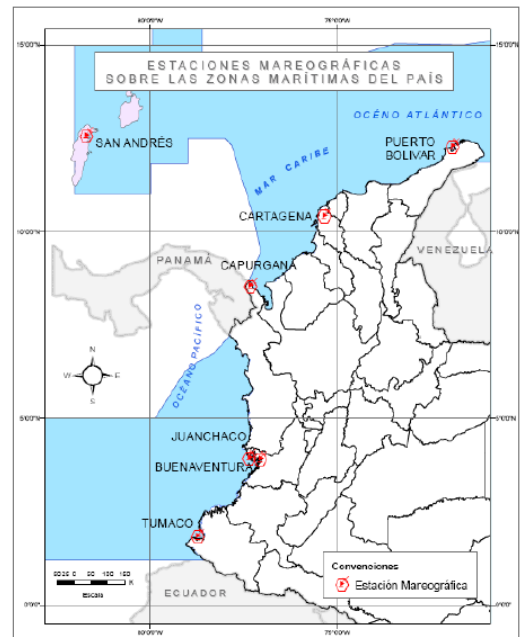
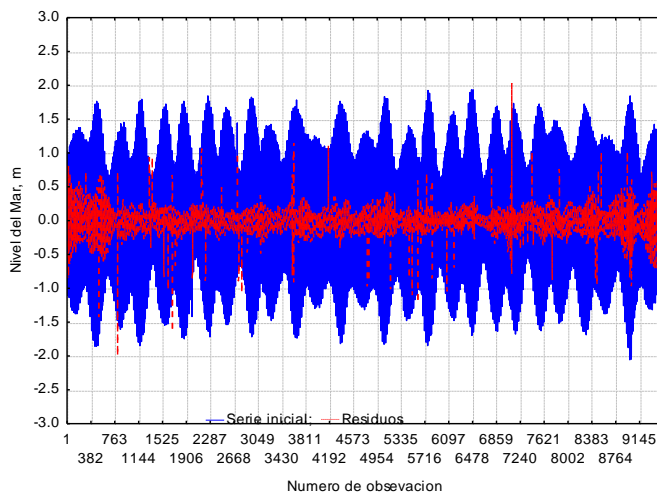


ESTUDIO SOBRE LA DETERMINACIÓN DE LAS COMPONENTES ARMÓNICAS DE LA MAREA Y DESCRIPCIÓN DE SU COMPORTAMIENTO EN DIFERENTES PUNTOS DE LAS COSTAS COLOMBIANAS



Ígor Málíkov
(Oceanólogo)

CONTENIDO

RESUMEN	3
1. INTRODUCCIÓN	4
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1 CLASIFICACIÓN DE LA MAREA.....	4
2.2 ANÁLISIS ARMÓNICO DE LA MAREA.....	7
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	11
3.1. ÁREA DE ESTUDIO E INFORMACIÓN UTILIZADA.....	11
3.2. NIVELACIÓN DE LAS SERIES ANALIZADAS	13
4. DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE LAS OSCILACIONES NO PERIÓDICAS EN LAS SERIES DEL NIVEL DEL MAR DE LOS PUNTOS DE OBSERVACIÓN.....	20
4.1. BUENAVENTURA.....	20
4.2. TUMACO.....	23
4.3. JUANCHACO	25
4.4. CARTAGENA	27
4.5 PUERTO BOLÍVAR.....	29
4.6. CAPURGANÁ.....	31
4.7 SAN ANDRÉS	33
5. DETERMINACIÓN DE LAS COMPONENTES DE LA MAREA DE LAS SERIES DE LOS PUNTOS DE OBSERVACIÓN.....	35
5.1. COSTA PACÍFICA	35
5.2. COSTA CARIBE	38
6. DETERMINACIÓN DEL TIPO DE OSCILACIONES DEL NIVEL DEL MAR EN LOS PUNTOS DE OBSERVACIÓN.....	43
BIBLIOGRAFÍA.....	45

ESTUDIO SOBRE LA DETERMINACIÓN DE LAS COMPONENTES ARMÓNICAS DE LA MAREA Y DESCRIPCIÓN DE SU COMPORTAMIENTO EN DIFERENTES PUNTOS DE LAS COSTAS COLOMBIANAS

RESUMEN

Se presentan los métodos de análisis de series del nivel del mar registrados en tres puertos del Pacífico y cinco del Caribe colombiano. El análisis espectral permitió identificar diferentes periodicidades en las series iniciales. Se encontró que en las series del Pacífico el mayor aporte a las oscilaciones lo da la componente M_2 , y en las del Caribe el mayor aporte lo presenta la componente K_1 . El análisis armónico determinó las componentes principales de las mareas en los puntos de observación. Se estableció que el tipo de marea es semi-diurno en el Pacífico y diurno-mixto en el Mar Caribe. En general la amplitud de la marea es mayor en el Pacífico y menor en el Caribe. En el Pacífico existe una mayor igualdad entre las fases de las mareas de Tumaco y Buenaventura y una pequeña diferencia con la de Juanchaco. En el Caribe la igualdad de fases de la marea se aprecia en todos los puertos con excepción de Puerto Bolívar, lo cual puede deberse a la corta longitud de la serie.

Palabras Claves: Mareas, análisis armónico, componente de mareas, nivel del mar, Pacífico Colombiano, Caribe Colombiano.

ABSTRACT

The realized methods for the analysis of sea level series registered in three ports over the Colombian Pacific and five over the Colombian Caribbean Sea are shown. The spectral analyses allowed identify different periodicities in the initial series. It was found, that biggest contribution to the oscillations in the pacific series is given by M_2 component, and in the Caribbean Sea series is given by K_1 component. The harmonic analysis determined the principal tide components in the observation points. It was established that the type of tide is semi diurnal in the Colombian pacific and mixed diurnal in the Colombian Caribbean Sea. In general the tide amplitude is major in the pacific and minor in the Caribbean Sea. In the Pacific there is equality between the phase tides of Tumaco and Buenaventura and there is a small difference with Juanchaco. In the Caribbean Sea the phase tide equality is appreciated in all ports but Port Bolivar is the exception, which can be due to short length of the series.

Key words: Tides, harmonic analysis, tide component, sea level, Colombian Pacific, Colombian Caribbean Sea.

1. INTRODUCCIÓN

En la presente Nota Técnica se dan a conocer los resultados de los objetivos planteados en el Contrato de Prestación de Servicios No. 170/2009, el cual tenía como objeto “La determinación de los componentes armónicos de la marea y la descripción de su comportamiento en diferentes puntos de las costas colombianas.

El documento consta de 6 partes. En las tres primeras se hace una introducción sobre la clasificación de las mareas y los aspectos teóricos del análisis armónico y seguidamente se describen los materiales y métodos utilizados para el análisis de las series iniciales del nivel del mar sobre el Caribe y el Pacífico Colombianos; en la cuarta parte se determina el porcentaje de las oscilaciones no periódicas en las series del nivel del mar para los puntos de observación y en la quinta y sexta partes, se calculan los componentes armónicos de la marea y se establece su clasificación. Por último se da a conocer el listado de la bibliografía utilizada.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 CLASIFICACIÓN DE LAS MAREAS

Todos los procesos y fuerzas que influyen en la oscilación de la superficie del nivel del mar en forma general se pueden dividir en los siguientes grupos:

- Fuerzas cósmicas;
- Fenómenos geodinámicos y geotérmicos en la corteza terrestre (terremotos y maremotos, actividad volcánica, levantamientos y descensos de la tierra durante los siglos y movimientos tectónicos modernos);
- Influencias mecánicas y físico-químicas, producidas por la radiación solar y por la actividad de la atmósfera, así como: procesos calóricos del océano, cambios de la presión atmosférica, el viento, vertientes de la costa, entre otros.

Las oscilaciones periódicas se forman por las fuerzas cósmicas. Los fenómenos geodinámicos y geotérmicos en la corteza terrestre llevan a formar oscilaciones del nivel del mar no periódicas de corta duración y a veces catastróficas, como tsunamis o cambios muy lentos por levantamientos o descensos de la tierra.

Las influencias mecánicas y físico-químicas también producen oscilaciones del nivel del mar no periódicas, entre ellas se encuentran:

- Oscilaciones del nivel por el flujo-reflujo, como resultado de la influencia tangencial de los flujos del aire sobre la superficie acuática;
- Oscilaciones producidas por cambios en la presión atmosférica. Ante un aumento de la presión atmosférica en 1 mb, el nivel del mar disminuye 10 mm y viceversa;
- Oscilaciones generadas por desigualdad en el proceso de intercambio de humedad (evaporación, precipitaciones, vertientes costeros) relacionados con el cambio en la cantidad de agua en diferentes partes del océano.
- Oscilaciones como consecuencia del cambio en la densidad del agua. Ante un aumento de la densidad del agua el nivel disminuye y al contrario.

Las oscilaciones periódicas se determinan con el análisis espectral. En hidrometeorología la idea del espectro es normalmente utilizada, para la determinación de períodos escondidos de las series de tiempo, para la investigación de las leyes de la estructura de frecuencias o para la modelación y pronósticos de los procesos. De acuerdo con el análisis armónico, los cambios complejos del nivel del mar se presentan como la suma de ondas regulares, cada una de las cuales tiene carácter de oscilaciones simples armónicas. Entonces, utilizando el análisis espectral se pueden determinar todas las componentes de una serie de nivel del mar o las armónicas.

La utilización de un filtro para la estimación de una señal cíclica de una serie temporal, permite tanto la estimación de tendencias a largo plazo como la extracción directa de una señal cíclica mediante, filtros de paso bajo y de paso en banda. El filtro de paso en banda, permiten el paso de un rango medio de frecuencias, definido entre una frecuencia de corte inferior y una frecuencia de corte superior (Emery y Thomson, 2001).

Con la ayuda de un filtro de pasa banda, de una serie inicial del nivel del mar, se extraen todas las armónicas dejando las oscilaciones del nivel del mar no periódicas.

Utilizando el análisis armónico se determinaron las amplitudes y fases de todas las componentes armónicas para cada punto de observación del nivel del mar.

Para la clasificación de las mareas se utiliza la relación de amplitudes H_{K_1} y H_{O_1} de las componentes principales diurnas de las ondas de la marea con la amplitud H_{M_2} de la componente principal semidiurna: $\frac{H_{K_1} + H_{O_1}}{H_{M_2}}$ (Egorov, 1966).

Dependiendo del valor de esta relación se determinan los siguientes tipos de mareas, dependiendo de si cumplen o no con las relaciones enunciadas:

1. Mareas semidiurnas, cuando se cumple que:

$$0 < \frac{H_{K_1} + H_{O_1}}{H_{M_2}} < 0.5.$$

2. Mareas diurnas:

$$\frac{H_{K_1} + H_{O_1}}{H_{M_2}} > 4.0.$$

3. Mareas mixtas:

$$0.5 < \frac{H_{K_1} + H_{O_1}}{H_{M_2}} < 4.0.$$

Las Mareas mixtas, pueden ser:

- Semidiurnas mixtas:

$$0.5 < \frac{H_{K_1} + H_{O_1}}{H_{M_2}} < 2.0$$

- Diurnas mixtas:

$$2.0 < \frac{H_{K_1} + H_{O_1}}{H_{M_2}} < 4.0.$$

Estos tres tipos de mareas son los principales, aunque existen otros, llamados anómalos:

- Semidiurnos solares;
- Semidiurnos paralácticos;
- Semidiurnos de aguas someras;
- Semidiurnos dobles (de $\frac{1}{4}$ del día);
- Bor, el cual se presenta en los deltas de los ríos, es una deformación de las mareas debido a la influencia de las condiciones físico-geográficas locales. Este nombre es conocido así por la lengua inglesa, y en francés lleva por nombre mascare.

La marea semidiurna se caracteriza por dos mareas altas y dos mareas bajas durante el día lunar, por eso el periodo es igual a la mitad del día lunar (12 h 25 m). Las alturas de las mareas altas y bajas siguientes tienen muy poca diferencia, debido a que la marea semidiurna se superpone a la marea diurna.

También las mareas semidiurnas presentan diferentes oscilaciones durante el mes, las cuales dependen de las fases de la luna. Las mareas altas se observan después de la luna llena y luna nueva, lo cual corresponde a la marea de sicigia. Luego de la sicigia, el valor de la marea disminuye y cuando la luna pasa al primer $\frac{1}{4}$ o al último $\frac{1}{4}$, la marea será mínima, a esto se le llama marea de cuadratura.

Las mareas semidiurnas mixtas tienen en general un carácter semidiurno. Durante el mes lunar conservan dos mareas altas y dos mareas bajas en el día lunar. Ante una mayor declinación de la luna se observan significativas desigualdades diurnas, las segundas mareas altas y bajas pueden expresarse débilmente. Ante una declinación nula de la luna las mareas tienen un carácter similar al de las mareas regulares diurnas.

Las desigualdades semimensuales en el valor de estas mareas también están relacionadas con las fases de la luna. Los máximos de las mareas se observan en luna nueva y en luna llena (mareas de sicigia) y los mínimos, cuando la luna se encuentra en el primer $\frac{1}{4}$ y en el último $\frac{1}{4}$ (mareas de cuadratura), entre más cercano a 2 esté el valor de la relación $\frac{H_{K_1} + H_{O_1}}{H_{M_2}}$, más fuerte se realiza la declinación de la luna en el valor de la marea y por eso se ven más las desigualdades diurnas.

Las mareas diurnas mixtas se caracterizan por la predominancia durante el mes lunar de las mareas diurnas con una marea alta y una marea baja en el día lunar (24 horas 50 minutos). Pero cuando la declinación lunar es cercana a cero, se observan dos mareas altas y dos mareas bajas en el día lunar. Las desigualdades semimensuales están relacionadas con la declinación lunar. Ante una declinación máxima de la luna el valor de la marea es máximo (pleamar) y tiene un carácter de marea diurna. Con una declinación lunar mínima el valor de la marea disminuye y aparecen las segundas mareas altas y bajas. El valor de la marea entonces es mínimo. Los cambios de las fases de la luna prácticamente no se notan en el valor de la marea. Entre más cercano a 4 sea el valor de la relación $\frac{H_{K_1} + H_{O_1}}{H_{M_2}}$, entonces las mareas diurnas mixtas estarán más cerca a las mareas diurnas.

Las mareas diurnas se caracterizan por tener una marea alta y una marea baja durante el día lunar. Las desigualdades de las mareas están relacionadas con la declinación lunar. Ante una declinación máxima de la luna, el valor de la marea es máxima (pleamar). Pero la marea máxima empieza no en el momento de la declinación máxima

de la luna, sino después de un tiempo (edad de la marea diurna). Cuando la declinación lunar es igual a cero, el valor de la marea es mínima (bajamar).

Las mareas semidiurnas solares tienen un período igual a la mitad del día solar, es decir de 12 horas. Por eso sus mareas altas y mareas bajas se observan siempre a las mismas horas del día.

Las mareas semidiurnas paralácticas se diferencian de las semidiurnas solamente por el carácter de las desigualdades semimensuales. El valor de ellas cambia dependiendo del cambio de la distancia entre la luna y la tierra, y no de las fases de la luna. Ante una distancia mínima entre la luna y la tierra durante un mes las mareas son máximas, y ante una distancia máxima, las mareas son mínimas.

Las mareas semidiurnas de las aguas someras se diferencian de las semidiurnas por el carácter de levantamiento y hundimiento del nivel. La curva de los cambios del nivel ante estas mareas es asimétrica y el tiempo de aumento y disminución puede diferenciarse mucho entre sí. Estas diferencias son mayores entre más grande sea la influencia de la disminución de la columna de agua.

Las mareas semidiurnas dobles se caracterizan por tener durante el día cuatro mareas altas y cuatro mareas bajas. Las alturas seguidas de las mareas altas y bajas se diferencian mucho entre sí, lo que conforma desigualdades dobles semidiurnas. El valor de la marea cambia dependiendo de las fases de la luna.

El bor se observa en la desembocadura de los ríos y presenta una desfiguración limitada de las mareas bajo la influencia de las condiciones físico-geográficas. A consecuencia de la fricción desde el fondo por el flujo de agua, la onda de la marea presenta una acción de freno sobre el agua que sale del río, y el estrechamiento de la desembocadura disminuye fuertemente el tiempo de crecimiento y la onda de la marea se distribuye en forma de oleaje.

El estudio del movimiento celeste del sistema Sol-Luna-Tierra es complejo debido que en él se analizan las influencias en los componentes principales de otros periodos moduladores correspondientes a periodos de 1 mes, 1 año, 8.85 años, 18.61 años y 21 000 años. El efecto de la modulación divide a las mareas en periodos cercanos a 1 y 2 ciclos por día (Manual UNESCO, 2006).

Las mareas explicadas anteriormente son las diurnas y semidiurnas, pero existen también tri-diurnas (1/3 del día) y mareas de periodos aún más cortos. Estas mareas pueden ser generadas principalmente por los componentes de las mareas de aguas someras influenciadas por fuerzas de fricción. Ellos tienen periodos de 2, 4 y 6 ciclos por día y hasta 12 en áreas muy someras. El régimen de la marea varía enormemente en diferentes partes del mundo. La mayor parte de las regiones está dominada por las mareas semidiurnas, reflejando la importancia de los terminos semidiurnos principales en la marea. Sin embargo, hay muchas áreas donde las mareas son predominantemente diurnas, y otras donde el régimen es mixto, es decir donde los componentes diurno y semidiurno tienen una magnitud comparable (Manual UNESCO, 2006).

2.2 ANALISIS ARMÓNICO DE LAS MAREAS

Laplace fue el primero que propuso este método para cálculo de las mareas, después fue desarrollado por Tomson y Darwin (Pugh, 1996; Neumann y Pierson, 1966; Egorov, 1966).

La esencia de los análisis armónicos radica en que los cambios complejos del nivel bajo la acción de mareas, se presentan como la suma de curvas (ondas) regulares, cada una de las cuales tiene carácter de oscilaciones simples armónicas en forma:

$$R \cos(qt - \zeta) \quad (2.1)$$

donde R es la amplitud de onda; q es la velocidad de ángulo de onda; t es el tiempo promedio del sol; ζ es la fase inicial de onda.

La amplitud de marea R se presenta como fH , donde H es una amplitud promedio de onda, la cual depende de las condiciones físico geográficas del sitio y es constante para este punto; f es un multiplicador reductivo, el cual depende de las condiciones astronómicas y se calcula por las leyes de movimiento de los astros.

La fase inicial ζ se presenta como $(\nu_0 + u) - g$, donde $(\nu_0 + u)$ es un argumento inicial astronómico; g es el ángulo de posición de onda, y depende de las condiciones físico geográficas del lugar.

Los componentes H y g de cada onda se determinan por medio de las observaciones de oscilaciones de nivel del punto (lugar) y se denominan constantes armónicas.

La fórmula para los cálculos de altura de marea con el método de análisis armónico puede ser presentada de la siguiente forma:

$$h = Z_0 + \sum f_n H_n \cos(q_n t + (\nu_0 + u)_n - g_n), \quad (2.2)$$

donde Z_0 es la altura promedio del nivel del mar en el punto de observación y n es la cantidad de las ondas sumadas.

La fórmula general para los cálculos de mareas tiene 93 componentes (ondas), pero en la práctica se pueden calcular las mareas utilizando solamente 8-11 componentes principales de las ondas de marea. Estos se dividen en:

- Ondas semi diurnas: Lunar principal (M_2), Solar principal (S_2), Lunar mayor elíptica (N_2), Lunar-Solar declinacional (K_2)
- Ondas diurnas: Lunar principal diurna (O_1), Solar principal diurna (P_1), Lunar eclíptica mayor diurna (Q_1), Lunar-solar diurna declinacional (K_1);
- Ondas de aguas someras o muy poco profundas: $\frac{1}{4}$ diurna de luna (M_4), $\frac{1}{6}$ diurna de luna (M_6) y $\frac{1}{4}$ diurna de luna-sol (MS_4).

Los continuos armónicos de las ondas principales se calculan por las observaciones horarias de las oscilaciones del nivel, en un periodo de 30 días. Para esto, se conforma la ecuación principal de la altura de marea 4.2, con los siguientes cambios:

$$fH = R; (\nu_0 + u) - g = -\zeta.$$

Entonces la fórmula adquiere la forma: $h = Z_0 + \sum R \cos(qt - \zeta)$. Se saca el \cos para cada onda $R \cos(qt - \zeta) = R \cos \zeta \cos qt + R \sin \zeta \sin qt$. Suponiendo que $R \cos \zeta = A$, $R \sin \zeta = B$, se obtiene:

$$h = Z_0 + \sum (A \cos qt + B \sin qt) \quad (2.3)$$

Las alturas del nivel horario h se determinan por las observaciones. Las velocidades de ángulo q de cada onda son conocidas por la teoría de análisis armónico. Entonces en la fórmula (4.3) se desconocen los coeficientes A y B de cada onda.

Para la determinación de los armónicos continuos de 11 ondas son necesarias aproximadamente 22 ecuaciones, pero esta mínima cantidad no es suficiente para lograr total exactitud. Por eso se conforma una cantidad de ecuaciones en 12 veces más de los coeficientes desconocidos, con las cuales se puede determinar los coeficientes A y B , utilizando el método de los mínimos cuadrados.

Para determinar los coeficientes por el método de mínimos cuadrados es necesario conformar ecuaciones normales, que exigen cálculos muy complejos. Para facilitar los cálculos, Darwin propuso un método, que permite determinar las componentes de ondas separadas, a partir de las alturas observadas de las mareas.

En esencia éste método plantea lo siguiente:

Se supone que la altura sumatoria de la marea h_t se determina solamente por dos componentes de ondas M_2 y S_2 , las cuales están cercanas por el periodo y tienen diferentes amplitudes H y fases g , es decir:

$$h_t = h_t^{M_2} + h_t^{S_2} = H_{M_2} \cos(q_{M_2} t - g_{M_2}) + H_{S_2} \cos(q_{S_2} t - g_{S_2}) \quad (2.4)$$

Así como los periodos de ondas y sus velocidades de ángulos no son iguales, el resto de las fases entre cualquier par de ondas va a aumentarse. Si en el primer día, el resto de fases entre las ondas seleccionadas M_2 y S_2 , es pequeño, éste aumentará día a día, hasta llegar a 360, por consiguiente la cantidad de estos días puede ser calculada (periodos).

Debido a que los periodos de ondas M_2 y S_2 son iguales a:

$$\tau_{M_2} = 360 / q_{M_2} \text{ y } \tau_{S_2} = 360 / q_{S_2} ,$$

Se supone que la onda M_2 ya completó su ciclo de 360°, entonces igualando, se obtiene:

$$q_{M_2} \tau_{M_2} = q_{M_2} 360 / q_{M_2}$$

Ahora, cuando la onda S_2 , completa un ciclo de 360°, la ecuación es:

$$q_{S_2} \tau_{S_2} = q_{S_2} 360 / q_{M_2}$$

De forma tal que, después de n ciclos de la onda M_2 la expresión se reduce a:

$$(q_{M_2} - q_{S_2}) \frac{360}{q_{M_2}} n .$$

Se asume que las demás fases son iguales a 360°, para poder determinar la cantidad de días de la onda M_2 :

$$\text{Si } (q_{M_2} - q_{S_2}) \frac{360}{q_{M_2}} n = 360, \quad n = \frac{q_{M_2}}{q_{M_2} - q_{S_2}}. \quad (2.5)$$

Para el cálculo de los componentes de la fórmula sumatoria de altura de marea (4.4), se utiliza la fórmula:

$$\begin{aligned} h_t^{M_2} &= H_{M_2} \cos(q_{M_2} t - g_{M_2}), \\ h_t^{S_2} &= H_{S_2} \cos(q_{S_2} t - g_{S_2}). \end{aligned}$$

Para esto se suman los horarios de altura del nivel h_t , obtenidos a la misma hora de la onda M_2 , cada día.

El total de días n , se obtiene de la fórmula (4.5), entonces para este periodo, la onda S_2 pasará por la fase, dependiendo de la onda M_2 en 360° , lo que significa que la onda S_2 va a pasar por todas las posibles posiciones dependiendo de la onda M_2 . Así, la suma de las alturas de la onda S_2 para la misma hora de la onda M_2 , por n días es igual a cero.

Para cualquier hora de la onda M_2 :

$$\text{La igualdad } \sum_1^n h_t = \sum_1^n h_t^{M_2} + \sum_1^n h_t^{S_2} \text{ pasa a } \sum_1^n h_t = \sum_1^n h_t^{M_2}, \text{ porque } \sum_1^n h_t^{S_2} = 0.$$

Como en la hora t de la onda M_2 su altura permanece constante, entonces se puede escribir:

$$\sum_1^n h_t = n h_t^{M_2}, \text{ de donde } h_t^{M_2} = \frac{1}{n} \sum_1^n h_t.$$

La fórmula obtenida servirá para cualquier hora de la onda M_2 y por lo tanto permite determinar 24 ordenadas promedios de horarios de la onda M_2 , de generales ordenados horarios h_t . Entonces, para cada onda se pueden conformar 24 ecuaciones del tipo: $h_t^{M_2} = H_{M_2} \cos(q_{M_2} t - g_{M_2})$.

Se supone que:

$$\begin{aligned} H_{M_2} \cos q_{M_2} &= A_{M_2} \text{ y } H_{M_2} \sin q_{M_2} = B_{M_2}, \text{ de allí se obtiene} \\ h_t^{M_2} &= A_{M_2} \cos q_{M_2} t + B_{M_2} \sin q_{M_2} t. \end{aligned} \quad (2.6)$$

Así se pueden hacer 24 ecuaciones para cada hora t de la onda M_2 durante un periodo de 0 hasta 23 horas. En esas ecuaciones se tienen solo dos coeficientes desconocidos A_{M_2} y B_{M_2} , los cuales se determinan con el método de mínimos cuadrados.

De la teoría de mínimos cuadrados se sabe, que si el argumento t se obtiene con igual intervalo, los coeficientes A_{M_2} y B_{M_2} se determinan con las fórmulas simples:

$$A_{M_2} = \frac{1}{12} \sum_0^{23} h_t^{M_2} \cos q_{M_2} t, \quad (2.7)$$

$$B_{M_2} = \frac{1}{12} \sum_0^{23} h_t^{M_2} \sin q_{M_2} t. \quad (2.8)$$

Para disminuir los errores en el cálculo de los coeficientes A_{M_2} y B_{M_2} son necesarias al menos 24 ecuaciones. De igual manera se determinan los coeficientes A y B de otros componentes de las ondas.

Determinando los valores A y B , se obtienen los continuos armónicos.

Como $A = R \cos \zeta$ y $B = R \sin \zeta$, entonces, se puede encontrar R y ζ mediante las formulas $R = \sqrt{A^2 + B^2}$, $\text{tg} \zeta = B / A$.

Tomando los valores multiplicadores de reducción f y el argumento inicial astronómico en hora cero del primer día de observaciones $(v_0 + u)$, ya establecidos en tablas, es posible encontrar $H = R / f$; $g = (v_0 + u) + \zeta$.

Finalmente, conocidos los armónicos continuos, se puede calcular la altura de la marea para cualquier día y hora del año.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. ÁREA DE ESTUDIO E INFORMACIÓN UTILIZADA

Los puntos analizados para hacer el cálculo de los armónicos, están localizados sobre los litorales Pacífico y Caribe colombianos (Fig. 1).

En Colombia la medición del nivel del mar se hace con mareógrafos convencionales y/o automáticos, en las estaciones mareográficas de: Buenaventura, Tumaco y Juanchaco sobre el Pacífico y Capurganá, San Andrés, Cartagena y Puerto Bolívar sobre el Caribe. En la tabla 1 se relaciona el nombre de los puertos con sus coordenadas y las fechas de inicio de registro de las series horarias del nivel del mar.

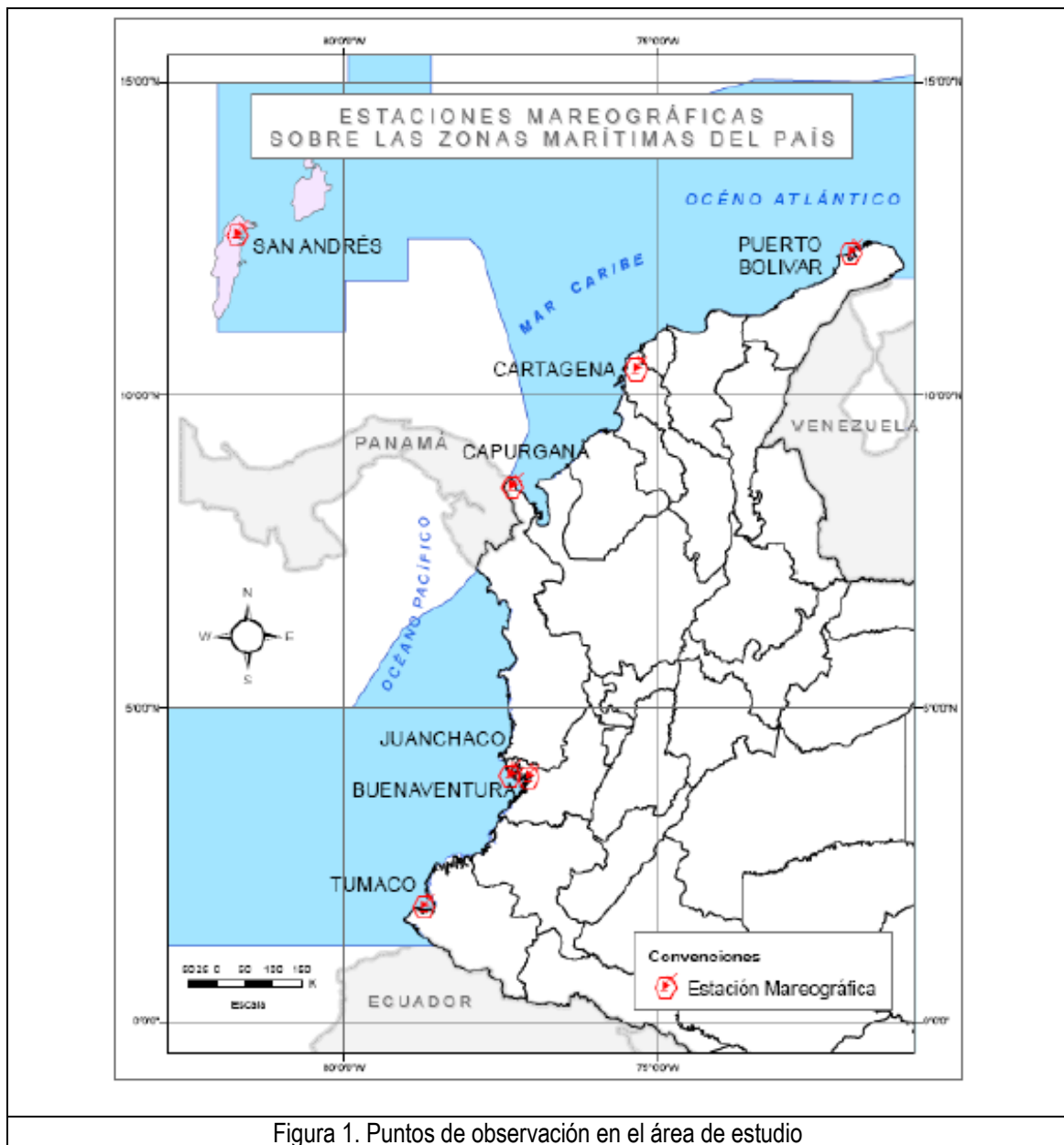


Tabla 1. Localización de los mareógrafos y características de las series del nivel del mar sobre el Caribe y el Pacífico colombiano.

Nombre	Latitud (N)	Longitud (W)	Fecha de registro	Zona Marítima	MUNICIPIO
Escuela Naval CIOH	10° 23' 22"	75° 31' 54.3"	noviembre del 1951 – diciembre 1988	Caribe	Cartagena
Tumaco	1° 49' 0.9"	78° 43' 49"	noviembre del 1951- actual	Pacífico	Tumaco
Juanchaco	3° 55' 46.4"	77° 21' 06.6"	junio del 2005 -octubre del 2008	Pacífico	Buenaventura
Buenaventura	3°53'25.0"	77°03'43.8"	Marzo del 1952 - actual	Pacífico	Buenaventura
Capurganá	8°36'58.5"	77°19'41.8"	abril del 2007 - actual	Caribe	Acandí
San Andrés	12° 33' 21.8"	81° 42' 14.3"	Enero del 1997 – diciembre del 2008	Caribe	San Andrés
Puerto Bolívar	12°13'27.4"	71°58'3.6"	15 de julio del 2009 - actual	Caribe	Uribe

3.2. NIVELACIÓN DE LAS SERIES ANALIZADAS

Una estación mareográfica para la toma del nivel del mar, debe ser verificada periódicamente calibrando el mareógrafo por su posición y nivel con relación a los puntos de referencia cercanos a éste, los cuales deben pertenecer a una red geodésica nacional.

Después de realizar la nivelación, el mareógrafo debe ser re-posicionado de tal forma, que los datos sean corregidos con relación al punto cero o de referencia principal, establecido inicialmente en la primera instalación del mareógrafo, con el fin de obtener una serie continua en el tiempo.

Las series de registro originales de las estaciones objeto de estudio, presentan discontinuidades en el nivel de referencia. Para corregir esta desnivelación, deben utilizarse los resultados de las topografías efectuadas a lo largo del tiempo. En este trabajo estos datos no fueron utilizados, porque los levantamientos topográficos no se realizaron con suficiente periodicidad y además la cantidad de verificaciones no coincide con los desniveles presentes en las series.

Por lo tanto, las series originales del nivel del mar fueron reconstruidas de la siguiente forma:

Para calibrar la serie temporal de cada estación a una única referencia a lo largo de todo el periodo, se estudió el comportamiento de las diferencias entre las series de las estaciones localizadas en la misma costa colombiana.

Se aplicó el Test de Homogeneización Normal Estándar (THNE) propuesto por Alexanderson (1999) para cada una de las series.

El THNE se aplicó teniendo en cuenta la siguiente modificación, relacionada con la determinación de los valores promedios mensuales. Para cada uno de los periodos discontinuos de la serie, se toma el promedio mensual del último mes del tramo de referencia y del primer mes del tramo siguiente; se calcula la diferencia entre estos dos datos y se suma o resta dicho valor al periodo que se quiere nivelar. Se estima la tendencia al incremento o disminución de los últimos seis meses del tramo de referencia, y este valor se suma o se resta a la serie nivelada.

Esta modificación se hizo porque el THNE proporciona los puntos donde existe una homogeneidad, pero no indica si se debe a un error en la referencia u otro tipo de error en la medida, o si por el contrario, es parte de la variabilidad

natural del nivel del mar. Asimismo el test proporciona información sobre el tamaño probable del salto o corte de la serie inicial.

El estadístico, para una serie de n datos, tiene la expresión:

$$T_\nu = \nu \cdot (\bar{z}_1) + (n - \nu) \cdot (\bar{z}_2) \quad (1)$$

donde (\bar{z}_1) es la media de la serie normalizada, desde el primer dato hasta el ν , y (\bar{z}_2) de la serie desde ν hasta n . Los máximos de T_ν dan los posibles puntos de heterogeneidad.

Además se tuvieron en cuenta los registros históricos de la ocurrencia de fenómenos anómalos de interacción océano-atmósfera en las regiones de estudio, con el fin de detectar los cortes que se atribuyen a efectos naturales, diferenciándolos de aquellos cortes originados por errores en las mediciones por falta de una correcta verificación de la ubicación del mareógrafo. Finalmente se obtuvieron series niveladas, continuas en el tiempo.

En la Figura 2, aparece un resumen de las topografías hechas en la estación, con puntos que pueden ser comparables a partir de 1984, porque antes de esa fecha los puntos de referencia fueron movidos o desaparecieron y por lo tanto no puede establecerse el cambio de cero de la mira.

De acuerdo con las nivelaciones topográficas realizadas por el IDEAM, en el mareógrafo de Buenaventura se hicieron 8 nivelaciones desde 1952 hasta el 2009, pero no existe una serie continua que refleje estas correcciones de nivel. Según las mediciones realizadas entre los puntos de referencia y la ubicación de los mareógrafos durante todo el tiempo de observación, las mediciones del nivel del mar debieron ser niveladas, pero estas correcciones no fueron realizadas.

Observando las oscilaciones del nivel del mar en Buenaventura desde el año 1952 hasta hoy (Fig. 3), se puede apreciar que existen por lo menos nueve periodos con cambios bruscos en los datos registrados, además de algunas variaciones al interior de esos periodos.

Si se toma el último período de observación (1993-2009) como la nivelación documentada y cierta del mareógrafo, entonces, de acuerdo con este período se puede nivelar el resto de los cortes de la serie inicial. Hay que tener en cuenta que algunos saltos máximos y mínimos de la serie pueden ocurrir por la ausencia de datos horarios, por lo tanto se muestran los valores promedios mensuales del nivel del mar (Fig. 3).

Aplicando la metodología expuesta, los datos fueron nivelados para obtener una serie continua (línea roja), que se observa en la figura 3, junto con la serie original (línea azul).

DATOS DE BUENAVENTURA (NIVELACION DEL 03 DE OCTUBRE DE 2008)

DATOS NAVEGADOS					DATOS POSTPROCESADOS CON MODELO GEOIDAL EGM96					DATOS CALCULADOS CON GEOCOL2004			
D DE PUNTO	CLASE	LATITUD	LONGITUD	ALT ELIPSOIDAL	CLASE	LATITUD	LONGITUD	ALT ELIPSOIDAL	OND GEOIDAL EGM96	COTA	ALT ELIPSOIDAL	OND GEOIDAL GEOCOL2004	COTA CALHORTO
NP CMB10	NAVEGACION	3° 53' 21.05473" N	77° 03' 45.38167" W	22.5587	CONTROL	3° 53' 20.99568" N	77° 03' 45.40508" W	20.608	17.0567	3.5513	20.608	17.75	3.623
IFT-277	NAVEGACION	3° 53' 25.10051" N	77° 03' 43.82529" W	17.1388	MEDIDO	3° 53' 25.00709" N	77° 03' 43.84291" W	21.2191	17.0561	4.163	21.2191	17.75	4.2341

Verificación de Nivelación Satelital con la Estación Total de Topografía (partiendo del punto CMB10 con cota = 3.623 (Ver Cartera))

id de punto cota

cmb10 3.623
ift277 **4.232**
ib1 4.196
cotacero -2.138

Verificación de Nivelación con Nivel de Precisión (partiendo del punto cmb10 con cota = 3.623)

id de punto cota

cmb10 3.623
ift277 **4.234**
cota cero -2.138

Según Certificación del IGAC la cota para el punto IFT277 = **4.242** (Ver Certificación anexa)

BUENAVENTURA (NIVELACION DEL 27 DE OCTUBRE DE 2005)

DATOS NAVEGADOS					DATOS POSTPROCESADOS CON MODELO GEOIDAL EGM96					DATOS CALCULADOS CON GEOCOL2004 Y CALHORTO			
D DE PUNTO	CLASE	LATITUD	LONGITUD	ALT ELIPSOIDAL	CLASE	LATITUD	LONGITUD	ALT ELIPSOIDAL	OND GEOIDAL EGM96	COTA	ALT ELIPSOIDAL	OND GEOIDAL GEOCOL2004	COTA CALHORTO
NP CMB10	NAVEGACION	3° 53' 21.13313" N	77° 03' 45.31782" W	24.5473	CONTROL	3° 53' 20.99568" N	77° 03' 45.40508" W	20.608	17.0567	3.5513	20.608	17.75	3.623
IFT277	NAVEGACION	3° 53' 25.13684" N	77° 03' 43.79127" W	24.1554	MEDIDO	3° 53' 24.61950" N	77° 03' 43.84278" W	21.2112	17.0567	4.1545	21.2112	17.75	4.2262
S/5 MTS	NAVEGACION	3° 53' 24.88285" N	77° 03' 43.60039" W	17.5844		3° 53' 24.36619" N	77° 03' 43.65582" W	14.3837	17.058	-2.068	14.3837	17.75	-1.9953

VERIFICACION DE DATOS CON NIVEL DE PRECISION

La Cota cero es de -1.997

COMPARACION DE DESNIVELES OBTENIDOS PARA DIFERENTES AÑOS PARA ESTOS MISMOS PUNTOS (nivelaciones)

Nota:
La Cota del cero de la mira cota (metros por debajo de)

	IFT277	CMB10	IB1	año	Del cero de la mira de Fecha
	6.372	5.761	6.334	2008	03 de Octubre de 2008
	6.239	5.62		2005	27 de Octubre de 2005
				2003	No Hay Nivelacion
				2000	No Hay Nivelacion
	6.129	5.512	6.1	1996	01 de febrero de 1996
	6.122	5.514	6.093	1993	13 de marzo de 1993
	6.122	5.514	6.093	1992	3 de noviembre de 1992
	6.351	6.355	6.322	1989	31 de enero de 1989
	6.3538	6.3553	6.3263	1985	24 octubre de 1985
	6.3598	6.3628	6.3333	1984	03 de marzo de 1984

Figura 2. Nivelación del IDEAM de la cota cero de la mira del mareógrafo de Buenaventura el 3 de octubre del 2006

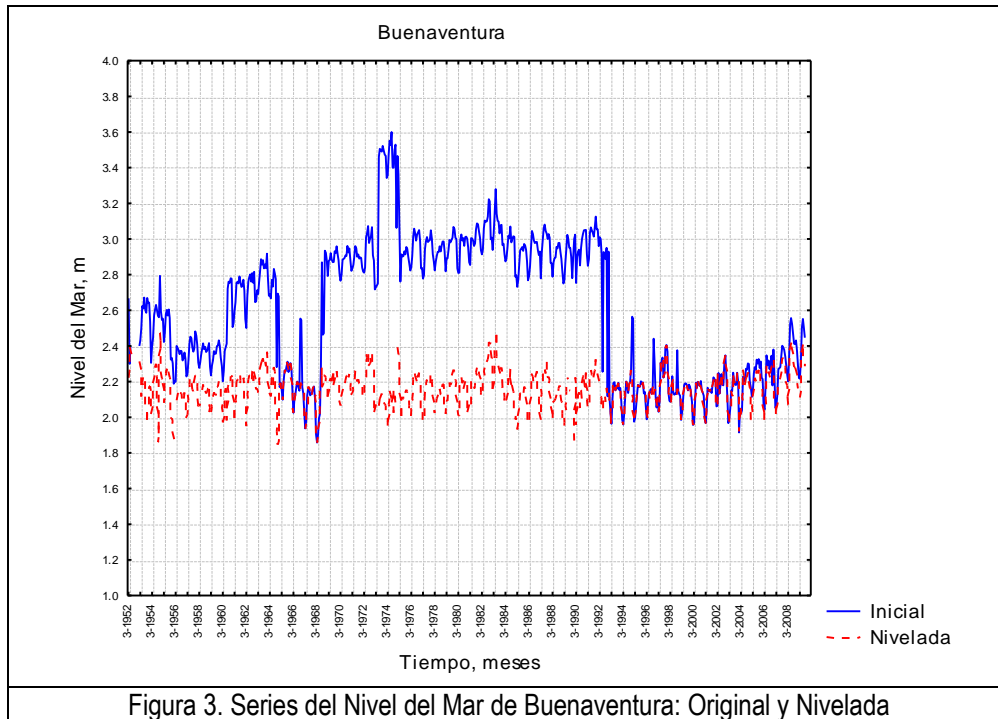


Figura 3. Series del Nivel del Mar de Buenaventura: Original y Nivelada

Para la serie de Tumaco se tomó el último período como nivel de referencia, a partir del cual fueron nivelados 8 tramos que presentaban discontinuidad en la serie original (Fig. 4 y 4A y 4A).

COMPARACIÓN DE DESNIVELES OBTENIDOS EN TUMACO PARA DIFERENTES AÑOS PARA ESTOS MISMOS PUNTOS (nivelaciones)

Nota:
La Cota del cero de la mira esta (metros por debajo de)

	103-TS-1	NP-3-B103-TS-1	NP-2-A103-TS-1	NP-4B-(TS-1)	NP-5B-(TS-1)	año	Del cero de la mira de Fecha	fecha nivelacion
	4.822	4.823	4.833	5.849	5.155	2009	07 septiembre de 2009	07 de septiembre de 2009
	4.822	4.823	4.833	5.849	5.155	2008	07 de Octubre de 2008	07 de octubre de 2008
	4.83	4.83	4.84	5.85	5.16	2005	24 de Octubre de 2005	24 de octubre de 2008
	4.72	4.74		5.76	5.07	1992	26 de Noviembre de 1992	
	6.87			7.92		1992	16 de febrero de 1992	
				7.92		1990	28 de enero de 1990	
				7.00		1987	15 de enero de 1987	
						1986	24 de agosto de 1984	
				7.00		1985	24 de agosto de 1984	17 de octubre de 1985
				7.00		1984	27 de agosto de 1984	27 de agosto de 194
				7.92		1983	28 de septiembre de 1978	7 de abril de 1983
						1982		
				7.91		1981	28 de septiembre de 1978	26 de enero de 1980
						1980		
				7.91		1979	28 de septiembre de 1978	20 de septiembre de 1978
				7.95		1978	28 de septiembre de 1978	28 de septiembre de 1978
						1977		
				7.95	7.22	1976	1 de agosto de 1976	1 de agosto de 1976
				7.95	7.22	1975	20 abril de 1974	30 de julio de 1975
				7.95	7.22	1975	20 de abril de 1974	8 de febrero de 1975
				6.01	5.28	1974	27 de junio de 1972	20 de abril de 1974
				6.01	5.28	1973	27 de junio de 1972	25 de septiembre de 1973
				6.01		1972	27 de junio de 1972	
				6.80	6.07	1971	10 de febrero de 1971	
	5.73	5.73	5.73	6.82	6.08	1966	13 de abril de 1966	
	5.73	5.73	5.74	6.82	6.08	1965	14 de mayo de 1965	
	5.73	5.72	5.73	6.81	6.07	1964	24 de octubre de 1964	
	5.73	5.73	5.73	6.82	6.08	1963	9 de septiembre de 1963	
	5.73	5.73	5.73	6.82	6.08	1962	6 de octubre de 1962	
	6.31	6.30	6.31	7.40	6.66	1961	21 de septiembre de 1961	
	6.31	6.31	6.31	7.41	6.66	1960	13 de agosto de 1960	
	6.31	6.31	6.32	7.41	6.66	1959	9 de septiembre de 1959	
	6.31	6.30	6.31	7.41		1958	29 de octubre de 1958	
	6.31	6.31	6.32	7.42		1958	24 de marzo de 1958	
	6.31	6.31	6.31	7.42		1956	18 de Octubre de 1956	

Figura 4. Nivelación del IDEAM de la cota cero de la mira del mareógrafo de Tumaco el 7 de septiembre del 2009

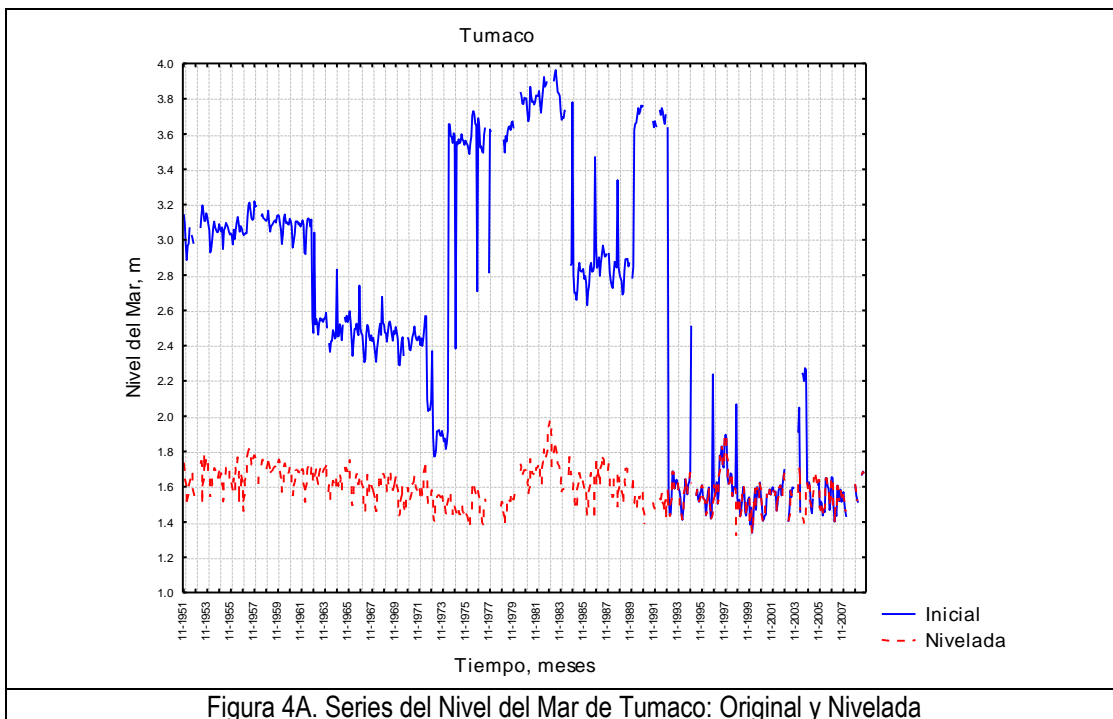


Figura 4A. Series del Nivel del Mar de Tumaco: Original y Nivelada

La toma de datos del nivel del mar en Juanchaco se niveló al último período de observación (junio del 2007 – octubre del 2008), la serie inicia en junio del 2005 y tuvo dos períodos de desnivelación del mareógrafo (Fig. 5).

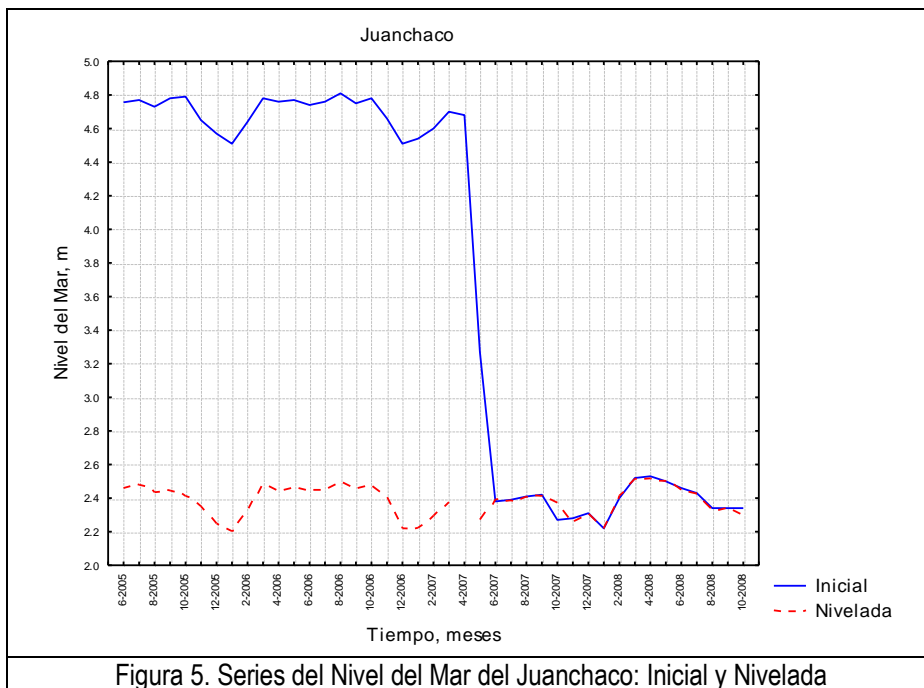


Figura 5. Series del Nivel del Mar del Juanchaco: Inicial y Nivelada

La observación del nivel del mar en la estación de Capurganá fue iniciada el 16 de abril del 2007 y por ahora no se ha detectado una desnivelación del mareógrafo (Fig. 6).

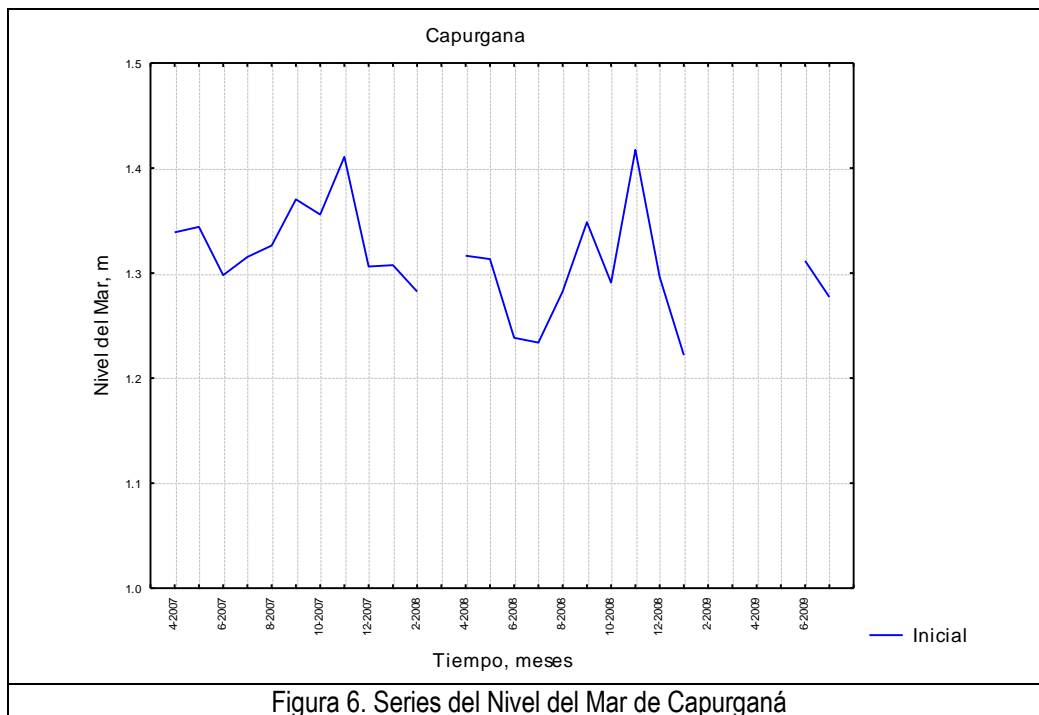


Figura 6. Series del Nivel del Mar de Capurganá

El registro de datos del nivel del mar en Cartagena fue iniciado a partir de noviembre del 1951. Se tomó como nivelación verdadera del mareógrafo el período comprendido desde la fecha de inicio hasta febrero de 1957. En toda la serie inicial se registraron 9 saltos o cortes en los datos del nivel del mar de este puerto sobre el Caribe Colombiano (Fig. 7).

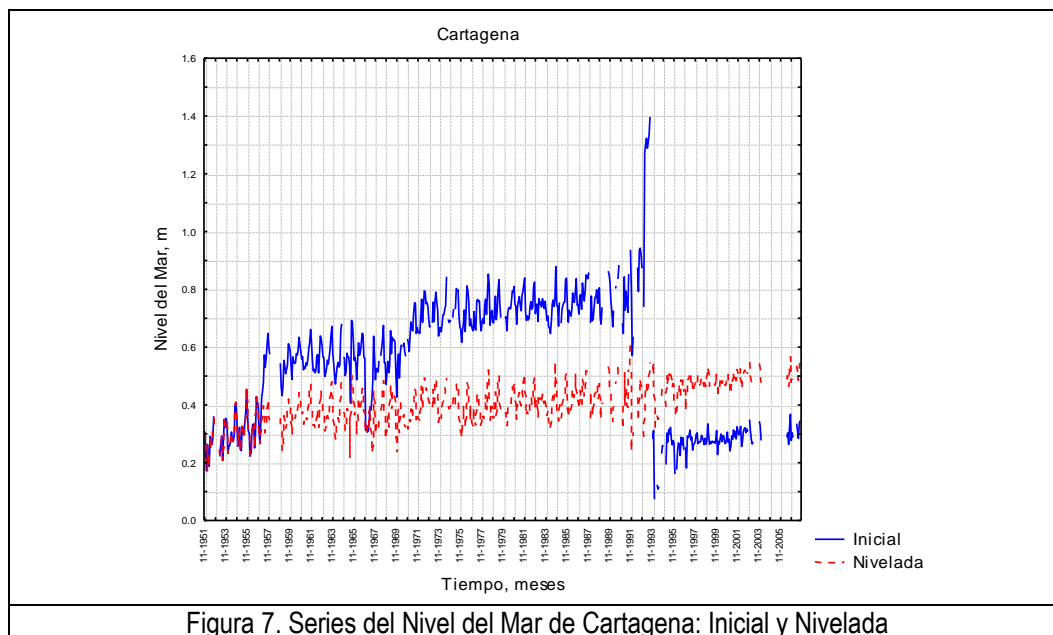


Figura 7. Series del Nivel del Mar de Cartagena: Inicial y Nivelada

La observación del nivel del mar en la estación de Puerto Bolívar fue iniciada recientemente desde el 15 de julio del 2009 y por ahora no se ha detectado una desnivelación del mareógrafo (Fig. 8).

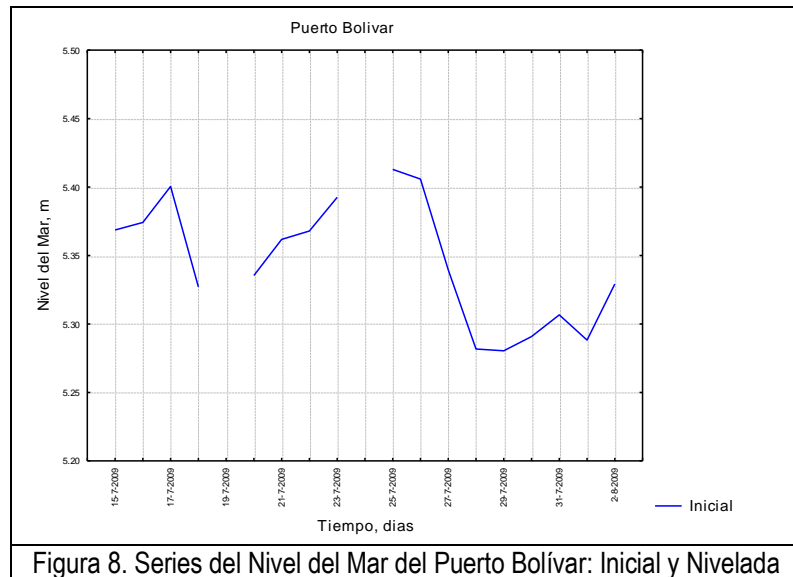


Figura 8. Series del Nivel del Mar del Puerto Bolívar: Inicial y Nivelada

El registro de datos del nivel del mar en el punto de San Andrés fue iniciado a partir de enero de 1997 hasta diciembre del 2008 y como nivelación cierta del mareógrafo se toma el primer corte desde enero de 1997 hasta mayo de 2006 (Fig. 9).

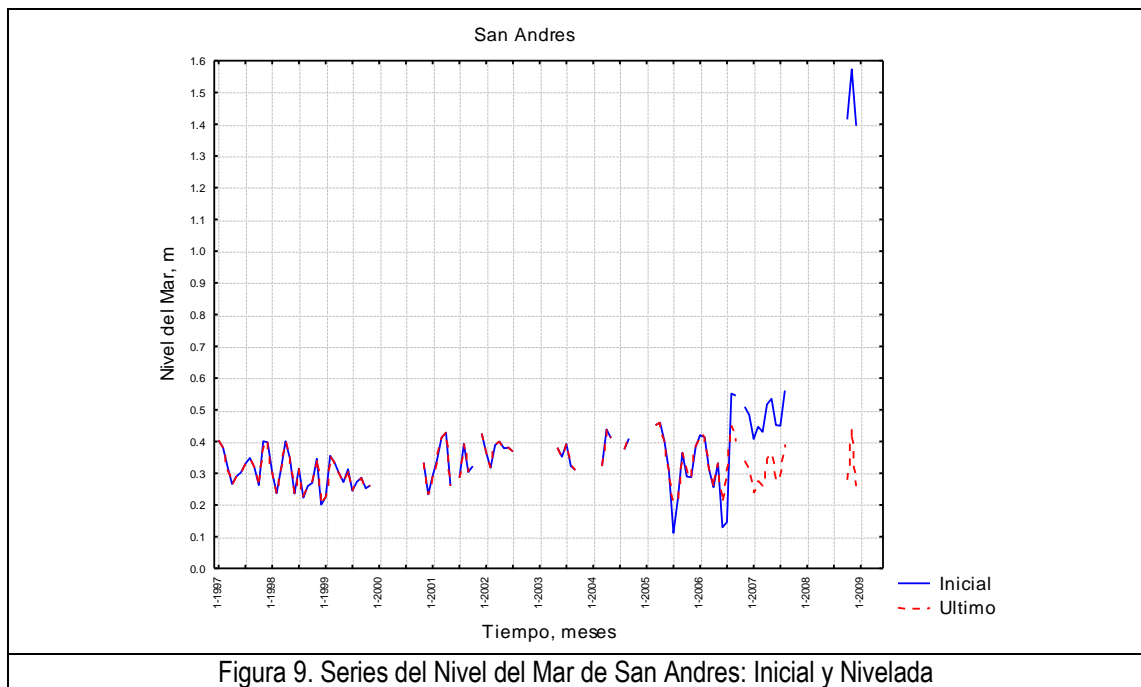


Figura 9. Series del Nivel del Mar de San Andres: Inicial y Nivelada

4. DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE LAS OSCILACIONES NO PERIÓDICAS EN LAS SERIES DEL NIVEL DEL MAR DE LOS PUNTOS DE OBSERVACIÓN

4.1. BUENAVENTURA

En el caso de Buenaventura se realiza la descomposición de la serie con una longitud de un año, sin tener en cuenta las oscilaciones de periodos largos. Para el análisis espectral fue utilizada la serie de registro del nivel del mar desde enero hasta diciembre del 1979.

En el gráfico de la densidad espectral de Buenaventura se puede observar (Fig. 11) que el mayor aporte en la formación de la marea lo da la componente M_2 , denominada la principal lunar, con un valor máximo de la densidad para esta serie de 3500 m^2/cph . Como se puede ver en la figura, las otras componentes de la marea se encuentran en rangos de densidad espectral mucho menores que la componente M_2 . El resto de la serie de Buenaventura se muestra en varios rangos de la densidad espectral

Al observar el gráfico de densidad espectral en un rango de cero a 250 m^2/cph , se aprecian otros componentes de marea entre los cuales se encuentra que, el de mayor valor es el llamado principal solar o S_2 , y el que le sigue es el denominado elíptico lunar mayor N_2 , (Fig. 12).

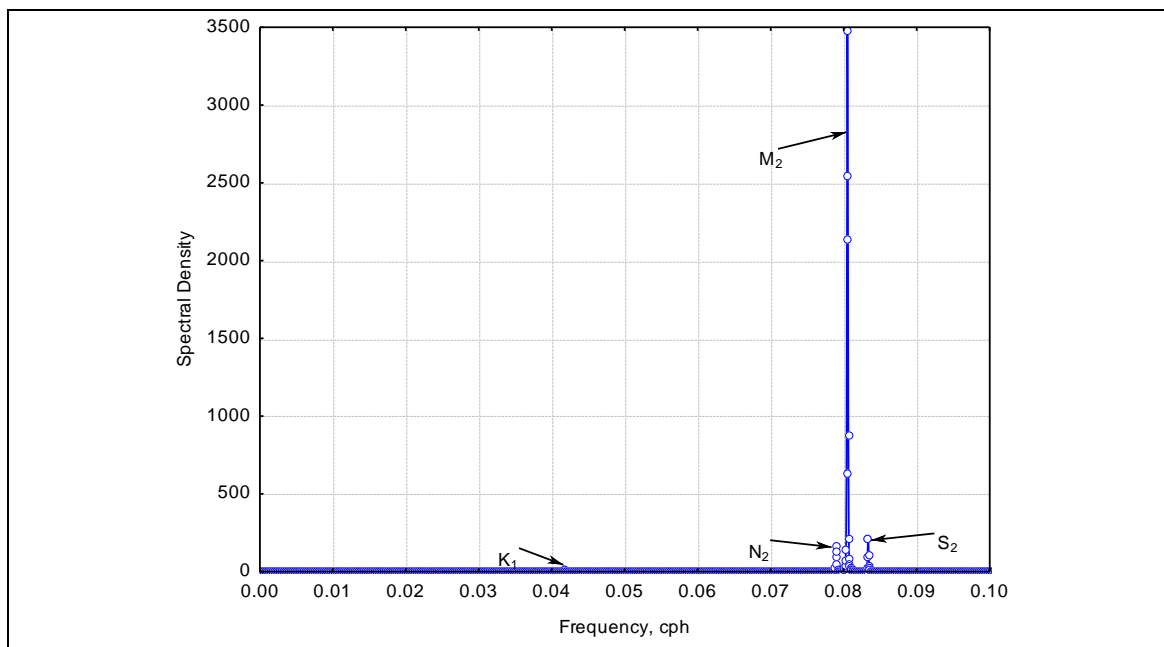


Figura 11. Densidad espectral del nivel del mar de Buenaventura.
Rango de densidad espectral: 0-3500 m^2/cph .

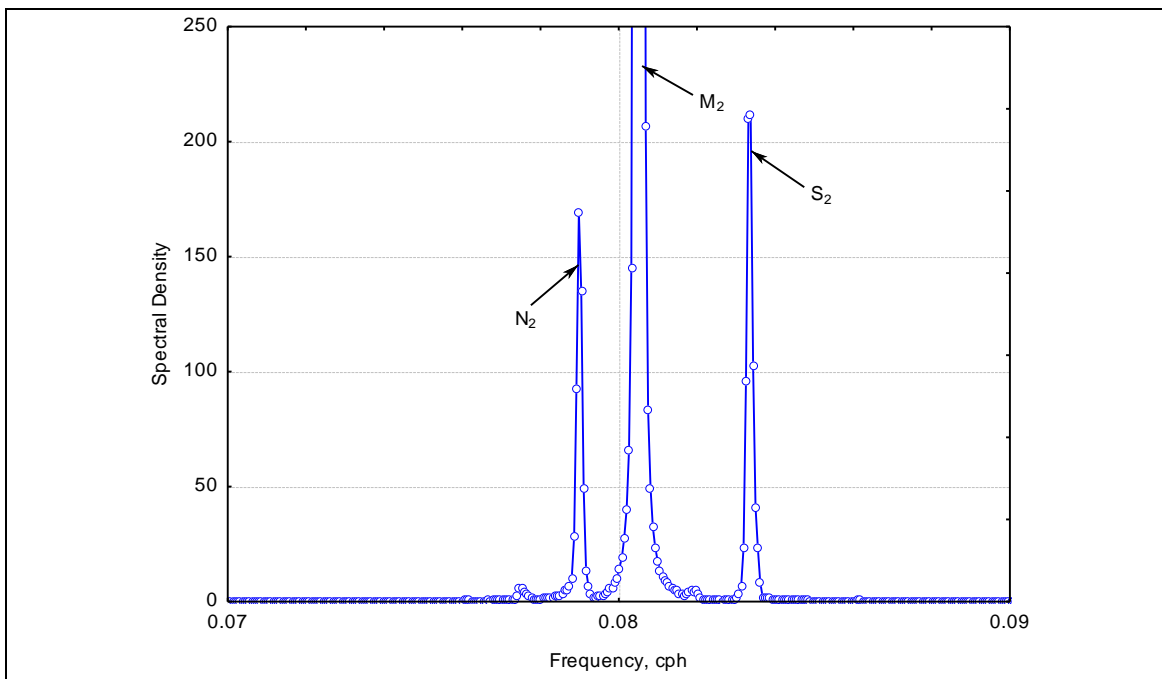


Figura 12. Densidad espectral del nivel del mar de Buenaventura.
Rango de densidad espectral: 0-250 m²/cph.

En el gráfico de densidad espectral con un rango de 0-50 m²/cph se observan los componentes de la marea K₁, declinación luna-sol y M₄, denominado 1/4 de luna (Fig. 13).

El resto de los componentes de la marea tienen densidades espectrales menores que 7 m²/cph (Figs. 14 y 15).

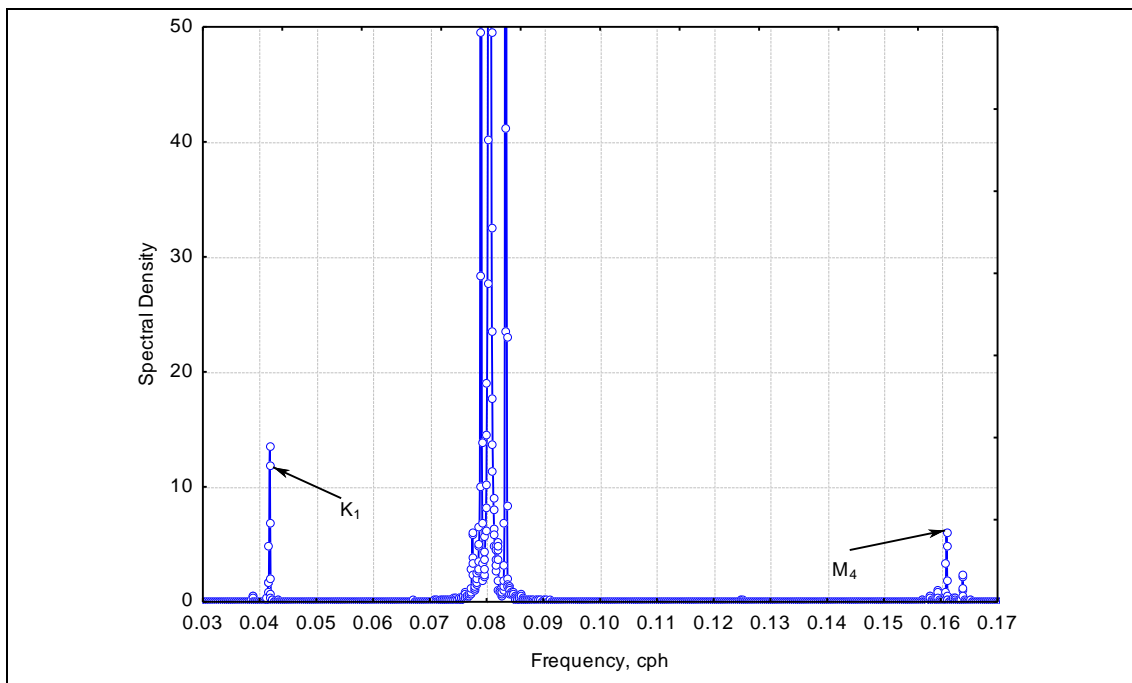


Figura 13. Densidad espectral del nivel del mar de Buenaventura.
Rango de densidad espectral: 0-50 m²/cph.

Del análisis espectral se determina que la componente principal lunar (M_2) es mayor que las demás en 1000 veces y, por eso, se puede suponer que el tipo de oscilaciones de la marea en Buenaventura es semidiurno. Al filtrar los ciclos periódicos de la serie inicial se obtuvieron las oscilaciones no periódicas o residuos (Fig. 16), los cuales fueron analizados para ver si tienen periodicidades.

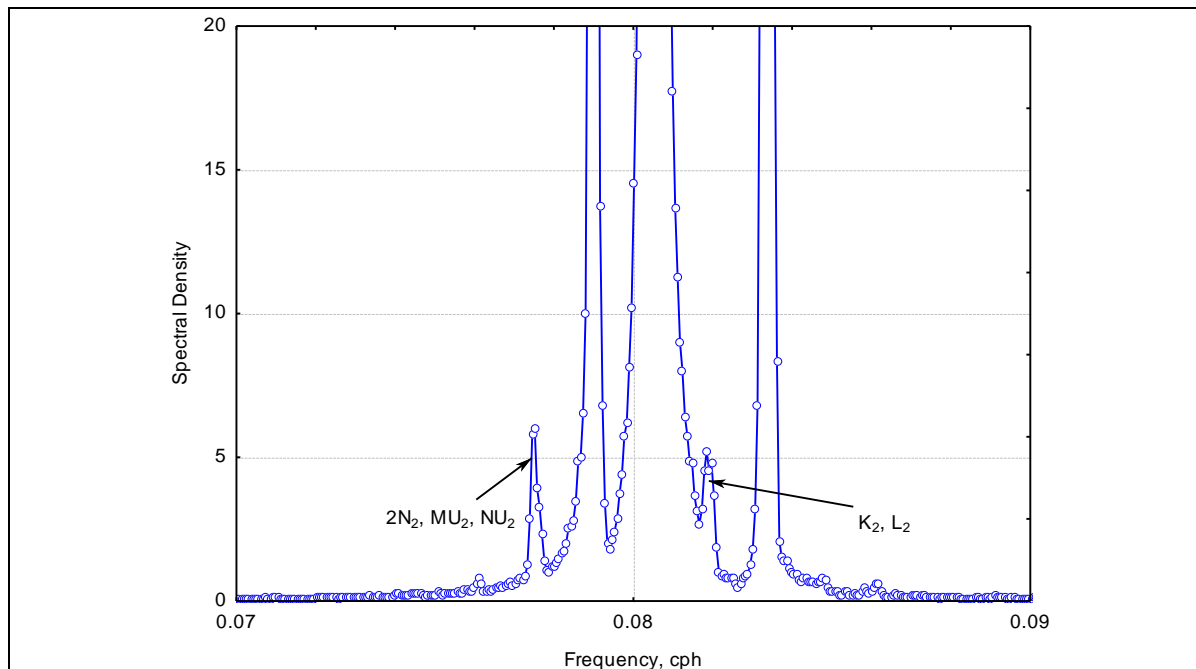


Figura 14. Densidad espectral del nivel del mar de Buenaventura.
Rango de densidad espectral: 0-20 m²/cph.

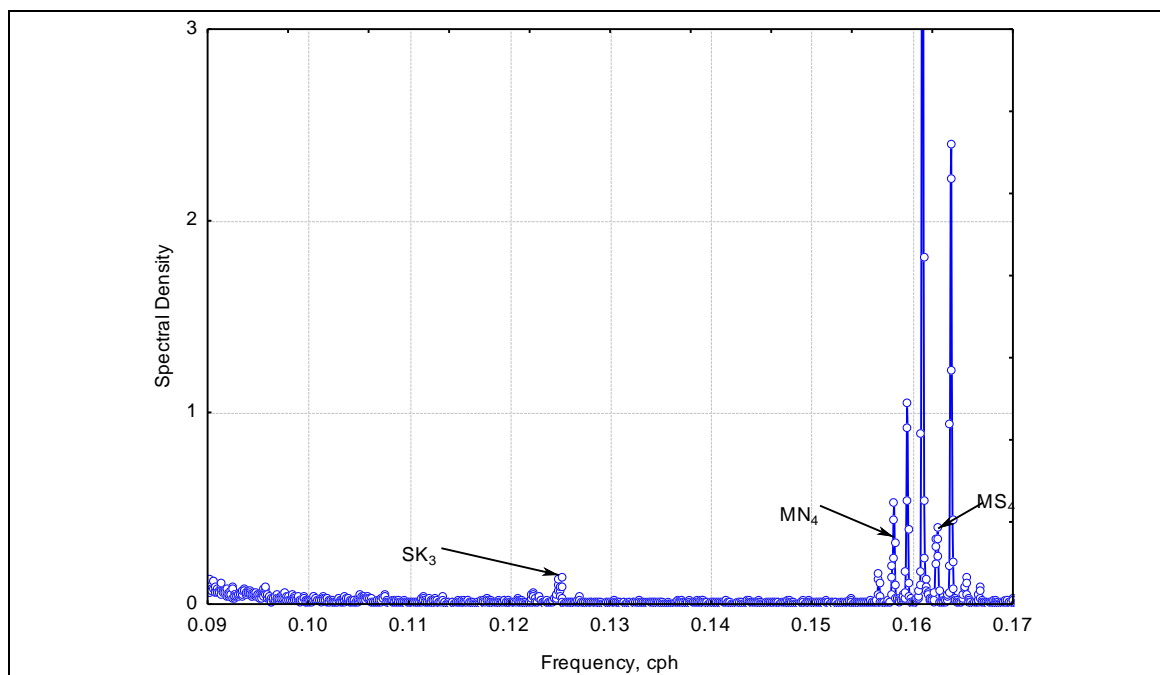
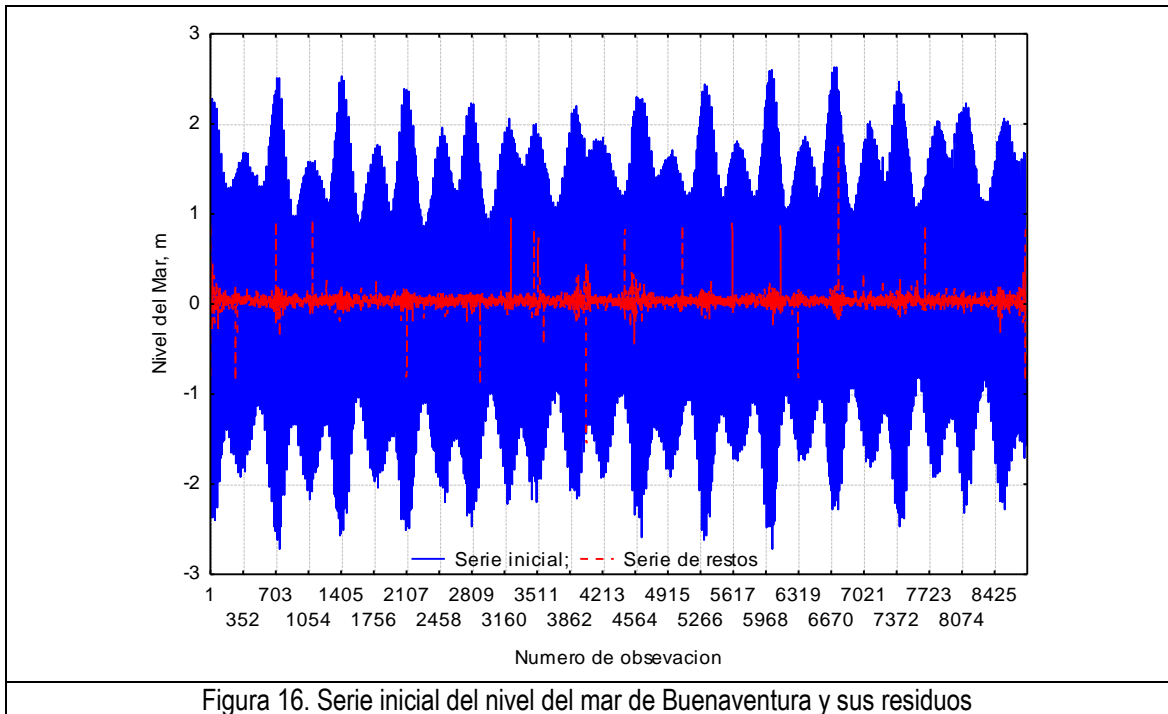
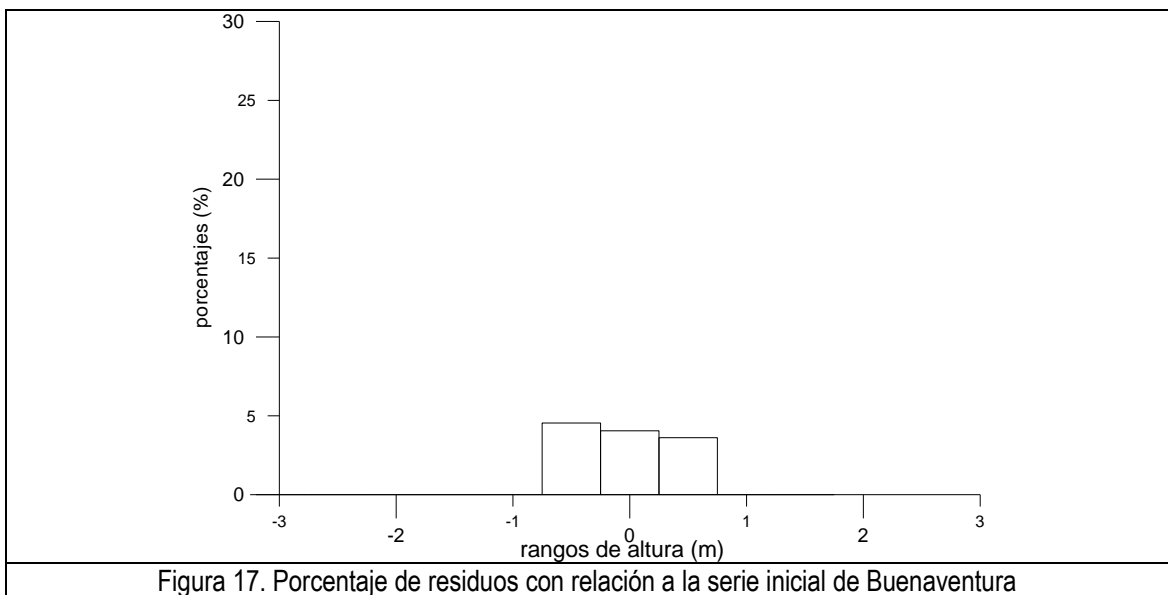


Figura 15. Densidad espectral del nivel del mar de Buenaventura.
Rango de densidad espectral: 0-3 m²/cph.



El porcentaje promedio de las oscilaciones no periódicas en la serie inicial es no mayor que 5%, y se presenta por rangos desde -0.75 hasta 0.75 m en la Figura 17.



4.2. TUMACO

El análisis espectral de la serie del nivel del mar de Tumaco (Fig. 18) utilizando la serie desde enero de 1969 hasta enero de 1970 muestra que el mayor aporte en la formación de la marea lo da la componente M_2 , con un valor máximo de la densidad cercana a 2100 m^2/cph , después sigue la componente S_2 con 170 m^2/cph , la componente N_2

con 80 m²/cph y la onda K₁ con 20 m²/cph. Estas cuatro componentes de la marea se observan en un rango visible, el resto de las componentes de la marea para Tumaco se encuentran en un rango que es 2100 veces menor que la onda que da mayor aporte en la formación de la marea en Tumaco (M₂) y se encuentran entre 0-10 m²/cph.

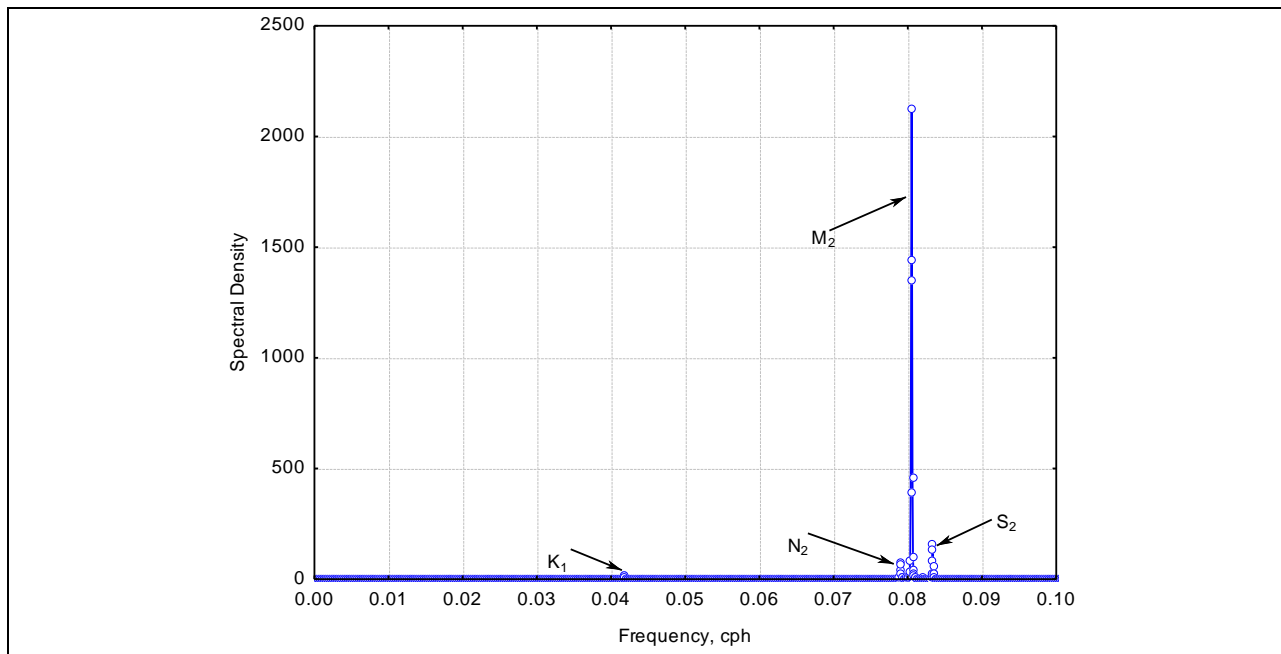


Figura 18. Densidad espectral del nivel del mar de Tumaco.
Rango de densidad espectral: 0-2500 m²/cph.

Filtrando las componentes periódicas de la serie inicial del nivel del mar de Tumaco se obtuvieron las oscilaciones no periódicas o residuos (Fig. 19).

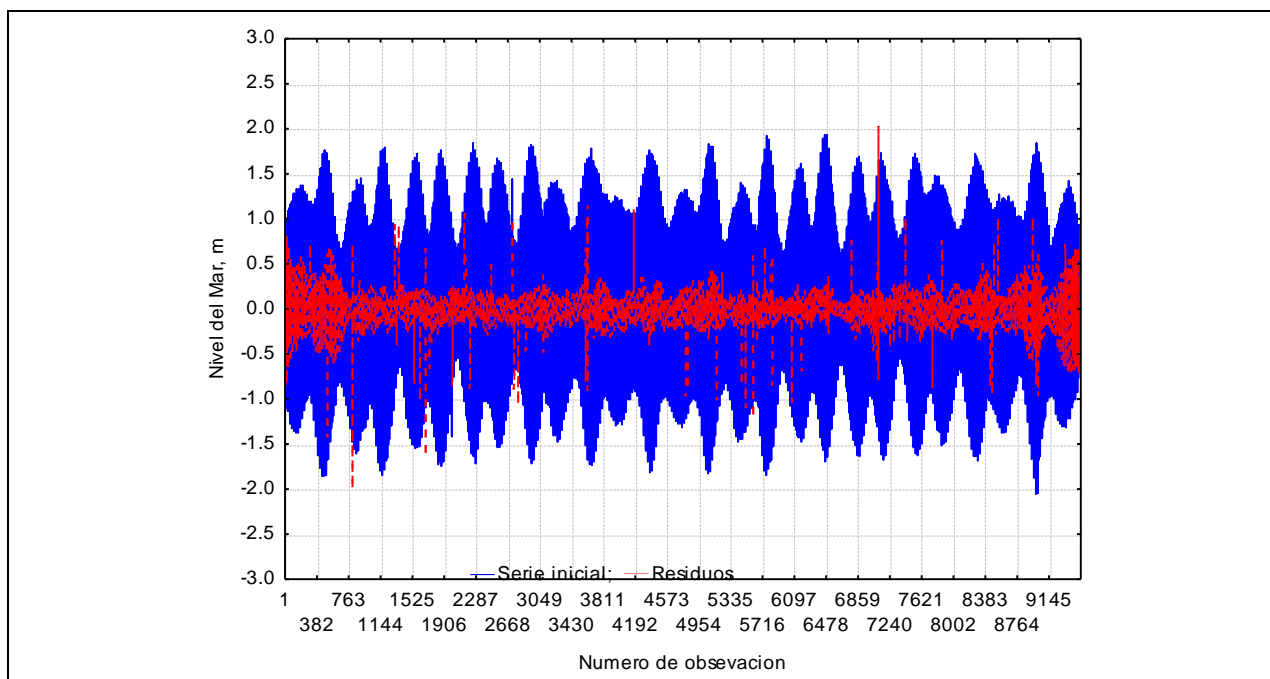
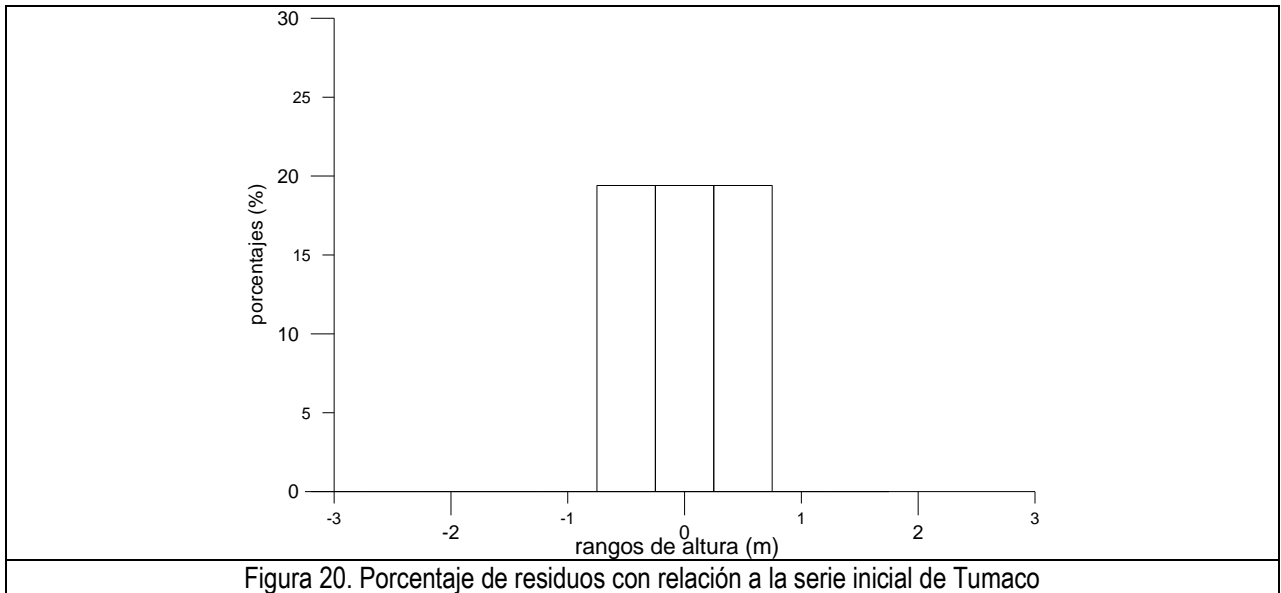


Figura 19. Serie inicial del nivel del mar de Tumaco y sus residuos

El porcentaje promedio que corresponde a las oscilaciones no periódicas con relación a la serie inicial de Tumaco (Fig. 20), en los rangos entre -0.75 hasta -0.5 m, -0.5:0.5 m, 0.5:0.75 m por cado rango es alrededor de 20%.



4.3. JUANCHACO

Para el análisis espectral fue utilizada la serie de Juanchaco desde enero hasta diciembre del 2006. El análisis espectral (Fig. 21) muestra el mismo comportamiento de los puntos de Buenaventura y Tumaco, con pequeñas diferencias en los valores de la densidad espectral, ya que los tres puntos se encuentran en la misma región. El mayor aporte pertenece a la componente M_2 , con un valor cercano a 2100 m^2/cph , después sigue la componente S_2 con 150 m^2/cph de la densidad espectral, la componente N_2 tiene 100 m^2/cph y la onda K_1 con 20 m^2/cph . El resto de las componentes de la marea para Juanchaco son menores en 2100 veces que la onda principal de este punto (M_2) y se encuentran entre 0-10 m^2/cph .

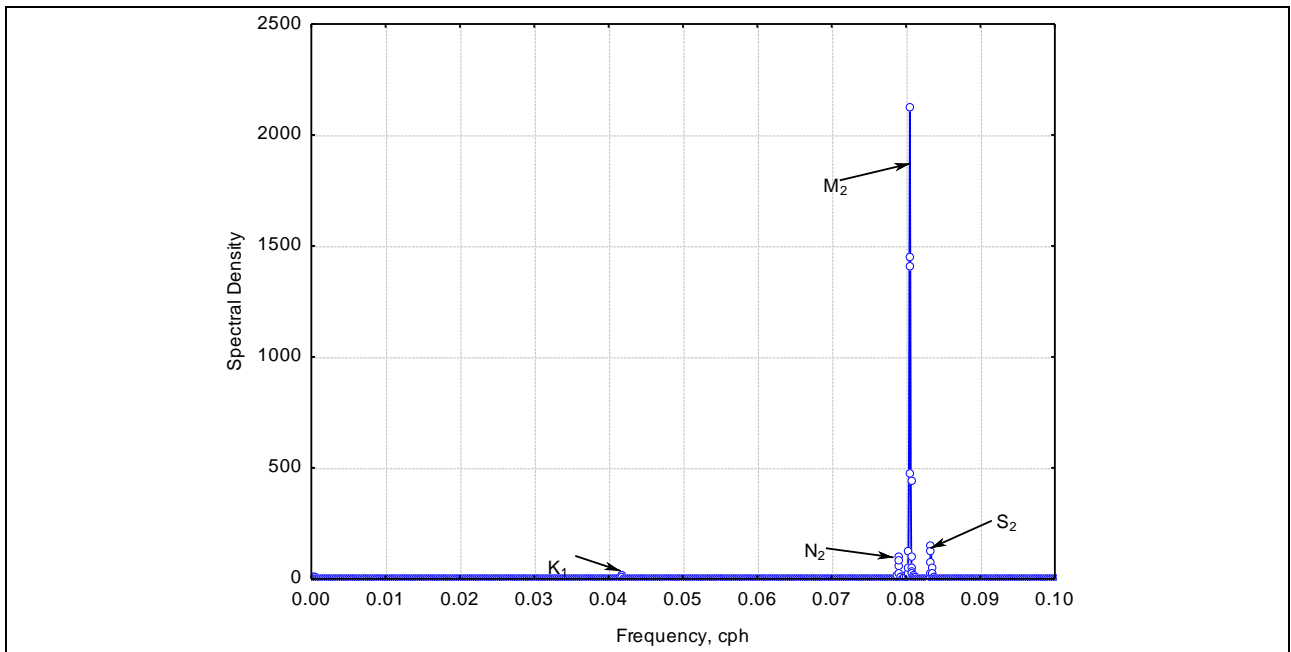


Figura 21. Densidad espectral del nivel del mar de Juanchaco.
Rango de densidad espectral: 0-2500 m²/cph.

Al filtrar las componentes periódicas de la serie inicial del nivel del mar de Juanchaco se obtuvieron los residuos (Fig. 22).

En Juanchaco el porcentaje promedio que corresponde a las oscilaciones no periódicas con relación a la serie inicial (Fig. 23), en el rango desde -2.75 hasta -2.25 m es cercano a 0%, entre -2.25:-1.75 m cerca al 2%, entre -1.75:-1.25 m en 2%, -1.25:-0.75 m tiene 4%, desde -0.75 hasta 0.75 m tiene por cada rango alrededor de 15%, de 0.75 a 1.25 es de 2% y en el ultimo rango 1.25:1.75 m es alrededor de 2%.

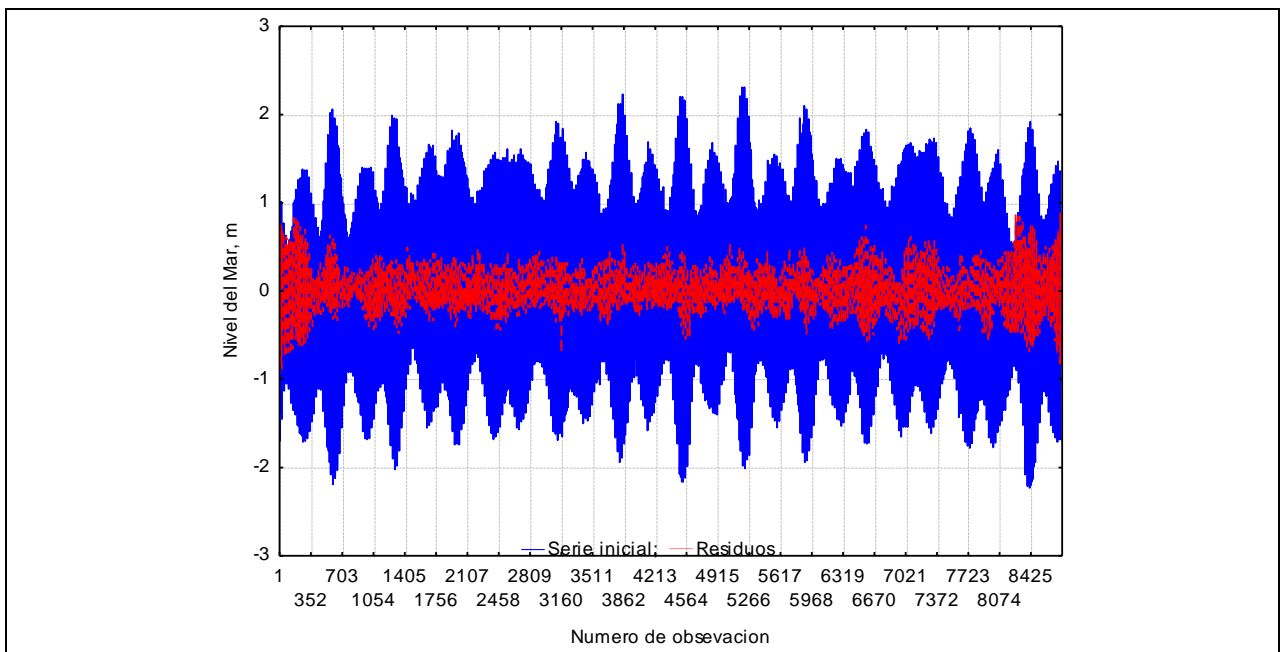


Figura 22. Serie inicial del nivel del mar de Juanchaco y sus residuos

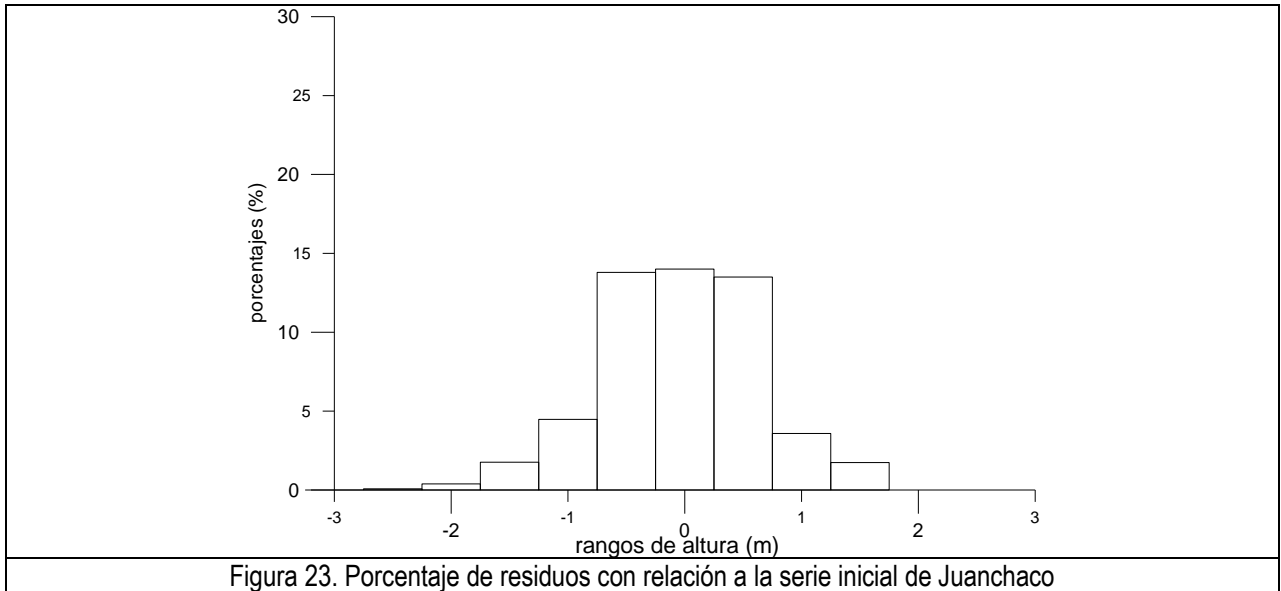


Figura 23. Porcentaje de residuos con relación a la serie inicial de Juanchaco

Los puntos de Buenaventura, Tumaco y Juanchaco pertenecen a la cuenca del Pacífico Colombiano y al comparar las densidades espectrales del nivel del mar se ve una semejanza entre ellos.

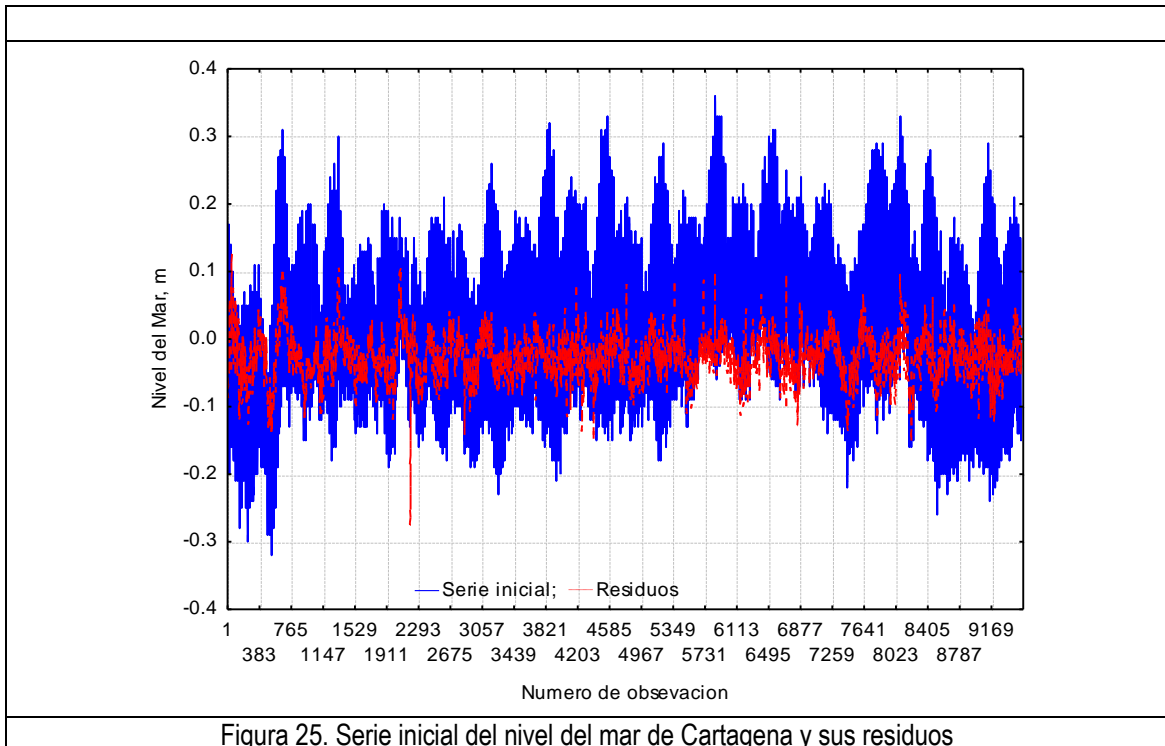
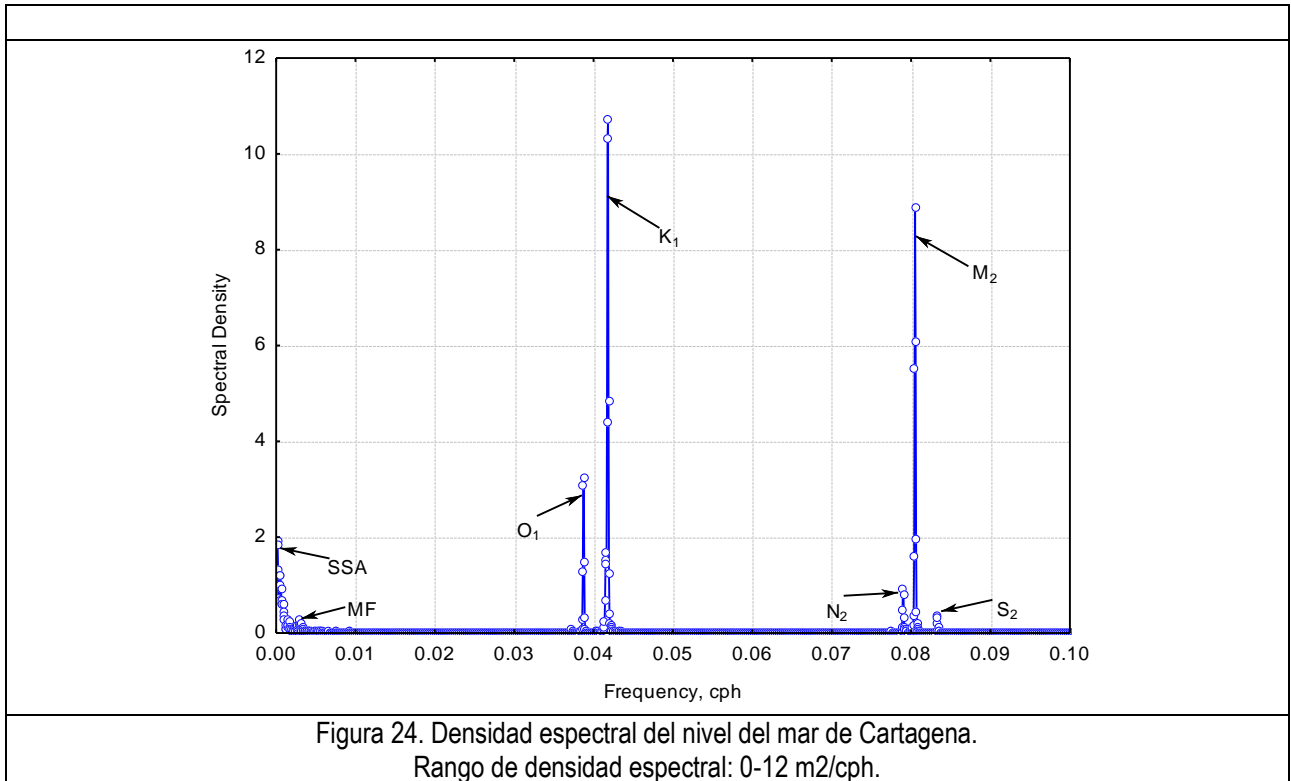
Al comparar los residuos de estos tres puntos, se puede afirmar que en Buenaventura hay menor registro de las oscilaciones no periódicos con relación a Tumaco y Juanchaco, lo cual puede atribuirse al menor efecto del viento en el punto de registro o a que el equipo de registro de marea tiene otro tipo de filtro que elimina estas oscilaciones.

En el nivel del mar las oscilaciones no periódicos (viento) afectan más cuando el valor del nivel del mar está cercano al nivel medio, por lo que las fuerzas de marea (o las corrientes de marea) son más débiles en este momento.

4.4. CARTAGENA

El resto de los puntos de observación del nivel del mar pertenecen al mar Caribe, por eso la estructura interna de estas series debe diferenciarse a las del Pacífico. En el punto de Cartagena se utilizó la longitud desde enero de 1960 hasta enero de 1961. Como se observa en la figura 24, el mayor aporte en las oscilaciones del mar pertenece a la onda diaria K_1 con 11 m²/cph, después sigue la componente M_2 con 9 m²/cph, la tercera onda es la O_1 con 3 m²/cph, la componente SSA tiene 2 m²/cph, las ondas que se pueden observar en este como MF, N2 y S2 se encuentran alrededor de 1 m²/cph y el resto de las componentes de las mareas son menores en 200 veces que la onda principal.

En la figura 25 se presentan los residuos de la serie analizada con la serie inicial del punto de Cartagena.



El porcentaje promedio que corresponde a las oscilaciones no periódicas con relación a la serie inicial para Cartagena se presenta en tres rangos: entre -0.75 hasta -0.5 m, -0.5:0.5 m y de 0.5 a 0.75 m con un valor aproximado de 25%.

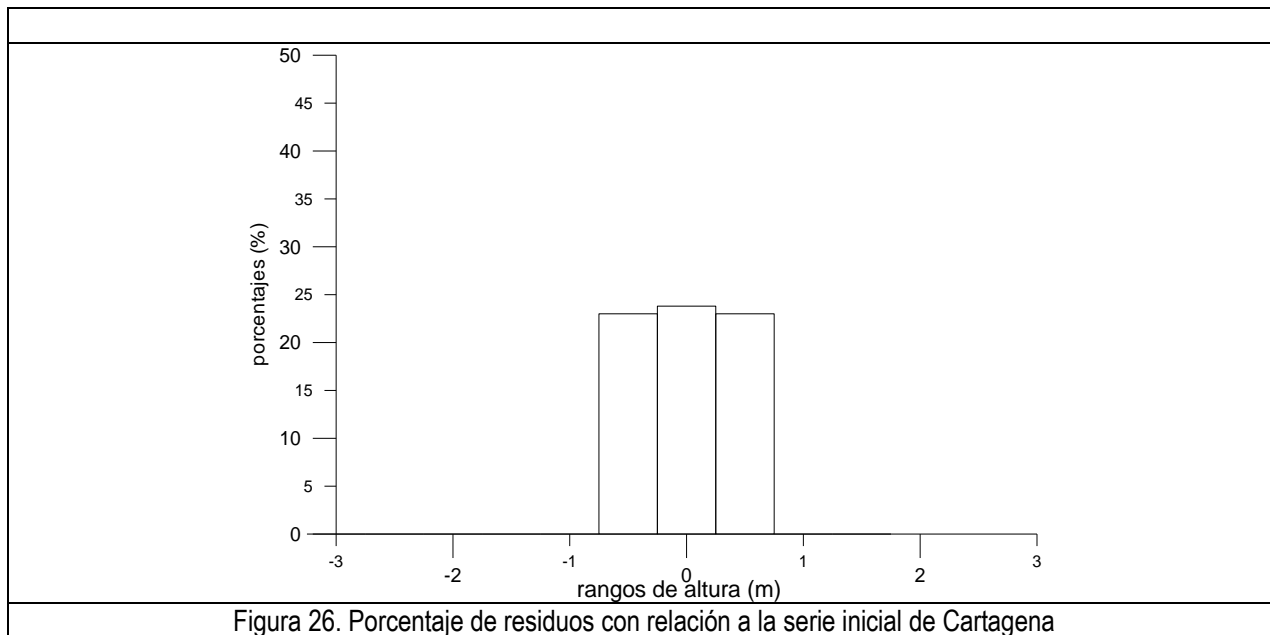
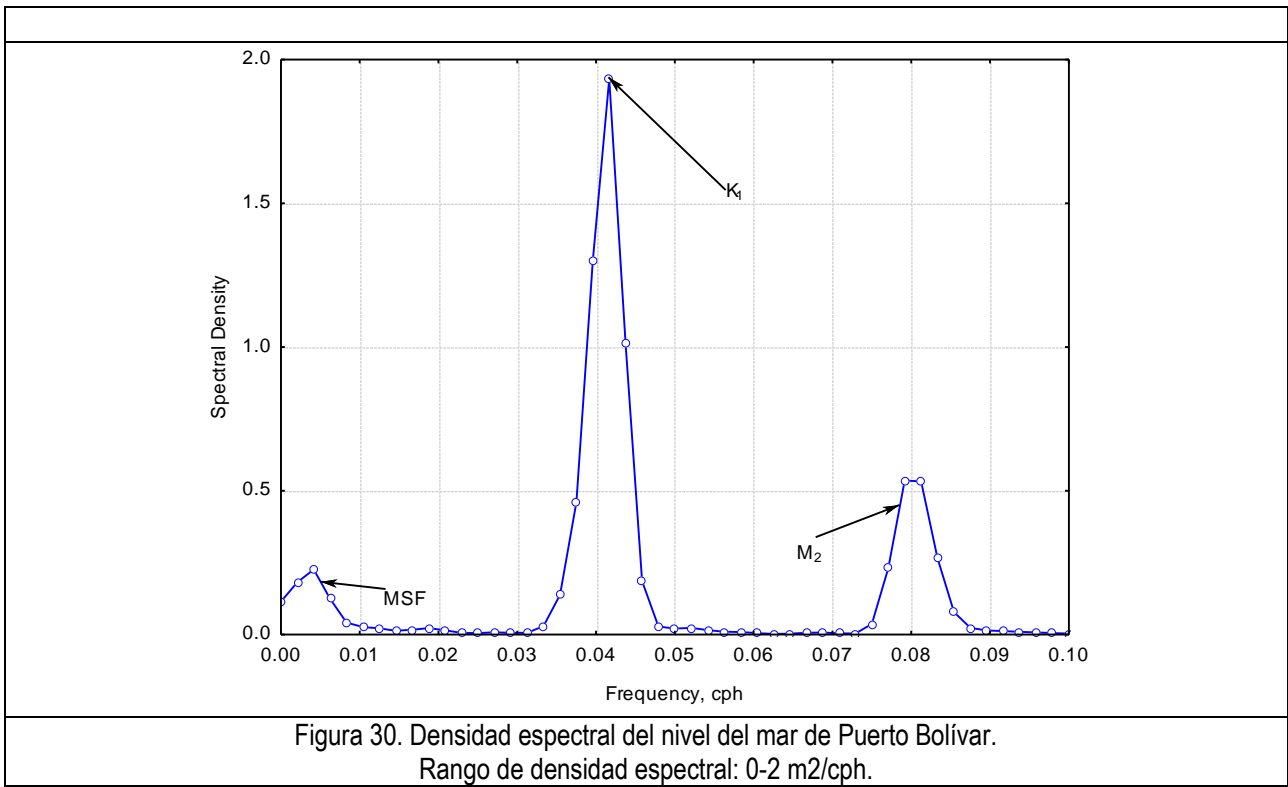


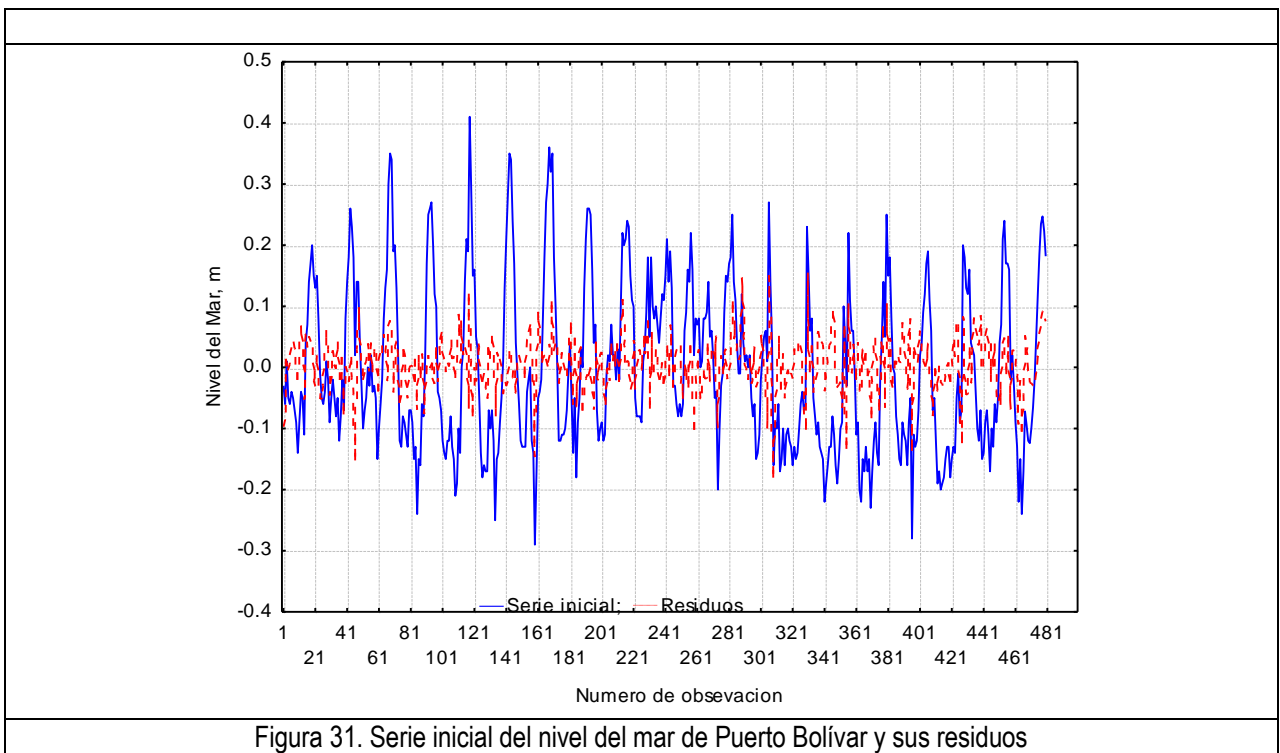
Figura 26. Porcentaje de residuos con relación a la serie inicial de Cartagena

4.5 PUERTO BOLÍVAR

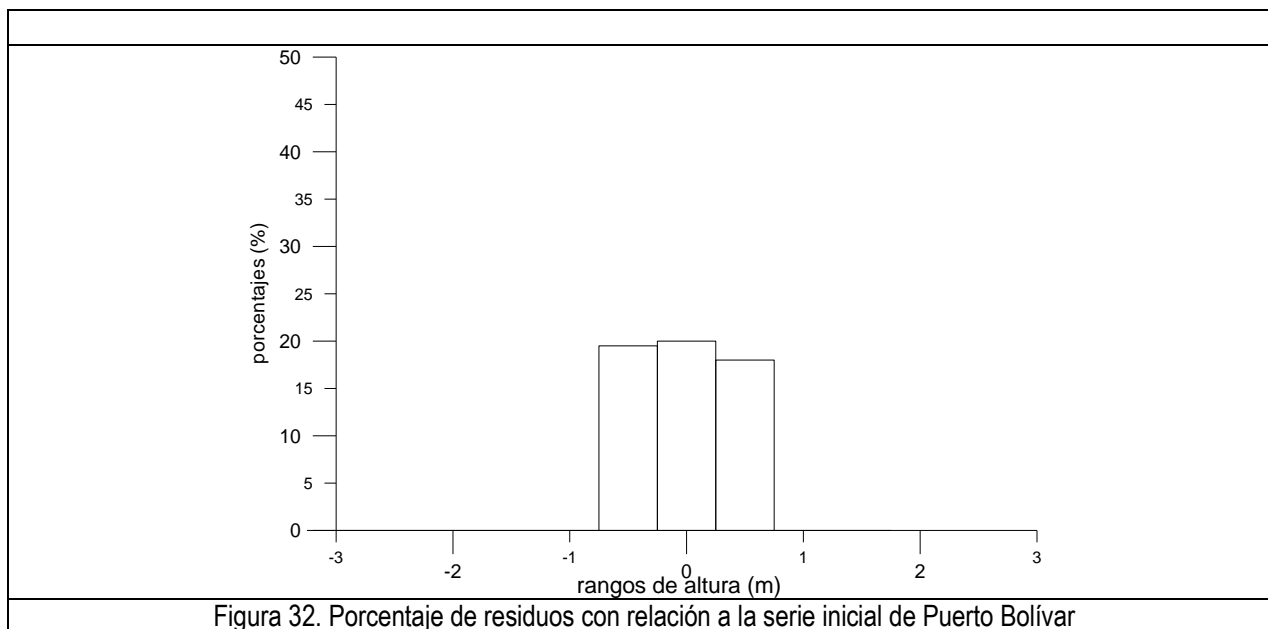
La densidad espectral de la serie de Puerto Bolívar (Fig. 30) fue analizada con una serie muy corta de solo 18 días desde el 15 de julio hasta el 3 de agosto del 2009. El mayor aporte lo presenta la onda K_1 con 1.9 m²/cph, el segundo es el de la componente M_2 con un valor de 0.6 m²/cph y el último es el del componente MFF con 0.2 m²/cph.



En la figura 31 se presentan los residuos de la serie analizada con la serie inicial del punto de Puerto Bolívar.



El porcentaje promedio que corresponde a las oscilaciones no periódicas con relación a la serie inicial de Islas Rosario (Fig. 32) se ve entre los tres rangos: de -0.75 a -0.5 m de 20%, de -0.5 a 0.5 m con 21% y de 0.5 a 0.75 m con 18%.



4.6. CAPURGANÁ

La estructura interna de la serie del nivel del mar de Capurgana también resulta similar a la de Cartagena e Islas del Rosario con aparición de la onda Q1 en el espectro visible dentro del rango 0-35m²/cph (Fig. 33). El mayor aporte en las oscilaciones del mar pertenece a la onda diaria K₁ con 32 m²/cph, la M₂ con 16 m²/cph, la O₁ con 14 m²/cph, la componente SSA con 5 m²/cph, las ondas MF y N2 tienen alrededor de 2m²/cph, y la S2 se encuentra alrededor de 1 m²/cph.

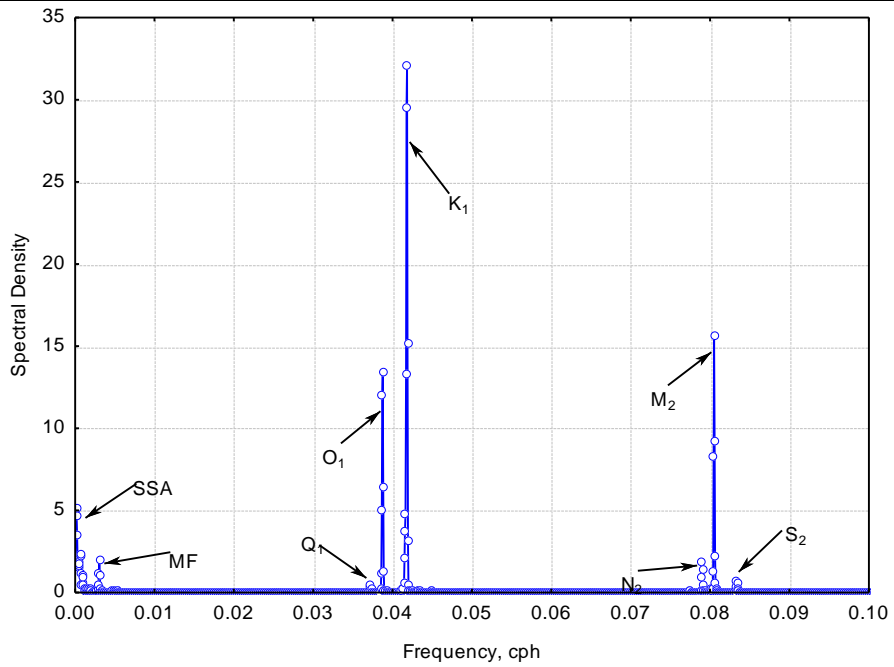


Figura 33. Densidad espectral del nivel del mar de Capurganá.
Rango de densidad espectral: 0-35 m²/cph.

Al filtrar las componentes periódicas de la serie inicial del nivel del mar de Capurganá se obtuvieron los residuos (Fig. 34).

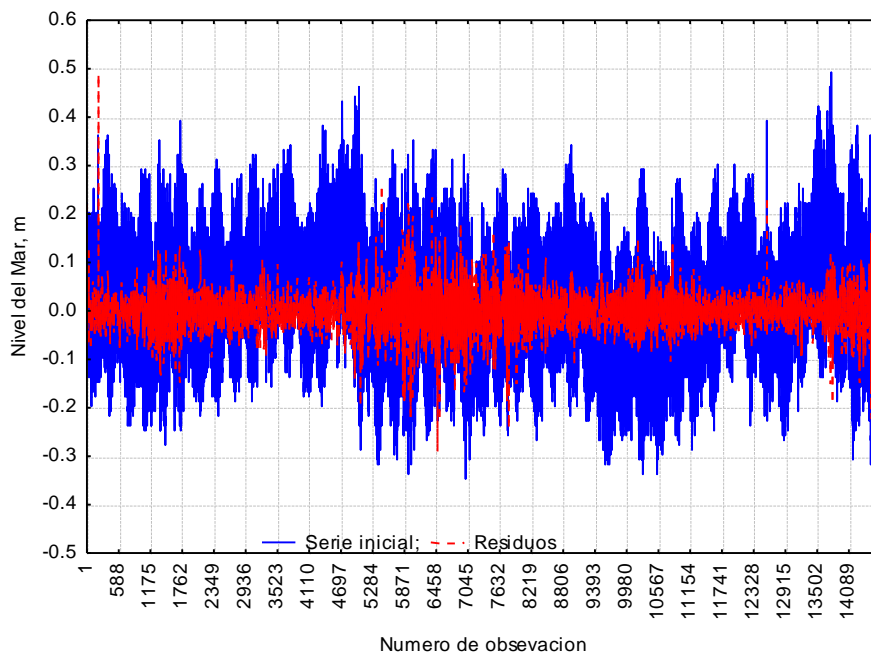


Figura 34. Serie inicial del nivel del mar de Capurganá y sus residuos

El porcentaje promedio que corresponde a las oscilaciones no periódicas con relación a la serie inicial de Capurganá (Fig. 35) se observa en tres rangos: de -0.75 a -0.5 m con 18%, de -0.5 a 0.5 m con 20% y de 0.5 a 0.75 m con 30%.

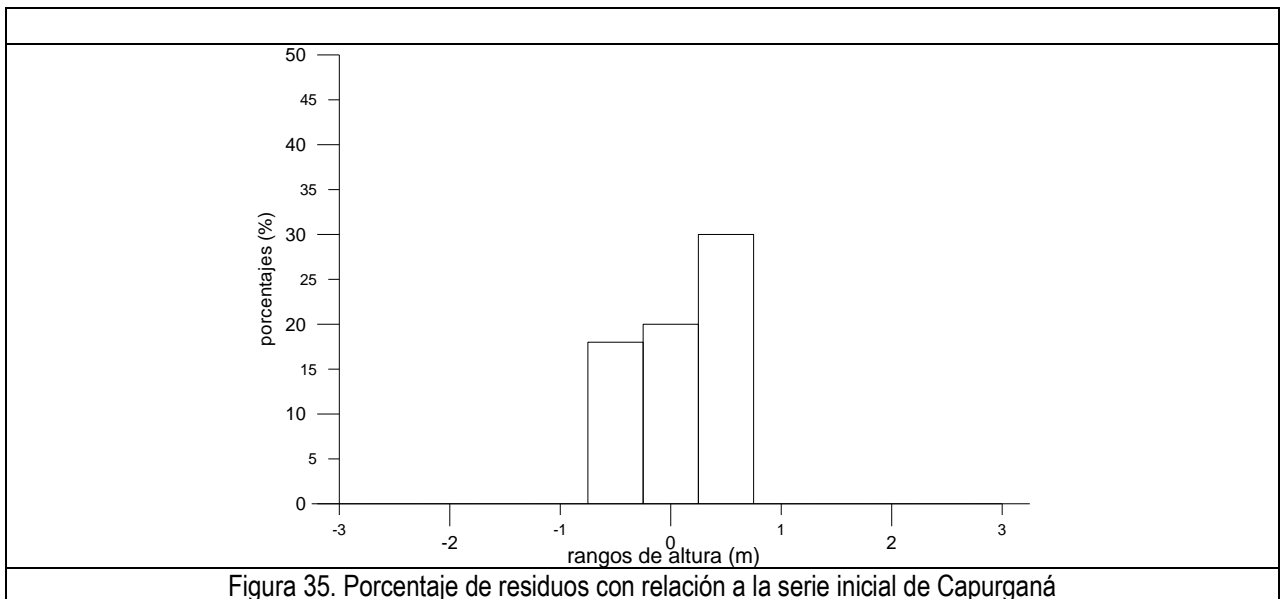


Figura 35. Porcentaje de residuos con relación a la serie inicial de Capurganá

4.7 SAN ANDRÉS

La densidad espectral de la serie del nivel del mar de San Andrés se parece a las de todos los puntos del mar Caribe excepto al de Puerto Bolívar, con unos pequeños cambios relacionados con un aumento del aporte de la componente SSA con un valor de 6 m²/cph (Fig. 36). El mayor aporte pertenece a la onda K₁ con un valor de 11 m²/cph y con un notable aporte de la componente M₂ con 10 m²/cph. La O₁ con 3.5 m²/cph, las ondas MF y N₂ están alrededor de 1m²/cph, y S₂ es menor de 1 m²/cph.

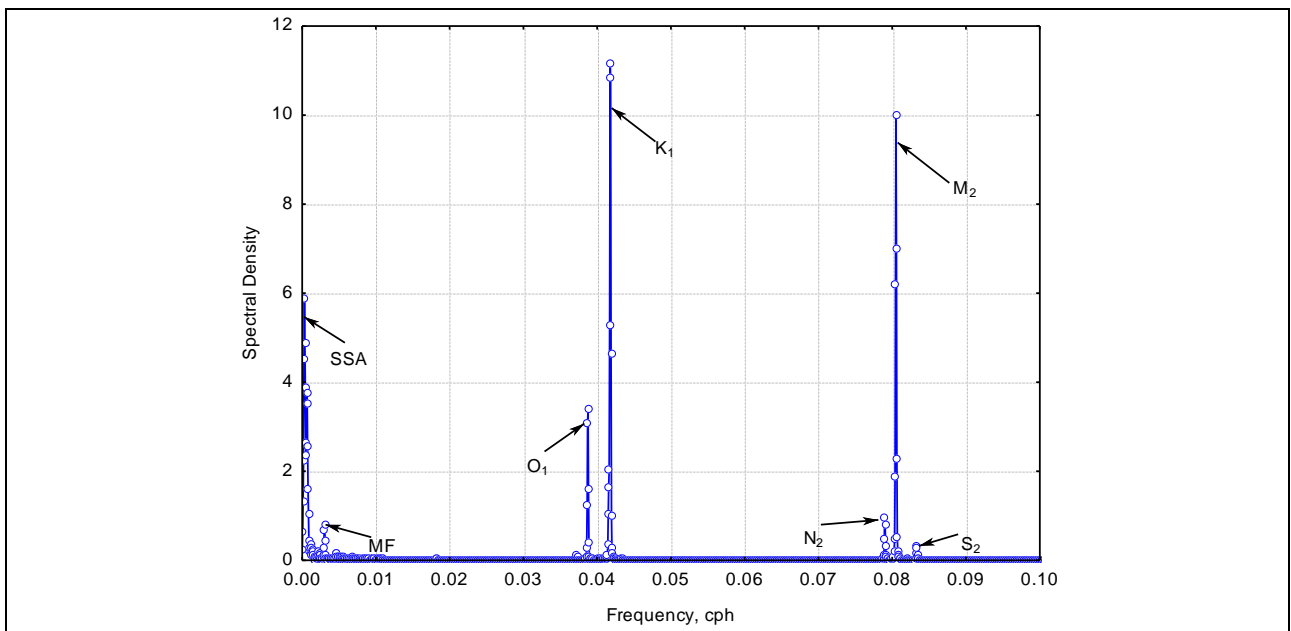


Figura 36. Densidad espectral del nivel del mar de San Andrés.
Rango de densidad espectral: 0-12 m²/cph.

Los residuos con la serie inicial del nivel del mar se presentan en la figura 37.

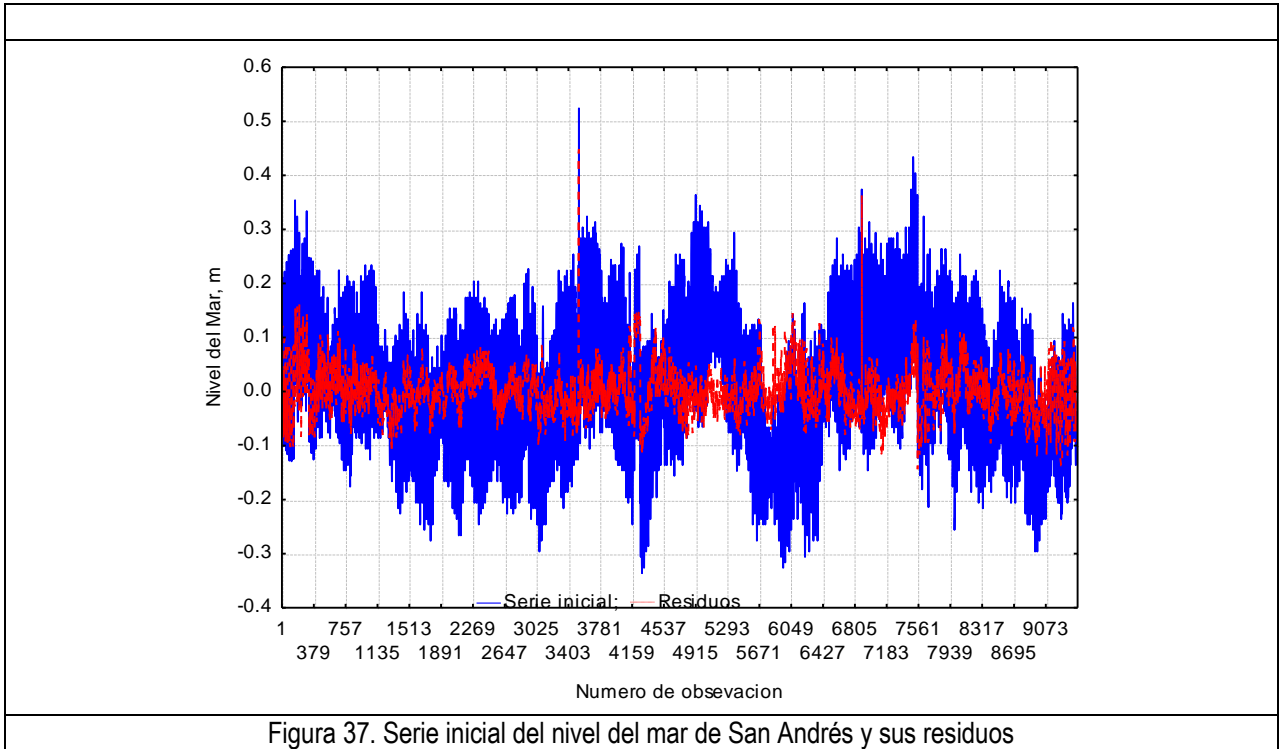


Figura 37. Serie inicial del nivel del mar de San Andrés y sus residuos

El porcentaje promedio que corresponde a las oscilaciones no periódicas con relación a la serie inicial de San Andrés se presenta en la figura 38, donde se observan tres rangos con sus respectivos porcentajes: de -0.75 a -0.5 m de 25%, de -0.5 a 0.5 m con el 40% y de 0.5 a 0.75 m con 25%.

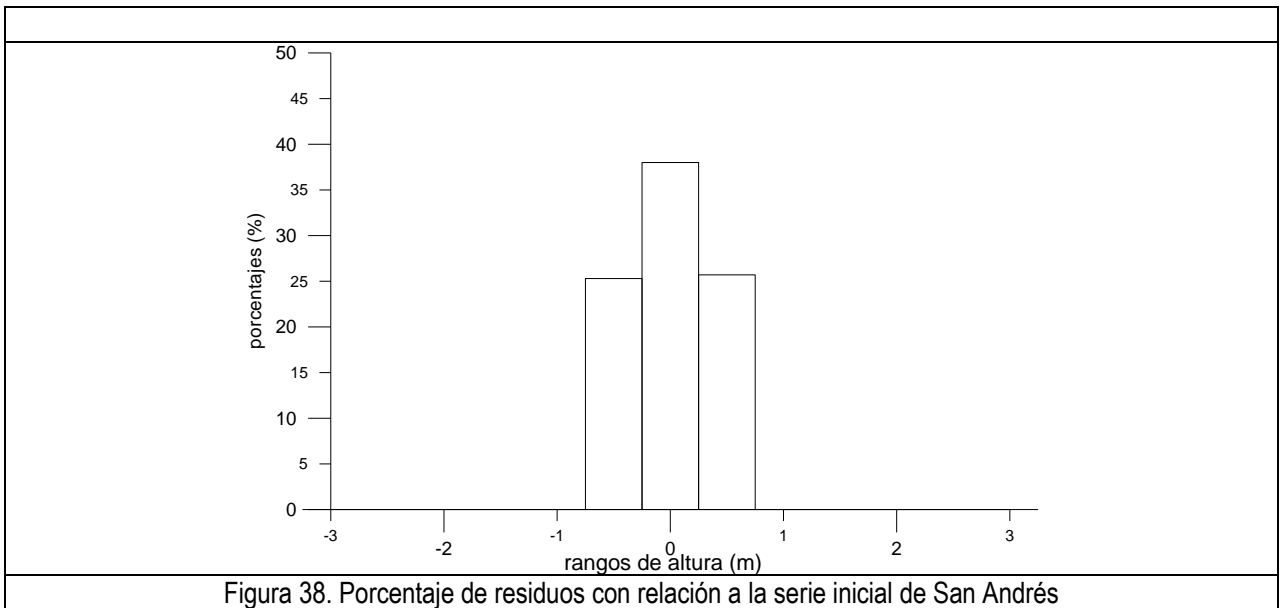


Figura 38. Porcentaje de residuos con relación a la serie inicial de San Andrés

5. DETERMINACIÓN DE LAS COMPONENTES DE LA MAREA DE LAS SERIES DE LOS PUNTOS DE OBSERVACIÓN

5.1. COSTA PACÍFICA

Se determinaron 60 componentes de la marea de las series de los puntos de observación utilizando los siguientes periodos de registro:

Buenaventura: enero a diciembre de 1979

Tumaco: enero de 1969 hasta enero de 1979

Juanchaco: enero a diciembre de 2006

Como resultado de los cálculos se pudo establecer que el nivel medio del mar en Buenaventura es igual a 216.48 cm. La mayor influencia a la marea astronómica en Buenaventura está dada por los componentes semidiurnos tales como M_2 con una amplitud de 150.09 cm, S_2 con un valor de 40.25 cm, N_2 con 31.66 cm, y la última es K_2 con un valor de 10.97 cm, seguida por una diurna K_1 con 11.25 cm.

En Tumaco se estableció que el nivel medio es igual a 162.97 cm. El mayor aporte a la formación de la marea lo dan las componentes semidiurnas: M_2 con un valor de 108.84 cm, S_2 con 31.7 cm, N_2 con 24.98 cm y una componente diurna K_1 con 10.74 cm.

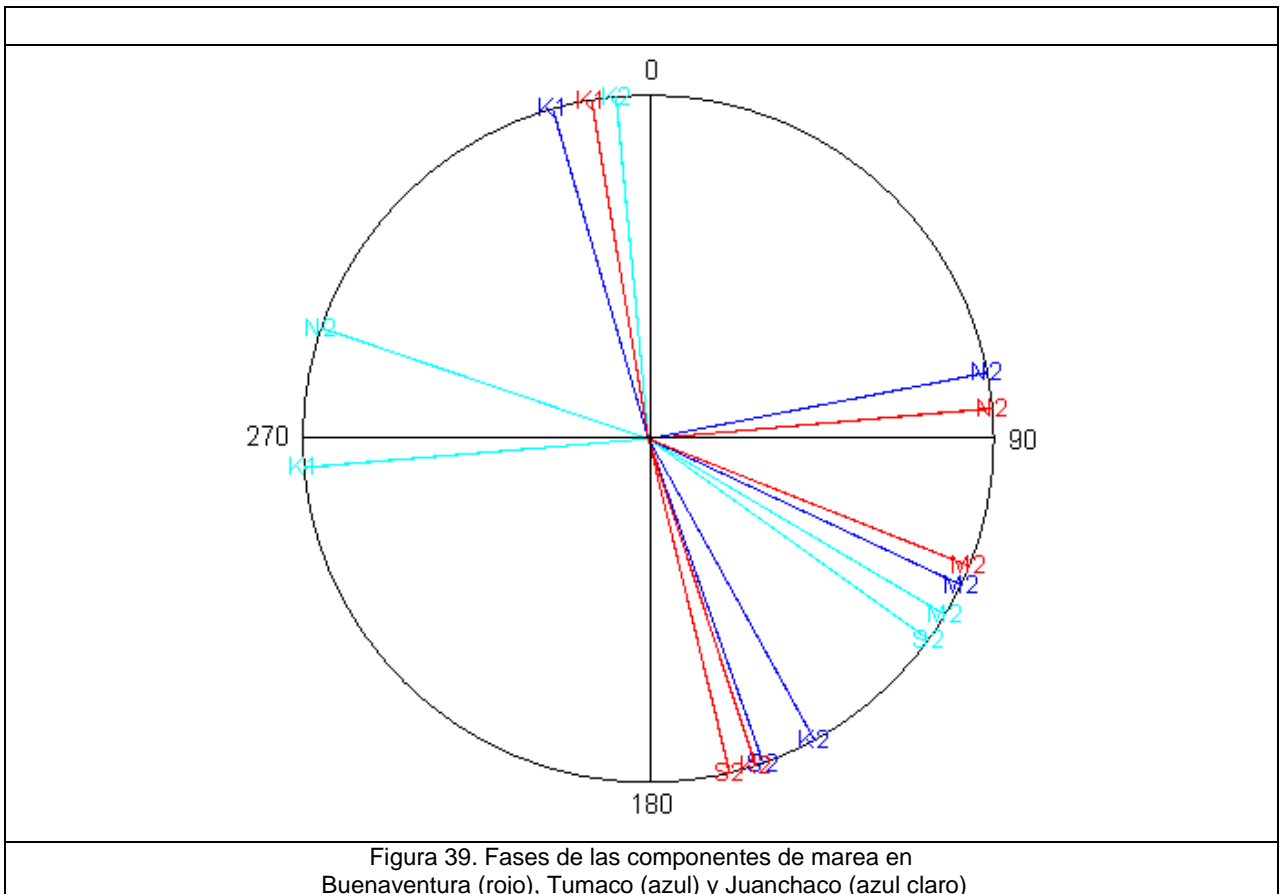
En la estación de Juanchaco, el nivel medio es de 240.67 cm, la amplitud más grande es la de la onda M_2 con 200.02 cm, la que le sigue es S_2 con 33.59 cm, después N_2 con 28.66 cm y la K_1 con 11.49 cm.

Al comparar los valores obtenidos para Buenaventura, Tumaco y Juanchaco, se aprecian unas características similares en las oscilaciones, donde predomina la marea de tipo semidiurno. Sin embargo, hay diferencias en la amplitud y en las fases de las ondas, debido a su localización geográfica.

Entre los tres puntos de la cuenca del Pacífico Colombiano el nivel medio más alto pertenece a Juanchaco con 240.67 cm, después sigue Buenaventura con un valor de 216.47 cm y el último es Tumaco con 162.97 cm.

Como se puede observar la distribución de las componentes de la marea de los puntos de Buenaventura y de Tumaco es muy parecida (Fig. 39), solo tienen una pequeña diferencia en unos grados de sus fases. En comparación al punto de Juanchaco esa diferencia es más grande con respecto a los otros dos puntos.

La onda N_2 de Juanchaco está casi en desfase con las mismas componentes de Buenaventura y Tumaco, a su vez la onda S_2 que es la segunda en el aporte después de la onda M_2 , se ubica cerca a la componente M_2 de Juanchaco. En comparación, la onda S_2 de otros puntos se ubican aproximadamente 50° adelante de la componente M_2 .



El mayor aporte pertenece a la componente M_2 en los tres puntos. Al comparar sus fases, se observa que las de Buenaventura y Tumaco son muy parecidas, 111.7° y 115.2° , razón por la cual los bajamares y pleamares prácticamente se presentan al mismo tiempo, mientras que la fase de la onda M_2 de Juanchaco es de 120.8° produciendo los bajamares y altamares con bastante diferencia horaria.

De acuerdo con la teoría, durante el año deben observarse desigualdades relacionadas con el sol: dos máximos y dos mínimos de la marea. La amplitud de la marea diaria solar es máxima cuando el sol tiene declinación máxima sureña o norteña, y la amplitud mínima cuando el sol se encuentra en la línea del ecuador. Por eso, los máximos se registran en junio y diciembre y los mínimos en marzo y septiembre (Vorobiev y Smirnov, 1999).

En Buenaventura los máximos durante el año se registran en mayo y en noviembre y los mínimos en febrero y agosto (Fig. 40). La amplitud media de la marea astronómica que se registra durante la cuadratura en Buenaventura es de 174 cm y en la sicigia es de 485 cm.

En Tumaco, los máximos se registran en mayo y en noviembre y los mínimos en febrero y agosto al igual que en Buenaventura (Fig. 41). La amplitud media de la marea astronómica en Tumaco en cuadratura es igual a 125 cm y en sicigia de 374 cm.

En Juanchaco los máximos, a diferencia de Buenaventura y Tumaco, se observan en abril y octubre y los mínimos en enero y julio (Fig. 42). La amplitud media de la marea astronómica en cuadratura es de 113 cm y en sicigia es de 423 cm.

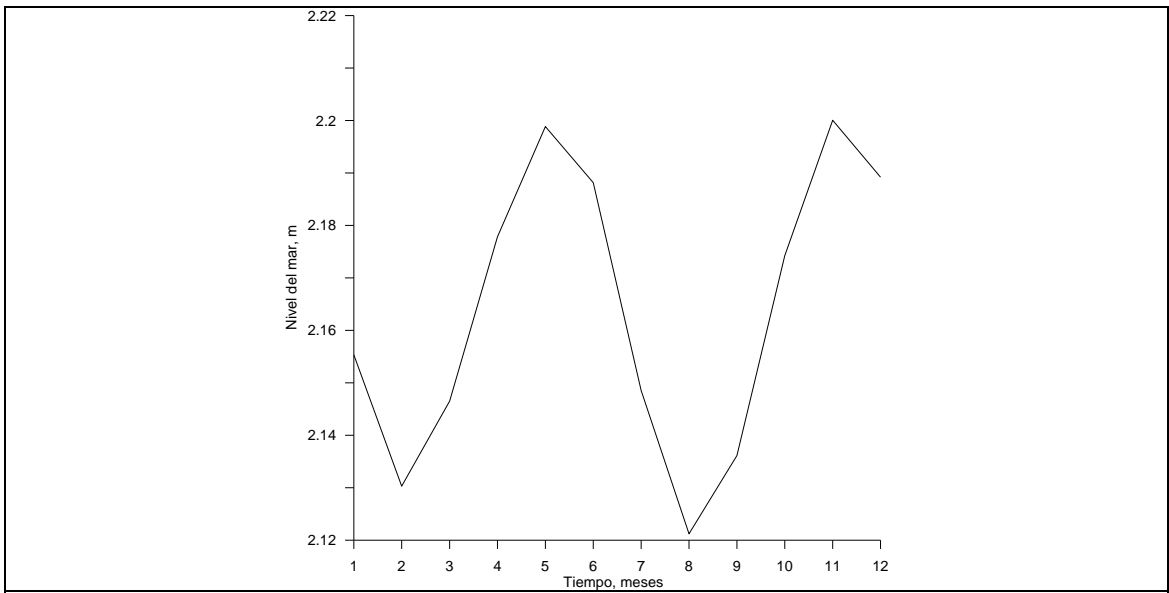


Figura 40. Oscilación anual de la marea astronómica de Buenaventura

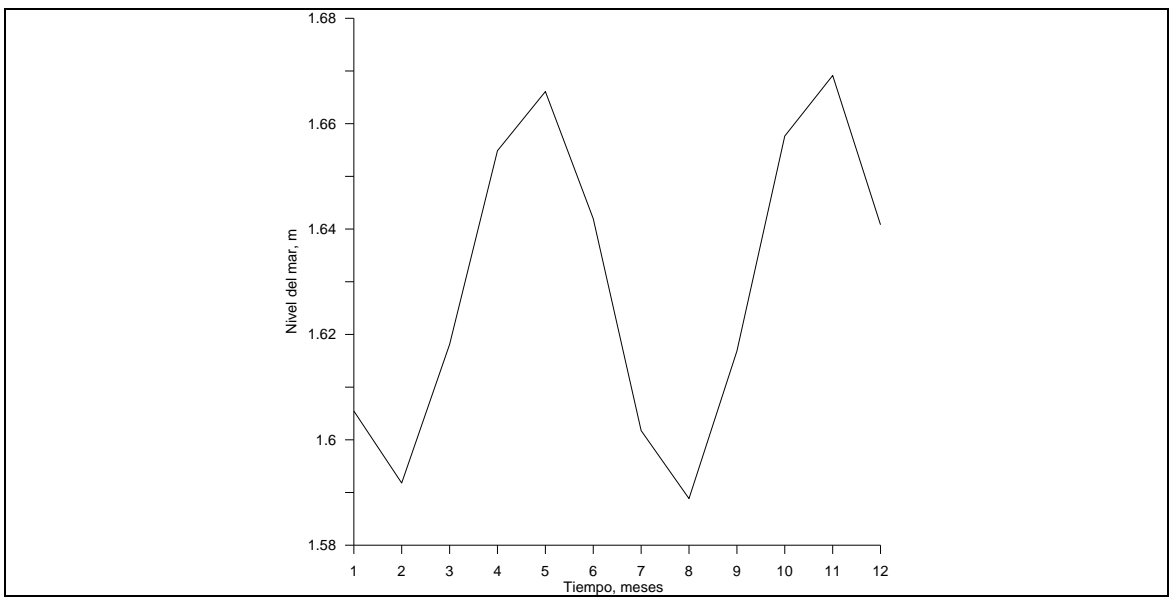
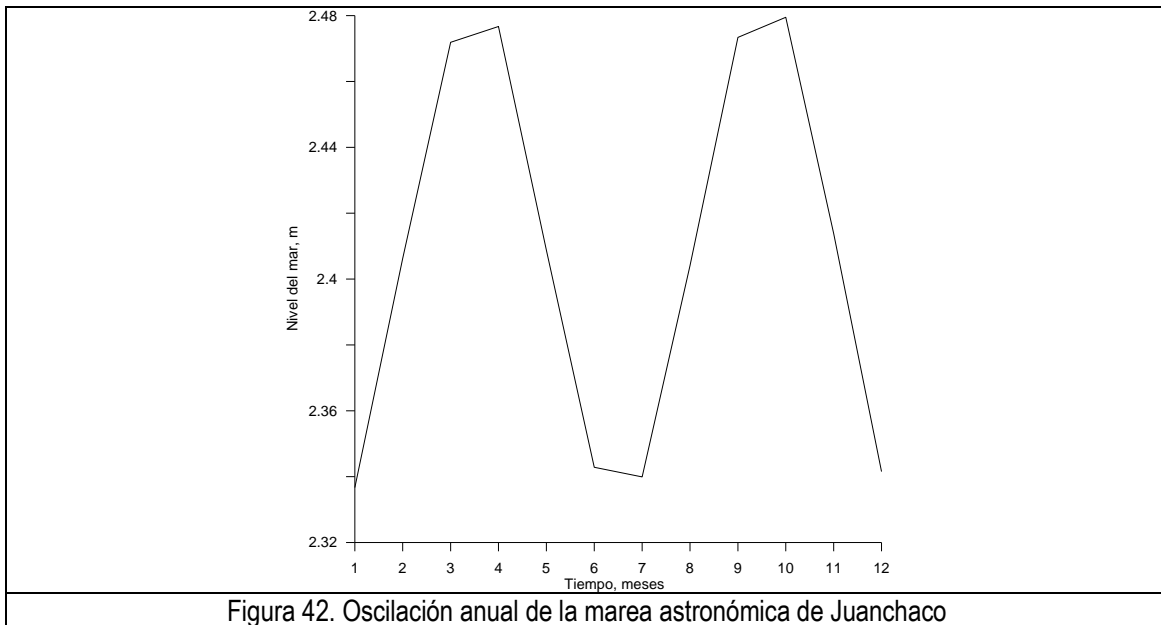


Figura 41. Oscilación anual de la marea astronómica de Tumaco



5.2. COSTA CARIBE

Se determinaron 60 componentes de la marea de las series de los puntos de observación utilizando los siguientes periodos de registro:

Cartagena: enero de 1960 hasta enero de 1961

Islas del Rosario: enero a noviembre de 1999

Puerto Bolívar: sólo 18 días desde el 15 de julio hasta el 3 de agosto del 2009

Capurganá: mayo del 2007 a junio del 2008

San Andrés: febrero de 1997 a febrero de 1998

Como resultado de los cálculos se pudo establecer que el nivel medio del mar en Cartagena es de 37.85 cm, y el mayor aporte a la formación de la marea lo dan las componentes diurnas K_1 con un valor de 9.53 cm y O_1 con 5.79 cm y, las componentes semidiurnas M_2 con un valor de 7.12 cm y N_2 con 2.39 cm.

En Islas del Rosario, el nivel medio de la marea es igual a 52.35 cm, el mayor aporte a la formación de la marea lo dan las componentes diurnas K_1 y la O_1 con valores de 10.45 cm y 6.22 cm respectivamente y, las ondas semidiurnas M_2 y N_2 con 7.81 cm y 2.86 cm respectivamente.

En Puerto Bolívar, el nivel medio de la marea para este punto es de 535.46 cm, el mayor aporte lo dan tres componentes: las ondas diurnas K_1 y la O_1 con 10.89 cm y 5.87 cm respectivamente y una onda semidiurna M_2 con un valor de 7.95 cm.

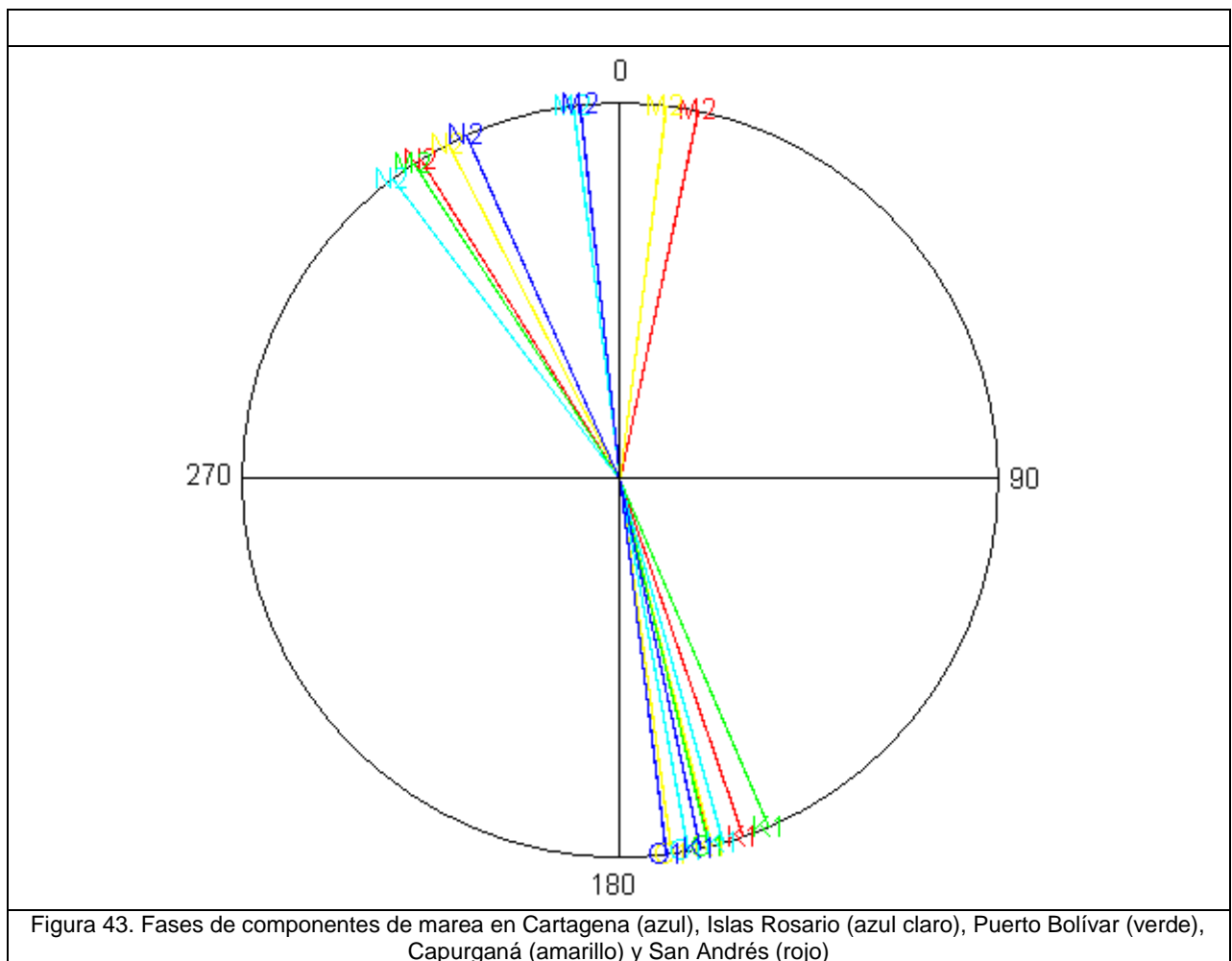
En Capurganá, el nivel medio es igual a 134.13 cm, el mayor aporte a la formación de la marea lo dan las siguientes componentes: las ondas diurnas K_1 con un valor de 10.64 cm y la O_1 con 6.34 cm y, las semidiurnas M_2 con un valor de 7.60 cm y la N_2 con 2.76 cm.

En San Andrés, el nivel medio de la marea es de 32.31 cm, el mayor aporte lo dan las ondas diurnas como K_1 y la O_1 con sus respectivos valores 9.89 cm y 5.92 cm y las ondas semidiurnas M_2 con un valor de 7.7 cm y N_2 con un valor de 2.4 cm.

Comparando los valores obtenidos por medio del analisis armónico para Cartagena, Islas Rosario, Puerto Bolívar, Capurganá y San Andrés se observan unas características similares en las oscilaciones, donde predomina la marea de tipo diurno. Sin embargo, hay diferencias en la amplitud y en las fases de las ondas, debido a su localización geografica.

El nivel medio más alto está en Puerto Bolívar con 535.5 cm, después sigue Capurganá con un valor de 134.1 cm, las Islas Rosario con 52.3 cm, Cartagena con 37.9 cm y San Andrés de 32.3 cm (Tabla 12).

El mayor aporte en las oscilaciones de la marea en estos puntos pertenece a la componente K_1 , las fases de esta onda en todos los puntos son muy cercanas y varían desde 156° en Puerto Bolívar hasta 167° en Cartagena. La segunda onda más importante es la M_2 , con fases que también tienen comportamiento similar entre sí. En la figura 43, se muestran las fases de las componentes principales de las mareas en cada punto de monitoreo.



Como se puede observar, la distribución de las fases de las componentes de la marea de los puntos de Cartagena, Islas del Rosario, Puerto Bolívar, Capurganá y San Andrés tienen semejanza con las ondas K_1 , O_1 y N_2 .

Las fases de la onda M_2 están muy cercanas entre los puntos de Cartagena e Islas del Rosario (353° y 352°). Con diferencia aproximadamente de 20° de ellas, se ubican las fases de la onda M_2 de los puntos Capurganá y San Andrés (7° y 12°), la M_2 del punto Puerto Bolívar es distinta del resto de los puntos con la fase de 327° .

Los máximos anuales en Cartagena se registran en abril y octubre y los mínimos en enero y julio (Fig. 44). La amplitud media de la marea astronómica que se registra durante la cuadratura en Cartagena es de 24 cm y en sicigia es de 60 cm.

Los máximos en Islas del Rosario se observan como en Cartagena en abril y octubre y los mínimos en enero y julio (Fig. 45). La amplitud media de la marea astronómica que se observa en cuadratura es de 14 cm y en sicigia es de 50 cm.

En Puerto Bolívar la oscilación anual es distinta a los otros puntos, porque la longitud de la serie es muy corta y para la determinación de la componentes de la marea hay que tener por lo menos un mes de observación. Los máximos se registran en marzo y diciembre y los mínimos en febrero y agosto (Fig. 46). La amplitud media de la marea astronómica en Puerto Bolívar en cuadratura es de 8 cm y en sicigia es de 42 cm.

En Capurganá igual que en Islas del Rosario y Cartagena los máximos se ven en abril y octubre y los mínimos en enero y julio (Fig. 47). La amplitud media de la marea astronómica que se observa en cuadratura es de 9 cm y en sicigia es de 47 cm.

En San Andrés la oscilación anual de la marea está en desfase con los demás puntos observados, los máximos se observan en enero y julio y los mínimos en abril y octubre (Fig. 48). La amplitud media de la marea astronómica que se registra en cuadratura es de 11 cm y en sicigia es de 47 cm.

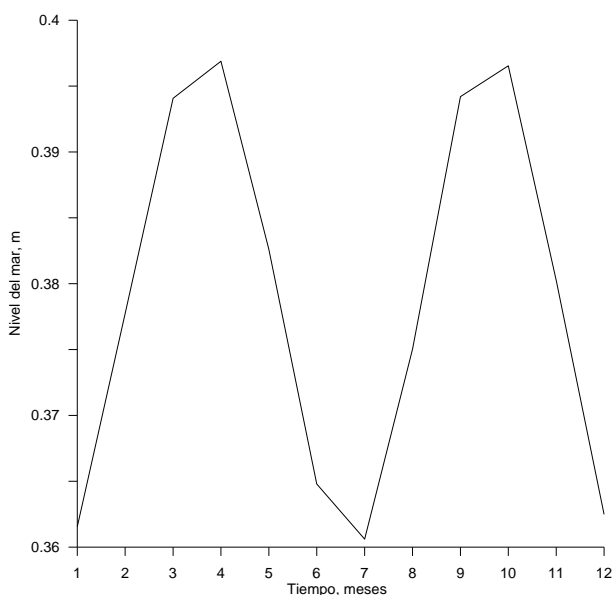


Figura 44. Oscilación anual de la marea astronómica de Cartagena

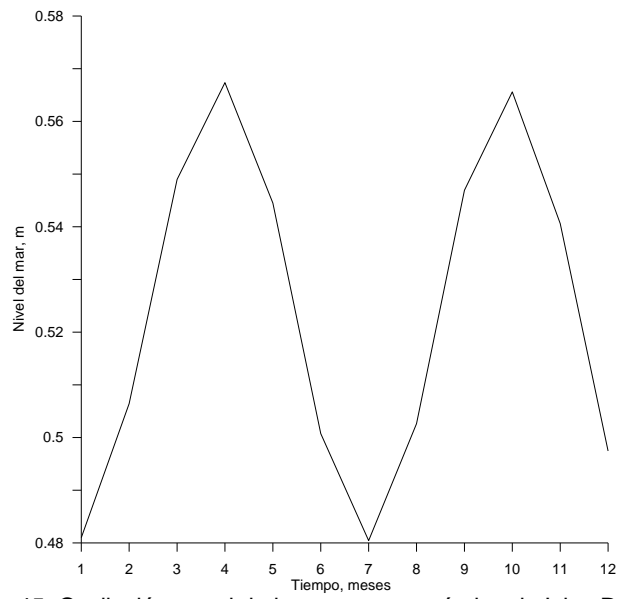


Figura 45. Oscilación anual de la marea astronómica de Islas Rosario

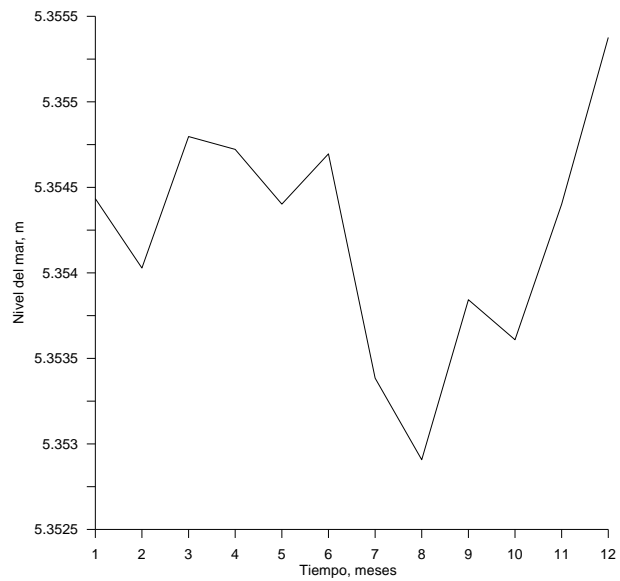


Figura 46. Oscilación anual de la marea astronómica de Puerto Bolívar

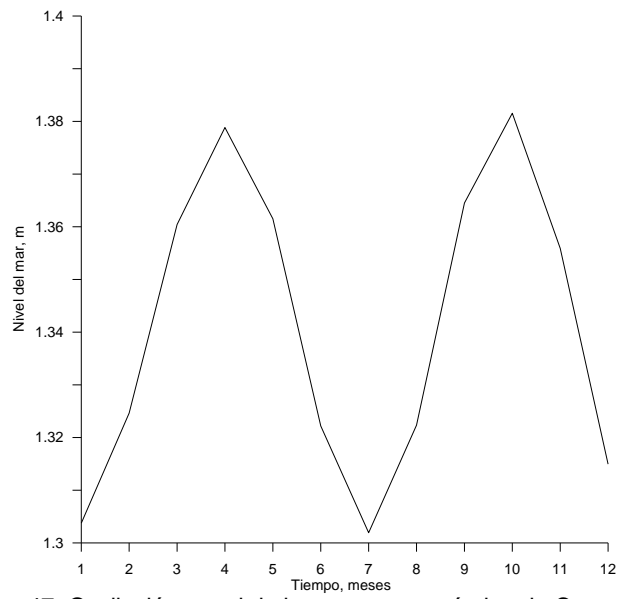


Figura 47. Oscilación anual de la marea astronómica de Capurgana

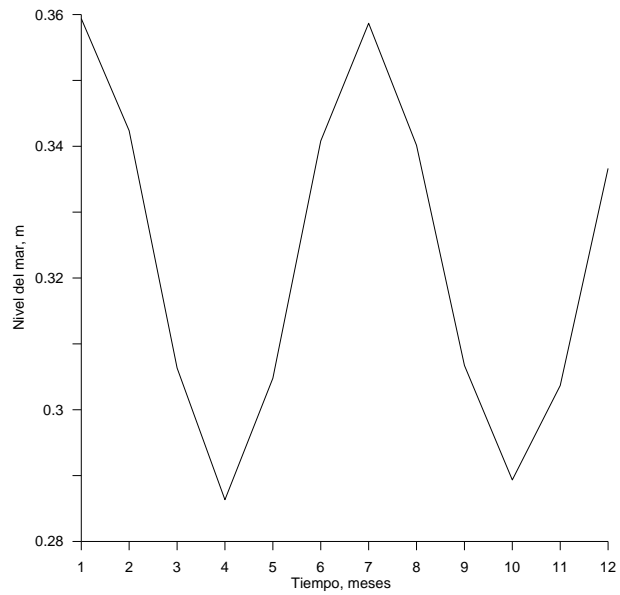


Figura 48. Oscilación anual de la marea astronómica de San Andrés

6. DETERMINACIÓN DEL TIPO DE OSCILACIONES DEL NIVEL DEL MAR EN LOS PUNTOS DE OBSERVACIÓN

Con los resultados obtenidos del cálculo de los armónicos, se determinaron las amplitudes de los componentes de la marea en los diferentes puntos.

Utilizando la relación $\frac{H_{K_1} + H_{O_1}}{H_{M_2}}$ que determina el tipo de marea para cada punto, se calcularon los siguientes

valores para el Pacífico:

- $\frac{11.2 + 2.6}{150.1} = 0.09$ En Buenaventura
- $\frac{10.7 + 2.3}{119.6} = 0.11$ En Tumaco
- $\frac{11.5 + 2.7}{125.3} = 0.11$ En Juanchaco

De acuerdo con los valores obtenidos, el tipo de marea se clasifica dentro del rango: $0 < \frac{H_{K_1} + H_{O_1}}{H_{M_2}} < 0.5$, correspondiente a la marea semidiurna en las tres estaciones.

En los puntos de observación de la marea en el Caribe colombiano, se obtuvieron los siguientes valores:

- $\frac{9.5 + 5.8}{7.1} = 2.15$ En Cartagena
- $\frac{10.4 + 6.2}{7.8} = 2.13$ En Islas del Rosario
- $\frac{10.9 + 5.9}{7.9} = 2.13$ En Puerto Bolívar
- $\frac{10.6 + 6.3}{7.6} = 2.22$ En Capurganá
- $\frac{9.9 + 5.9}{7.7} = 2.05$ En San Andrés

Todos los puntos en el Caribe cumplen con la relación: $2.0 < \frac{H_{K_1} + H_{O_1}}{H_{M_2}} < 4.0$, que los clasifica con el tipo de marea semidiurna mixta.

BIBLIOGRAFÍA

ABUZIAROV, Z.K. Pronósticos Marinos. Gidrometeoizdat, Leningrado, 1988.

ALEXANDERSSON, H and MOBERG. 1997. A Homogenization of Swedish temperature data. Part I: Homogeneity test for linear trends". *Int. Jour. of Climat.*, **17**, 25-34.

EGOROV, N.I. Oceanografía Física. Gidrometeoizdat, Leningrado, 1966.

EMERY W. J. y R. E. THOMSON, 2001. Data analysis methods in physical oceanography. Second and Revised Edition. Amsterdam, Netherlands, 2001.

KAGAN, B.A. y SMIRNOV A.N. Las mareas del Océano del Sur. Trabajos científicos. Gidrometeoizdat, Leningrado, 1990.

Manual on Sea Level Measurements and Interpretation. Intergovernmental Oceanographic Commission of Unesco. Volume 4: An Update to 2006. Editorial United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, París. 80 páginas.

NEKRASOV, A.V. y PELINOVSKIY, E.N. Prácticas de dinámica del oceano. Gidrometeoizdat, San Petersburgo, 1992.

NEUMANN, G. and PIERSON, W.J. Principles Of Physical Oceanography. Prentice - Hall, Inc. New York, 1966.

PERESIPKIN V. I. Los métodos analíticos del recuento de las oscilaciones del nivel del mar. Gidrometeoizdat, Leningrado, 1982.

PUGH, D. (1996). Tides, Surges and Mean Sea Level . Ed. John Wiley and Sons, Wiltshire. 472 páginas

VOROBIEV V Y N. SMIRNOV, 1999. Oceanología general. Parte II Procesos dinámicos. San Petersburgo, RSHMU, 230 p.