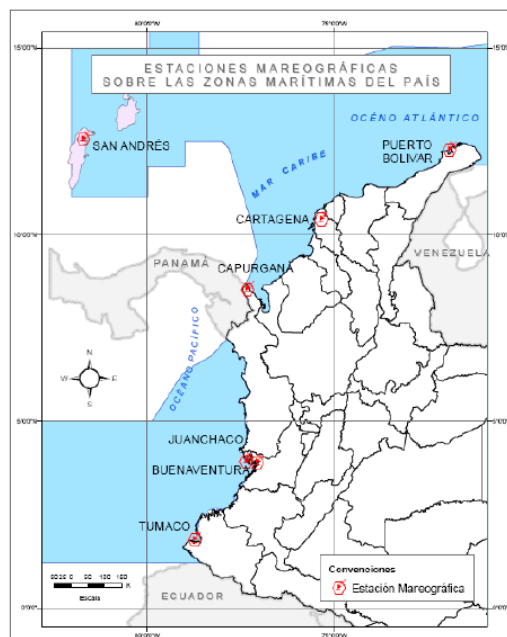
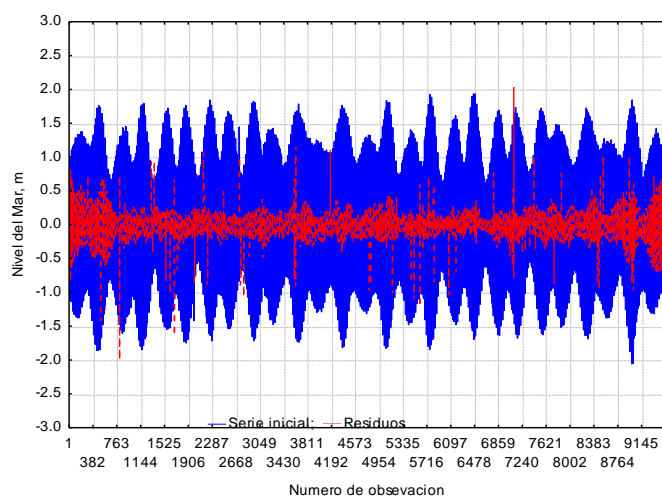


RÉGIMEN DE LA MAREA EN DIFERENTES PUNTOS DE LAS COSTAS COLOMBIANAS



Igor Málikov

Oceanólogo

CONTENIDO

RESUMEN.....	3
1. INTRODUCCIÓN	4
2. MARCO TEÓRICO.....	¡Error! Marcador no definido.
2.1 CLASIFICACIÓN DE LA MAREA.....	4
2.2 ANÁLISIS ARMÓNICO DE LA MAREA.....	7
3. MATERIALES Y MÉTODOS	¡Error! Marcador no definido.
3.1. ÁREA DE ESTUDIO E INFORMACIÓN UTILIZADA	¡Error! Marcador no definido.
3.2. NIVELACIÓN DE LAS SERIES ANALIZADAS	¡Error! Marcador no definido.
4. DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE LAS OSCILACIONES NO PERIÓDICAS EN LAS SERIES DEL NIVEL DEL MAR DE LOS PUNTOS DE OBSERVACIÓN	¡Error! Marcador no definido.
4.1. BUENAVENTURA.....	¡Error! Marcador no definido.
4.2. TUMACO	¡Error! Marcador no definido.
4.3. JUANCHACO.....	¡Error! Marcador no definido.
4.4. CARTAGENA.....	¡Error! Marcador no definido.
4.5 PUERTO BOLÍVAR.....	¡Error! Marcador no definido.
4.6. CAPURGANÁ	¡Error! Marcador no definido.
4.7 SAN ANDRÉS.....	¡Error! Marcador no definido.
5. DETERMINACIÓN DE LAS COMPONENTES DE LA MAREA DE LAS SERIES DE LOS PUNTOS DE OBSERVACIÓN	11
5.1. COSTA PACÍFICA	11
5.2. COSTA CARIBE	14
6. DETERMINACIÓN DEL TIPO DE OSCILACIONES DEL NIVEL DEL MAR EN LOS PUNTOS DE OBSERVACIÓN.....	19
BIBLIOGRAFÍA.....	21

RÉGIMEN DE LA MAREA 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 CLASIFICACIÓN DE LAS MAREAS

2.1 OSCILACIONES PERIÓDICAS Y NO PERIÓDICAS

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* que producen *oscilaciones periódicas*.
- *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.

Los fenómenos geodinámicos y geotérmicos en la corteza terrestre y las influencias mecánicas y físico-químicas, producen *oscilaciones del nivel del mar no periódicas*.

Entre los efectos no periódicos de corta duración y a veces catastróficos de los fenómenos geodinámicos, se encuentran los tsunamis o cambios muy lentos por levantamientos o descensos de la tierra.

Las influencias mecánicas y físico-químicas producen:

- 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, permite 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.

El análisis armónico se utiliza para determinar las amplitudes y fases de todas las componentes armónicas para diferentes puntos de observación del nivel del mar.

2.2 TIPOS DE MAREA

De acuerdo con la clasificación de mareas definida en la literatura utilizando la relación de amplitudes de las componentes principales (Egorov, 1966), se pueden diferenciar los siguientes tipos de mareas:

1. Mareas semidiurnas
2. Mareas diurnas:
3. Mareas mixtas:

Las Mareas mixtas, pueden ser:

- Semidiurnas mixtas:
- Diurnas mixtas:

2.2.1 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 cuarto o al último cuarto (menguante o creciente), 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 cuarto y en el último cuarto (mareas de cuadratura).

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 simidiurnas 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.

2.2.2 Marea Diurna

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).

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.

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).

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 períodos moduladores correspondientes a períodos 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 períodos 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 períodos 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 períodos 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 términos 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).

3 ANALISIS ARMÓNICO DE LAS MAREAS

Laplace fue el primero que propuso el método del análisis armónico para el 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 las mareas, se presentan como la suma de curvas (ondas) regulares, cada una de las cuales tiene carácter de oscilaciones simples armónicas.

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 del mar, en un periodo de 30 días; con ellos se puede calcular la altura de la marea para cualquier día y hora del año.

4 RÉGIMEN DE MAREA EN COLOMBIA

4.1 Series de nivel del mar

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 y Cartagena sobre el Caribe. En la tabla 1-figura 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 de 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"	Noviembre del 1951 – Diciembre 1988	Caribe	Cartagena
Tumaco	1° 49' 09"	78° 43' 49"	Noviembre del 1951- actual	Pacífico	Tumaco
Juanchaco	3° 55' 46"	77° 21' 06"	Junio del 2005 - Octubre del 2008	Pacífico	Buenaventura
Buenaventura	3° 53' 25"	77° 03' 43"	Marzo del 1952 - actual	Pacífico	Buenaventura
Capurganá	8° 36' 58"	77° 19' 41"	Abril del 2007 - actual	Caribe	Acandí
San Andrés	12° 33' 21"	81° 42' 14"	Enero del 1997 – Diciembre del 2008	Caribe	San Andrés
Puerto Bolívar	12° 13' 27"	71° 58' 03"	15 de Julio del 2009 - actual	Caribe	Uribe

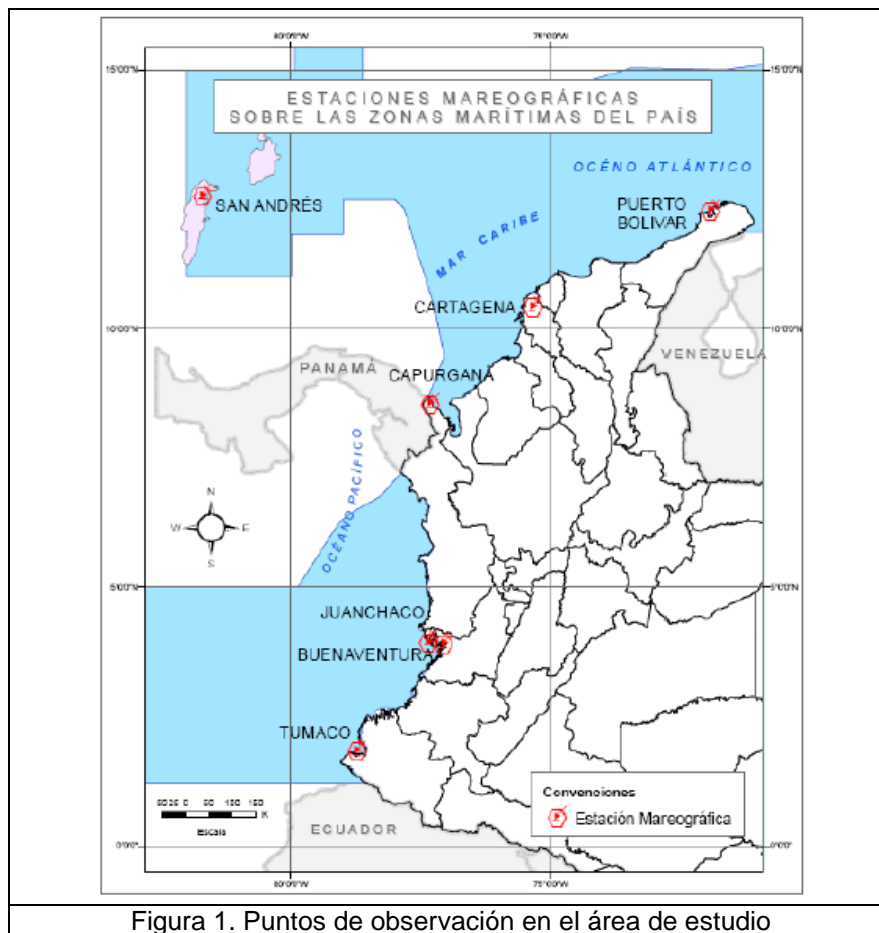


Figura 1. Puntos de observación en el área de estudio

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.

4.2 Oscilaciones Periódicas detectadas en las Series de Nivel del Mar sobre la Costa Colombiana

4.2.1 BUENAVENTURA

De acuerdo con el análisis espectral, en Buenaventura, el mayor aporte en la formación de la marea lo da la componente M_2 (Principal lunar), lo que permite concluir que el tipo de oscilaciones de la marea en Buenaventura es semidiurno.

4.2.2 TUMACO

El análisis espectral de la serie del nivel del mar de Tumaco muestra que el mayor aporte en la formación de la marea lo da la componente M_2 , igual que en Buenaventura.

4.2.3 JUANCHACO

El análisis espectral muestra el mismo comportamiento de los puntos de Buenaventura y Tumaco, con pequeñas diferencias en los valores de la densidad espectral.

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, es decir que todos presentan régimen semidiurno, caracterizado 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).

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.

4.2.4 CARTAGENA

En el punto de Cartagena el mayor aporte en las oscilaciones del mar pertenece a la onda diaria K_1 (Lunar-solar diurna declinacional), después sigue la componente M_2 (Principal lunar) y una tercera onda O_1 (Lunar principal diurna).

4.2.5 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 Q_1 (Lunar eclíptica mayor diurna). El mayor aporte en las oscilaciones del mar pertenece a la onda diaria K_1 (Lunar-solar diurna declinacional) y la M_2

4.2.6 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. El mayor aporte pertenece a la onda K_1 , con un notable aporte de la componente M_2 .

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.

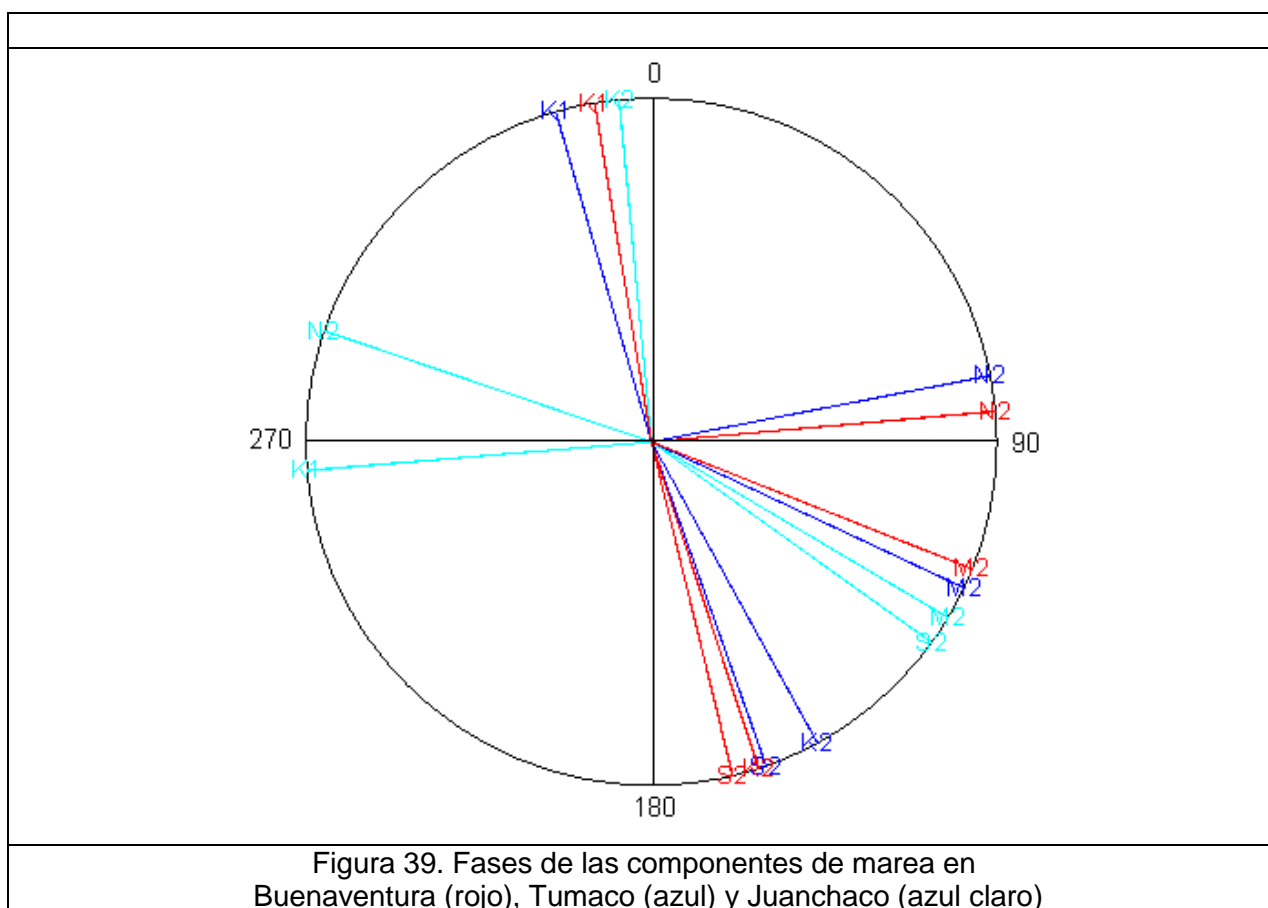
En la estación de Juanchaco, el nivel medio es de 240.67 cm, la amplitud más grande es la de la onda M_2 con 200.02 cm, la que le sigue es S_2 con 33.59 cm, después N_2 con 28.66 cm y la K_1 con 11.49 cm.

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 .



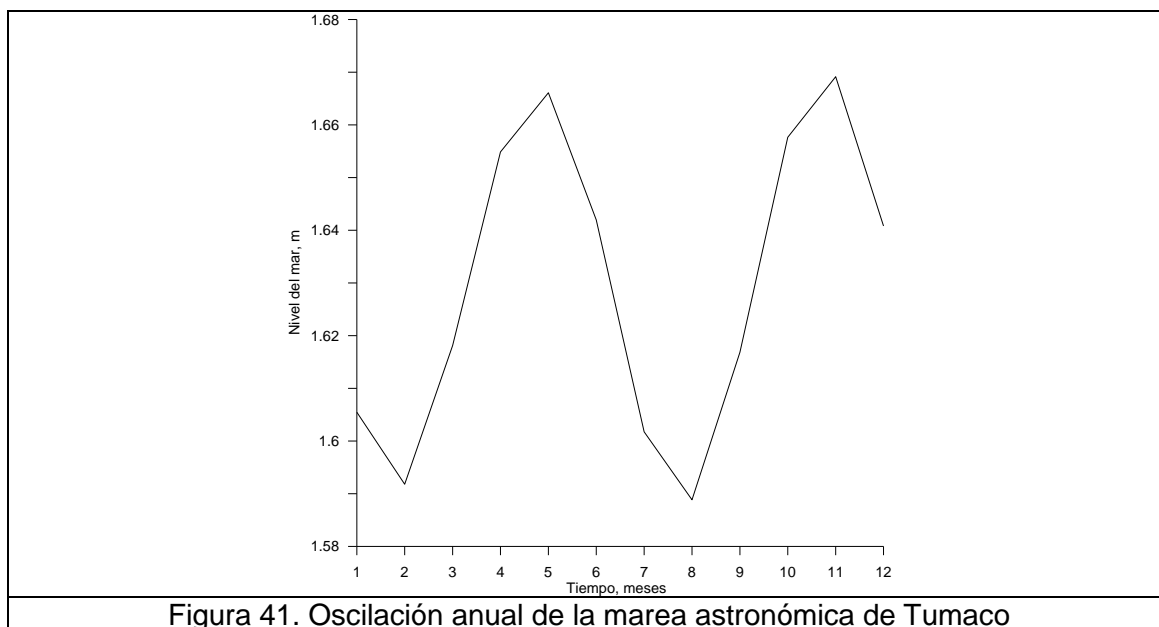
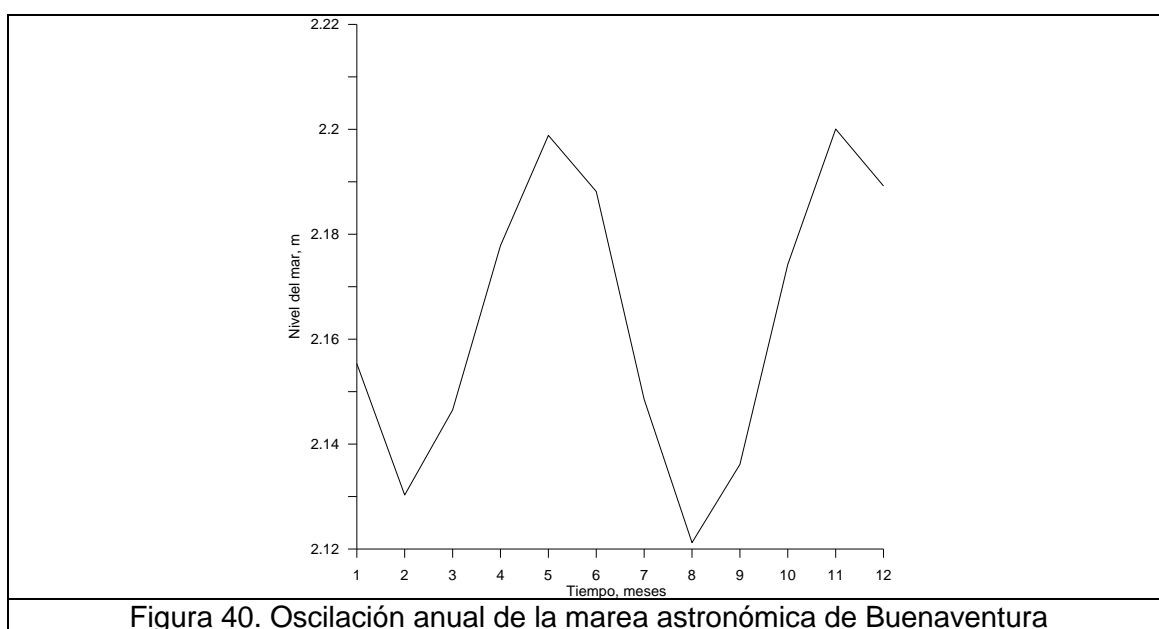
El mayor aporte pertenece a la componente M_2 en los tres puntos. Al comparar sus fases, se observa que las de Buenaventura y Tumaco son muy parecidas, 111.7° y 115.2° , razón por la cual los bajamares y pleamares prácticamente se presentan al mismo tiempo, mientras que la fase de la onda M_2 de Juanchaco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



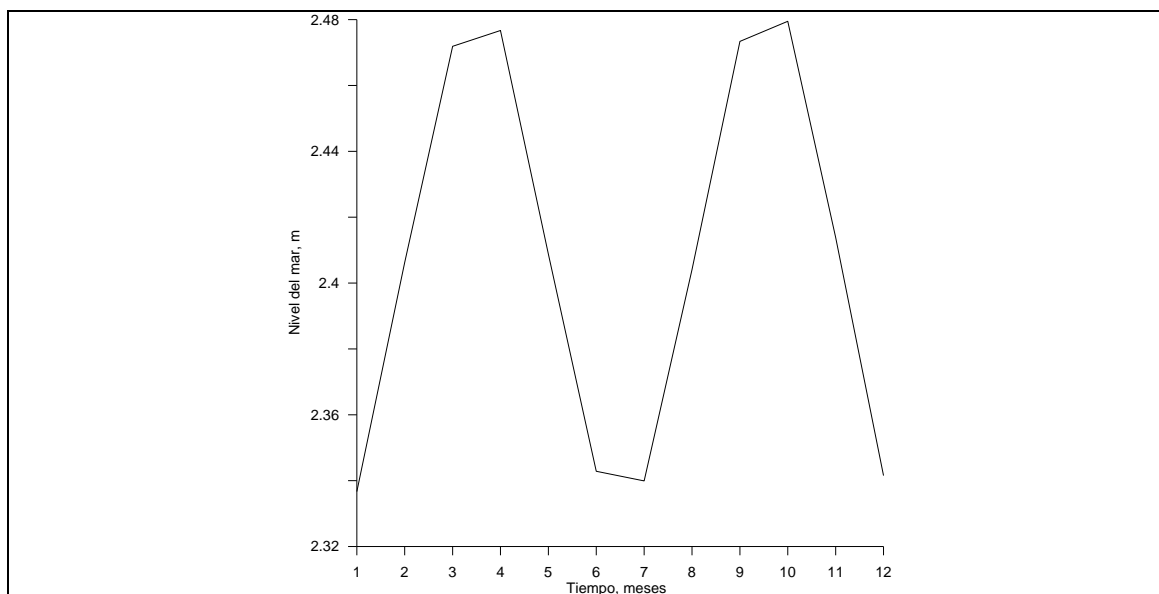


Figura 42. Oscilación anual de la marea astronómica de Juanchaco

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.

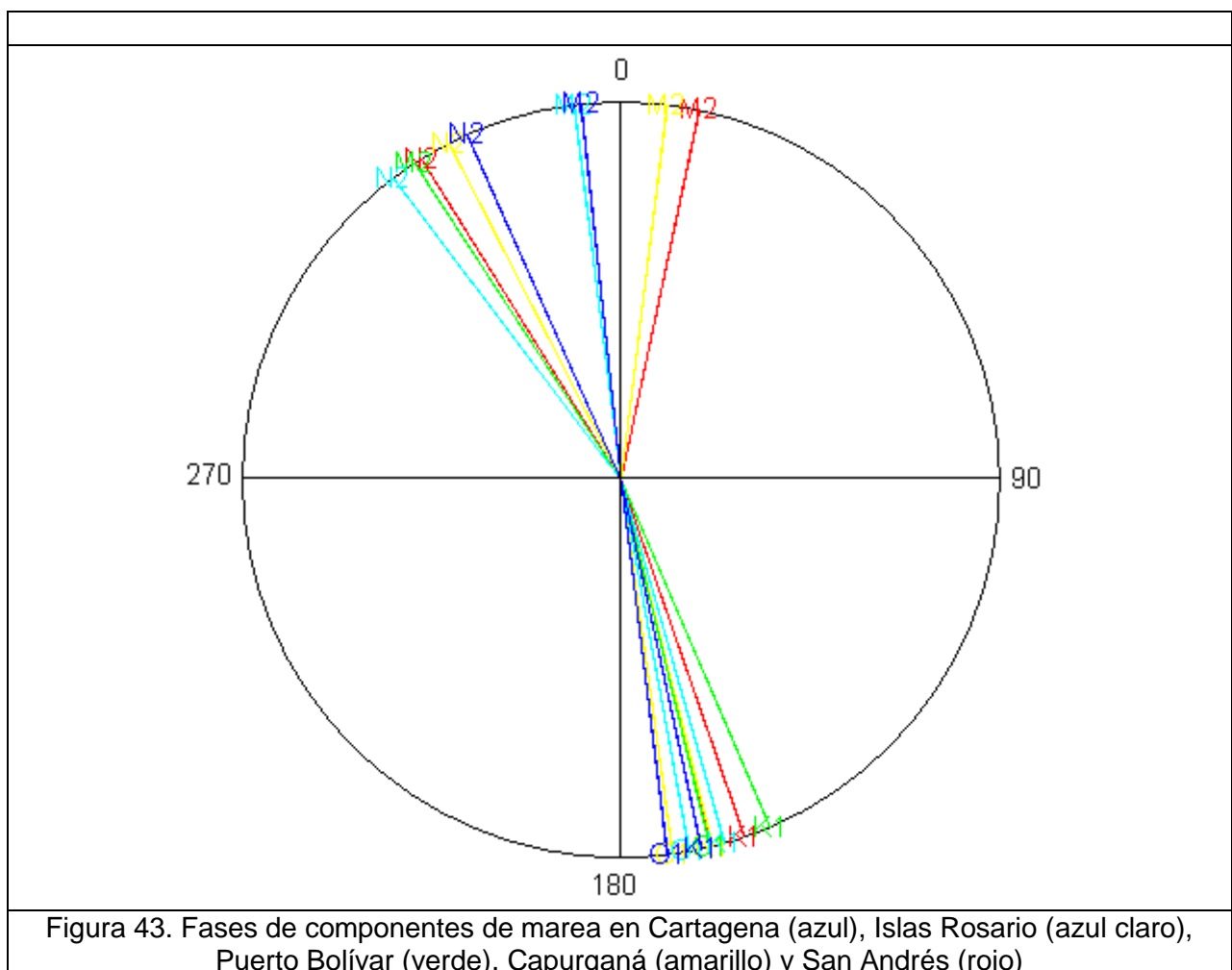
En Capurganá, el nivel medio es igual a 134.13 cm, el mayor aporte a la formación de la marea lo dan las siguientes componentes: las ondas diurnas K_1 con un valor de 10.64 cm y la O_1 con 6.34 cm y, las semidiurnas M_2 con un valor de 7.60 cm y la N_2 con 2.76 cm.

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 geográfica.

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 Bolivar, Capurganá y San Andres 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.

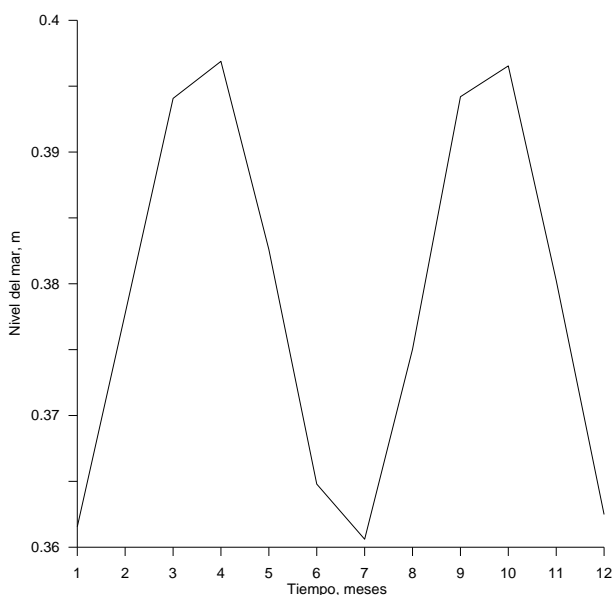


Figura 44. Oscilación anual de la marea astronómica de Cartagena

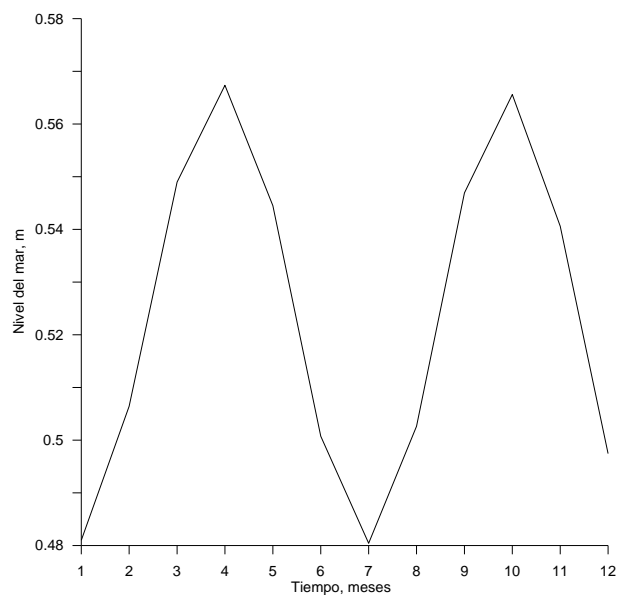


Figura 45. Oscilación anual de la marea astronómica de Islas Rosario

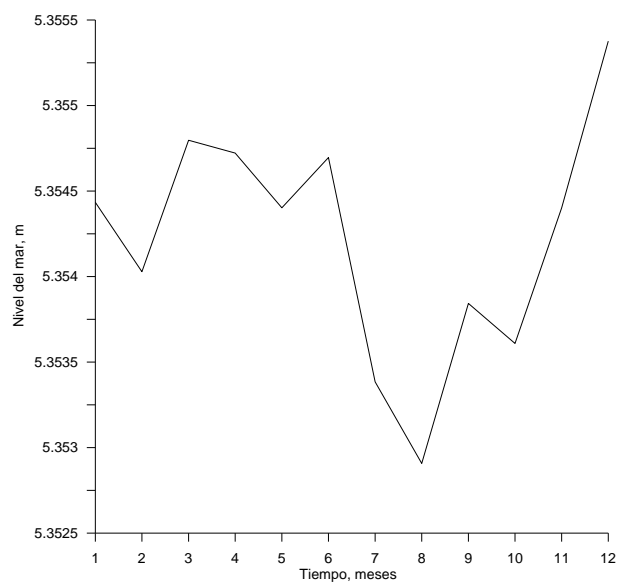


Figura 46. Oscilación anual de la marea astronómica de Puerto Bolívar

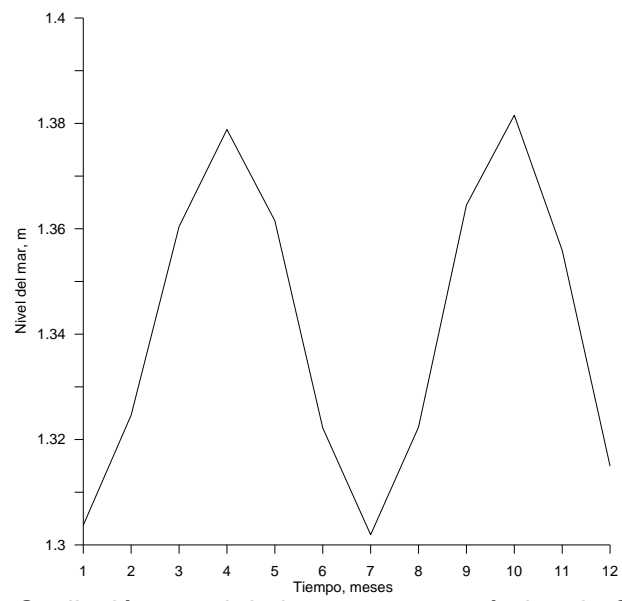


Figura 47. Oscilación anual de la marea astronómica de Capurgana

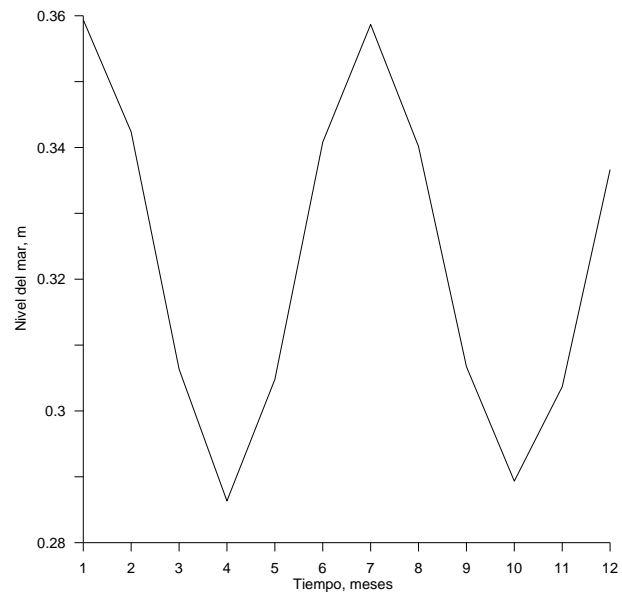


Figura 48. Oscilación anual de la marea astronómica de San Andrés

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:

- $\frac{11.2 + 2.6}{150.1} = 0.09.2$ 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.