

## Validación e implementación de una herramienta operacional para el pronóstico de mareas en el Pacífico colombiano (caso de estudio isla Gorgona)

### *Validation and implementation of an operational tool for the forecasting of tides in the Colombian Pacific (Gorgona Island case study)*

DOI: 10.26640/22159045.2019.521

Fecha de recepción: 20219/10/10 Fecha de aceptación: 20219/12/20

Laura Marcela Vásquez López<sup>1</sup>; José David Iriarte Sánchez<sup>2</sup>

#### CITAR COMO:

**Vásquez López, L.; Iriarte Sánchez, J. (2019).** Validación e implementación de una herramienta operacional para el pronóstico de mareas en el Pacífico colombiano (caso de estudio isla Gorgona). *Bol. Cient. CIOH*; 38(2):3-14. ISSN impreso 0120-0542 e ISSN en línea 2215-9045. DOI: 10.26640/22159045.2019.521

#### RESUMEN

El presente trabajo describe la validación e implementación operacional de una herramienta informática en el Pacífico colombiano (Interfaz Gráfica de Usuario). Esta aplicación, denominada Pronóstico de Mareas Pacífico Colombiano (ProMarPaCo), está disponible en el Área de Oceanografía Operacional del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCP). El proceso de caracterización del comportamiento mareal sobre los principales puertos del Pacífico colombiano fue realizado a través de técnicas de análisis de armónicos, la Transformada Rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés) y el coeficiente de Courtier, aplicadas a las series de tiempo de nivel del mar pertenecientes a las estaciones mareográficas de la Red de Medición de Parámetros Oceanográficos y de Meteorología Marina de la Dirección General Marítima (RedMpomm), tomando como caso de estudio para el presente artículo la isla de Gorgona. Como resultado se presenta la operatividad y funcionalidad de la herramienta ProMarPaCo, la cual sirve de apoyo a la Dirección General Marítima (Dimar) para el control y verificación de las actividades marítimas que se desarrollan en la Cuenca del Pacífico Colombiano (CPC).

**PALABRAS CLAVE:** nivel del mar, marea astronómica, análisis armónico, FFT (Fourier), coeficiente de Courtier, pronóstico de mareas.

#### ABSTRACT

*This paper describes the validation and operational implementation of a computer tool in the Colombian Pacific (Graphical User Interface); this application called the Colombian Pacific Tide Forecast (PROMARPACO), is available in the Operational Oceanography Area of the Oceanographic and Hydrographic Pacific Research Center (CIOH Pacific (CCCP)). The process of characterization of the tidal behavior on the main ports of the Colombian Pacific was carried out through harmonic analysis techniques, Fast Fourier Transform (FFT) and the Courtier coefficient, applied to the time series of sea level belonging to the tidal stations of the Network of Measurement of Oceanographic Parameters and Marine Meteorology of the General Maritime Directorate (REDPOMM), taking as a case study for this article the Gorgona Island. As a result, the operability and functionality of the PROMARPACO tool is presented, which serves as support to DIMAR for the control and verification of the maritime activities carried out in the Colombian Pacific basin.*

**KEYWORDS:** Sea level, astronomical tide, harmonic analysis, FFT (Fourier), Courtier coefficient, tidal forecast.

<sup>1</sup> Orcid: 0000-0003-4820-2069. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico, Área de Oceanografía Operacional. Barrio 20 de Julio, Vía El Morro, Capitanía de Puerto de Tumaco, San Andrés de Tumaco (Nariño). Correo electrónico: lvasquez@dimar.mil.co

<sup>2</sup> Orcid: 0000-0002-7427-0025. Capitanía de Puerto de Riohacha. Carrera 12 #5-25, Conjunto El Faro, Riohacha (La Guajira). Correo electrónico: jiriarte@dimar.mil.co

## INTRODUCCIÓN

Las mareas se definen como movimientos periódicos, generados principalmente por la fuerza gravitatoria que ejercen la Luna y el Sol sobre la superficie terrestre, dichos movimientos generan el desplazamiento de grandes acopios de agua hacia dentro y fuera de la costa (Pugh & Woodworth, 2015). El estudio de la marea constituye un factor de vital importancia, dado que sirve de soporte a los programas de investigación oceanográfica a nivel local y global, siendo a su vez de particular interés dentro de estudios relacionados con el clima y sus variaciones (Naveda, 2011).

Por otro lado, el estudio de esta variable debe ser considerado y abordado de forma permanente desde diferentes enfoques (social, económico y ambiental), dada la variedad de actividades y aspectos que llegan a depender de la dinámica que está presente en un lugar determinado.

Entre las actividades económicas dependientes se encuentran aquellas relacionadas con el transporte marítimo (nacional e internacional), el turismo en general y la pesca (artesanal e industrial). Por su parte, desde una perspectiva ambiental y social, las variaciones del nivel del mar juegan un papel importante con respecto al monitoreo de la calidad del agua alrededor de los asentamientos costeros, lo cual coadyuva a determinar el grado de depuración de la carga antrópica que puedan llegar a tener las aguas durante cada ciclo mareal

Así las cosas, la Dimar, dentro de sus funciones contempla el desarrollo de actividades relacionadas con el levantamiento de información hidrográfica (batimetrías); así mismo, está a cargo de dirigir y controlar todos aquellos aspectos relacionados con la seguridad en la navegación, la vida humana en el mar, la búsqueda y salvamento marino, entre otras. Bajo este enfoque, conocer el comportamiento de la onda de marea de forma anticipada, a través de tablas de mareas pronosticadas en un lugar determinado, se convierte en una herramienta básica, operativa y de apoyo para la toma de decisiones oportunas de manera eficaz y eficiente.

Entre las principales utilidades que genera el conocimiento previo de las variaciones del nivel

del mar en un lugar determinado se destacan las siguientes: (i) ofrecer seguridad a los navegantes durante sus aproximaciones a puertos, ya que de acuerdo al nivel de agua disponible en la vertical, en un instante dado varía la profundidad de los canales de acceso, y basado en esta información el comandante de un buque y/o embarcación evalúa el calado para determinar la seguridad de arribo al muelle o puerto, e inclusive transitar de forma segura; (ii) por otro lado, el pronóstico de la marea se emplea en algunos sectores para planear y ubicar asentamientos humanos (poblaciones o comunidades), se convierten en una herramienta y material de consulta para las entidades de atención y prevención de desastre durante la toma de decisiones; (iii) por último, este material también es consultado eventualmente por los pescadores para la programación de las jornadas de pesca.

Con base en lo anterior, el presente trabajo tiene como fin dar a conocer el desarrollo e implementación de una herramienta técnica y operativa para el pronóstico de mareas, la cual servirá de apoyo para el desarrollo de las actividades y funciones que ejerce la Dimar a nivel nacional, específicamente en el Pacífico colombiano. La herramienta en mención trata de una interfaz gráfica de usuario -*Graphical User Interface*- (GUI, por sus siglas en inglés), desarrollada en Matlab, e integrada por un paquete de herramientas de análisis escrito en Fortran, desarrollado por (Foreman, 1977); este tipo de herramientas (GUI) es ampliamente utilizado dentro de programas, aplicaciones o instrucciones para el desarrollo de otras tareas de forma más sencilla. El objetivo principal al momento de desarrollar una aplicación informática de este tipo es facilitar de forma práctica y eficaz la realización de trabajos, actividades y/o obtención de resultados, generalmente de forma inmediata, en este caso, aquellos relacionados con el comportamiento del nivel del mar.

Durante la confección de la herramienta se hizo necesario caracterizar el comportamiento de la onda de marea en un área de interés, que para este caso se escogió la isla de Gorgona. La caracterización en mención contempló aspectos y procesos tales como el análisis armónico, la determinación del coeficiente de Courtier y el análisis espectral (Transformada Rápida de

Fourier). Los análisis fueron aplicados a las series instrumentales disponibles, pertenecientes a la RedMpomm de la Dimar.

La interfaz en mención permitirá al usuario, operador o analista, elaborar una representación gráfica del pronóstico de marea astronómica, en ella se representarán los intervalos horarios en los cuales se pronosticará la ocurrencia de las pleamares y bajamares, así como su altura para un lugar determinado. Así las cosas, la herramienta apoyará permanentemente el desarrollo de las actividades marítimas llevadas a cabo en el Pacífico colombiano (transporte marítimo, investigación y turismo), coadyuvando a la toma de decisiones de manera oportuna.

## ÁREA DE ESTUDIO

Isla Gorgona y su vecina Gorgonilla son islas separadas una de la otra por el paso de Tasca, ocupan una extensión de 13.70 km<sup>2</sup>, representando la porción insular emergida más extensa sobre la plataforma continental del Pacífico colombiano (Invemar, 2001). Geográficamente se localiza entre 2°55' y 3°00' de latitud Norte y 78°09' y 78°14' de longitud Oeste, es una isla de origen volcánico, distante 30 km de la costa más cercana. Al costado este de la isla, cerca del sector El Poblado (lat. 2°57'43.66" N – long. 78°10'18.10" O), se encuentra instalado sobre una base de concreto un sensor tipo Radar Level Sensor (RLS, por sus siglas en inglés) para la medición del nivel del mar, con el que se registran las oscilaciones de la lámina de agua a intervalos regulares de tiempo (Figura1).

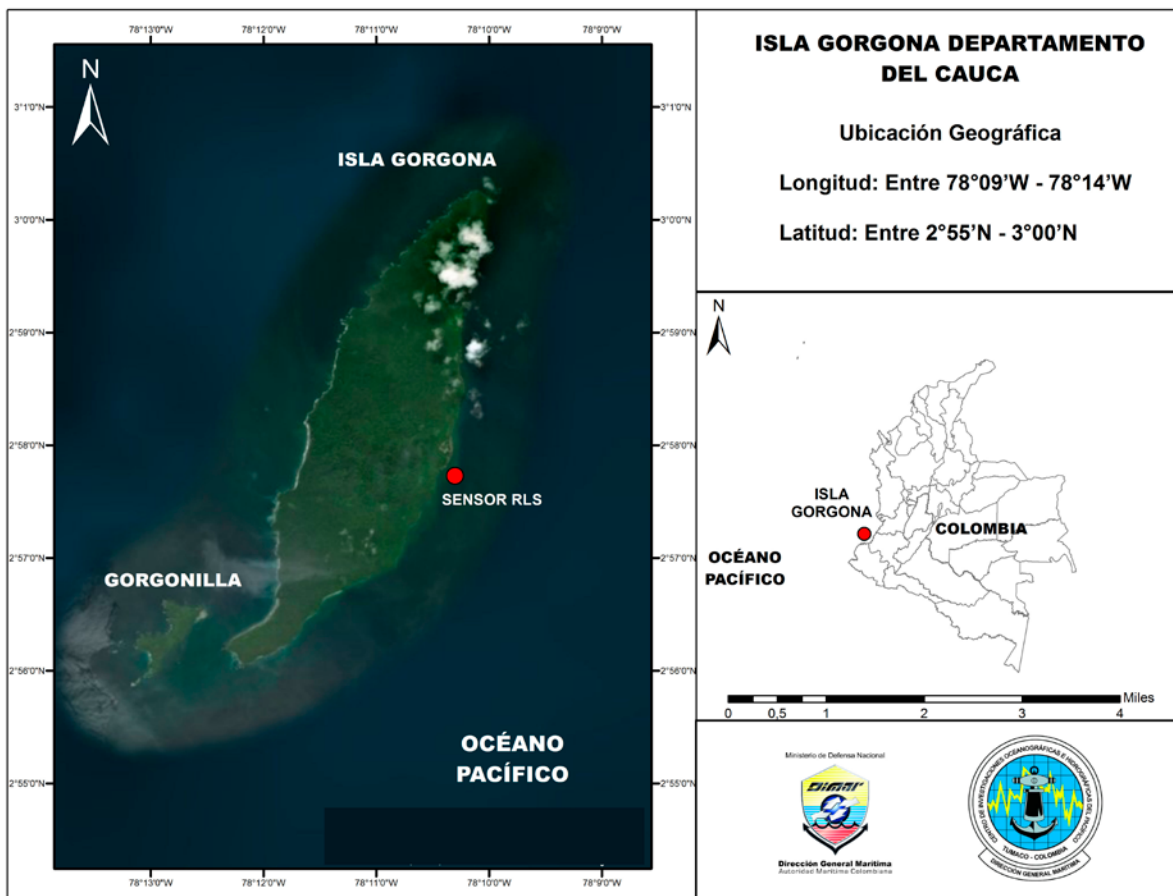


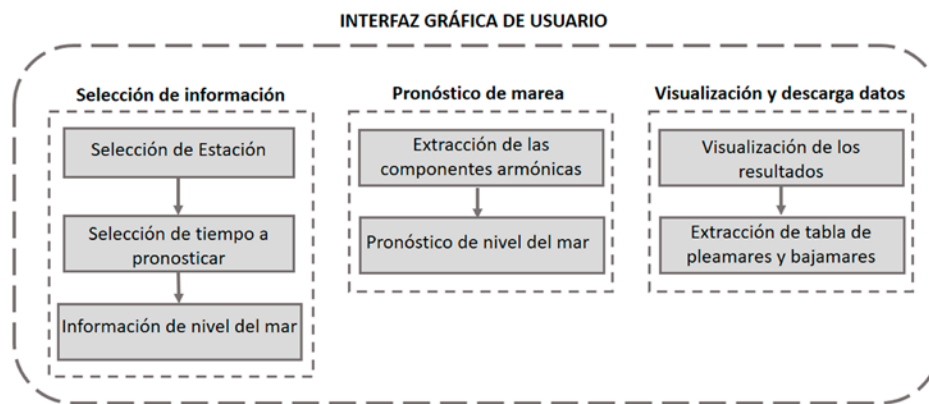
Figura 1. Área de estudio: isla Gorgona.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Con el fin de desarrollar e implementar una herramienta computacional que permita realizar un pronóstico de marea en los principales puertos del Pacífico colombiano de manera automatizada, fue necesario determinar el comportamiento dinámico de la onda de marea (tomando como caso de estudio la isla de Gorgona). Este proceso se desarrolló a partir de un análisis armónico y métodos estadísticos aplicados a los datos de nivel del mar *in situ*, obteniendo como resultado la identificación de los constituyentes armónicos

más representativos de la onda de marea en esta zona. Finalmente, los principales componentes obtenidos, fueron empleados como insumo principal para la elaboración de los pronósticos de marea.

Con el fin de diseñar un diagrama de procedimientos (Figura 2) que permitiera establecer los módulos necesarios que debían ser considerados dentro de la aplicación, se hizo un análisis y verificación de requerimientos primarios.



**Figura 2.** Esquema de funcionamiento de la interfaz gráfica para pronosticar mareas.

La herramienta en su totalidad fue desarrollada empleando el software Matlab -abreviación de Matrix Laboratory-, sistema robusto para el análisis numérico que ofrece dentro sus bondades un entorno de desarrollo integrado con su propio lenguaje de programación, disponible para diferentes sistemas operativos Windows, Linux, MAC (MathWorks, Inc., 1994). Dentro de las herramientas disponibles en Matlab se empleó el editor de interfaces gráficas de usuario (Guide), bajo el cual se realizó el diseño de la aplicación.

Para comparar y validar los resultados obtenidos a partir de la herramienta, se seleccionó como lugar de análisis la estación mareográfica ubicada en isla Gorgona. La serie de tiempo de marea disponible empleada para realizar los diferentes análisis se presenta a una resolución temporal horaria que inicia el 19 de diciembre de 2013 y finaliza el 30 de septiembre de 2015. Esta información es detallada en la Tabla 1, discriminando el porcentaje de datos disponibles por mes.

**Tabla 1.** Consolidado de datos serie de nivel del mar Isla Gorgona Dic/13 -Sept/15.

Mes	Años		
	2013	2014	2015
ENE	-----	92.04 %	97.98 %
FEB	-----	65.18 %	98.81 %
MAR	-----	0.00 %	92.88 %
ABR	-----	20.84 %	88.06 %
MAY	-----	82.80 %	100.00 %
JUN	-----	13.48 %	99.72 %
JUL	-----	52.15 %	96.64 %
AGOS	-----	100.00 %	99.33 %
SEPT	-----	100.00 %	99.45 %
OCT	-----	99.87 %	N/A
NOV	-----	100.00 %	N/A
DIC	40.73 %	100.00 %	N/A

### **Marea astronómica**

Es el resultado del movimiento periódico de ascenso y descenso del nivel del mar, las mareas son los procesos ondulatorios más regulares que se presentan en los océanos. Básicamente, la onda de marea es la manifestación de las fuerzas de atracción gravitacional ejercidas sobre la Tierra en rotación, por los cuerpos celestes, en especial la Luna y el Sol. Las respuestas del océano frente a las fuerzas generadoras de las mareas se manifiestan de diferentes formas, distinguiéndose principalmente mareas de tipo diurnas, semidiurnas y mixtas (Gómez, 2009).

Con base en lo anterior, conocer el comportamiento del nivel del mar en un determinado lugar proporciona información valiosa e indispensable para el diseño y construcción de obras marítimas, el manejo integrado de la zona costera y para garantizar la seguridad en la navegación, principalmente en lugares donde el rango de variación del nivel del mar es significativo.

Los estudios de la propagación de la onda de marea en cuerpos de agua tienen como objetivo reproducir los parámetros característicos y estables en el tiempo, que describen el régimen mareal del lugar de observación. Frecuentemente denominadas constantes mareales, estos parámetros surgen de una asunción implícita, la cual se basa en que las respuestas de las masas de agua a la acción de las fuerzas generadoras de las mareas no cambian en el tiempo (Gómez, 2009). A partir de estas constantes, por ser una variable determinista, la marea puede ser pronosticada con gran acierto, teniendo en cuenta que principalmente, debe su origen a la atracción gravitacional del Sol y de la Luna, siendo estos cuerpos celestes que experimentan movimientos periódicos que influyen más del 98 % de estas variaciones.

La marea, como componente astronómico del nivel del mar, puede descomponerse en un número finito de ondas conocidas como armónicos, cada una con período específico (que varía entre 12 horas y 18.6 años), que se asocia a algún movimiento planetario real o ficticio. Mediante la aplicación de la técnica de análisis de armónicos a datos del nivel del mar puede hallarse la amplitud y fase de los componentes

mareales de dicha serie, con lo cual se determina el comportamiento de la marea para un sitio en particular (OHI, 2010).

### **Análisis armónico**

Para el análisis de los componentes armónicos de la serie de tiempo observada, se empleó el paquete T\_TIDE, que se incorpora a las herramientas de análisis de Matlab. Esta herramienta está escrita en Fortran (Foreman, 1977). El paquete ajusta los componentes de marea por el método de mínimos cuadrados, teniendo en cuenta las frecuencias preestablecidas del mismo. Cuando se tienen series cortas de tiempo de los niveles del mar (menores a un mes) no se incluyen constituyentes con periodo mayor a 720 horas. La forma como el T\_TIDE resuelve este problema y en general los aspectos de la determinación de parámetros de mareas son discutidos por (Rosenfeld, 2009). La serie de marea empleada para la obtención de los armónicos comprende un periodo de tiempo con resolución horaria que va desde el primero de agosto de 2014 hasta el 30 de septiembre de 2015 (8 760 registros = 1 año).

### **Coefficiente de Courtier**

Las mareas en una región en particular pueden ser caracterizadas por la relación existente entre las magnitudes relativas de las amplitudes de los constituyentes diurnos y semidiurnos principales; esta relación es definida como el coeficiente de Courtier (Burling, 2003; Defant, 1958; Pugh D. T., 1987), cuya expresión matemática es representada por (1):

$$N_f = \frac{H_{K1} + H_{O1}}{H_{M2} + H_{S2}} \quad (1)$$

Donde:

- N<sub>f</sub>** Coeficiente de Courtier
- H<sub>K1</sub>** Amplitud (m) de la componente diurna lunisolar.
- H<sub>O1</sub>** Amplitud (m) componente lunar diurna.
- H<sub>M2</sub>** Amplitud (m) componente lunar principal semidiurna.
- H<sub>S2</sub>** Amplitud (m) componente solar principal.

A partir de este coeficiente las mareas pueden clasificarse de la siguiente forma:

- Si  $N_f < 0.25$ , son mareas consideradas de tipo semidiurna, es decir, aquellas en las que durante un ciclo de 24 horas ocurren dos pleamares y dos bajamares de similar amplitud.
- Si  $0.25 > N_f < 1.50$ , son mareas consideradas de tipo mixta, principalmente semidiurna.
- Si  $1.50 > N_f < 3.00$ , son mareas consideradas de tipo mixta, principalmente diurna. Este tipo de mareas se caracteriza por presentar dos pleamares y dos bajamares con amplitud diferente durante un ciclo de 24 horas.

- Si  $N_f > 3.00$ , son mareas consideradas de tipo diurnas, donde ocurre una pleamar y una bajamar en un ciclo de 24 horas.

### Análisis espectral

La representación espectral de un proceso consiste en expresar dicha situación como una suma de sucesiones periódicas, concretamente trigonométricas (Figura 3), y es una herramienta adecuada para resaltar las componentes periódicas. Por lo tanto, esta representación permite centrar la atención en las frecuencias de mayor interés.

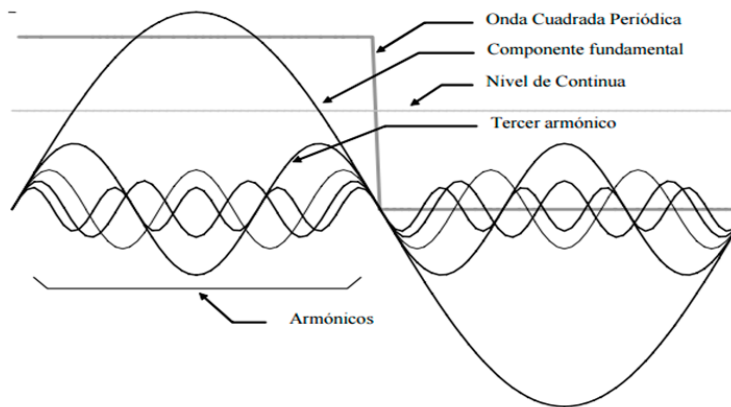


Figura 3. Esquema de una onda cuadrada con sus siete primeros armónicos (Carrillo, 2003).

Una función periódica  $f(t)$ , ya sea más o menos compleja, es una sucesión de números reales que se pueden escribir como combinaciones lineales de senos y cosenos (2), cuya frecuencia es múltiplo de la función periódica (Carrillo, 2003). Es decir, que dicha función puede descomponerse en una serie armónica infinita, así:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(n\omega_0 t - \theta_n) \quad (2)$$

Donde:  $\omega_0 (0 f_r = \omega_0 2\pi)$  es la frecuencia de la función periódica conocida como frecuencia natural; y  $a_n, b_n, C_n, \theta_n$ , son los coeficientes de la serie de Fourier, y definen la amplitud de las funciones sinusoidales que pueden obtenerse a partir de las siguientes expresiones:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_T f(t) dt; \quad a_n = \frac{2}{T} \int_T f(t) \cos(n\omega_0 t) dt; \quad b_n = \frac{2}{T} \int_T f(t) \sin(n\omega_0 t) dt \quad (3)$$

$$C_0 = \frac{a_0}{2}; \quad C_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}; \quad \theta_n = \tan^{-1}(b_n/a_n)$$

Donde, la notación  $\int_T dt$  significa que está extendida a un período cualquiera de la función periódica  $f(t)$ , por ejemplo, de:  $-T/2$  a  $+T/2$ , ó de  $0$  a  $T$ , etc.

Las series de Fourier generalizadas dan origen a las conocidas Transformadas de Fourier, a partir de las cuales puede representarse prácticamente cualquier tipo de función, periódica o no.

Transformada de Fourier:  $F(\omega) = \mathfrak{F}\{f(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt$  (4)

Transformada Inversa de Fourier:  $f(t) = \mathfrak{F}^{-1}\{F(\omega)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)e^{j\omega t} d\omega$  (5)

Donde:

- $t$  representa el tiempo, expresado en segundos y
- $\omega$  representa a la frecuencia, expresada en rad/s.

A partir de (4) se obtiene una función continua en el dominio de las frecuencias  $F(\omega)$ , conocido como espectro continuo de  $f(t)$ .

En aras de aplicar de forma eficiente la transformada de Fourier a una señal que representa un fenómeno físico se creó el algoritmo de cálculo de la transformada discreta de Fourier (DTF), pero con un menor coste computacional, esta notación también es conocida como transformada rápida de Fourier (FFT) (Carrillo, 2003). En este caso particular, este algoritmo fue empleado para descomponer la serie de tiempo de marea, y con ello, a partir del espectro, establecer las frecuencias predominantes en los ciclos mareales para validar las señales modeladas.

mediano plazo de la onda de marea, cuenta con tres módulos principales (Figura 4); el primero permite seleccionar la estación sobre la cual se desea trabajar, definir el periodo de tiempo a pronosticar y la incorporación de los datos observados, finalmente este módulo extrae los componentes armónicos y genera el pronóstico de marea deseado; a través del segundo módulo puede ser configurada la interfaz de visualización, permitiendo seleccionar el rango de días calendario de la gráfica (máximo 30 días), al igual que la referencia vertical (dátum), así como las unidades de medida; el tercer y último módulo permite verificar y guardar la tabla de pleamares y bajamares (en formato \*.txt), al igual que la gráfica en diferentes formatos (\*.png, \*.jpg o \*.tiff). Una vez implementada y puesta a punto la herramienta se realizó un ejercicio de prueba, tomando como caso de estudio la información correspondiente a la isla de Gorgona, obteniendo los siguientes resultados:

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Interfaz gráfica

La herramienta computacional fue diseñada con el objetivo de realizar pronósticos a corto y



Figura 4. Herramienta diseñada para el cálculo de pronósticos de mareas.



### Componentes armónicos

A la serie de tiempo registrada y observada en isla Gorgona le fue aplicado un análisis armónico (Leffler & Jay, 2009) y (Pawlowicz, 2002), identificándose en total 68 constituyentes armónicos, 24 de los cuales son considerados

como representativos, aportando un 95.45 % de la amplitud total de la onda. Los ángulos de fase son referidos al meridiano de Greenwich y los valores observados, tanto para la amplitud, como para la fase, están reportados dentro de un intervalo de confianza del 95 % (Tabla 2).

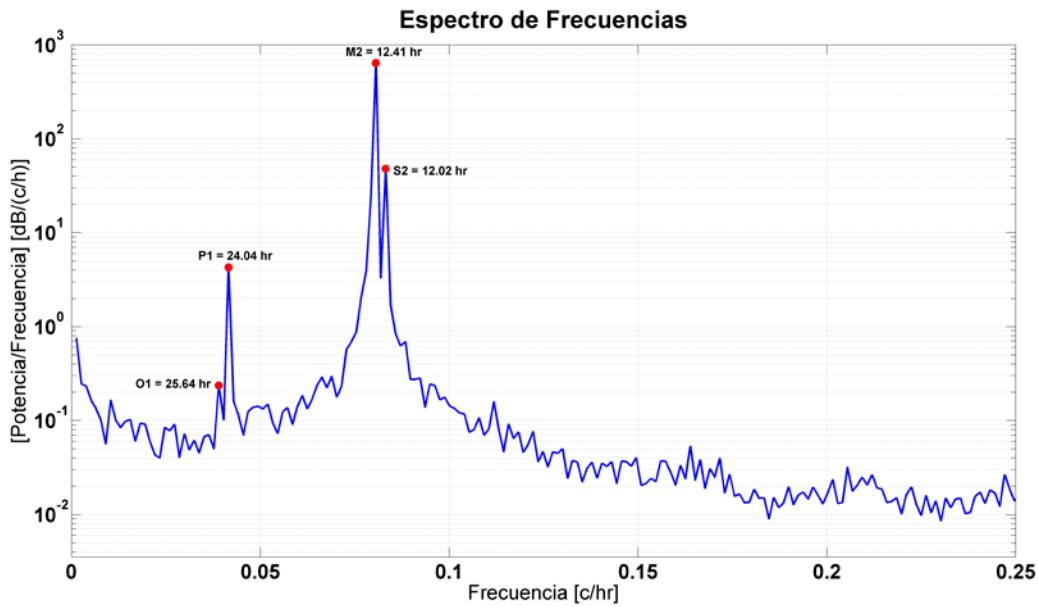
**Tabla 2.** Constituyentes armónicos representativos de la serie de nivel del mar, Dic. 2013–Sept. 2015 isla Gorgona.

Constituyente armónica	Frecuencia [c/hr]	Periodo [hr]	Amplitud (m)	Fase (°)
SA	0.0001	8766.2300	0.0609	264.9209
SSA	0.0002	4382.9063	0.0941	29.5637
O1	0.0387	25.8193	0.0190	134.2615
P1	0.0416	24.0658	0.0331	56.8625
S1	0.0417	23.9808	0.0143	32.9445
K1	0.0418	23.9344	0.0960	138.1716
J1	0.0433	23.0984	0.0090	43.3899
EPS2	0.0762	13.1272	0.0094	137.8474
2N2	0.0775	12.9053	0.0338	195.4096
MU2	0.0777	12.8717	0.0409	35.5371
N2	0.0790	12.6583	0.2715	112.8675
NU2	0.0792	12.6260	0.0499	312.2316
M2	0.0805	12.4206	1.2582	33.8671
LDA2	0.0818	12.2218	0.0087	293.5154
L2	0.0820	12.1916	0.0292	121.2591
T2	0.0832	12.0192	0.0227	348.2783
H2	0.0806	12.4069	0.0075	308.5812
S2	0.0833	12.0000	0.3311	31.6874
K2	0.0836	11.9672	0.0641	284.6159
M3	0.1208	8.2804	0.0055	226.9068
SK3	0.1251	7.9927	0.0051	334.0510
M4	0.1610	6.2103	0.0047	116.9492
MS4	0.1638	6.1033	0.0027	120.7466
S4	0.1667	6.0000	0.0021	137.0642

Con base en lo anterior se determinaron cinco componentes diurnos (K1, O1, P1, J1, S1), doce componentes semidiurnos (M2, S2, N2, K2, H2, 2N2, L2, T2, MU2, NU2, EPS2, LDA2), dos componentes de largo plazo (SA, SSA) y las cinco restantes corresponden a los componentes armónicos de aguas someras (MS4, M4, M3, S4, SK3). Los componentes semidiurnos representan un 86.23 % del total de la energía de la onda de marea, mientras que las restantes aportan un 13.77 %.

Posteriormente, se empleó la FFT (Figura 5), a partir del cual se pudo inferir que las componentes de marea más representativas se ubican alrededor de los 0.03 c/hr a 0.10 c/hr (frecuencias bajas), representando periodos de 25.04, 24.04, 12.41, 12.02 horas (Tabla 3), perteneciendo al grupo de las principales componentes semidiurnas y diurnas. Sin embargo, se observó que las componentes semidiurnas ostentan mayor energía.





**Figura 5.** Espectro de frecuencias de la serie de nivel del mar de Gorgona 2013-2015.

**Tabla 3.** Principales armónicos diurnos y semidiurnos serie de nivel del mar de Isla Gorgona 2013-2015.

Frecuencia [c/hr]	Periodo [hr]	Componente de marea asociada	Descripción
0.0387	25.8193	O1	Lunar principal diurna.
0.0418	23.9344	K1	Solar principal diurna.
0.0805	12.4206	M2	Lunar principal semidiurna.
0.0833	12.0000	S2	Solar principal semidiurna.

Para establecer el tipo de marea o régimen mareal característico de la isla de Gorgona se calculó el coeficiente de Courtier (1938) con base en las amplitudes de los componentes armónicos diurnos y semidiurnos principales, así:

$$N_f = \frac{H_{K_1} + H_{O_1}}{H_{M_2} + H_{S_2}} = \frac{0.0960 + 0.0190}{1.2582 + 0.3311} = 0.0723 \quad (7)$$

Teniendo en cuenta que y a los análisis mostrados con anterioridad, se estableció que la marea de la isla de Gorgona es de tipo semidiurna, correspondiendo al comportamiento típico del Pacífico colombiano (IDEAM, 2013; Vásquez, Iriarte, & Sánchez, 2018).

### **Validación del análisis armónico del nivel del mar, para la predicción de la onda de marea en Isla Gorgona**

Para elaborar predicciones de la onda de marea se hace necesario conocer los componentes armónicos de la onda (amplitud y fase) de cada ubicación para las que desee hacer la predicción. Estas componentes se obtienen como resultado del análisis armónico efectuado a los registros instrumentales. Si el análisis de componentes armónicas se realiza a series temporales de gran extensión, mayor será la precisión de la predicción, ya que se contará con un mayor número de armónicos; es decir, que la precisión

de la predicción estará condicionada a la cantidad de componentes armónicas empleadas. Partiendo de los valores conocidos de amplitud, fase y la frecuencia para cada componente, puede ser calculada en cualquier instante de tiempo (t) deseado utilizando la serie de Fourier (8):

$$f(t) = \sum_{i=0}^n A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) \quad (8.1)$$

Donde:

$A_i$ =Amplitud de la  $i$ -ésima onda

$\omega_i$ =Frecuencia angular de la  $i$ -ésima onda

$\varphi_i$ =Fase de la  $i$ -ésima onda

A partir de la frecuencia angular se puede determinar el período del fenómeno, con la siguiente expresión:

$$\omega_i = \frac{2\pi}{T_i} = 2\pi f_i \quad (8.2)$$

La amplitud y la fase son coeficientes obtenidos de la serie seno-coseno, mediante las relaciones:

$$a_i = A_i \sin(\varphi_i) \quad (8.3)$$

$$b_i = A_i \cos(\varphi_i)$$

A partir de las componentes armónicas obtenidas anteriormente (Tabla 2) se realizó una predicción de la serie temporal registrada por el mareógrafo, con la finalidad de validar la similitud entre ambas series (observada vs. pronosticada), tanto en amplitud como en fase. Al finalizar la predicción se efectuó un análisis estadístico exploratorio entre ambas series (Figura 6) para establecer el tipo de comportamiento de ambas series (tendencia).

La Figura 6 muestra un comportamiento positivo (recta ascendente) en ambas series, con escasa dispersión. Con la finalidad de medir la fuerza de la relación existente entre ambas series se efectuó un análisis de correlación (Spearman,

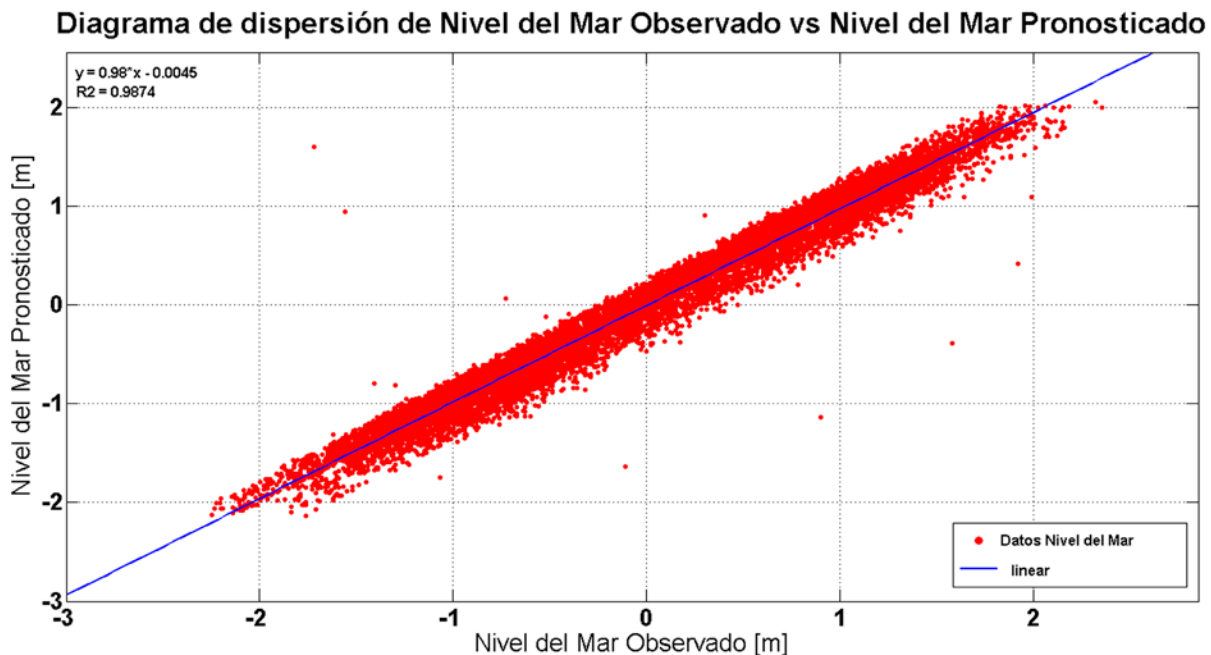
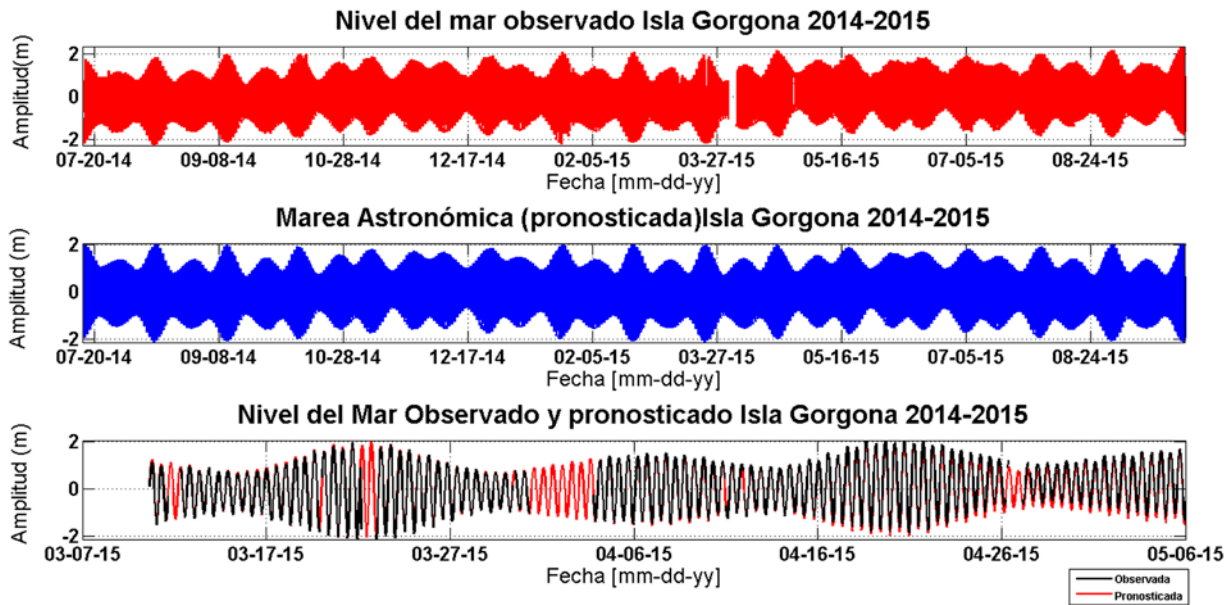


Figura 6. Diagrama de dispersión serie de nivel del mar observada y pronosticada.

1927), obteniendo como resultado un coeficiente de 0.99, siendo este significativamente alto, lo que permite inferir que las predicciones que se realicen basadas en los armónicos obtenidos de la onda de marea observada representarán acertadamente el comportamiento de dicha onda en isla Gorgona.

Una vez confirmado el porcentaje de aceptabilidad de la serie pronosticada, con respecto a la observada, en la Figura 7 se presentan los resultados obtenidos a través de la interfaz elaborada:



**Figura 7.** Comparación serie de marea observada vs. predicción.

En la figura anterior ambas series presentan una gran similitud, tanto en fase como en amplitud, y aquellas diferencias existentes en la serie pronosticada respecto de la observada pueden ser explicadas a partir del aporte meteorológico de la zona. Cabe resaltar que empleando la herramienta se pueden completar con un alto grado de confiabilidad los espacios vacíos donde no existen datos instrumentales, como se aprecia en la Figura 7, preservando el comportamiento normal de la serie observada.

## CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos del análisis armónico y del pronóstico de marea constituyen una evidencia confiable (coeficiente de correlación alto (0.99)) en cuanto a la representación de la onda de marea en isla Gorgona; sin embargo, se recomienda emplear una mayor extensión temporal en las series de tiempo observadas, teniendo en cuenta que si se cuenta con un mayor número de componentes armónicos

la precisión aumenta, permitiendo realizar pronósticos a largo plazo.

- El uso de la herramienta permite optimizar el proceso empleado para la realización de los pronósticos de marea, especialmente en aquellos lugares del Pacífico colombiano donde no se cuenta con información mareográfica instrumental, otorgando información operacional oportuna a usuarios internos y externos.
- El desarrollo de la herramienta propuesta, como cualquier proyecto de desarrollo y diseño informático, no está exento de imprevistos, dado que el medio cambia y evoluciona constantemente a medida que la sociedad, sus necesidades y recursos tecnológicos así lo hacen, en este sentido los conceptos básicos de la interfaz no se pierden, se generarían versiones actualizadas de la misma que continúen satisfaciendo su fin principal, la optimización del proceso, entrega oportuna, eficacia y eficiencia en la información requerida.

## REFERENCIAS

- Burling, M. P. (2003). *The tidal regime of Shark Bay, Western Australia, Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 57, 725-735, 2003. Australia. [https://doi.org/10.1016/S0272-7714\(02\)00343-8](https://doi.org/10.1016/S0272-7714(02)00343-8)
- Carrillo, C. J. (2003). *Fundamentos del Análisis de Fourier*. Vigo, España.
- Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico. (2013). *Zonificación Fisiográfica del Litoral Pacífico Colombiano*. Informe Técnico, CCCP. Tumaco (Colombia).
- Defant, A. (1958). *Ebb and flow*. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press.
- Foreman, M. (1977). *Manual for Tidal Heights Analysis and Prediction*, Pacific Marine Science Report 7710, Institute. Sidney, Patricia bay, Australia.
- Gómez, M. A. (2009). *cybertesis.uach.cl*. Retrieved 02 25, 2012
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2013). *Pronóstico de pleamares y bajamares costa Pacífica colombiana*. Ideam. Bogotá, Colombia.
- Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "José Benito Vives de Andrés". (2001). *Gorgona Marina: Contribución al conocimiento de una isla única*. (L. Barrios, & L.-V. M, Eds.). Invemar. Santa Marta, Colombia.
- Leffler, K.; Jay, D. (2009). Enhancing tidal harmonic analysis: Robust (hybrid L1=L2) solutions, *Continental Shelf Research*, 29, 78- 88. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2008.04.011>
- MathWorks, Inc. (1994). *MathWorks*. Retrieved from MathWorks web site: <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>
- Naveda, J. (2011). Variación en el nivel del mar como consecuencia del cambio climático global: Una evaluación de la costa Venezolana. *Temas de Coyuntura*, 61-85.
- Organización Hidrográfica Internacional. (2010). *Manual de Hidrografía*. (OHI). Mónaco: Bureau Hydrográfico Internacional.
- Pawlowicz, R. (2002). Classical tidal harmonic analysis with errors in matlab using t-tide. *Computers&Geosciences*, 28, 929-937. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(02\)00013-4](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(02)00013-4)
- Pugh, D. T. (1987). *Tides, surges and mean sea-level: A handbook forengineers and scientists*. Chichester, United Kingdom.
- Pugh, D.; Woodworth, P. (2015). *Sea-Level Science:Understanding Tides, Surges, Tsunamis and Mean Sea-Level Changes*. *Contemporary Physics*, 394. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139235778>
- Rosenfeld, L. (2009). Methodology for a regional tidal model evaluation, with application to central California deep sea research part II. *Tropical studies in oceanography* pag 199-218. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2008.08.007>
- Vásquez, L.; Iriarte, J.; Sánchez, R. (2018). Determinación de las cotas máximas de inundación, mediante modelación numérica, en Bahía Solano Chocó. *Boletín Científico CIOH*, 37, 17-34. <https://doi.org/10.26640/22159045.2018.447>