

Determinación de la resonancia de onda larga en el Pacífico colombiano y otras bahías naturales mediante modelación numérica

Jaime Arturo Orejarena Cuartas
Jardín Botánico de Bogotá

Recibido: 17 de diciembre de 2018

Aceptado: 12 de junio de 2019

Pag. 13-24

Resumen

Los fenómenos de resonancia han sido estudiados de muchas maneras en el mundo. Estos se producen cuando la frecuencia angular de la fuerza externa coincide con la frecuencia natural de oscilación del sistema, generando un aumento de la amplitud, al coincidir las frecuencias. En los últimos años el estudio de estas ondas se ha incrementado debido a los cuantiosos daños que este fenómeno produce en sitios como Ciutadella en España, Shikotan Island en Japón y el Puerto de Rotterdam en Holanda.

En el presente trabajo se seleccionaron diez bahías naturales de tres países (Colombia, España y Francia), aplicando un modelo de elementos finitos denominado MSP con el fin de determinar la presencia de las ondas de resonancia y la influencia que tiene la morfología en la amplificación. Las mallas de propagación generadas en este modelo dependieron de la longitud de onda de la oscilación que se representó, disponiendo al menos diez elementos por longitud de onda.

Los resultados obtenidos demuestran que las bahías son resonantes en diferentes frecuencias, dependiendo de su morfología, y que existe una relación directa entre la amplificación resonante de las bahías y las plataformas continentales donde están ubicadas.

Palabras clave: resonancia, *seiches*, Modelación Numérica (MSP), elementos finitos, ingeniería de costas.

Doi: 10.25100/rc.v23i1.8619

Orcid: 0000-0002-0816-5227

Long wave resonance Determination in the Colombian Pacific and other Natural Bays through Numerical Modeling

Abstract

Resonance events have been studied in many ways in the world. These events occur when the angular frequency of an external force matches with the natural frequency of oscillation in the system, generating an increase of amplitude. In recent years the study of these waves has increased due to the extensive damage that this phenomenon causes in places like Ciutadella in Spain, Shikotan Island in Japan and the Port of Rotterdam in the Netherlands.

In this paper we selected ten natural bays of three countries (Colombia, Spain and France), using a finite element model called MSP to determine the presence of resonant waves and the influence of morphology on the amplification. Propagation meshes generated in this model depended on the wavelength of the oscillation which is represented, having at least ten elements per wavelength.

The results obtained show that the bays are resonant at different frequencies, depending on their morphology, and there is a direct relationship between the resonant amplification of the bays and continental shelves where they are located.

Keywords: resonance, seiches, Numerical Modeling (MSP), finite elements, coastal engineering.

1 Introducción

Los *seiches* son ondas estacionarias en un cuerpo de agua cerrado o parcialmente cerrado que según la geometría de la cuenca pueden entrar en resonancia induciendo un aumento de la amplitud de oscilación que puede provocar daños en la zona costera, en los barcos y en las construcciones portuarias. Las oscilaciones se producen cuando una masa de agua cerrada deja de estar en equilibrio por una acción externa y aparece una fuerza restauradora, “la gravedad”, que tiende a recuperar el estado inicial.

La palabra *seiche* fue el término utilizado por el hidrólogo suizo François-Alphonse Forel en 1890 para nombrar a cierto tipo de ondas generadas por el viento, observadas en algunos lagos alpinos (Lemán en Suiza y Geneva entre Suiza y Francia). Ese mismo fenómeno ha sido nombrado de diferentes maneras en otras partes del mundo: en los Grandes Lagos de Norteamérica, se suelen llamar *slosh*; *abiki* en la bahía de Nagasaki, Japón; en las Islas Baleares, España, se les ha llamado *rissagues*.

Estas ondas pueden generarse por varios fenómenos naturales, tales como: terremotos, deslizamientos de tierra, viento, olas y cambios en la presión atmosférica. La altura de un *seiche* puede variar de centímetros a pocos metros, en casos extremos. Aunque el fenómeno en muchos puertos no alcanza niveles suficientemente elevados como para causar daños por sí solos, las corrientes asociadas a estas oscilaciones sí tienen consecuencias de consideración⁽¹⁾.

Las características (período y longitud de onda) de estas ondas dependen de las características geométricas de la ensenada en la cual se propagan. Cuando las características geométricas de la onda coinciden de cierto modo con las características geométricas del sistema en el cual se propaga, en este caso una ensenada, se genera una amplificación resonante de la onda. Esto normalmente ocurre para algún(os) tipo(s) de onda(s) que no necesariamente existe(n) en el clima marítimo de la zona, y se conoce(n) comúnmente como modo(s) propio(s) o natural(es) de oscilación de la ensenada. El período y la distribución espacial de la superficie libre para cada modo natural de oscilación son controlados por la forma y profundidad de la ensenada considerada ⁽²⁾.

El estudio de la resonancia por onda larga inició por la derivación de expresiones con las que se intentaba estimar rápidamente los modos resonantes de una dársena de geometría sencilla. Proudman ⁽³⁾ las planteó para lagos y Wilson ^(4,5) para muchas otras geometrías. Desde hace unas décadas, la metodología de estudio ha mostrado una clara evolución entre el planteamiento de modelos analíticos de geometrías básicas al uso de modelos numéricos que permiten evidenciar la relación e interacción océano-atmósfera y así acercarnos más a determinar su formación, esto con el fin de tomar decisiones importantes en el manejo de la zona costera, de la construcción de puertos, del manejo del tránsito portuario ^(3,6-10).

Los modelos para estudios de agitación y resonancia más comunes son los que se basan en las ecuaciones de Boussinesq. Nwogu ⁽¹¹⁾ propuso las “ecuaciones modificadas de Boussinesq”, que permitían la propagación de ondas desde aguas intermedias hacia aguas someras. Gobby y Kirby ⁽¹²⁾ desarrollaron las “ecuaciones extendidas de Boussinesq”, mejorando el cálculo del comportamiento no lineal del oleaje. Madsen *et al.*, y Liu ^(13,14) presentaron mejoras en las ecuaciones para aumentar el orden en la dispersión y en la no-linealidad. Estos modelos basados en las ecuaciones de Boussinesq se han desarrollado tanto en diferencias finitas ⁽¹⁵⁾ como en elementos finitos ⁽¹⁶⁾. En el presente estudio se utiliza el modelo MSP, que ha sido desarrollado por el Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas de la Universidad de Cantabria, es un modelo de elementos finitos que se basa en la aproximación elíptica de las ecuaciones de la pendiente suave, propuestas originalmente por Berkhoff ⁽¹⁷⁾. Estas ecuaciones resuelven el flujo oscilatorio dentro de geometrías portuarias complejas y sobre batimetrías reales, teniendo en cuenta forzamientos monocromáticos e irregulares de oleaje multidireccional.

Si bien en mar abierto estas ondas carecen de relevancia, en las zonas costeras cobran valor debido a que la amplitud aumenta debido a la influencia del fondo y de los contornos. Por lo tanto, esta onda presenta una caracterización de los períodos resonantes en diversos puntos dentro y fuera de la bahía que tiende de manera general a ser menor en la bocana y de mayor amplitud en los márgenes continentales de la bahía, por lo que es significativo identificar estas ondas como complemento importante en el estudio de la protección y el manejo de las zonas costeras y su infraestructura. Este trabajo tiene como objetivo determinar los fenómenos de resonancia en diferentes bahías en el mundo, haciendo énfasis en bahías en Colombia. Como eje central se tiene la caracterización de las bahías y los análisis del fenómeno por medio del modelo MSP, como parte del estudio de las ondas resonantes en 18 bahías naturales ^(10,18).

2 Metodología

Para la selección de las bahías, se tuvieron en cuenta las características geométricas de las mismas, buscando una relación entre la bahía y la plataforma correspondiente; la influencia de la geometría se midió en función de la magnitud de los procesos que afectan la onda, esto es, en función de la transformación de la onda por asomeramiento, refracción, difracción, reflexión, absorción.

El criterio de selección inicial parte de la hipótesis de la relación entre los modos propios de oscilación de algunas bahías y las plataformas donde están ubicadas. Fue necesario además plantear las restricciones físicas que parecen tener este tipo de onda: bahías de material suelto no cohesivo y poco antropizadas.^(19,20) (Tabla 1).

Tabla 1. Bahías seleccionadas para determinar la frecuencia de las ondas resonantes

ID	País	Región
1	COLOMBIA	Buenaventura
2		Málaga
3		Cupica
4		Solano
5	ESPAÑA	Alcuida
6		Palma
7		Alfacas
8		Fangar
9	FRANCIA	Marsella
10		Port de Bouc

Se utilizó un modelo en elementos finitos denominado MSP, desarrollado por el Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas de la Universidad de Cantabria. Dicho modelo resuelve la ecuación conocida como “ecuación de pendiente suave”, es decir, contempla los efectos de refracción, difracción, asomeramiento, rotura, disipación por fondo y reflexión parcial o total de los contornos y permite observar los modos propios de oscilación de la zona costera; tiene la capacidad de analizar el efecto de la reflexión múltiple de un tren de olas en el interior de una zona semicerrada, incluyendo todos los patrones de difracción producidos por los distintos contornos de la misma.

El modelo asume que el movimiento del agua es irrotacional y estudia el fenómeno de la propagación del oleaje por medio de una función potencial. Considerando que la batimetría de la zona es de pendiente suave, se describe el problema por medio de una ecuación de refracción-difracción bidimensional “*mild-slope equation*”, integrada en profundidad entre el fondo y la superficie libre.

Debido a que es una ecuación de tipo elíptico, se definen las condiciones de contorno a lo largo de todo el dominio de integración; tales como: a) reflexión total o parcial en contornos fijos, b) onda incidente conocida o condición de radiación en contornos abiertos. Realizando la resolución del sistema mediante métodos de elementos finitos.

Finalmente, por las grandes necesidades computacionales que este sistema usa (tanto de memoria como de tiempo de computación), se utiliza el módulo simplificado del modelo, que resuelve la “aproximación parabólica”. En este caso, el efecto de la difracción (curvatura de la amplitud de onda) en la dirección de propagación es nulo y la difracción sólo ocurre a lo largo de un frente de onda (líneas de igual fase). De este modo, el sistema se expresa como (Ecuación 1):

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = ik - \frac{1}{2kc C_g} \frac{\partial}{\partial x} (kC C_g) \phi + \frac{i}{2kc C_g} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{C C_g \partial \phi}{\partial y} \right) \quad (1)$$

Dónde:

i: unidad imaginaria ($i^2 = -1$)

x: dirección predominante de propagación.

Lo más importante de este caso es que el modelo permite generar mallas que están limitadas de acuerdo con la línea de costa de cada bahía permitiendo detallar cada uno de los contornos y detalles geomorfológicos, además de islas o de cualquier estructura que pueda influenciar en las ondas estudiadas.

2.1 Batimetría

La batimetría utilizada para la simulación de las condiciones son: para bahía Cupica y Solano ha sido la obtenida de las Cartas Náuticas COL. 30, 31. 116, 502; para Buenaventura y Málaga, de las Cartas Náuticas COL. 150, 153 306 760 del Centro de Investigaciones Oceanográfico e Hidrográfico (CIOH) de DIMAR en Colombia y de España, para Alcúdia y Palma, las cartas náuticas 48, 48e, 47 y 384 para Alfacs y L'Ampolla, las cartas 48 y 485 del Instituto Hidrográfico de la Marina Española y para Francia, la carta Náutica 49 del mismo instituto (Figura 1).

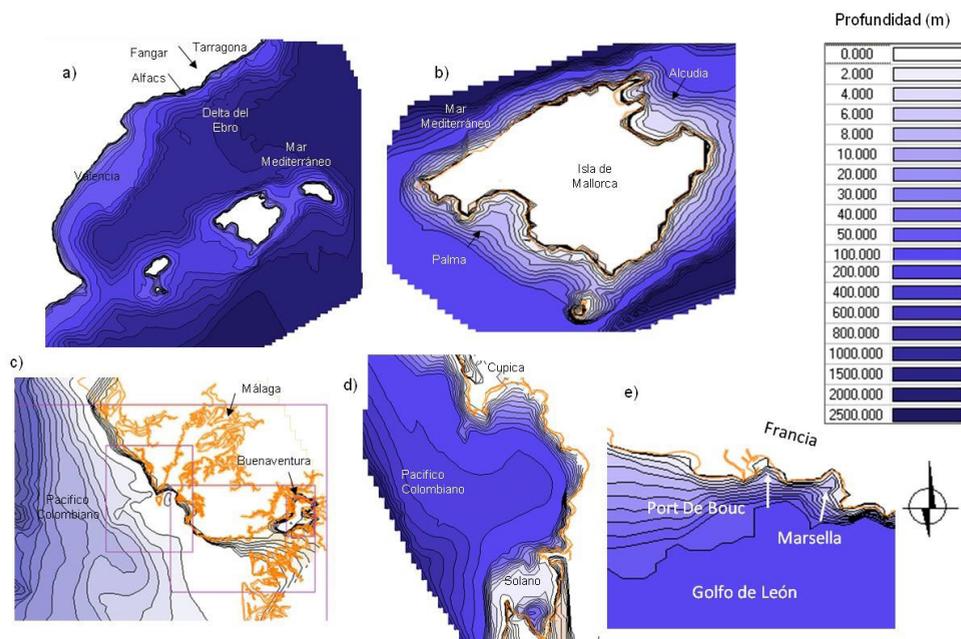


Figura 1. Batimetría general de la plataforma continental de las bahías de: a) Alfacs y Fangar; b) Alcudia y Palma; en España c) Buenaventura y Málaga; d) Cupica y Solano en Colombia y e) Port de Bouc y Marsella en Francia.

2.2 Malla de propagación

Las mallas de propagación generadas en este modelo dependieron de la longitud de onda de la oscilación que se representó, disponiendo de por lo menos diez elementos por longitud de onda. En la corona de la malla se definió la dirección, amplitud y el período de la onda incidente. Además, la localización de cada elemento de la malla dependió de la profundidad a la que se encontraba. La malla de propagación para este caso corresponde al nivel de media marea; en el caso del Pacífico colombiano: Nivel de media marea = 2,0 m y para el caso de las bahías en España y Francia fue de 0,50 m. Los picos y resultados que puedan observarse en los niveles de baja y alta marea son las expresiones de lo que se observa en la media marea siendo la más general y representativa. El período mínimo para la generación de la malla en todas fue de 1.000 s, y el número de elementos por longitud de onda fue $n = 15$ (Figura 2).

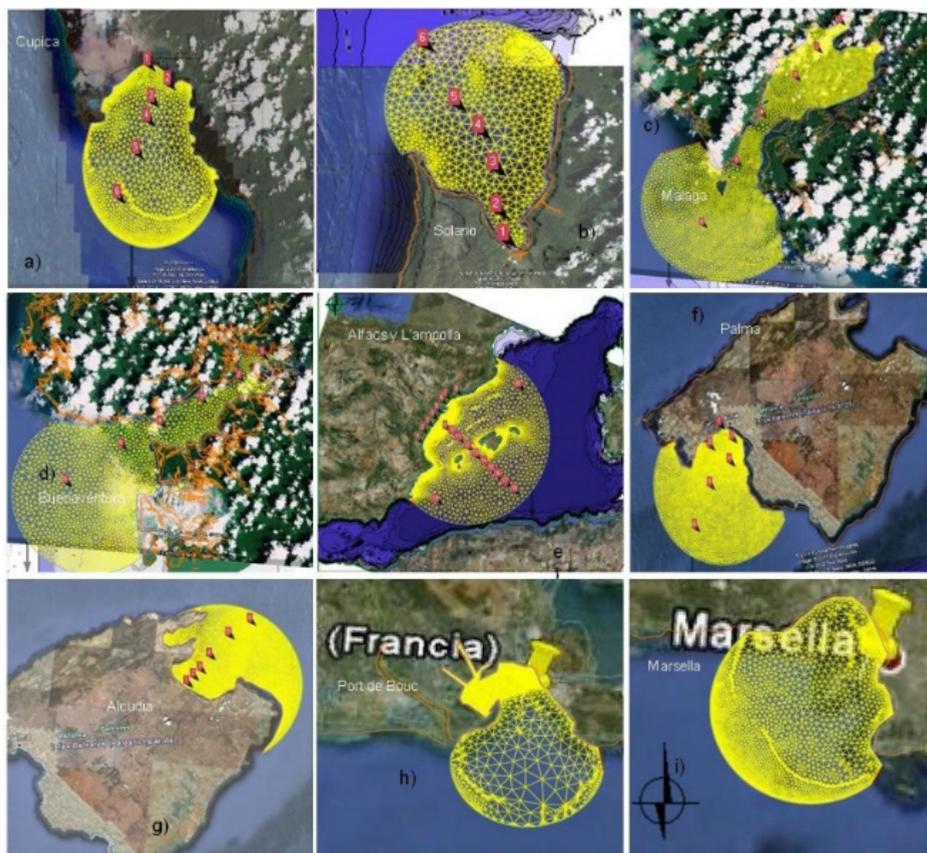


Figura 2. Batimetría general de la plataforma continental de las bahías de: a) Alfacs y Fangar; b) Alcudia y Palma; en España c) Buenaventura y Málaga; d) Cupica y Solano en Colombia y e) Port de Bouc y Marsella en Francia.

3 Resultados

La información arrojada por el modelo para los casos, permite la observación directa del desarrollo temporal de dicha transformación, no solo en los puntos mencionados, sino además en cualquier punto dentro del dominio; los valores de los modos principales tuvieron menor magnitud a medida que el punto de control era más lejano a la costa (Tabla 2).

Tabla 2. Resultados de los modos resonantes principales calculados en las bahías y sus respectivas plataformas (en horas)

ID	País	Región	Bahías	Plataforma
1	COLOMBIA	Buenaventura	2,20	2,24
2		Málaga	2,36	2,24
3		Cupica	0,79	0,81
4		Solano	0,80	0,81
5	ESPAÑA	Alcuida	1,61	1,56
6		Palma	1,72	1,56
7		Alfacs	3,30	3,41
8		Fangar	1,50	1,69
9	FRANCIA	Marsella	1,11	1,13
10		Port de Bouc	1,02	1,13

De acuerdo con los valores obtenidos en la modelación, en Colombia la bahía con mayor frecuencia fue Málaga seguida de Buenaventura con un valor de 2,36 y 2,20 h; Cupica y Solano con frecuencias de 0,79 y 0,80 respectivamente. En España la Bahía de Alfacs mostró una frecuencia de 3,3h (la mayor de este estudio) y las bahías de Palma, Alcuida y Fangar, valores de 1,72, 1,61 y 1,5 h. respectivamente y finalmente las bahías de Marsella y Port de Bouc en Francia con frecuencias de 1,11 h y 1,02 h.

Las zonas donde se presentó la mayor energía fueron donde incidieron las ondas propagadas y es justamente el punto donde coinciden las frecuencias de oscilación de las ondas de oscilación naturales del cuerpo de agua, con aquellas frecuencias de oscilación de las ondas externas del océano, actuando éstas como elemento forzador (Figura 3).

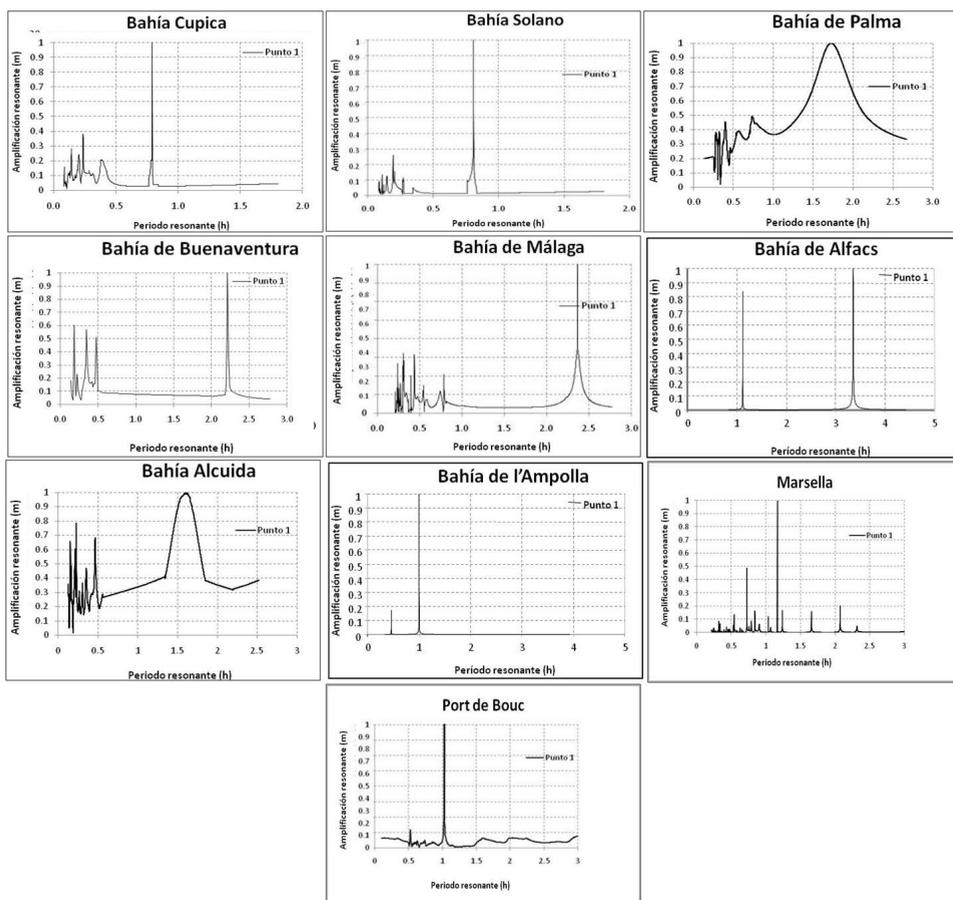


Figura 3. Resultados de la modelación Coeficiente de amplificación dimensionalizado en cada una de las bahías en el punto de mayor amplitud de resonancia.

Estas oscilaciones observadas se caracterizan porque son ondas de pequeña amplitud y gran longitud, estas características permiten su análisis por medio de la teoría lineal de ondas dada por: a/h , (siendo a = la amplitud de la onda y h = el calado); por lo que el modelo (MSP) identifica con buena precisión el valor de las frecuencias resonantes y los resultados son comparables y semejantes.

3.1 Comparación valores modelados en las bahías y en las plataformas

Los resultados de los nodos principales en las bahías y en las plataformas son comparados con el fin de observar realmente si existe relación y resonancia en cada una de ellas (Figura 4).

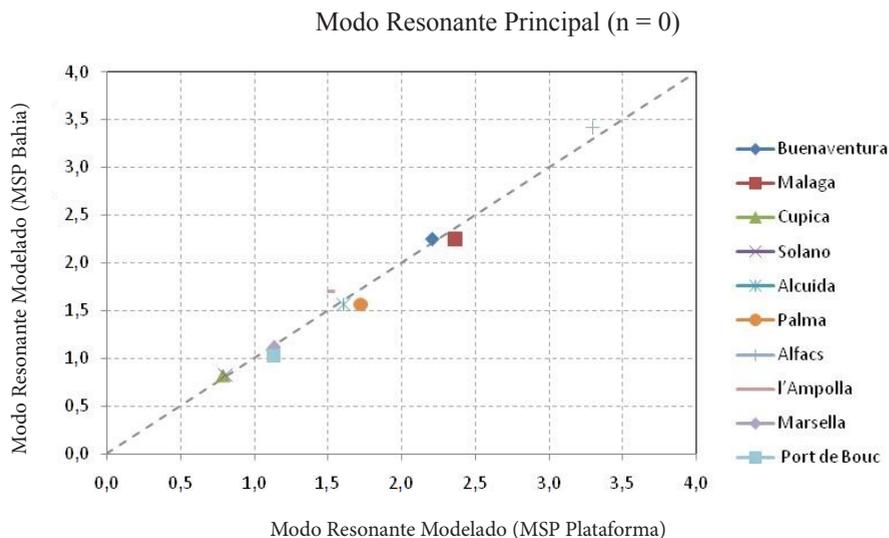


Figura 4. Diagrama de dispersión del Periodo Resonante modelado para las bahías vs. lo modelado en las plataformas.

Se encuentra relación entre las bahías y las plataformas de las áreas estudiadas (Colombia, España y Francia). Estas bahías comparten características físicas que son relevantes en la amplificación resonante, tales como: influencia antropogénica mínima, energía de descargas fluviales menores que la energía del mar, y son formadas por material moldeable.

De acuerdo con esto, se puede deducir que en las áreas estudiadas existen concentraciones en las frecuencias de energía que pertenecen a un sistema de ondas que son relativas y dependientes de la forma y tamaño de la plataforma y la bahía relacionada. En la entrada de la misma, por ejemplo, la oscilación de la superficie libre es muy pequeña en el tiempo y las componentes armónicas de más alta frecuencia empiezan a aparecer en las zonas costeras.

Debido a estos factores, la rotura del oleaje, la difracción o los cambios en la batimetría, se produce la liberación de la onda ligada, originando ondas libres. Esta liberación de la onda larga está íntimamente relacionada con las oscilaciones de largo periodo en playas y en puertos, como en el caso de Buenaventura, donde la mayor amplitud se encontró en el punto frente a la Isla de Buenaventura, actuando esta como un gran dique donde se intensifican los fenómenos de difracción y refracción, dado que estos sitios son las principales causantes de los episodios de resonancia.

4 Conclusiones

Se demuestra la existencia de fenómenos resonantes en las bahías de Buenaventura, Málaga, Cupica y Solano en Colombia; Alfacs, Fangar, Palma y Alcuida, en España y Marsella y Port de Bouc en Francia, con las siguientes frecuencias: Buenaventura y Málaga 2,2 h; Cupica y Solano 0,87 h; Alcuida y Palma 1,6 h; Alfacs 3,4 h; Fangar 1,5 h y Port de Bouc 1,1 h.

En los modos resonantes de las bahías de estudio y su comportamiento espacio-temporal, analizados mediante modelación numérica; se encontró que existe una relación directa entre la amplificación resonante de algunas bahías y la misma amplificación de las plataformas continentales donde están ubicadas, en Colombia, España y Francia.

Estos resultados permiten deducir que existe una relación directa entre la magnitud de ondas y ciertas características geo-morfo-métricas debido a que los resultados son equivalentes dentro de las bahías y en sus plataformas continentales.

Las oscilaciones observadas son ondas de pequeña amplitud y gran longitud, por lo tanto, el modelo MSP resuelve e identifica con buena precisión el valor de las frecuencias resonantes.

Agradecimientos: Un agradecimiento especial a Pablo Agudelo Restrepo, por haber dirigido, financiado y apoyado a llevar este trabajo hasta el final.

Referencias bibliográficas

1. Vidal C, Medina R, Monserrat S, Martín FL. Harbor Resonance Induced by Pressure-Forced Surface Waves, Coastal Engineering 2000. American Society of Civil Engineers. Reston VA. 2000; 3615-3628.
2. Yanuma T, Tsuji Y. Observation of Edge Waves Trapped on the Continental Shelf in the Vicinity of Makurazaki Harbor, Kyushu, Japan. Journal of Oceanography. 1998; 54: 9-18.
3. Proudman J. Dynamical Oceanography. Long Ocean Gravity Waves: Trapping, Resonance and Leaking, Gidrometeoizdat. Published by Methuen & Co. Ltd., London (1953). 1953; 300-325.
4. Wilson BW. Generation of long-period seiches in Table Bay, Cape Town, by barometric oscillations. Transactions, American Geophysical Union. 1954; 35(5): 733-746. Doi: 10.1029/TR035i005p00733.
5. Wilson BW. Seiches. Advances in Hydroscience. Consulting Oceanographic Engineer Pasadena, California. 1972; 8: 1-94. Doi: 10.1016/B978-0-12-021808-0.50006-1.
6. Shuisky YD, Schwartz ML. Basic Principles of Sediment Budget Study in the Coastal Zone. Shore & Beach. 1983; 51 (1) :34-40.
7. Dean RG, Dalrymple RA. Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists. Volume 2. World Scientific. 1991; 157-158. Doi: 10.1142/asoe10.1142/1232.
8. Rabinovich AB, Monserrat S. Meteorological tsunamis near the Balearic and Kuril Islands: Descriptive and statistical analysis. Natural Hazards, 1996; 13(1): 55-90.
9. Agudelo, P.; Posada, L. y Roldán A. Erosión costera al norte del golfo de Morrosquillo (Caribe central colombiano). En: XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Ciudad de La Habana, Cuba. 2002.

10. Orejarena Cuartas JA. Estudio de la Resonancia de Onda Larga en el Pacífico colombiano y otras Bahías naturales mediante ecuaciones paramétricas, modelación numérica y análisis de series de tiempo. Trabajo de Grado para optar al título de Maestría en Oceanografía. 2012; 134.
11. Nwogu O. Alternative form of Boussinesq Equations for Nearshore Wave Propagation. *Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering*. ASCE, 1993; 119(6): 618-638. Doi: 10.1061/(ASCE)0733-950X(1993)119:6(618).
12. Gobbi MF, Kirby JT. Wave evolution over submerged sills: Tests of a high-order Boussinesq model. *Coastal Engineering*. 1999; 37: 57-96.
13. Madsen OS, Poon YK, Graber HC. Spectral wave attenuation by bottom friction: theory. *Proceedings of the Twenty-First Coastal Engineering Conference*. ASCE, 1988; 492-504.
14. Liu PL-F. Model equations for wave propagations from deep to shallow water. In: *Advances in Coastal and Ocean Engineering*. 1994; 1:125-157.
15. Dalrymple RA, Kirby JT. Angular Spectrum Modelling of water waves. *Reviews in Aquatic Sciences*. CRC Press. 1992; 6(5,6) 383-404.
16. Woo SB, Liu PL-F. Finite-Element Model for Modified Boussinesq Equations. I: Model Development. *Journal of Waterway Port Coast and Ocean Engineering*. 2004; 130(1):1-16.
17. Berkhoff, JCW. Computation of combined refraction-diffraction. *Coastal Engineering Proceedings*. ASCE. Chapter 24. 1972; 13: 471-490. Doi:10.9753/icce.v13.23
18. Orejarena Cuartas JA, Agudelo-Restrepo P. Estudio de la Resonancia de Onda Larga en el Pacífico Colombiano y Otras Bahías Naturales Mediante Ecuaciones Paramétricas. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. 2012; 36(139): 253-259.
19. Garcies M, Gomis D, Monserrat S. Pressure-forced seiches of large amplitude in inlets of the Balearic Islands. 2. Observational study. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1996; 101(C3): 6453-6467. Doi: 10.1029/95JC03626.
20. Jong M PC de, LH. Holthuijsen, Battjes JA. Generation of seiches by cold fronts over the southern North Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2003; 108(C4): 10-25//3118-3132//14,1-14,10. Doi: 10.1029/2002JC001422.

Dirección del autor

Jaime Arturo Orejarena Cuartas

Coordinador de Proyectos, Jardín Botánico de Bogotá, Bogotá - Colombia

jaimeorejarenac@gmail.com