de ondas largas. Los resultados del modelo H2D sugieren que la bahía de Cartagena resuena con dichos períodos y con valores de amplitud de onda entre 0.5 m y 1.5 m. Con los valores de los períodos explorados se pudo notar que la respuesta a una amplificación

por resonancia depende de la energía de la onda y que esta a su vez depende de la amplitud, lo cual, teóricamente es correcto.

Los sitios más propensos a las variaciones de la superficie libre según los resultados del modelo H2D son los puntos 1 al 7, mostrados en la Figura 4, ya que el análisis de la superficie libre para diferentes casos permitió evidenciar resonancia en los puntos 1 a 5 y 7. Los resultados sugieren que existe reflexión de onda para el punto 6, debido a que eran muy notables los incrementos periódicos de amplitud de onda en esas zonas.

El modelo numérico WAPO, a pesar de que computacionalmente es más rápido que el modelo numérico H2D, utiliza términos de disipación de energía que al parecer no son adecuados para la propagación de ondas largas. Como las que se propagan en bahías como la de Cartagena, con geometría compleja, pues no se observaron incrementos considerables en la superficie libre dentro de la bahía.

La marea en la bahía de Cartagena no puede ser considerada como mecanismo forzador de ondas resonantes, al menos mediante análisis de Fourier, debido a que no se puede estimar la variación temporal de dicha energía, lo cual es necesario para conocer el comportamiento de la energía asociada a las frecuencias de interés. Con este fin se recomienda utilizar el método de Wavelets (Goupillaud, Grossmann y Morlet, 1984) e incluso considerar el análisis de ondas de presión atmosférica (barométricas), y ondas de borde (ondas de Kelvin) (Agudelo, 2014).

Por otra parte, es importante mencionar que una de las mayores aproximaciones que se hicieron en este trabajo es que no se tuvo en cuenta la influencia que podría tener el canal del Dique en los efectos de resonancia dentro de la bahía. Por esta razón se debe tener en cuenta que los resultados sugieren que dentro de la bahía de Cartagena se presenta una amplificación del nivel del mar asociado a una resonancia teórica y forzada con ondas largas. Sin embargo, se desconoce si estos forzantes asociados a los modos libres de oscilación se pueden producir mediante algún fenómeno natural en la zona y, por lo tanto, es necesario mejorar las mediciones espaciales y temporales del nivel del mar. En

nuestro caso solo fue posible analizar y proponer la marea como posible mecanismo forzante de ondas resonantes para la bahía.

Teniendo en cuenta las limitaciones de los modelos numéricos que utilizan el esquema de diferencias finitas, se recomienda el uso de modelos numéricos que usen un esquema en elementos finitos, con el fin de obtener una descripción más detallada del comportamiento de las ondas largas cerca de la línea de costa. Otra simplificación en cuanto al rendimiento computacional se puede lograr implementando modelos numéricos atemporales, los cuales logran llegar a una solución numérica en un tiempo relativamente corto, en comparación con modelos transitorios (Díaz, 2006).

LISTA DE REFERENCIAS

- Agudelo, P.; Posada, L.; Roldán, A. (2002). *Erosión costera al norte del golfo de Morrosquillo* (Caribe Central Colombiano). En: XX congreso Latinoamericano de Hidráulica. La Habana, Cuba.
- Agudelo, P. (2014). *Análisis de los sistemas oscilatorios en Bahías naturales* [tesis doctoral, Universidad de Cantabria]. Santander, España, 320 pp.
- Berkhoff, J. (1972). *Computation of Combined Refraction-Diffraction*. Proc. 13th Int. Conference Coastal Engineering, ASCE, 2, Vancouver (Canadá), 471-490.
- Chamberlain, P.; Porter, D. (1995). The modified mild-slope equation. *Journal of Fluid Mechanics*, 291, 393-407. <https://doi.org/10.1017/S0022112095002758>
- Chen, H.; Mei, C. (1974). *Oscillations and Wave Forces in a Man-Made Harbor in the Open Sea*. Proceedings 10th Naval Hydrodynamics Symposium, June 24-28, 573-596.
- Díaz, G. (2006). *Análisis de resonancia portuaria: generación, transitoriedad no linealidad y acoplamiento geométrico* [tesis doctoral, Universidad de Cantabria]. Santander, España. 630 pp.

- Durand, N.; Bourban, S.; Tozer, N. (2018). *ARTEMIS developments at HR Wallingford*. In Proceedings of the XXVth. TELEMAT-MASCARET User Conference, 9 al 11 de octubre de 2018, Norwich, 131-135.
- Goupillaud, P.; Grossmann, A.; Morlet, J. (1984). Cycle-octave and related transforms in seismic signal analysis. *Geoexploration*, 23(1), 85-102. [https://10.1016/0016-7142\(84\)90025-5](https://10.1016/0016-7142(84)90025-5)
- Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas. (2000). *Dinámica del oleaje*. Documento de referencia, vol. 1, Universidad de Cantabria, España, 580 pp.
- Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas. (2001). *Manual de Referencia Modelo numérico H2D*. Universidad de Cantabria, España, 138 pp.
- Kirby, J.; Dalrymple, R. (1994). *Combined Refraction/Diffraction Model REF/DIF 1, Version 2.5: Documentation and User's Manual*. Center for Applied Coastal Research, Department of Civil Engineering, University of Delaware, Newark, 1-122.
- Lonin, S.; Giraldo, L. (1995). Circulación de las aguas y transporte de contaminantes en la bahía interna de Cartagena. *Bol. Cient. CIOH*, (16):25-56. <https://doi.org/10.26640/22159045.77>
- Lonin, S.; Parra, C.; Andrade, C.; Thomas, Y. (2004, diciembre 1). Patrones de la pluma turbia del canal del Dique en la bahía de Cartagena. *Bol. Cient. CIOH*, (22):77-89. <https://doi.org/10.26640/22159045.130>
- Massel, S. (1993). Extended refraction-diffraction equation for surface waves. *Coastal Engineering*, 19(1-2), 97-126. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(93\)90020-9](https://doi.org/10.1016/0378-3839(93)90020-9)
- Palacio, H.; Restrepo, A. (1999). *Influencia de la evolución del delta del río Sinú en los procesos morfodinámicos del litoral Caribe Antioqueño* [trabajo de grado, Universidad Nacional de Colombia]. Facultad de Minas. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Medellín, 141 pp.
- Rabinovich, A. (2009). *Seiches and Harbor oscillations*. World Scientific, Singapore, 193-236.
- Rueda, J. (2010). *Estudio de la Hidrodinámica y sus mecanismos forzadores en la bahía de Cartagena* [trabajo de grado, Universidad Militar Nueva Granada]. Cartagena, 161.
- Rueda, J.; Otero, L.; Pierini, J. (2013). Caracterización en un estuario tropical de Suramérica con régimen micromareal mixto (Bahía de Cartagena, Colombia). *Bol. Cient. CIOH* (31): 159-174.
- Silva, R. (2010). *Manual del usuario y documento de referencia del programa MWAPO4*. Universidad Nacional Autónoma de México, México, 61 pp.
- Thomson, R.; Emery, W. (2014). *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. Elsevier Science, Third Edition, 521-525.
- Wilson, B. (1972). "Seiches". *Advances in Hydroscience*, 8,1-94.