

**ESTUDIO DE LA MAREA Y SU PRONÓSTICO EN LA CUENCA COLOMBIA – MAR
CARIBE**

SADID AUGUSTO LATANDRET SOLANA

**ESCUELA NAVAL DE CADETES “ALMIRANTE PADILLA”
FACULTAD DE OCEANOGRAFÍA FÍSICA
PROGRAMA MAESTRÍA EN OCEANOGRAFÍA
CARTAGENA DE INDIAS, D. T. y C.
2021**

**ESTUDIO DE LA MAREA Y SU PRONÓSTICO EN LA CUENCA COLOMBIA – MAR
CARIBE**

SADID AUGUSTO LATANDRET SOLANA

**Proyecto de Grado como requisito parcial para optar al título de
Magister en Oceanografía**

Director:

RAFAEL RICARDO TORRES PARRA, MSc. PhD.

**ESCUELA NAVAL DE CADETES “ALMIRANTE PADILLA”
FACULTAD DE OCEANOGRAFÍA FÍSICA
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN OCEANOGRAFÍA
CARTAGENA DE INDIAS, D. T. y C.**

2021

Nota de Aceptación

Firma del Director

Firma del Evaluador

Firma del Evaluador

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	8
ABSTRACT	9
1. INTRODUCCIÓN.....	10
2. MARCO TEÓRICO	12
3. ÁREA DE ESTUDIO	18
3.1 Descripción física	18
3.2 Condiciones atmosféricas	19
3.3 Condiciones oceanográficas	8
3.4 Nivel del mar	9
4. DATOS Y MÉTODOS	12
4.1 Datos.....	12
4.1.1 Estaciones de nivel del mar.....	12
4.1.2 Modelos globales de marea.....	16
4.1.3 Topografía Dinámica Absoluta	18
4.2 Métodos	19
4.2.1 Control de calidad a series de tiempo de nivel del mar	20
4.2.2 Estimación de la marea y el residuo en el Caribe colombiano	21
4.2.3 Estimación de armónicos en la costa que no cuenten con mediciones	23
4.2.4 Predicción de la marea a partir de armónicos medidos o modelados y la inclusión de variaciones de largo plazo	26
5. CONTROL DE CALIDAD A LAS SERIES DE TIEMPO DE NIVEL DEL MAR.....	29
5.1 Introducción.....	29
5.2 Tratamiento de series de tiempo con alta frecuencia.....	31

5.3	Tratamiento y control de calidad a series de tiempo horarias	38
5.4	Selección del sensor	41
5.5	Selección del año común para el análisis de las series de tiempo.....	42
6.	DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA MAREA Y RESIDUO METEOROLÓGICO EN EL CARIBE COLOMBIANO	46
6.1	Introducción.....	46
6.2	Descripción del comportamiento de la marea	48
6.3	Descripción del comportamiento del residuo meteorológico	56
7.	ESTIMACIÓN DE ARMÓNICOS EN LA COSTA QUE NO CUENTEN CON MEDICIONES <i>IN-SITU</i>	62
7.1	Introducción.....	62
7.2	Comparación de modelos globales de marea para el Caribe colombiano	63
7.3	Configuración y validación de un modelo hidrodinámico para la obtención de armónicos sintéticos de marea	64
7.4	Evaluación de armónicos a partir de series de tiempo de marea modeladas ..	67
8.	PREDICCIÓN DE LA MAREA A PARTIR DE ARMÓNICOS MEDIDOS O DE MODELOS DE MAREA GLOBALES.....	72
8.1	Introducción.....	72
8.2	Evaluación de la calidad de los pronósticos de marea.....	74
9.	DISCUSIÓN.....	79
10.	CONCLUSIONES.....	85
11.	BIBLIOGRAFÍA.....	87
12.	ANEXOS.....	95
12.1	Metadata control de calidad estaciones.....	95
12.2	Variación estacional por estación para el año 2018.....	113

Lista de tablas

Tabla 1. Requisitos de los mareógrafos para diferentes aplicaciones científicas. Modificado de (UNESCO/COI, 2012).	17
Tabla 2. Datos de nivel del mar disponibles para la investigación.	15
Tabla 3. Resultados de datos eliminados de acuerdo al tamaño de la ventana de evaluación en una media móvil por saltos.....	32
Tabla 4. Datos faltantes de las series de tiempo horarias después de aplicar los filtros de media móvil por saltos y S-G.	35
Tabla 5. Resultados del control de calidad a las series de tiempo horarias.	42
Tabla 6. Resultados del control de calidad a las series de tiempo horarias.	43
Tabla 7. Ordenamiento de constituyentes armónicos con base en su porcentaje de energía por puerto.....	47
Tabla 8. Comparación de amplitud de los principales armónicos de datos observados con modelos globales de marea	54
Tabla 9. Comparación de fase de los principales armónicos de datos observados con modelos globales de marea	55
Tabla 10. Resultados obtenidos del análisis del residuo de marea de cada estación de nivel del mar para el año 2018 y algunas estaciones de 2013. 1.....	57
Tabla 11. RMS y RSS de las diferencias de amplitud y fase entre los valores medidos y los modelos globales de marea.....	63
Tabla 12. Evaluación de desempeño en función de la amplitud (cm) entre MOHID, el modelo Global TPXO9 y los datos observados para San Andrés.	65

Tabla 13. Evaluación de desempeño en función de la fase (°) entre MOHID, el modelo Global TPXO9 y los datos observados para San Andrés.....	66
Tabla 14. Amplitud (cm) de la serie de tiempo observada (O) en el 2018 y diferencias respecto de la simulación hidrodinámica (S) y modelo global TPXO9 (T).....	69
Tabla 15. Fase (grados respecto al 1 de enero) de la serie de tiempo observada (O) en el 2018 y diferencias respecto de la simulación hidrodinámica (S) y modelo global TPXO9 (T).....	70
Tabla 16. Amplitud (cm) de los armónicos de la serie de 2019 (R) y diferencias respecto al pronóstico con datos de 2018 (O) y pronóstico con los armónicos del modelo global TPXO9 (T) 1	75
Tabla 17. Fase (° a partir del 1 de enero) de los armónicos de la serie de 2019 (R) y diferencias respecto al pronóstico con datos de 2018 (O) y pronóstico con los armónicos del modelo global TPXO9 (T) 1	76

Lista de Figuras

- Figura 1. Área de estudio: Cuenca Colombia. En blanco se presentan las profundidades menores a 200 metros. Se muestran las isóbatas de 200 m, 1000 m y 3000 m. Con una estrella roja los sensores pertenecientes a la Red MPOMM y con un cuadrado verde los de la UHSLC. Datos batimétricos de ETOPO1 (Amante & Eakins, 2009)..... 19
- Figura 2. Media mensual multianual (1987-2016) de las principales variables meteorológicas en superficie sobre el Mar Caribe. Fuentes: Vientos, Reanalysis Cross-Calibrated Multiplatform Ocean (CCMP); temperatura y presión, International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set (ICOADS) y precipitación, Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). 8
- Figura 3. Diagrama de flujo de datos de nivel del mar desde que son tomados por el mareógrafo hasta que son desplegados y visualizados en el sistema Hydras 3 en los Centros de Investigación..... 14
- Figura 4. Series de tiempo de tres meses en Ballenas y Turbo, con los tres sensores de las estaciones mareográficas usando una ventana de 7 minutos para calcular el dato horario. Tiempo en UTC..... 34
- Figura 5. Respuesta de los filtros a los espacios vacíos en la serie de tiempo de nivel del mar..... 36
- Figura 6. Espectro de frecuencia de la estación de San Andrés. Arriba, datos originales de la estación sin filtrar; medio, datos horarios filtrados aplicando el método Savitzky-Golay y abajo datos horarios filtrados aplicando el filtro medio móvil por saltos..... 37
- Figura 7. Residuo meteorológico de la estación de nivel del mar de Ballenas entre agosto de 2013 y diciembre de 2019, se aprecian los cambios en la referencia vertical, comparado con la serie de tiempo de ADT (Absolute Dynamic Topography) obtenida del nodo más cercano a 18 km al noreste de la estación. 39

Figura 8. Residuo meteorológico de la estación de Ballenas después de aplicar el procedimiento para la recuperación del datum vertical (azul) y datos de ADT del nodo más cercano (rojo).	40
Figura 9. Series de tiempo de las 18 estaciones de nivel del mar de DIMAR y de la UHSLC, a las cuales se les aplicó el control de calidad definido previamente. Entre líneas negras verticales se destaca el lapso de tiempo común a la mayoría de series de tiempo.	45
Figura 10. Variación temporal de los ciclos anuales estadísticamente significativos para el año 2018, a excepción de Puerto Velero que corresponde a 2013.	58
Figura 11. Variación temporal de los ciclos semi-anuales estadísticamente significativos para el año 2018, a excepción de Puerto Velero que corresponde a 2013.	59
Figura 12. Variación estacional de los ciclos anuales y semianuales estadísticamente significativos para el año 2018, a excepción de Puerto Velero que corresponde a 2013.	60
Figura 13. Dominios computacionales empleados en la propagación de la onda de marea desde aguas profundas en las poblaciones de: A) Ballenas, B) Cartagena, C) Turbo y D) San Andrés.	67
Figura 14. Modulación nodal de K1, amplitud (superior) y fase (inferior) para la estación de San Andrés del año 2014 al 2019.	74

RESUMEN

La marea y el residuo meteorológico son analizados en la Cuenca Colombia a partir de series de nivel del mar observadas en 18 lugares, 14 en las costas colombianas y 4 adicionales de países vecinos. Se propone y aplica una metodología para el control de calidad a estos datos, la cual mantiene la energía de los principales constituyentes de la marea, sin desfase y conservando una mayor cantidad de información respecto a otros filtros. De igual forma, el análisis armónico a los datos muestra que los principales constituyentes que rigen la marea en el Caribe corresponden a K1, O1, P1, M2, N2, S2 y Mf; siendo S2 un armónico afectado en gran medida por variaciones meteorológicas principalmente hacia el oeste de la cuenca. Asimismo, se evalúa el desempeño de tres modelos globales de marea para el Caribe, encontrando que el TPX09 presenta el mejor desempeño al ser comparado con datos medidos. La calidad de los armónicos del TPX09 cerca de la costa es similar a los armónicos que se obtienen de propagar la onda de marea con un modelo hidrodinámico forzado por el mismo modelo desde aguas profundas, por lo cual no se sugiere el uso del modelo hidrodinámico. A partir de los armónicos del modelo global y los medidos, se estableció una metodología para la generación de pronósticos de marea para lugares con y sin mediciones. La metodología para lugares sin mediciones se basa en la generación del pronóstico tomando los datos de amplitud y fase directamente del modelo global TPX09. En ambos casos se sugiere incluir al pronóstico de marea las variaciones estacionales (Sa y Ssa) las cuales dependen de forzantes meteorológicos. Esta inclusión en el Caribe permite que el pronóstico de marea sea más representativo de las variaciones reales del nivel del mar que afectan los procesos y actividades en las costas.

Palabras claves: Marea – Mar Caribe – TPX09 – Armónicos – Residuo de marea

Línea de investigación: Oceanografía Física

Sub-línea de Investigación: Estudios de los procesos físicos del océano

ABSTRACT

The tide and non-tidal residuals are analyzed in the Colombian Basin from observed sea level series at 18 places, 14 in the Colombian coasts and other 4 from neighbor countries. A quality control methodology is proposed and applied to this data, which maintain the main constituents' energy without producing a phase lag and preserving more information than other filters. Besides, harmonic analysis shows that the main constituents in the Caribbean correspond to K1, O1, P1, M2, N2, S2, Mf. From these, S2 harmonic is largely affected by meteorological variations mainly towards the west of the basin. Furthermore, we evaluated three global tide models in the Caribbean, finding that the TPXO9 has the best performance when compared to observed data. The quality of the TPXO9 harmonics near the coast is similar to the harmonics obtained by propagating the tidal wave with a hydrodynamic model forced from deep waters with the same global tidal model; therefore, the use of the hydrodynamic model to obtain coastal harmonics is not suggested. A methodology to forecast the tide at places with and without measurements is presented, using observed tidal harmonics or from the global tidal model, respectively. On both cases, the inclusion of the meteorological dependent seasonal variations (Sa and Ssa) to the tidal forecast are recommended. This inclusion allows the tidal forecast to be more representative of real sea level variations that affect coastal processes and activities in the Caribbean coasts.

Keywords: Tide – Caribbean Sea – TPXO9 – Harmonics – Nontidal residual

Research line: Physical Oceanography

Sub-Research Line: Studies of the physical processes of the ocean.

1. INTRODUCCIÓN

La presente investigación determina el comportamiento de la marea en los principales puertos del Caribe Colombiano incorporando estaciones que no se han estudiado previamente (18 en total). Este estudio actualiza y amplía el conocimiento de la marea, así como analiza las variaciones espaciales en las costas continental e insular de Colombia. Igualmente, se pronostica la marea incorporando las variaciones de largo plazo. Este pronóstico se puede obtener en lugares donde se tengan datos, pero también en aquellos lugares en la costa Caribe Colombiana donde no se tiene información medida de nivel del mar, empleando modelos globales de marea.

La presente investigación facilita el ejercicio de autoridad de la Dirección General Marítima, para generar pronósticos de marea con gran exactitud que contribuyan a la seguridad integral marítima y portuaria. A su vez, contribuye al logro de objetivos estratégicos misionales de la Armada Nacional, a través del conocimiento que permita mitigar los efectos del cambio climático, atender desastres naturales y proteger los ecosistemas; como también, poner este conocimiento al servicio del desarrollo integral del país.

El objetivo general de este trabajo es estudiar la marea en el Caribe colombiano, para generar pronósticos a partir de armónicos medidos o modelados que incluyan las variaciones de largo plazo generadas por la regresión de los nodos lunares. Para lograr esto se desarrollan cuatro objetivos específicos:

- I. Proponer y aplicar una metodología para efectuar control de calidad a las series de tiempo de nivel del mar medidas en diferentes puertos en el Caribe colombiano.
- II. Describir los principales armónicos de marea y su variación espacial a lo largo de la costa colombiana en el Caribe.
- III. Establecer y aplicar una metodología para estimar los armónicos de la marea en lugares de la costa Caribe colombiana en el que no se cuenten con mediciones in-situ.

- IV. Establecer y aplicar una metodología para la predicción de la marea en la costa Caribe colombiana a partir de armónicos medidos o modelados y la inclusión de variaciones de largo plazo generadas por la regresión de los nodos lunares.

El documento consta de diez capítulos. A partir del Capítulo 2, se inicia con el marco teórico con el fin de dar al lector los conceptos que permitan el entendimiento del trabajo desarrollado. En el Capítulo 3 se presenta una descripción física del Mar Caribe colombiano, como también sus principales características oceanográficas, meteorológicas y el conocimiento que se tiene referente al nivel del mar para la cuenca. En el Capítulo 4 se encuentra una descripción de las diferentes fuentes de información, a partir de las cuales se obtuvieron los datos empleados en este trabajo; asimismo, las herramientas y metodologías empleadas para cumplir con los objetivos de esta investigación. Cabe resaltar que la metodología de control de calidad de datos se encuentra consignada en el Capítulo 5, por ser un objetivo específico de este trabajo y se aborda de una manera más detallada.

El Capítulo 6 presenta la descripción del comportamiento de la marea en el Caribe colombiano. En el Capítulo 7 se explica el proceso de obtención de los armónicos de marea en lugares sin mediciones y en el 8 la obtención de pronósticos de marea para lugares con o sin mediciones, incluyendo las variaciones de largo plazo debido a la regresión de los nodos lunares. Por último, los Capítulos 9 y 10 corresponden a la discusión y conclusiones de la investigación respectivamente.

2. MARCO TEÓRICO

El nivel del mar $X(t)$ resulta de la combinación de la variabilidad del nivel medio del mar $Z_0(t)$, la marea $T(t)$ y un componente de residuo meteorológico que varía por cambios en la presión atmosférica y al esfuerzo del viento $R(t)$, (Pugh & Woodworth, 2014; Torres Parra, 2013):

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{Z}_0(t) + \mathbf{T}(t) + \mathbf{R}(t) \quad \text{Ecuación 1}$$

Asimismo, el nivel medio del mar $Z_0(t)$ cambia lentamente con el tiempo y puede ser expresado como:

$$\mathbf{Z}_0(t) = \overline{\mathbf{Z}_0} + \mathbf{a}t + \mathbf{W}_{inter} + \mathbf{C}_a + \mathbf{C}_{sa} + \mathbf{W}_{intra} + \mathbf{e}(t) \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde se incluye un nivel medio de largo plazo $\overline{\mathbf{Z}_0}$, una tendencia $\mathbf{a}t$, la variabilidad interanual para periodos mayores a un año \mathbf{W}_{inter} ; \mathbf{C}_a y \mathbf{C}_{sa} corresponden a los ciclos anuales y semianuales respectivamente, \mathbf{W}_{intra} a la variabilidad intra-anual para cambios en periodos mayores a 15 días pero menores a un año, no incluyendo los periodos anuales ni semianuales y $\mathbf{e}(t)$ relacionados con los errores de medición y otros no incluidos en los demás términos de la ecuación.

La marea $T(t)$, se puede definir como un movimiento periódico que está directamente relacionado en amplitud y fase a algunas fuerzas geofísicas periódicas. La fuerza geofísica dominante es la variación del campo gravitacional de la superficie de la Tierra, causado por los movimientos regulares de los sistemas Luna-Tierra y Tierra-Sol. Los movimientos debido a estas fuerzas son llamados *mareas gravitacionales* o *marea astronómica*, esto para distinguirlo de los movimientos regulares debido a fuerzas meteorológicas llamadas *marea meteorológica* o *marea radiacional* (Pugh & Woodworth, 2014). La comprensión actual de las mareas surgió del desarrollo de la teoría gravitacional de Newton (Foreman & Henry, 1989). Masselink & Hughes (2014), afirmaron que la fuerza

astronómica de la marea que actúa sobre la Tierra está dominada por la atracción gravitacional de la luna, debido a su proximidad, y el sol por su gran masa.

Pugh y Woodworth (2014) explicaron que los niveles más altos y bajos de la marea como *pleamar* y *bajamar*, respectivamente, durante un ciclo de marea; y a la diferencia entre la pleamar y la bajamar consecutiva como *rango*, que a su vez corresponde dos veces a la *amplitud*. Las dos principales características de cualquier registro de nivel del mar son el rango y el *periodo*, siendo este último el tiempo entre una pleamar (o bajamar) y la siguiente pleamar (o bajamar).

En los lugares donde el ciclo de marea predominante ocupa aproximadamente la mitad de un día (12 horas y 25 minutos), se le conoce como marea de tipo *semidiurna*; estas mareas tienen un rango que normalmente crece y decrece de forma cíclica por un periodo de catorce días. Los rangos máximos son llamados *marea de sicigia* y ocurre pocos días después de la luna llena y la luna nueva. Los rangos mínimos son llamados *marea de cuadratura* y ocurre un poco después del cuarto creciente y cuarto menguante de la luna. Por otra parte, existen lugares en el planeta donde para cada día lunar, solo se presenta un ciclo de marea (cada 24 horas y 50 minutos), el cual se define como marea de tipo *diurna*. La marea también se puede clasificar de tipo mixta cuando se presentan dos pleamares y dos bajamares en un día lunar, con sus componentes cambiando durante el mes (Pugh & Woodworth, 2014).

Por otra parte, Pugh (1987) explicó que el comportamiento de la marea en un lugar particular está gobernado por las respuestas del océano y las cuencas a las fuerzas gravitacionales. Asimismo, en las plataformas continentales se espera una onda de marea compleja debido al efecto de las aguas someras (Ranji *et al*, 2016); aguas poco profundas tienen el efecto de retardar el valle de la onda más que la cresta, esto distorsiona la figura sinusoidal original de la onda (distorsión de amplitud y fase pronunciada) e introduce una señal armónica que no está incluida en el potencial de marea (Foreman, 1977; R. D. Ray, 2013).

Es por ello que cada punto del planeta presenta unas características únicas de marea y el registro de los datos a partir de instrumentos se convierte en la

herramienta fundamental para conocer el comportamiento del nivel del mar en el lugar que se ubique. Adicional a esto y teniendo en cuenta que el principal interés del análisis de marea se realiza en la zona costera, se recomienda adoptar un enfoque empírico que utilice las mediciones de marea pasadas para predecir la marea en el futuro (Masselink & Hughes, 2014).

Para ello, el estudio de la marea se puede hacer a partir de separar los aportes de armónicos a los que también se les conoce como *constituyentes armónicos* de la marea y representan la contribución de la energía de cada frecuencia mareal. En la práctica se obtienen valores de amplitud y fase específicos de cada armónico en cada punto en el planeta. A estos valores se les conoce como *constantes armónicas*. La predicción armónica de la marea envuelve una suma de curvas coseno que se construyen a partir de diferentes constantes armónicas. Los constituyentes armónicos se encuentran diferenciados por su periodo siendo los más importantes aquellos que se centran en los periodos cercanos a las 12 h (semidiurnos) y 24 horas (diurnos). Adicionalmente hay armónicos de hasta 18.6 años, el cual se presenta debido a la intercepción del plano orbital de la luna con el plano orbital de la tierra y el sol (*eclíptica*), también conocida como *regresión de nodos lunares*. Esta oscilación es muy importante porque afecta otros constituyentes haciendo que estos varíen con el tiempo; por ejemplo, M2 aumenta y disminuye hasta un 3.7% respecto a su promedio (Pugh & Woodworth, 2014).

Por lo tanto, para conocer el aporte de cada constituyente armónico en un punto determinado, a través de la historia se han desarrollado diferentes métodos de análisis que permiten la extracción de estos, como por ejemplo: análisis de Fourier, mínimos cuadrados, método de respuesta, método de corrección de armónicos de aguas someras, método de concordancia de especies, método de la transformada continua de wavelet, método de resolución superfina de los constituyentes armónicos y constantes armónicas de una serie de tiempo larga de pleamares y bajamares (Parker, 2007).

Estos métodos son aplicados a las series de tiempo medidas en puntos específicos, registrados con mareógrafos en la costa. Estos equipos tienen diferentes principios

de funcionamiento como radar, presión, burbujeo o flotador-contrapeso; pero para la obtención de información en aguas profundas se necesitan otros más complejos, como los sensores de presión anclados en el lecho marino empleados para el monitoreo de tsunamis, anclajes oceanográficos costa afuera o satélites.

El uso de satélites se introdujo en los años 70's como una técnica de detección remota, lo que permitió observar de forma sinóptica el océano a nivel global. Debido a que por su diseño orbital el satélite visitaba el mismo sitio en un tiempo determinado, fue posible la adquisición de datos de la altura de la superficie del mar del mismo lugar (altimetría satelital), por lo cual estos son análogos a las mediciones de un mareógrafo permitiendo calcular la señal de marea. Es de resaltar que en las últimas dos décadas, el conocimiento de las mareas oceánicas ha avanzado notablemente, gracias en gran parte a la altimetría por satélite (R. D. Ray, Luthcke, & Boy, 2009), la cual a pesar de tener muy buena cobertura espacial, su resolución temporal es dispersa si se compara con mediciones en un sitio (Fok, 2012). En el caso de la altimetría, la resolución temporal de los datos llega a ser diaria, después de su procesamiento, lo cual es bajo si se compara con los mareógrafos en costa que pueden llegar a registrar datos por debajo del minuto. De igual forma, ambos sistemas poseen niveles de referencia diferentes, en el caso de las mediciones satelitales esta referencia es absoluta, teniendo en cuenta que se realiza desde el elipsoide y en el caso de los mareógrafos esta referencia es relativa partiendo de la experiencia en la instalación de la regla de medición.

Sin embargo, para monitorear la estabilidad de las mediciones a partir de satélites de altimetría son necesarios los mareógrafos. De estas mediciones de altimetría se obtienen algunas variables como la topografía dinámica absoluta (ADT por su sigla en inglés), definida como la altura de la superficie del mar medida desde el geoide; o la altura de la superficie del mar (SSH por su sigla en inglés), definida como la altura desde el elipsoide de referencia hasta la superficie instantánea del mar.

En el caso de los datos de ADT estos tienen correcciones de marea oceánica y terrestre, efecto de barómetro invertido, tropósfera seca y húmeda entre otros, (Torres-Parra, Sánchez-Reyes, & Moreno-Calderón, 2017). Comparaciones a nivel

global del ciclo anual del nivel del mar en áreas costeras, calculado a partir de datos de altimetría y mareógrafos indican que las diferencias del valor cuadrático medio es menor o igual a 2 cm en el 76,4% de los sitios (Ruiz Etcheverry *et al*, 2015). Asimismo los datos de ADT pueden ser usados para el Caribe Colombiano para evaluar el ciclo estacional costero, teniendo en cuenta las siguientes consideraciones encontradas por Torres & Tsimplis (2012): (i) en las estaciones analizadas en el sur de la Cuenca Colombia el ciclo estacional no es afectado por el efecto del barómetro invertido; (ii) en el Mar Caribe el ciclo estacional calculado a partir de mediciones in situ no mostró diferencias al calculado a partir de datos satelitales; (iii) la variación temporal de los ciclos estacionales del nivel del mar observado en periodos de 5 años en el Caribe con datos de altimetría mostraron ser similares con aquellos derivados de mareógrafos sobre el mismo periodo de tiempo.

Igualmente Ranji *et al.* (2016) han afirmado que el lanzamiento de los satélites ha sido la razón principal de las recientes mejoras de los modelos globales de marea, los cuales son sistemas que permiten conocer el comportamiento de la marea a nivel global, en algunos casos asimilando la información de las mediciones que se hacen sobre la costa. Estos modelos pueden ser categorizados en modelos hidrodinámicos (e.g., HYCOM, STORMTIDE), asimilados (e.g., TPXO, FES) y empíricos (e.g., EOT, OSU). A partir de estos modelos globales de marea, es posible realizar una propagación de la onda desde aguas profundas hasta sectores costeros, utilizando los valores de sus constantes armónicas como condiciones de contorno. El resultado se puede validar usando datos medidos en costa, para después emplearlo para estimar las constantes armónicas donde no se tengan mediciones con instrumentos. Para ello se puede obtener una serie sintética horaria de por lo menos un año, de acuerdo a lo recomendado por Foreman (1977) y Pugh y Woodworth (2014).

Por otra parte y de acuerdo con la Comisión Oceanográfica Intergubernamental de UNESCO (2012), la estabilidad del *datum* (referencia vertical de la altura del nivel del mar) normalmente no es un problema cuando se examina el fenómeno de la marea, sin embargo, las predicciones son más precisas si el desplazamiento de este

es minimizado (UNESCO/COI, 2012). Por lo anterior y para propósitos científicos y de ingeniería, es más conveniente considerar los niveles relativos a un único datum de nivel medio del mar (Pugh, 1987); y aunque idealmente se necesitan 18.6 años de datos para producir las mejores constantes armónicas empleadas en la generación de los pronósticos de marea, unos buenos armónicos pueden ser derivados a partir de un año de datos o menos como se presenta en la Tabla 1 (UNESCO/COI, 2012). Foreman y Henry (1989), establecieron que con series de tiempo de por lo menos 8760 horas (1 año), se pueden identificar dentro del análisis de armónicos 45 constituyentes astronómicas y 24 de aguas poco profundas (García *et al.* 2011).

Tabla 1. Requisitos de los mareógrafos para diferentes aplicaciones científicas. Modificado de (UNESCO/COI, 2012).

	Intervalo de muestreo	Intervalo de reporte	Cobertura espacial	Estabilidad del datum
<i>Incremento del nivel del mar en decenas de años</i>	1 mes	1 año	Global, polar	Alto
<i>Corrientes superficiales</i>	1 día	1 mes	Global, puntos de ahogo, trópicos	Alto
<i>Procesos de marea</i>	15 minutos	1 año	Global	Medio
<i>Marejada ciclónica</i>	15 minutos	1 hora	Región de tormentas	Bajo
<i>Tsunamis</i>	1 minuto	1-15 minutos	Global, zona de fallas.	Bajo

Adicionalmente, para garantizar que los datos sean consistentes y puedan ser integrados en bases de datos como la del PSMSL¹ o UHSLC², autores como Bradshaw *et al.* (2004) y García *et al.* (2007), proponen aplicar un filtro para obtener los valores horarios referidos en tiempo a UTC (Coordinated Universal Time). Este algoritmo deber ser adecuado para la detección de picos que permita dejar los fenómenos como tsunamis y seiches, sin asignarle una bandera como dato atípico. Por lo anterior, el control de calidad de las series de tiempo de nivel mar es el punto de partida que garantizará la calidad de los resultados que se obtengan.

¹ Permanent Service for Mean Sea Level <https://www.psmsl.org/>

² University of Hawaii – Sea Level Center <https://uhslc.soest.hawaii.edu/>

3. ÁREA DE ESTUDIO

3.1 Descripción física

El presente estudio fue desarrollado en la costa continental e insular de Colombia, con mayor precisión en la cuenca Colombia (Figura 1), la cual se encuentra ubicada dentro del Mar Caribe. Este último se caracteriza por ser una cuenca suboceánica ubicada al oeste del océano Atlántico, la cual resultó de los movimientos tectónicos entre Norte América y Sur América (Luyendyk, 2016). La cuenca Colombia está separada parcialmente por el este de la cuenca de Venezuela por la cordillera Beata y conectadas entre sí por la brecha de Aruba. Al noroeste se encuentra separada de la cuenca Cayman por la elevación Centroamericana, una amplia cordillera triangular con una profundidad máxima de 1200 metros (Ogden & James, 2019). Al oeste con los países de Nicaragua y Costa Rica; al sur con Panamá, al sureste con Colombia y el borde norte está marcado por el escarpe de Hess, probablemente una falla transformante de 1000 kilómetros de largo. Esta es la más grande de las cuencas en el Caribe y tiene una profundidad promedio de 3500 metros (Bowland & Rosencrantz, 1988).

En la Figura 1 se puede observar la plataforma continental con profundidades menores a 200 metros; se destaca la elevación de Centroamérica como la plataforma continental más amplia en el área de estudio. Cabe resaltar que el archipiélago de San Andrés y Providencia no presenta una extensa plataforma continental debido a su origen volcánico, y aun cuando ambas islas tienen un origen geológico común, cada una ha experimentado su propia historia geológica. San Andrés se originó como un atolón que fue inclinándose hacia el este, cuyo margen occidental emergió para formar una isla de calizas, la cual se eleva hasta 100 metros sobre el nivel del mar; por otra parte, para Providencia la etapa de atolón terminó súbitamente cuando el vulcanismo recurrente terminó, por lo cual es un isla volcánica de generación secundaria rodeada por una barrera arrecifal reciente (Geister & Díaz, 2007).

Igualmente, en la cuenca Colombia desembocan importantes ríos como el Magdalena, y los ríos Sinú y Atrato (GWP-SAMTAC, 2000). El río Magdalena

desemboca en “Bocas de Cenizas” entre los departamentos de Atlántico y Magdalena, el Sinú en cercanías a Isla Fuerte y Coveñas y el río Atrato, en el Golfo de Urabá entre Turbo y Sapzurro.

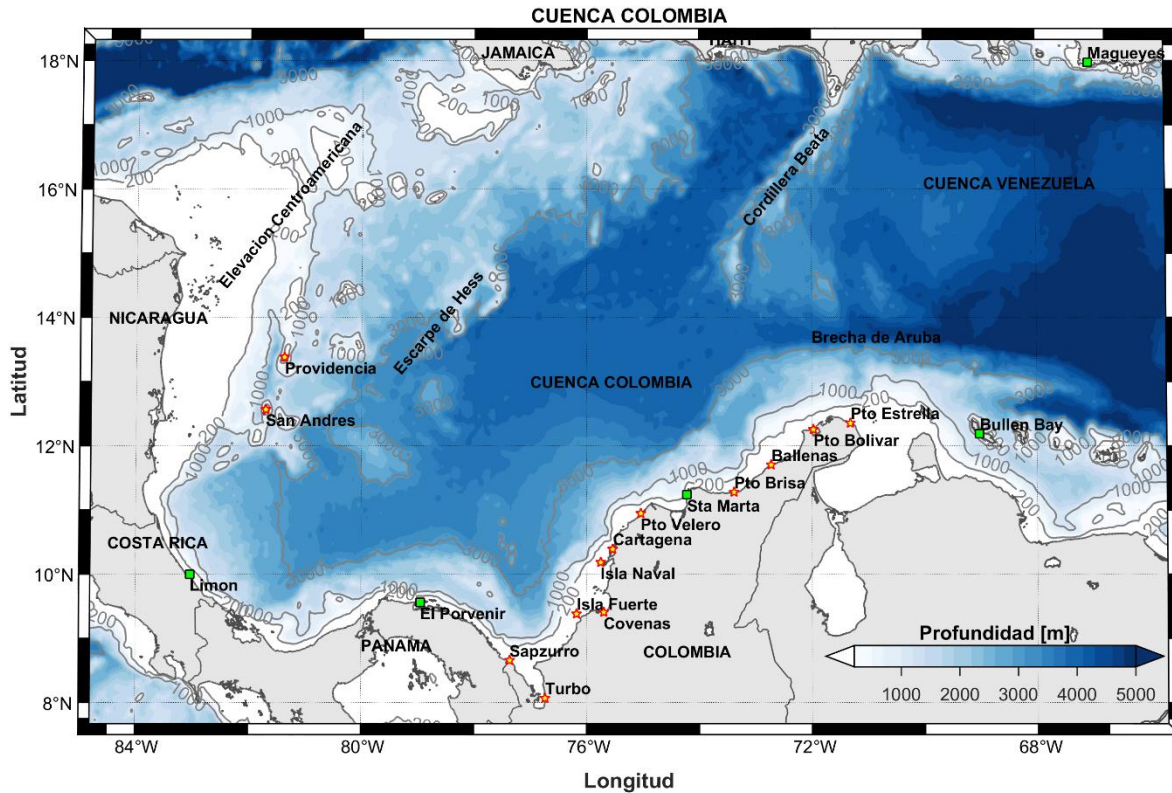


Figura 1. Área de estudio: Cuenca Colombia. En blanco se presentan las profundidades menores a 200 metros. Se muestran las isóbatas de 200 m, 1000 m y 3000 m. Con una estrella roja los sensores pertenecientes a la Red MPOMM y con un cuadrado verde los de la UHSLC. Datos batimétricos de ETOPO1 (Amante & Eakins, 2009).

3.2 Condiciones atmosféricas

El comportamiento de las principales variables atmosféricas en la cuenca Caribe permite describir la estacionalidad característica de la región, clasificando tres épocas climáticas: *la época Seca* se da desde el mes de diciembre hasta el mes de abril. Durante esta época predomina el efecto de las altas presiones sobre el Mar Caribe el cual inhibe la formación de nubes convectivas y favorece las condiciones estables o buen tiempo en la atmosfera. *Época de transición*, que comprende los meses de mayo a junio durante la cual se observa el ascenso latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y una disminución de los vientos alisios. Entre los meses de junio y agosto aparece el “veranillo de San Juan”, el cual es una época

seca menor de la climatología de la región Caribe y el norte de Sur América, la cual coincide con una intensificación de los vientos Alisios en el núcleo del chorro Tropical del Caribe, generando cambios notorios en la climatología de las variables oceanográficas de la cuenca Colombia (Bernal *et al.* 2015). Por último la *época húmeda o de lluvias*, la cual se extiende desde agosto a noviembre y es caracterizada por vientos de intensidad débil y un régimen de lluvias abundantes influenciado por la ZCIT y el paso de sistemas intra-estacionales como ondas tropicales y ciclones (Andrade, 2015).

El comportamiento de la temperatura ambiente a lo largo del año, se relaciona directamente con las épocas climáticas que rigen la región Caribe, observando las menores temperaturas con valores entre 25 °C y 27 °C en la época seca, y los mayores valores durante la época húmeda con una media climática de hasta 30 °C, disminuyendo considerablemente durante el mes de diciembre (Figura 2-a), (Latandret-Solana *et al.* 2019).

La climatología de la precipitación para la cuenca del Caribe esta demarcada por las épocas climáticas características del Caribe, con una temporada de menor precipitación (*época seca*), durante los primeros cuatro meses del año, incluyendo el mes de diciembre donde los valores de precipitación van desde 0 a 38 mm/mes acumulados, seguido de un periodo de aumento paulatino de lluvias entre los meses de abril y julio con valores entre 70 y 190 mm/mes sobre todo en el área oeste y suroeste y posteriormente durante la época húmeda se observan los registros de precipitación más altos (Figura 2-b), (Latandret-Solana *et al.* 2019). Es de destacar que Colombia cuenta con uno de los mayores recursos hídricos del continente, ya que el promedio anual de lluvias es alto.

En el Mar Caribe, los vientos son determinados por los Alisios del noreste durante la mayor porción del año. Estos son generados por la dinámica de la alta presión de las Azores el cual se ubica sobre el centro y noreste del océano Atlántico Norte y el sistema de baja presión del Darién o también conocida como baja anclada de Panamá, la cual ejerce una influencia directa sobre el área suroeste. De acuerdo con los promedios mensuales multianuales, los vientos en la cuenca Caribe

predominan con dirección este-noreste durante los meses de diciembre hasta abril, presentando las mayores intensidades especialmente sobre el centro con valores entre 10 y 12 m/s. En los meses de agosto a noviembre se observan las intensidades más bajas con valores entre 2 y 5 m/s (Figura 2-d). El campo de presión atmosférica media (Figura 2-c), no presenta un intervalo de variaciones significativas en la mayor parte del Caribe, sin embargo, se destaca que en época seca el gradiente de presión, diferencias entre los campos isobáricos, es mayor por la interacción del sistema de alta presión de Azores, con el sistema de baja presión del Darién, (Latandret-Solana *et al.* 2019).

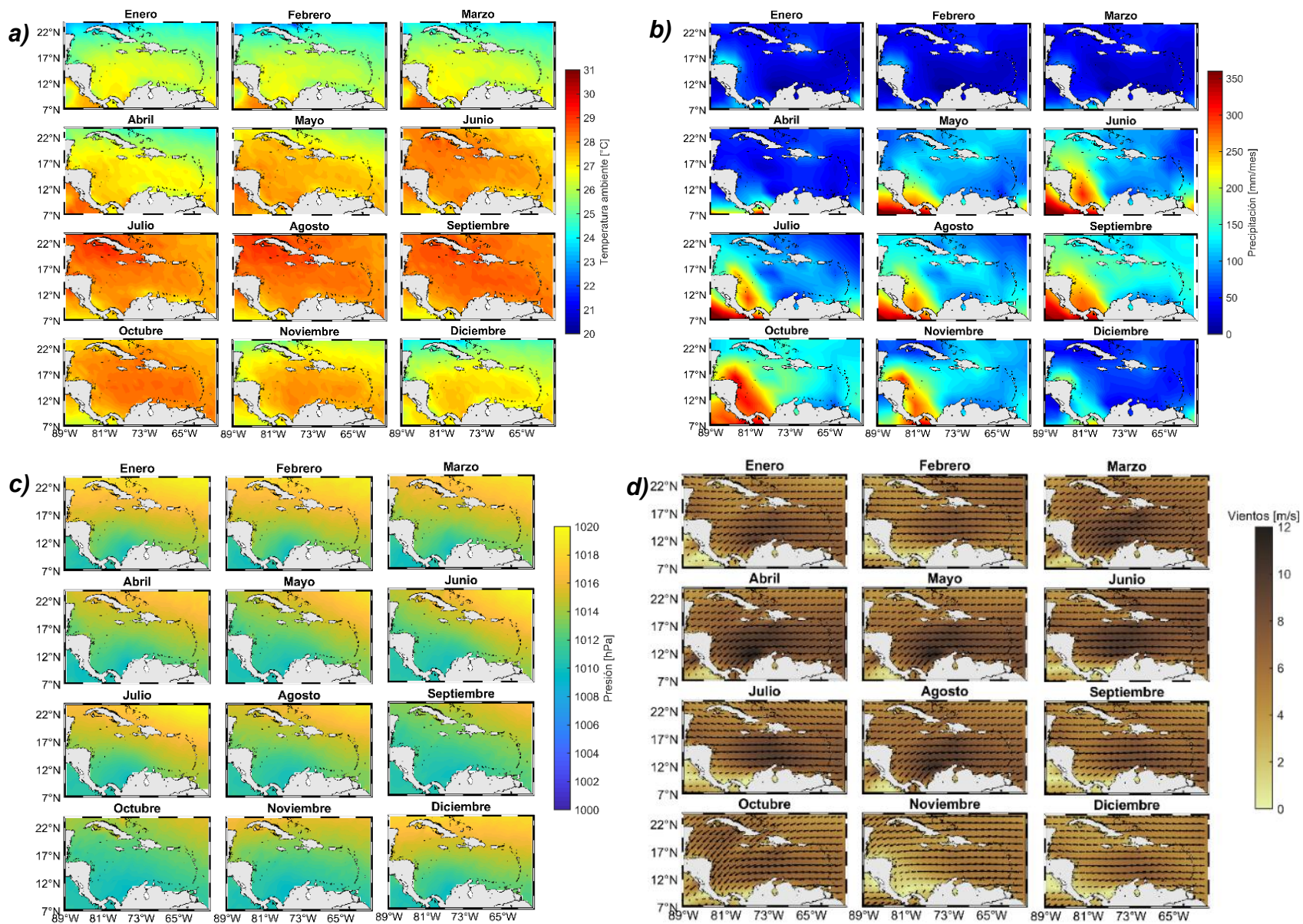


Figura 2. Media mensual multianual (1987-2016) de las principales variables meteorológicas en superficie sobre el Mar Caribe: **a)** Temperatura [°C] **b)** Precipitación [mm/mes] **c)** Presión Atmosférica [hPa] y **d)** Viento [m/s]. Fuentes: Vientos, Reanalysis Cross-Calibrated Multiplatform Ocean (CCMP); temperatura y presión, International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set (ICOADS) y precipitación, Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM).

3.3 Condiciones oceanográficas

La orientación zonal de las corrientes del Mar Caribe, hacen que el transporte de las aguas que entran por las Antillas menores sea dirigido hacia el mar Caimán al cruzar el canal Chibcha y luego al Golfo de México a través del canal de Yucatán, (Andrade, 2001; Montoya, Ruiz, & Bernal, 2014). La circulación superficial del suroeste de la Cuenca Colombia es más compleja, dominada por una circulación ciclónica (contraria a las manecillas del reloj en el hemisferio norte), del Giro Panamá-Colombia. La parte de este movimiento ciclónico a lo largo de la costa de Panamá y Colombia es también conocido como Contracorriente del Darién (Andrade & Barton, 2000). Este es un flujo muy estrecho cerca de las costas centroamericanas y más ancho fuera de la costa colombiana, con velocidades medias próximas a 1 m/s, lo que la hace una corriente muy intensa si se compara con la circulación del Caribe, que normalmente es la mitad (Andrade, 2001). Durante la época seca esta corriente se extiende desde el golfo del Darién hasta cercanías de la desembocadura del río Magdalena. En la época de lluvias, cuando se disminuye el efecto de los vientos alisios, esta contracorriente se extiende hasta la península de La Guajira, (Lozano-Duque *et al.* 2010).

Cabe resaltar que la costa norte colombiana es una de las regiones más productivas debido a la intensa “surgencia de la Guajira” que predomina en la zona. Este movimiento ascendente de las aguas subsuperficiales que llegan a la superficie depende principalmente de la acción del esfuerzo y el rotor del viento. El sistema de surgencias responde al transporte de Ekman hacia afuera de la costa y un bombeo de Ekman que resulta de la divergencia de las aguas superficiales, respectivamente (Montoya, 2019).

Por otra parte, como lo establecieron Andrade (2009) y Torres & Tsimplis (2012), al sur de la costa colombiana las aguas están fuertemente afectadas por la descarga fluvial del río Magdalena; asimismo, los ríos Atrato y Sinú afectan significativamente la región costera durante la estación de lluvias. La relación Temperatura-Salinidad en la Cuenca de Colombia parece afectarse por estos forzamientos.

Las masas de agua identificadas corresponden al agua superficial del Caribe, el agua subtropical subsuperficial, agua del mar de los Sargazos, el agua central del Atlántico tropical, el agua intermedia del Antártico y el agua profunda del Atlántico norte (Morrison & Nowlin, 1982). Asimismo, en esta cuenca la temperatura superficial del agua varía entre 26 °C en la estación de vientos (al final del invierno boreal) hasta 29 °C durante la época de lluvias (al final del otoño boreal) y en términos de salinidad, las aguas superficiales tienen valores típicos de 36 ups presentando variaciones estacionales (Andrade, 2009).

3.4 Nivel del mar

Los términos de la Ecuación 1 y de la Ecuación 2 han sido investigados en el Mar Caribe. En el caso de la marea, Kjerfve (1981) encontró que es predominante de tipo mixto con un rango micromareal y en la mayor parte de la cuenca es menor a los 20 centímetros excepto en el borde de la Plataforma Centroamericana y en el extremo sureste de la cuenca donde el rango excede los 40 centímetros. De igual forma confirmó la presencia de un punto anfidrómico al noreste de la cuenca, el cual se define como un lugar en el que la amplitud de la marea es nula debido a la anulación de las ondas mareales (R. Ray & Egbert, 2005). Para llegar a estas conclusiones se utilizaron series de tiempo en la costa de Colombia de los puertos de Riohacha y Cartagena para un periodo de 365 y 369 días respectivamente.

De igual forma, se debe tener en cuenta que, aunque en el Caribe las mareas tienen rango del orden de los centímetros, se ha encontrado que las modulaciones de largo plazo son significativas. Se encontró que el rango máximo de marea puede cambiar hasta en 8.4 cm en un ciclo nodal. Por lo tanto, estimar los cambios en el rango de marea por efecto de la regresión de los nodos lunares (18.6 años) resulta relevante, porque estos cambios contribuyen a estimar la vulnerabilidad de las áreas costeras cuando son acopladas con variaciones de largo plazo de nivel del mar o marejadas extremas, debiendo ser incorporados en los pronósticos de marea en la medida de lo posible (Torres & Tsimplis, 2011).

En Colombia se han realizado diversos estudios sobre la marea, aunque en forma parcial. Molaes (2004), utilizó tres series de tiempo del Caribe Colombiano, con una

longitud de cinco años para Cartagena y de tres años para Isla del Rosario y San Andrés. En ese estudio, se halló que las primeras 10 componentes en cada uno de los casos estudiados abarcaban un 80% de la energía de la señal de marea. En Santa Marta Garcia *et al.* (2011), utilizaron una serie de datos de 60 días, pudiendo identificar seis armónicos de carácter diurno, cinco de carácter semi-diurno y la componente lunisolar sinódica quincenal. Asimismo, Torres & Tsimplis (2011), analizaron para la estación de Cartagena datos de una serie de tiempo de 50 años, para adelantar sus investigaciones sobre mareas en el Caribe y las modulaciones de largo plazo, concluyendo que para el análisis armónico en este punto se debe tener en cuenta su cercanía al Canal del Dique, pudiendo afectar la constituyente S2.

Por otra parte, en el Mar Caribe, el nivel medio del mar presenta un aumento de 1.7 ± 1.3 mm/año, a partir de datos de altimetría y estaciones de nivel del mar; muy similar a la media global, (Palanisamy *et al.*, 2012; Torres & Tsimplis, 2013). De igual forma, Torres & Tsimplis (2013) establecieron que la variabilidad interanual puede explicar un tercio de la variabilidad total mensual del nivel del mar, lo cual puede ser parcialmente explicada por la influencia de El Niño Oscilación del Sur; mas no encontraron correlación con la Oscilación del Atlántico Norte.

En el estudio del ciclo anual se pudo identificar que estos armónicos presentan amplitudes significativas de rango de 2 cm a 9 cm, mostrando el pico más alto entre los meses de agosto, mientras que el ciclo semi-anual presenta una amplitud máxima de 6 cm en los meses de abril y octubre. Asimismo, se estableció la existencia de diferentes parámetros dominantes en el forzamiento del nivel del mar en las frecuencias anuales y semestrales, como el giro Panamá-Colombia vinculado al tensor de viento y el jet de viento de bajo nivel del Caribe, los cuales modulan el nivel del mar en la costa norte de Suramérica y están vinculados a la surgencia de la Guajira (Torres & Tsimplis, 2012). Los fenómenos intra-anales también han sido estudiados pudiendo establecer que las marejadas ciclónicas en el Caribe son generadas principalmente por las tormentas tropicales y los frentes fríos

estacionarios; sin embargo, los giros oceánicos mesoescalares (eddies) y la señal estacional contribuyen con la creación de extremos (Torres & Tsimplis, 2014).

En el Caribe colombiano, Torres *et al* (2013, 2017) realizaron estudios puntuales de aumento paulatino de nivel del mar relativo sobre algunos sectores; por un lado, se pudo identificar una gran tendencia para la ciudad de Cartagena de 5.3 ± 0.3 mm/año. Por otra parte, se concluyó que la variación anual del nivel del mar absoluta para el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, incluyendo las islas cayo, tiene un rango mínimo de 2.7 cm y máximo de 9.5 cm a partir del estudio del ciclo anual, con base en 22 años de topografía dinámica absoluta.

Estos trabajos demostraron que el residuo meteorológico cobra relevancia por la naturaleza micromareal del área de estudio, más aún porque se debe tener en cuenta que en el Caribe se encuentran variaciones de marea meteorológica muy distintas a pesar de la cercanía que tengan algunas estaciones. Esto supone que son respuestas a variaciones de tipo local por afectación de fenómenos océano-meteorológicos (Lizano, 2006; R. D. Ray, 2013). Investigaciones hechas respecto a la marea meteorológica en el Caribe (Ecuación 1), han permitido concluir que el incremento en el número de huracanes durante la década reciente ha causado por la marejada mucho más daño en las áreas costeras que el ascenso de nivel medio del mar en sí mismo (Palanisamy *et al.* 2012). Por lo tanto, se requieren futuras investigaciones que permitan entender el enlace que existe entre la actividad de los huracanes y la variabilidad de nivel del mar en la región. Más aún cuando estudios, como el de Torres & Tsimplis (2014), sugirieron que existen tendencias significativas en los eventos extremos asociadas al aumento del nivel medio del mar, por lo cual se espera que las inundaciones sean más frecuentes en el futuro, en el Mar Caribe.

4. DATOS Y MÉTODOS

4.1 Datos

4.1.1 Estaciones de nivel del mar

La Dirección General Marítima (DIMAR) cuenta con la Red de Medición de Parámetros Oceanográficos y de Meteorología Marina (Red MPOMM), mediante la cual se toman diversos datos oceanográficos como nivel del mar y oleaje, así como datos meteorológicos de viento, presión atmosférica, temperatura ambiente, entre otros. Con esta red, DIMAR, cuenta con la capacidad de recolectar series de tiempo de estas variables, precursor indispensable para describir el comportamiento océano-atmosférico en el territorio marítimo colombiano, y junto con modelos numéricos, alcanzar la capacidad de predicción, en busca de aumentar la eficiencia y seguridad en el desarrollo de las actividades marítimas en Colombia.

A lo largo de la costa Caribe colombiana se encuentran instalados los sensores de nivel del mar de la Red MPOMM, a partir de los cuales se toma la mayor parte de la información utilizada en esta investigación; la cual es complementada con estaciones de la UHSLC en lugares donde no se tienen mediciones de la Red, así como también para complementar la descripción del comportamiento de la marea en el Caribe colombiano.

Las estaciones tomadas del UHSLC son datos con calidad de investigación que han pasado por un control de calidad previo y se encuentran disponibles para descarga a través de la página web de la Universidad de Hawaii. Los datos descargados corresponden a una serie de tiempo, construida a partir de los sensores disponibles en la estación de medición y filtrados a datos horarios aplicando un filtro de Hanning centrados en la hora. Están en horario UTC y referidos al cero de la regla de cada estación que a su vez está amarrada a un punto geodésico. Cabe aclarar que este cero es único de cada estación y no corresponde a un datum oficial (Caldwell *et al.* 2015). De este proveedor de datos son tenidas en cuenta las estaciones con datos posteriores a agosto de 2013, por ser la fecha en la que se instalaron las de la Red MPOMM y podrán ser comparadas posteriormente.

Para la medición de nivel del mar las estaciones de la Red MPOMM cuentan con tres sensores diferentes de la casa fabricante OTT, definidos como sensor de radar por impulsos de baja energía - RLS, sonda manométrica - PLS y sensor de burbujeo compacto - CBS. Estos sensores registran la información en metros sobre su nivel de referencia vertical y son referidos temporalmente al horario local. Sin embargo, en la presente investigación toda la información fue convertida a centímetros, por la naturaleza micromareal del Caribe colombiano, y el tiempo a UTC, con el fin de estandarizar, ser comparables con los de la UHSLC y en un futuro pueda incorporarse en bases de datos internacionales.

El sensor RLS está basado en una tecnología de pulso de radar. La antena de transmisión emite un pulso corto y luego, una antena independiente recibe este pulso reflejado por la superficie del agua y es usado para determinar la distancia entre el sensor y el agua. El tiempo empleado por el pulso desde su transmisión hasta su recepción es proporcional a la distancia entre el sensor y la superficie del agua. El nivel actual del agua es entonces calculado y referenciado a un valor que se configura inicialmente. El sensor toma datos durante 20 segundos y estos son promediados para obtener el dato que es almacenado y enviado (OTT Hydromet, 2015).

El sensor PLS es una sonda manométrica que determina la presión hidrostática de la columna de agua con una célula de medición de la presión relativa. A través de un capilar de compensación de presión situado en el cable de la sonda, se proporciona el valor de la presión atmosférica en torno a la ubicación del sensor, para que esta le sirva de referencia; de esta forma no se producen errores debido a grandes oscilaciones de la presión atmosférica. El dato es tomado en forma instantánea en el momento que el sensor es consultado, luego lo almacena y posteriormente lo envía (OTT Hydromet, 2018).

Por último, el sensor CBS es un sensor de burbujeo que permite medir niveles freáticos o de aguas superficiales, para ello el aire a presión generado por una bomba de émbolo pasa rápidamente a través de un conducto del cabezal de burbujeo, al agua que se desea medir. La presión originada así en el conducto de

burbujeo es directamente proporcional a la columna de agua que está por encima del cabezal. El CBS determina consecutivamente la presión barométrica del aire y la presión de las burbujas de éste, después calcula el nivel de agua que está por encima del cabezal de burbujeo con la diferencia de las dos señales (OTT Hydromet, 2017). Al igual que el sensor PLS este sensor almacena la medición de nivel del mar de forma instantánea en el momento que es consultado por la unidad central y posteriormente enviado por los canales de comunicación con que cuenta la estación.

Todos estos datos son recolectados en alta frecuencia por las estaciones mareográficas (un dato por minuto), posteriormente enviados a la base de datos de la Red MPOMM mediante dos sistemas de comunicación, a través de internet por GPRS (General Packet Radio Service) o satelitalmente a través de GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite). En algunos casos donde no se tiene cobertura de GPRS, el envío de la información vía internet se realiza a través de un sistema satelital, empleando un modem BGAN Inmarsat (Figura 3).

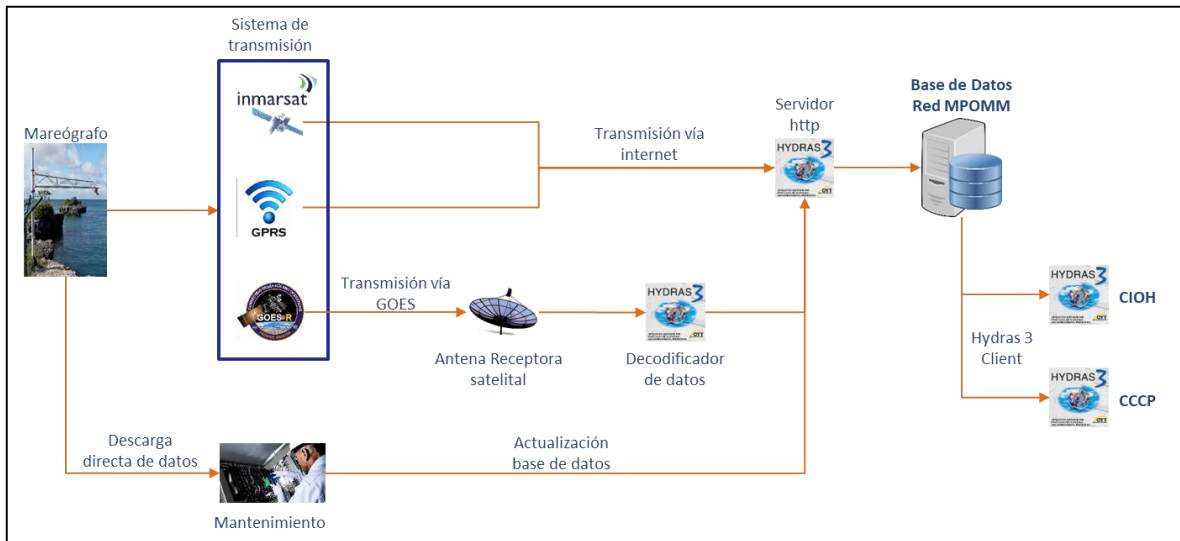


Figura 3. Diagrama de flujo de datos de nivel del mar desde que son tomados por el mareógrafo hasta que son desplegados y visualizados en el sistema Hydras 3 en los Centros de Investigación.

Los datos enviados por internet (GPRS o Inmarsat) son recibidos directamente por un servidor HTTP (Hypertext Transfer Protocol) de Hydras 3. Los datos transmitidos a través del satélite GOES son recibidos por un receptor satelital, ubicado en la

Sede Central de la Dirección General Marítima, donde son decodificados y enviados al servidor HTTP de Hydras 3. Este sistema se encarga de guardar los datos en un sistema de base de datos que funciona con un motor para manipulación de datos tipo SQL (Standardized Query Language) Server.

Los datos enviados por internet (GPRS o Inmersat), son transmitidos a intervalos de 2 minutos; mientras que los datos satelitales a través de GOES son enviados en intervalos de 15 minutos. En ambos casos, cuando se transmiten los datos, se envían todos los datos recolectados de los últimos 2 o 15 minutos respectivamente. El resumen de la información disponible se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Datos de nivel del mar disponibles para la investigación.

Estación	Sensor	Inicio (dd/mm/aa)	Final (dd/mm/aa)	Longitud Serie de Tiempo¹ (Años)	% Datos faltantes
<i>Ballenas</i>	CBS	19/08/2013	31/12/2019	5.1	18.9%
	PLS	19/08/2013	03/12/2018	3.2	38.6%
	RLS	19/08/2013	31/12/2019	5.3	15.7%
<i>Barranquilla Bullen Bay (Curacao)⁴</i>	RLS	14/12/2017	31/12/2019	1.9	7.2%
		16/10/2013	31/12/2018	5.2	0.0%
<i>Cartagena</i>	CBS	16/08/2013	31/12/2019	5.9	6.4%
	PLS	16/08/2013	29/09/2016	2.0	34.1%
	RLS	16/08/2013	31/12/2019	5.3	15.5%
<i>Coveñas</i>	CBS	07/08/2013	31/12/2019	5.3	17.0%
	PLS	07/08/2013	02/12/2018	4.2	19.5%
	RLS	07/08/2013	31/12/2019	6.0	5.5%
<i>El Provenir (Panamá)⁴</i>		01/08/2013	31/12/2018	5.3	0.9%
	CBS	21/12/2013	31/12/2019	1.9	4.9%
<i>Isla Fuerte</i>	PLS	21/12/2013	31/12/2019	1.9	4.9%
	RLS	21/12/2013	31/12/2019	1.9	4.9%
	CBS	19/08/2013	31/12/2019	6.1	3.9%
<i>Isla Naval</i>	PLS	19/08/2013	08/09/2018	4.9	2.8%
	RLS	19/08/2013	31/12/2019	6.1	3.8%
		01/08/2013	31/12/2018	5.4	0.0%
<i>Limon (Costa Rica)⁴</i>		01/08/2013	31/12/2018	4.9	8.9%
<i>Magueyes (Puerto Rico)⁴</i>	CBS	12/05/2014	23/11/2019	4.5	18.6%
	PLS	12/05/2014	06/08/2017	3.1	2.1%
	RLS	12/05/2014	31/12/2019	5.5	1.3%
<i>Providencia</i>					

<i>Puerto Bolívar</i>	CBS	31/08/2013	31/12/2019	4.4	29.9%
	PLS	31/08/2013	30/12/2014	1.2	7.6%
	RLS	31/08/2013	31/12/2019	3.7	40.9%
<i>Puerto Brisa</i>	RLS	01/08/2017	31/12/2019	2.3	1.6%
<i>Puerto Estrella²</i>	CBS	14/08/2013	30/09/2016	2.9	4.5%
	PLS	14/08/2013	09/10/2016	3.0	4.4%
	RLS	14/08/2013	31/12/2019	4.4	29.3%
<i>Puerto Velero³</i>	CBS	24/08/2013	01/06/2016	2.6	4.3%
	PLS	24/08/2013	01/06/2016	2.6	4.0%
	RLS	24/08/2013	01/06/2016	2.0	27.9%
<i>Quitasueño</i>	CBS	19/02/2015	29/01/2017	0.3	85.0%
	RLS	19/02/2015	25/07/2017	0.5	77.3%
<i>San Andrés</i>	CBS	22/08/2013	21/12/2019	6.0	5.7%
	PLS	22/08/2013	20/11/2017	4.1	2.4%
	RLS	04/08/2015	31/12/2019	6.1	3.5%
<i>Santa Marta⁴</i>		01/08/2013	31/12/2018	5.2	3.5%
	CBS	04/08/2015	31/12/2019	4.2	4.0%
<i>Sapzurro</i>	PLS	04/08/2015	21/05/2018	0.6	78.2%
	RLS	04/08/2015	31/12/2019	4.3	1.4%
<i>Serranilla</i>	CBS	22/11/2013	20/09/2017	1.3	65.9%
	PLS	22/11/2013	07/04/2014	0.3	1.1%
	RLS	22/11/2013	17/01/2017	0.3	87.6%
<i>Turbo</i>	CBS	18/12/2017	31/12/2019	1.8	6.8%
	PLS	18/12/2017	31/12/2019	2.0	0.7%
	RLS	18/12/2017	31/12/2019	2.0	0.8%

¹ Desde la fecha de inicio hasta la fecha de fin excluyendo los datos faltantes.

² Serie de tiempo original hasta que el sensor fue destruido por el Huracán Mathew en octubre 2016, reemplazado solamente por un RLS en el mismo lugar de instalación.

³ Los datos se usan hasta el 1 de junio de 2016, pues a partir de esta fecha los sensores presentaron problemas por sedimentación.

⁴ Estaciones de la UHSLC, algunas de estas estaciones tienen múltiples sensores, por lo tanto, cuando falla el sensor principal, pequeños espacios en blancos son llenados con datos de los demás sensores instalados.

De acuerdo con la información anterior, se descartan las estaciones de Barranquilla, por encontrarse dentro del Río Magdalena y las estaciones de Quitasueño y Serranilla, por la poca información que tienen, lo cual se debe principalmente al difícil acceso a las mismas debido a la lejanía en donde se encuentran instaladas.

4.1.2 Modelos globales de marea

Debido al diseño orbital de los satélites de altimetría, estos visitan el mismo sitio en cada ciclo de muestreo en una ventana temporal pre-definida a lo largo de su huella sobre la superficie de la tierra. Por lo tanto la adquisición de los datos de altura

superficial del mar (SSH) a través de altímetros pueden ser utilizados de forma análoga como medidas de la marea a nivel global (Fok, 2012).

Esta información es la base del desarrollo actual de la mayoría de los modelos globales de marea, los cuales pueden ser clasificados en tres categorías. Primero los empíricos, los cuales dependen solamente del análisis de las observaciones de SSH realizadas por los satélites de altimetría y mareógrafos. Segundo, los semi-empíricos (DTU, Technical University of Denmark)) en los cuales se realiza un análisis indirecto de los datos de altimetría a partir de un modelo global de marea. En este caso el SSH es corregido preliminarmente con datos a-prior del modelo global de mareas, seguido por el uso de la anomalía del SSH (diferencia entre el modelo global y el SSH), que es agregada al modelo a-prior para obtener un nuevo modelo global completo. Tercero, los hidrodinámicos y asimilados (FES2014, TPXO9) los cuales son forzados asimilando datos de mareógrafos como condiciones de borde en el modelo hidrodinámico y a partir de estos se obtienen las mareas oceánicas (Seifi *et al.* 2019). Para la presente investigación de la marea en la Cuenca Colombia, se utilizan los siguientes modelos globales de marea:

- **DTU10:** Es un modelo semi-empírico desarrollado por Cheng & Andersen (2011) que utiliza 17 años de datos de observaciones de las misiones Topex/Poseidon (T/P), Jason-1 y Jason-2 como también observaciones del ER2 y Envisat. La marea residual fue calculada a partir del modelo FES2004. Las constantes de marea fueron estimadas usando el método de respuesta en el residuo de marea. DTU10 aplica un método de cuadrícula dependiente de la profundidad, lo que aumenta su capacidad de estimar las constantes de marea en áreas con batimetría y línea de costa muy variable. Posee una resolución espacial de $1/8^\circ$ (14 km aproximadamente) en una malla global. (https://www.space.dtu.dk/english/research/scientific_data_and_models/global_ocean_tide_model)
- **FES2014:** Es la última versión del modelo de marea FES (Finite Element Solution), un modelo hidrodinámico que asimila datos de altimetría (T/P,

Jason -1, Jason -2, TP interleaved -J1 interleaved, ERS -1, ERS -2, y Envisat) y de mareógrafos en la costa, para los cuales en el Caribe se asimilaron 7 estaciones mareográficas. Los datos de oscilación de marea (amplitud y fase) y las corrientes son distribuidos en una malla global con una resolución de $1/16^\circ$ (7 km aproximadamente) para un total de 34 constituyentes armónicas (Carrere *et al.* 2015). (<https://www.aviso.altimetry.fr/es/data/products/auxiliary-products/global-tide-fes.html>)

- **TPX09:** Es un modelo de mareas global que se ajusta mejor, en un sentido de mínimos cuadrados respecto a sus versiones anteriores, a las ecuaciones de mareas de Laplace y los datos de altimetría (T/P); posee una resolución de $1/30^\circ$ (4 km aproximadamente), obtenida mediante la combinación de la solución global TPX09.v1 de $1/6^\circ$ y treinta soluciones locales con resolución de $1/30^\circ$ para todas las áreas costeras, incluidas las zonas árticas y antárticas (Egbert & Erofeeva, 2002). Incluye amplitudes complejas de elevaciones de la superficie del océano relativas al nivel medio del mar y corrientes para ocho constituyentes primarias (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1), dos de largo período (Mf, Mm), 3 no lineales (M4, MS4, MN4), más 2N2 y S1. (<https://www.tpxo.net/global/tpxo9-atlas>).

4.1.3 Topografía Dinámica Absoluta

Los datos de topografía dinámica absoluta (ADT por sus siglas en inglés), son obtenidos a partir de datos de altimetría satelital y adecuados para la descripción de variaciones de nivel del mar costa afuera (Torres-Parra *et al.* 2017). Corresponde a la altura de la superficie del mar sobre el geoide, calculada como la suma de la anomalía del nivel del mar más la topografía dinámica media, esta última calculada respecto a un período de referencia medio de 20 años (1993-2012).

Tradicionalmente, los datos de altimetría en la zona costera (aproximadamente a 30 km de la costa) no eran procesados y, por tanto, se marcaban como malos y no se utilizaban. Con el pasar de los años, esto ha motivado el desarrollo de la altimetría

costera para mejorar la calidad de los datos en este sector, a partir de nuevas tecnologías como el radar de apertura sintética o el altímetro de retardo/Doppler (Vignudelli *et al.* 2019). Por lo tanto, la altimetría costera tiene el potencial de proporcionar un conjunto de datos único y coherente sobre el nivel del mar desde el océano abierto hasta las costas, que puede combinarse con mareógrafos y otras técnicas de observación para mejorar la capacidad de comprender los cambios del nivel del mar en este sector (Marcos *et al.* 2019).

Los datos de ADT utilizados en esta investigación son producidos por SSALTO/DUACS y distribuidos por AVISO y Copernicus Climate Change Service (C3S), con una resolución temporal diaria y una resolución espacial de 0.25°. Las series de tiempo de ADT han sido previamente empleadas en el Mar Caribe para la corrección de la referencia vertical entre segmentos de una misma serie de tiempo de nivel del mar costera cuando se ha perdido el Datum de referencia vertical relativo. Para esto se adopta la tendencia de la señal de ADT entre los segmentos de datos del mareógrafo donde no se tiene información (Torres Parra, 2013). Los datos de ADT también han sido empleados para calcular los ciclos estacionales de nivel del mar en la costa, tendencias de aumento del nivel del mar, variación de meso escala, entre otros (e.g. Torres-Parra *et al.* 2017; Torres & Tsimplis, 2012, 2013). (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/satellite-sea-level-global?tab=overview>).

4.2 Métodos

Para la presente investigación se utilizaron las estaciones con niveles observados cada hora por un periodo mínimo de un año, puesto que, con series de tiempo de por lo menos 8760 horas, se pueden determinar e incluir dentro del análisis armónico la mayor cantidad de constituyentes (Foreman & Henry, 1989).

Sin embargo, para poder identificar dentro de estas series de tiempo el armónico Sa (Solar anual), el cual es un armónico de largo periodo y de gran importancia en el Caribe colombiano (Torres & Tsimplis, 2011), se identificaron series de tiempo lo más completas posibles con una longitud de por lo menos 8784 horas que corresponde a 366 días. Asimismo, se trabajó con series horarias, lo cual permite

tener por lo menos dos observaciones en periodos de alta frecuencia presentes en armónicos de aguas someras como son M_4 , M_6 y M_8 (con periodos de 6, 4 y 3 horas). Esta frecuencia de muestreo también evita el *aliasing* donde los constituyentes que son muestreados menos de dos veces por ciclo se confunden con los constituyentes de baja frecuencia (Foreman & Henry 1989).

Para el análisis armónico de las series de tiempo y pronóstico se utilizó el programa U_Tide “*Unified Tidal Analysis and Prediction*”, el cual comprende a un par de funciones de Matlab de fácil entendimiento e implementación. Con estas funciones, se analizaron las series de tiempo para obtener la amplitud y fase de los diferentes armónicos, con los cuales es posible pronosticar la marea. La función de análisis acepta registros con tiempos de muestreos uniformes o irregularmente distribuidos y puede proveer una corrección a la variación nodal de 18.6 años (Codiga, 2011).

A continuación, se presentan las metodologías aplicadas a los datos antes descritos, para el desarrollo de cada objetivo específico de esta investigación:

4.2.1 Control de calidad a series de tiempo de nivel del mar

Para el control de calidad de las series de tiempo se determinó una metodología que se presenta en el Capítulo 5, toda vez que esta corresponde a un objetivo específico de este trabajo, por lo que es abordada de forma detallada. La metodología se presenta como un resultado de investigación, puesto que se propone sea implementada para el control de calidad de las series de tiempo de la Red MPOMM. Para desarrollar este control de calidad, primero se definió la forma de obtener series de tiempo horarias a partir de datos minuto a minuto, teniendo en cuenta que la Red MPOMM posee datos a muy alta frecuencia. De igual forma, esta metodología permite la identificación y tratamiento de datos atípicos. Posteriormente se propone un control de calidad a las series horarias y al residuo meteorológico, teniendo en cuenta las diferencias entre sensores que posee la estación (PLS, CBS, RLS).

Asimismo, se aplicó un procedimiento para recuperar el nivel de referencia vertical en todas las series de tiempo que presentaban diferente datum a lo largo de la misma, normalmente después de interrupciones en la adquisición de datos. Si bien

la corrección del datum vertical no es de gran importancia para la estimación de la marea, sí lo es para la estimación de residuo meteorológico, el cual también es estudiado parcialmente en este trabajo. Este procedimiento permitió obtener datos que superaron el control de calidad, a partir de los cuales se seleccionó el año más completo y común a todas las estaciones de medición. De esta forma, quedaron las series de tiempo listas para cumplir con los demás objetivos específicos del presente trabajo.

Por otra parte, con los armónicos encontrados en cada serie de tiempo se pronosticó la marea y esta a su vez se restó de la serie de tiempo de nivel del mar observada, para obtener el residuo meteorológico. Para este pronóstico se aplicaron dos restricciones: primero, no se usaron constituyentes con una relación señal/ruido (SNR) menor a 10. Segundo, no se usaron constituyentes con periodos mayores a 20 días (Sa, Ssa, Msm y Mm); esto último con el fin de mantener estas variaciones en el residuo de marea, ya que los efectos meteorológicos pueden ser importantes en estos periodos en el Mar Caribe (Torres & Tsimplis, 2012).

4.2.2 Estimación de la marea y el residuo en el Caribe colombiano

Después de seleccionado el año más completo de las series de tiempo de nivel del mar tras el proceso de control de calidad, se efectuó un análisis armónico a cada estación usando la caja de herramientas U_Tide, a partir del cual se obtuvieron las amplitudes y fases de los 146 armónicos que evalúa el programa, empleando el método de mínimos cuadrados repesados de forma iterativa (IRLS, por sus siglas en inglés). Este método minimiza la influencia de los valores atípicos, reduciendo así los intervalos de confianza en relación con el método estándar de mínimos cuadrados ordinarios (Codiga, 2011). Cabe resaltar que la mayor diferencia entre las técnicas antiguas de análisis armónico que han sido remplazadas por la de mínimos cuadrados, es que esta última se basa en minimizar el cuadrado de las diferencias entre los datos de marea y las predicciones calculadas (Parker, 2007). Por lo cual el IRLS es una versión mejorada del método de mínimos cuadrados ordinarios estándar (OLS), dando un mejor tratamiento a los datos atípicos que puedan existir en la serie de tiempo.

En el análisis armónico se incluyeron las correcciones nodales y los constituyentes fueron organizados en función de su porcentaje de energía, el cual se obtiene a partir de:

$$PE_q = \frac{E_q}{\sum_{q=1}^{n_{alloc}} E_q} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde E_q corresponde a la amplitud de cada constituyente elevado al cuadrado (A^2) y n_{alloc} al número de constituyentes identificados en la serie de tiempo. Siendo este método una forma de medir la importancia relativa de un constituyente, independientemente de su significancia respecto al umbral de la relación señal ruido (SNR) (Codiga, 2011).

La amplitud y fase de las constituyentes de marea obtenidas en cada estación fueron usadas para explicar la variación espacial de los armónicos más representativos en la cuenca Colombia, tres diurnos (K1, O1 y P1), tres semi-diurnos (M2, S2 y N2) y uno de largo periodo (Mf). Asimismo, la amplitud y fase de los armónicos fueron comparados con respecto a los modelos globales FES2014, TPXO9 y DTU10 (sección 4.1.2), tomando información del nodo más cercano a cada estación, para evaluar el comportamiento regional con respecto a estos modelos (Capítulo 6). Los dos primeros son modelos globales asimilados y el último un modelo semi-empírico.

Por último, se analizó el residuo de marea en cada una de las estaciones, a partir del residuo obtenido como se indica en la sección 4.2.1. De esta forma, variaciones en periodos de 6 y 12 meses, con forzantes tanto astronómicos como meteorológicos quedaron en el residuo, lo cual es lo más adecuado, al ser este último el aporte más significativo en estos periodos en el Mar Caribe (Torres & Tsimplis, 2012). Por tanto, el residuo de marea permite explicar el efecto de las variables meteorológicas de forma local en cada estación, ofreciendo información relevante como el comportamiento de los ciclos estacionales o extremos del nivel del mar en la costa colombiana, entre otros.

El ciclo anual y semi-anual fue obtenido a partir del ajuste de funciones coseno a la serie de tiempo (Ecuación 4) después de obtener la amplitud y fase por medio de una regresión lineal a los datos horarios, en periodos de 8765.8 horas y 4382.9 horas respectivamente.

$$Z_0(t) = \bar{Z}_0 + at + C_1 \cos \left[\frac{2\pi}{8765} t - \varphi_1 \right] + C_2 \cos \left[\frac{2\pi}{4382} t - \varphi_2 \right] \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde el nivel del mar mensual observado (Z_0) varía en el tiempo (t) y es explicado por un valor medio de largo plazo (\bar{Z}_0), una tendencia (a) y ciclos anual y semianual, los cuales son descritos por la amplitud (C_1, C_2) y fase (φ_1, φ_2) respectivamente, (Torres-Parra *et al.* 2017). La variación estacional se obtuvo como la sumatoria del ciclo anual y semi-anual en el lapso de tiempo de cada estación. Todos los errores fueron estimados a un nivel de significancia del 95%.

4.2.3 Estimación de armónicos en la costa que no cuenten con mediciones

En la sección anterior se describió el procedimiento para calcular los armónicos de marea en un lugar en el cual exista una serie de tiempo de nivel del mar. Sin embargo, no siempre se cuenta con este tipo de información, por lo cual se evaluó un procedimiento para obtener armónicos de la marea a pesar de no contar con datos observados, tomando como base la metodología empleada por Torres *et al.* (2008).

Para ello, inicialmente se evaluó el desempeño de tres modelos globales de marea en el Caribe colombiano descritos en la sección 4.1.2 (DTU, FES2014 y TPX09). Posteriormente y siguiendo las metodologías de Nasrin *et al.* (2019) y Seifi *et al.* (2019), se calculó el RMS de las diferencias de 6 constituyentes, entre el modelo (A_m) y los armónicos obtenidos de 20 series de nivel del mar para los 18 lugares donde existen datos (dos estaciones con series de tiempo para el 2013 y 2018) ($N=20$). La comparación se realizó tanto para la amplitud como para la fase. Los armónicos de las estaciones se calcularon a partir de un año de datos (A_e) (Ecuación 5). Se emplearon los datos del nodo más cercado de cada modelo global a la estación. La mayor distancia entre una estación y un nodo se obtuvo en Punta Estrella para el DTU a 13.8 kilómetros.

$$\text{RMS} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (A_e - A_m)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación 5}$$

Igualmente, usando el RMS de los armónicos, se pudo contrastar el desempeño de los modelos globales, para lo cual se calculó la raíz de las sumas cuadradas (RSS, por sus siglas en inglés) aplicando la Ecuación 6 a los seis armónicos principales analizados (m).

$$\text{RSS} = \left(\sum_{j=1}^m \text{RMS}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación 6}$$

Una vez determinado el mejor modelo global de mareas para el Caribe, se definieron cuatro sectores (Ballenas, Cartagena, Turbo y San Andrés) para obtener los armónicos sintéticos a partir de la propagación de la onda de marea empleando un modelo hidrodinámico. Estos puntos fueron seleccionados con el fin de tener una buena cobertura geográfica (norte, centro, sur y área insular) y por tener características geomorfológicas diferentes, como una extensa plataforma continental en Turbo, una bahía semi-cerrada en Cartagena, exposición a aguas abiertas con una estrecha plataforma continental en Ballenas y la interacción de la onda de marea de aguas profundas con barreras naturales como los arrecifes de coral en San Andrés.

Luego se utilizó el modelo hidrodinámico MOHID, con el fin de propagar la onda desde aguas profundas hasta la costa. Este es un sistema hidrodinámico de tres dimensiones (3D), que incluye un módulo hidrodinámico baroclínico y un esquema 3D para el flujo de sedimentos, con sus respectivos módulos de transporte euleriano y lagrangiano. El modelo ha sido desarrollado por el Instituto Superior Técnico – Facultad de Ingeniería Ambiental y Mecánica – Grupo de Modelamiento de Ambientes Marinos (Portugal), e Hidromod Ltda (Portugal). MOHID resuelve las ecuaciones tridimensionales fundamentales de flujos incompresibles, considerando el equilibrio hidrostático, condiciones de Boussinesq y aproximaciones de Reynolds. Este fue forzado en sus fronteras por los constituyentes del modelo global de

mareas con mejor ajuste para el Caribe para generar un año de datos de marea en la costa.

Se debe tener en cuenta que la onda de marea se comporta como una onda de aguas someras en todo el océano, por lo cual su velocidad y comportamiento siempre dependen de la profundidad. Es por ello que en las cuatro zonas de estudio se utilizaron datos batimétricos de alta resolución (50 metros) suministrados por el Servicio Hidrográfico Nacional. Igualmente, se debe tener presente que al forzar el modelo solamente con la información de los armónicos, se obtiene una serie de tiempo de marea y no de nivel del mar (Ecuación 1).

Con el modelo hidrodinámico se realizaron dos ejercicios. El primero, con el fin de optimizar los tiempos de cómputo del modelo. Para esto, se realizaron diferentes pruebas de desempeño simulando el comportamiento de la onda por un lapso de 46 días para la isla de San Andrés; correspondientes a 15 días de calentamiento y 31 de simulación, del mes de enero de 2018, el cual corresponde al año con mejor calidad de datos medidos de acuerdo a lo analizado en la sección 5.5. A partir de estos 31 días simulados se calcularon las amplitudes y fases de los armónicos en la serie obtenida con el modelo hidrodinámico. Luego se calcularon las diferencias entre estas amplitudes y fases con las del nodo más cercano del modelo global al mareógrafo y los datos observados en el mismo periodo de tiempo (31 días).

Para evaluar el desempeño del modelo, este fue ejecutado usando dos mallas, una de 250 m y otra de 500 m de resolución horizontal, las cuales fueron forzadas usando 1 y 4 nodos en la frontera costa afuera a más de 1000 m de profundidad. Teniendo en cuenta, que el mareógrafo con el que se comparan los datos en San Andrés se encuentra en el costado oriental de la isla, el forzamiento con 1 punto se ubicó en la frontera este del dominio y para el forzamiento con 4 puntos fueron distribuidos uno en cada dirección del dominio a una profundidad de mínimo 1000 metros.

Una vez efectuadas las pruebas de sensibilidad por resolución de malla y forzantes en San Andrés, se realizó el segundo ejercicio con el modelo hidrodinámico. En esta ocasión se obtuvieron series de tiempo de marea modelada de 366 días, desde el

31 de diciembre de 2017 a las 00:00 hasta el 31 de diciembre de 2018 a las 23:00 para cada una de las cuatro áreas seleccionadas. Siguiendo los pasos indicados en la sección 4.2.2, se obtuvo la amplitud y fase de los principales armónicos para el Caribe (K1, O1, P1, M2, N2, S2 y Mf). Al igual que en las pruebas de sensibilidad, se evaluaron las diferencias existentes entre la amplitud y fase de los armónicos a partir de un año de la modelación hidrodinámica, el modelo global de mareas (nodo más cercano al mareógrafo) y la serie de tiempo observada en el mismo periodo de tiempo. Lo anterior, permitió determinar que tan bien los armónicos sintéticos representan los constituyentes obtenidos a partir de las series de nivel del mar.

Por último, se efectuó una evaluación de todos los constituyentes del mejor modelo global de mareas con lo cual se determinó cuáles son los armónicos que se deben usar para la obtención de constituyentes sintéticos en el Caribe colombiano donde no se cuenta con series de tiempo de nivel del mar observadas.

4.2.4 Predicción de la marea a partir de armónicos medidos o modelados y la inclusión de variaciones de largo plazo

Empleando las cajas de herramienta U_Tide (Codiga, 2011) y TMD (Tide Model Driver) (Egbert & Erofeeva, 2002), se obtuvieron dos pronósticos de marea para el año 2019 en las cuatro poblaciones definidas en la sección anterior (Ballenas, Cartagena, Turbo y San Andrés). La herramienta TMD permite acceder a los constituyentes armónicos de los modelos creados por la Universidad Estatal de Oregón (OSU por sus siglas en inglés), como TPXO9 (Padman & Erofeeva, 2015). La primera predicción se efectuó utilizando los armónicos obtenidos a partir de las series medidas de nivel del mar en el 2018. La segunda, empleando armónicos obtenidos del mejor modelo global de marea, para lugares en los que no se cuenta con mediciones. En ambos casos la predicción de la serie de marea se realizó teniendo en cuenta la corrección nodal.

Primer pronóstico: En la generación de los pronósticos a partir de las series de nivel del mar observadas en el 2018, se utilizaron todos los constituyentes con una relación señal-ruido (SNR) mayor a diez (Sección 4.1.2). Esta SNR resulta de la relación entre la amplitud y el error de cada armónico, este último calculado

mediante técnicas de remplazo aleatorio de datos (bootstrap). Por tanto, un valor alto de SNR distingue una fuerte señal en relación de su límite de confianza. De igual forma se tuvo en cuenta su porcentaje de energía (Ecuación 3), con el cual se evalúa la importancia de cada constituyente en función de su amplitud. La importancia de un armónico en la señal dependerá entonces de una alta SNR (distingue la señal sobre el ruido) y su porcentaje de energía (aporte importante a la señal de marea). En algunos casos coinciden, sin embargo, el porcentaje de energía es menos sensible al método de cálculo del intervalo de confianza, por lo cual provee información complementaria al SNR (Codiga, 2011). Igualmente, el análisis de las series de tiempo medidas permitió obtener los armónicos S_a y S_{sa} , importantes en gran parte de los puertos del Caribe colombiano (Torres & Tsimplis, 2012), por lo tanto, al efectuar el pronóstico de marea estos constituyentes fueron tenidos en cuenta, al igual que las correcciones de largo plazo.

Segundo pronóstico: Para la generación del pronóstico de mareas en lugares en los que no se cuenta con mediciones, se utilizaron los siete principales constituyentes para el Caribe, del modelo global TPXO9 (M2, S2, N2, K1, O1, P1 y Mf) haciendo uso de la caja de herramientas TMD. Esta predicción se realizó a partir de la información existente en el nodo más cercano a la estación. Posterior a esto, al pronóstico de marea se le adicionó el ciclo estacional del año anterior, calculado a partir de la amplitud y fase de los armónicos anuales y semi-anuales obtenidos al ajustar una función coseno, con los periodos respectivos de S_a y S_{sa} , a la serie de tiempo de ADT (Sección 4.1.3), tomados del nodo más cercano a cada estación. Todos los pronósticos fueron generados aplicando la corrección nodal, teniendo en cuenta que para el Caribe las modulaciones de largo plazo son importantes (Torres & Tsimplis, 2011).

Las series de tiempo de marea generadas con estos dos pronósticos para el 2019 fueron procesadas con U_Tide para calcular los armónicos correspondientes a este año, sin emplear la corrección nodal, con lo cual se obtiene el valor exacto de amplitud y fase para el año evaluado.

En adición a los dos pronósticos de marea para el 2019, se calcularon los armónicos a partir de la serie de nivel del mar observado en el año 2019 en Ballenas, Cartagena, Turbo y San Andrés. Estos resultados se consideran los de mayor exactitud, por lo cual se usan para compararlos con los resultados de los dos pronósticos. La evaluación se realizó con datos entre el 31 de diciembre de 2018 a las 00:00 UTC y el 31 de diciembre de 2019 a las 23:00 UTC. No se efectuó la corrección nodal con el fin de obtener el valor de amplitud y fase más exacto de los diferentes armónicos para este año y permitir la comparación con los armónicos obtenidos de las dos series de tiempo pronosticadas. Adicionalmente, empleando los datos de 2019 se obtuvieron las constituyentes armónicas, incluyendo Sa y Ssa, a partir de los cuales también se obtuvo la serie de tiempo de mareas de ese mismo año. Esta última si incluye la corrección nodal, con el fin de permitir la comparación con las series de tiempo de marea obtenidas con los pronósticos. Por tanto, para la comparación de las series de tiempo de marea, estas contaban con corrección nodal, en tanto que la comparación con los armónicos no.

En primera instancia, se evaluó el error cuadrático medio, RMS (Ecuación 5), de las diferencias entre la amplitud y fase de los siete principales constituyentes armónicos (M2, N2, S2, K1, O1, P1 y Mf); como también se analizó el coeficiente de correlación (r , Ecuación 8), el cual mide la intensidad de la relación lineal entre la serie de marea pronosticada a partir de datos medidos del 2018 o modelados (Y) y el pronóstico de marea obtenido con datos del año 2019 para ese mismo año (X) (Daniel, 1980).

$$r = \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} \quad \text{Ecuación 7}$$

5. CONTROL DE CALIDAD A LAS SERIES DE TIEMPO DE NIVEL DEL MAR

5.1 Introducción

En el pasado los investigadores han tratado los datos de nivel del mar de acuerdo con los objetivos específicos de cada una de sus investigaciones; sin establecer, una metodología única para el control de calidad donde se definan reglas de normalización para este tipo de información. El Servicio Europeo de Nivel del Mar (ESEAS) definió dos niveles de control de calidad dependiendo del tiempo de entrega de los datos, llamados L1: control de calidad para series de tiempo que debían estar disponibles para consulta en poco tiempo para los servicios operacionales, y L2: un control de calidad total que tardaba más pero correspondía a un análisis más exhaustivo de los datos registrados antes de estar disponibles para investigaciones de la comunidad científica (García *et al.* 2007).

Se debe tener presente que el objetivo final de estos controles de calidad es detectar y, de ser posible, corregir errores que permitan minimizar la pérdida de información, como también la documentación del datum y otros metadatos que ayuden a integrar la información en un sistema regional o global de este tipo de datos (Bradshaw *et al.* 2004) .

Cabe anotar que los desarrollos logrados en los sistemas de observación del océano permiten la toma de datos a mayor frecuencia y es típico que tengan brechas sustanciales o muestreos temporales distribuidos de forma irregular (Codiga, 2011). No obstante, el control de calidad también contempla estos sucesos, debido que las variaciones de alta frecuencia pueden ser consideradas como ruido cuando se busca estudiar señales de baja frecuencia, como por ejemplo el comportamiento de la marea con periodos diurnos y semi-diurnos. La aplicación de filtros pasa bajo a las variaciones de marea es bastante limitado, teniendo en cuenta que algunos fenómenos oceanográficos y atmosféricos se enmascaran dentro de las frecuencias de los armónicos astronómicos y es complejo distinguir entre los dos tipos de señales. Es por ello que a partir del uso de otras técnicas matemáticas como la media móvil o el uso del filtro Savitzky-Golay de suavizado de datos, se puede alcanzar una buena aproximación para la obtención de datos en

baja frecuencia como es el caso de la señal de marea, (Alsaaq *et al.* 2016). Este último filtro se basa en una aproximación polinomial de mínimos cuadrados y cuyos valores suavizados de salida son menos efectivos en la reducción de ruido, pero más efectivos en retener la figura de la señal original (Schafer, 2011). Cabe destacar que un filtro ideal será aquel que optimice la respuesta de amplitud y minimice las distorsiones de su fase (Wert *et al.* 2004).

En este capítulo se define el control de calidad realizado a las series de tiempo de nivel del mar, las cuales serán empleadas para el desarrollo del estudio de la marea en el Caribe colombiano. Estas series de tiempo obtenidas por la Red MPOMM fueron muestreadas cada minuto, por lo tanto, la toma de datos en alta frecuencia puede incluir ruido, causado por el oleaje y otros fenómenos. El objetivo del control de calidad aplicado es poder obtener series horarias de nivel del mar, eliminando datos atípicos y reduciendo de forma significativa los saltos en referencia vertical que se identifiquen en cada serie.

De acuerdo con lo anterior y teniendo en cuenta las características de las series de tiempo de la Red MPOMM, primero, se define un método con el cual se pasaron los datos muestreados cada minuto a datos horarios; luego, se establecen los procedimientos de control de calidad aplicados a las series de nivel del mar; estos tratamientos fueron aplicados a los tres sensores (CBS, PLS y RLS) en tres ubicaciones diferentes, con el cual se evalúa y escoge el sensor con mejor desempeño de los tres. Posterior a esto se aplica el control de calidad a todas las estaciones de nivel del mar, incluyendo las del UHSLC, lo que permite escoger el año más completo y común a todas las estaciones, dejando de esta forma las series listas para el cumplimiento de los demás objetivos específicos.

Los resultados estadísticos y ajustes en la referencia vertical que se efectuaron durante este procedimiento de control de calidad fueron documentados y resumidos en una hoja de metadatos para cada estación en la sección 12.1.

5.2 Tratamiento de series de tiempo con alta frecuencia

Los datos de la Red MPOMM son tomados con un periodo de muestreo de un minuto, lo que implica la generación de ruido de alta frecuencia cuando se desean analizar fenómenos de marea y de nivel del mar. Es por ello que se evaluaron tres posibles filtros pasa bajos, con el fin de obtener series de tiempo horarias, las cuales típicamente son usadas para el estudio de la marea: media móvil, Savitzky – Golay (S-G) y media móvil por saltos.

La media móvil se usa como filtro paso bajo para 61 minutos a lo largo de toda la serie de tiempo, con el fin de filtrar todas aquellas oscilaciones con periodos menores a una hora. Sin embargo, es un filtro causal donde el efecto en la salida ocurre luego de la causa correspondiente en la entrada; estos filtros causales introducen un retardo de la salida respecto a los datos de entrada.

El filtro S-G realiza un suavizado por mínimos cuadrados y reduce el ruido mientras mantienen la figura y el pico de la forma de la onda, asimismo tienen fase cero, por lo que las características de la señal no son desplazadas (Schafer, 2011). En la aplicación de este método se hace necesario determinar el ancho medio (M) de un grupo de datos de entrada determinados por $2M + 1$ y el grado del polinomio (N) que está en función de la frecuencia de corte (f_c) que se desea filtrar.

De acuerdo con Schafer (2011) se puede obtener el grado del polinomio a partir de:

$$f_c = \frac{N + 1}{3.2M - 4.6} \quad M \geq 25 \text{ y } N < M \quad \text{Ecuación 8}$$

Al despejar la Ecuación 8 se puede obtener N así:

$$N = f_c(3.2M - 4.6) - 1 \quad \text{Ecuación 9}$$

Teniendo en cuenta que se desea eliminar las señales de alta frecuencia con periodos menores a 60 minutos, la frecuencia de corte en este caso será de 0.01666

min^{-1} la cual al aplicar la Ecuación 9 se obtendría N igual a 2.17 siendo aproximado a 2 como grado del polinomio y se estableció un ancho medio de ventana igual a 60.

Finalmente, la media móvil por saltos consiste en un promedio que se aplica a los datos centrados en la hora 00, con el fin de no tener problemas de desfase de la onda y dentro de una ventana específica de observación. En este caso los datos se evaluaron en una ventana de 7 observaciones es decir desde el minuto 57 hasta el minuto 03. Cada valor es evaluado dentro de esta ventana y no puede estar a más de 3 desviaciones estándar del promedio de la ventana, los datos por fuera de este criterio son borrados y el promedio solo es calculado si el 50% de los valores de la ventana de observación se encuentran a menos de tres desviaciones, es decir debe haber por lo menos 4 datos de 7 de lo contrario se deja como un dato vacío.

Previamente a la media móvil por saltos se realizó un análisis de sensibilidad. En este se evaluaron ventanas de 7, 11 y 15 minutos (datos) para marcar los datos atípicos, usando los tres sensores (RLS, PLS y CBS). En la Tabla 3 se presentan los resultados para las estaciones de Ballenas en la Guajira y Turbo en el Golfo de Urabá. Estas series de tiempo fueron seleccionadas por tener muy pocos datos faltantes y presentar condiciones de instalación diferentes. Por un lado, los datos de Turbo no se ven tan expuestos a variaciones de alta frecuencia como el oleaje, mientras que en Ballenas sí se evidencia la influencia de este tipo de fenómenos.

Tabla 3. Resultados de datos eliminados de acuerdo al tamaño de la ventana de evaluación en una media móvil por saltos.

<i>Estación</i>	<i>Sensor</i>	<i>Datos por minuto</i>				
		Faltantes		Datos borrados fuera 3 DS		
		#	%	7	11	15
<i>Ballenas</i>	CBS	458	0.35	0	1	24
<i>Ballenas</i>	PLS	458	0.35	0	0	5
<i>Ballenas</i>	RLS	498	0.38	0	5	19
<i>Turbo</i>	CBS	5	0.00	0	74	453
<i>Turbo</i>	PLS	5	0.00	0	201	117
<i>Turbo</i>	RLS	28	0.02	0	186	92

Al aumentar el tamaño de la ventana, se aumenta el número de datos por minuto que no superan el criterio de las tres desviaciones estándar. Lo anterior por cuanto al aumentar el número de datos a evaluar y por la variabilidad propia de los datos tomados cada minuto, es de esperar un mayor número de datos que no superen este criterio. De acuerdo con la inspección visual de los datos, la diferencia entre los resultados de los sensores de Ballenas y Turbo posiblemente se debe a que la variabilidad de los mismos depende del lugar de instalación de los sensores. En el caso de Ballenas, los sensores están más expuestos al oleaje, por tanto, el desempeño de los tres sensores es difícil de evaluar. En Turbo, los sensores están en aguas más protegidas, por tanto, con menor variabilidad en los datos, lo que permite observar mejor las diferencias en el desempeño de los sensores.

Se consideró importante evaluar también las diferencias en el valor vertical que se obtiene al calcular los datos horarios usando las diferentes ventanas evaluadas (7, 11 y 15 minutos). Para esto se generaron series de tiempo horarios usando las tres ventanas, de forma similar a las mostradas en la Figura 4 (en la cual se usó una ventana de 7 minutos). A estas tres series horarios se les calculó el error cuadrático medio (RMS) a partir de sumar la diferencia elevada al cuadrado cada hora entre el promedio de altura de las tres ventanas (7, 11 y 15 minutos) y la altura obtenida con cada ventana particular. A esta sumatoria se le sacó la raíz cuadrada para obtener el valor RMS para cada ventana.

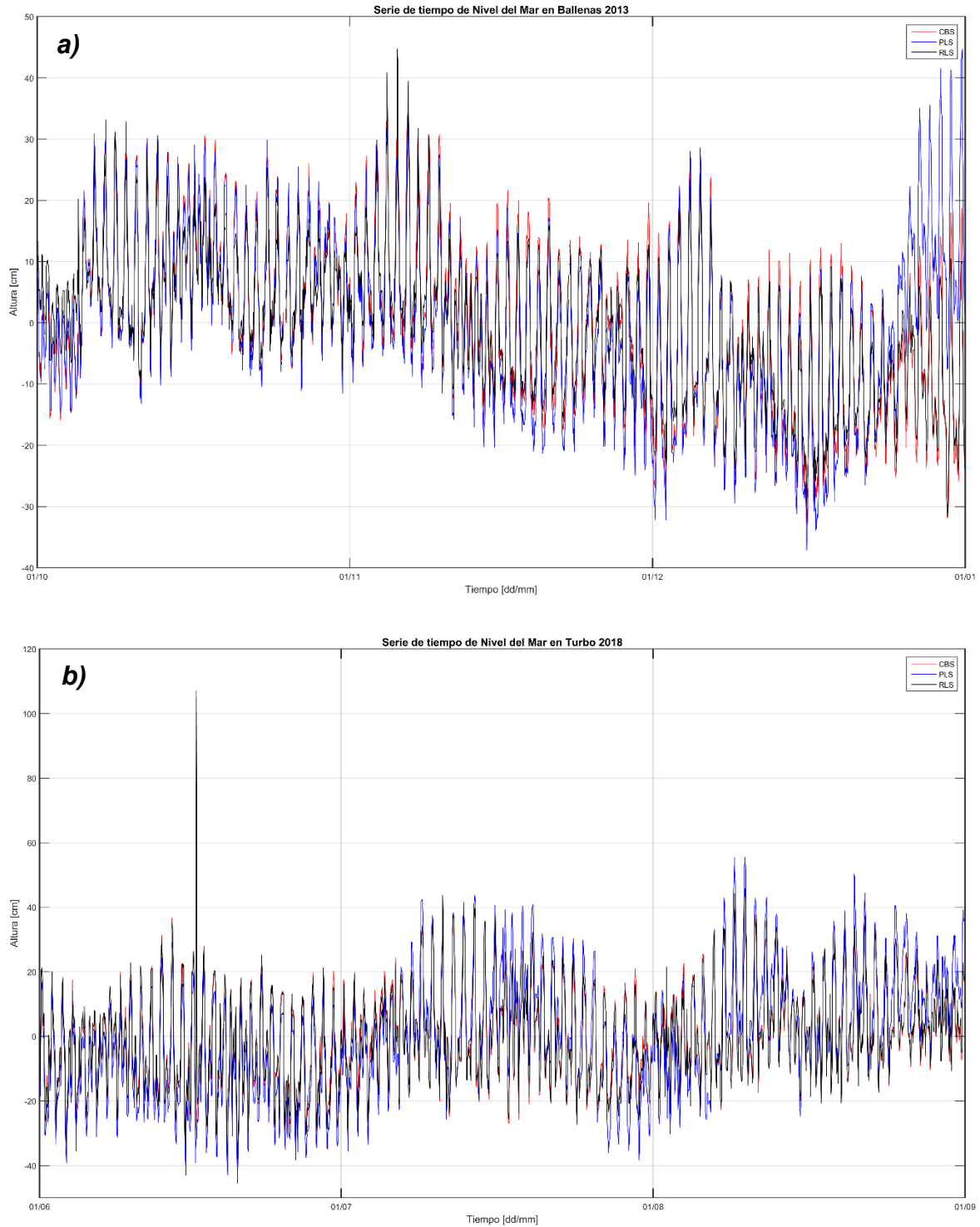


Figura 4. Series de tiempo de tres meses en Ballenas (a) y Turbo (b), con los tres sensores de las estaciones mareográficas usando una ventana de 7 minutos para calcular el dato horario. Tiempo en UTC.

Esta evaluación se hizo usando los tres meses de la estación de Ballenas con el sensor CBS. Los RMS para la ventana de 7, 11 y 15 minutos fueron de 4.08 mm,

2.24 mm y 3.41 mm respectivamente. Teniendo en cuenta lo analizado en la evaluación de las tres ventanas de tiempo, se encontró que hay poco impacto, primero, en el número de datos horarios perdidos, segundo, en la diferencia vertical del dato horario obtenido (análisis de RMS). Con base en estos resultados para la media móvil por saltos se definió utilizar la ventana de 7 minutos que permita la generación de la serie de tiempo horaria, pues tiene la ventaja de que, al usar menos datos que las otras ventanas, logra mantener mejor las variaciones extremas que son importantes para el análisis del comportamiento del nivel del mar.

Una vez definida la configuración de cada uno de los filtros, se realizó una comparación de los resultados al emplear el filtro S-G y la media móvil por saltos en un conjunto de datos de las estaciones de Ballenas (01-10-2013 al 01-01-2014) y Turbo (01-06-2018 al 01-09-2018) con el fin de analizar su efectividad y realizar una comparación numérica de estos al momento de generar una serie de tiempo horaria. El filtro de media móvil fue descartado debido al desfase que genera en la señal de salida.

Tabla 4. Datos faltantes de las series de tiempo horarias después de aplicar los filtros de media móvil por saltos y S-G.

Datos/hora faltantes en las series ¹

<i>Estación</i>	<i>Sensor</i>	Número (#)		Porcentaje (%)	
		Media móvil por saltos	Savtizky-Golay	Media móvil por saltos	Savtizky-Golay
<i>Ballenas</i>	CBS	9	25	0.4	1.1
<i>Ballenas</i>	PLS	9	25	0.4	1.1
<i>Ballenas</i>	RLS	9	33	0.4	1.4
<i>Turbo</i>	CBS	0	1	0	0.0
<i>Turbo</i>	PLS	0	1	0	0.0
<i>Turbo</i>	RLS	0	9	0	0.4

¹ Estos datos/horas faltantes pueden resultar de la falta del 50% de los datos/minuto en la media móvil por saltos de la ventana de tiempo evaluada o al no cumplir con el criterio de las tres desviaciones estándar o por un dato faltante que impide calcular los valores al aplicar el filtro S-G.

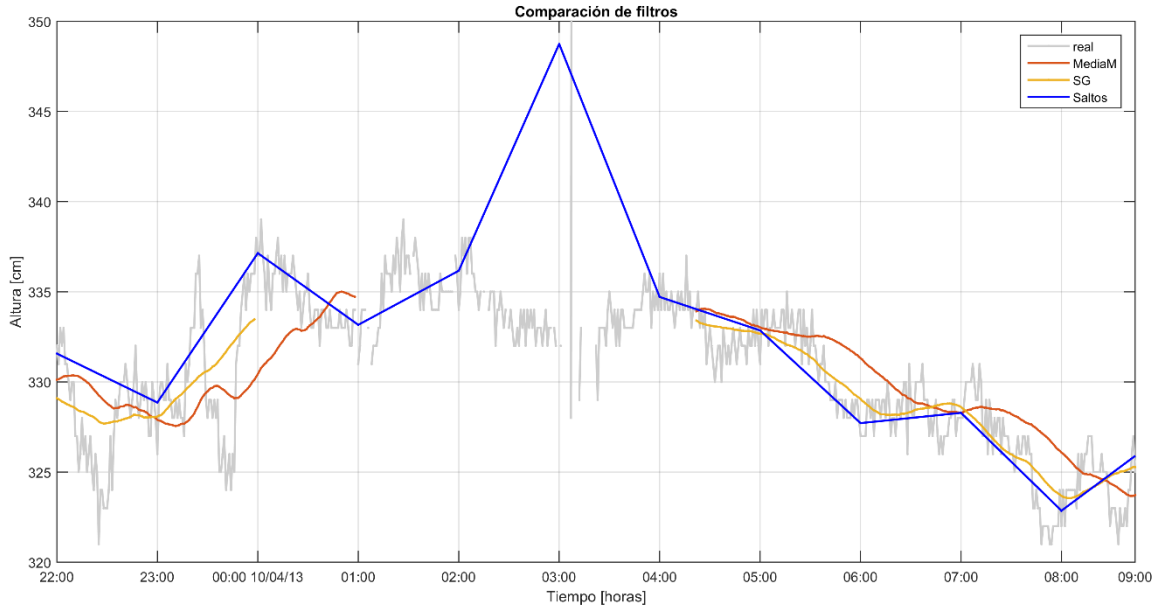


Figura 5. Respuesta de los filtros a los espacios vacíos en la serie de tiempo de nivel del mar.

La Tabla 4 permite observar que el filtro S-G presenta una mayor cantidad de datos faltantes al momento de generar la serie de tiempo horaria con respecto a la media móvil por saltos, asimismo y como se evidencia en la Figura 5 el método de media móvil por saltos es más eficiente ante la aparición de espacios vacíos en la serie de tiempo, teniendo en cuenta que utiliza una ventana de solo 7 observaciones. La cual es menos sensible a este problema en comparación a una ventana de observación de 121 datos que utiliza el método S-G y que necesita que esta ventana cuente con los datos completos; por lo tanto, el primer método (media móvil por saltos) permite obtener una mayor cantidad de datos.

Por otra parte, se comparó el espectro de frecuencia de la serie de tiempo sin filtrar contra las series filtradas a partir de los métodos S-G y media móvil por saltos (Figura 6). Para este análisis se utilizaron los datos de la estación de San Andrés para el periodo entre 2017-12-31 00:00 hasta el 2018-04-01 00:00, lo anterior teniendo en cuenta que en esta estación se observaba con mayor claridad la aparición de los picos de energía de las componentes diurnas y semidirunas, a diferencia de las estaciones de Ballenas y Turbo donde no eran tan perceptibles al aplicar el análisis de frecuencia.

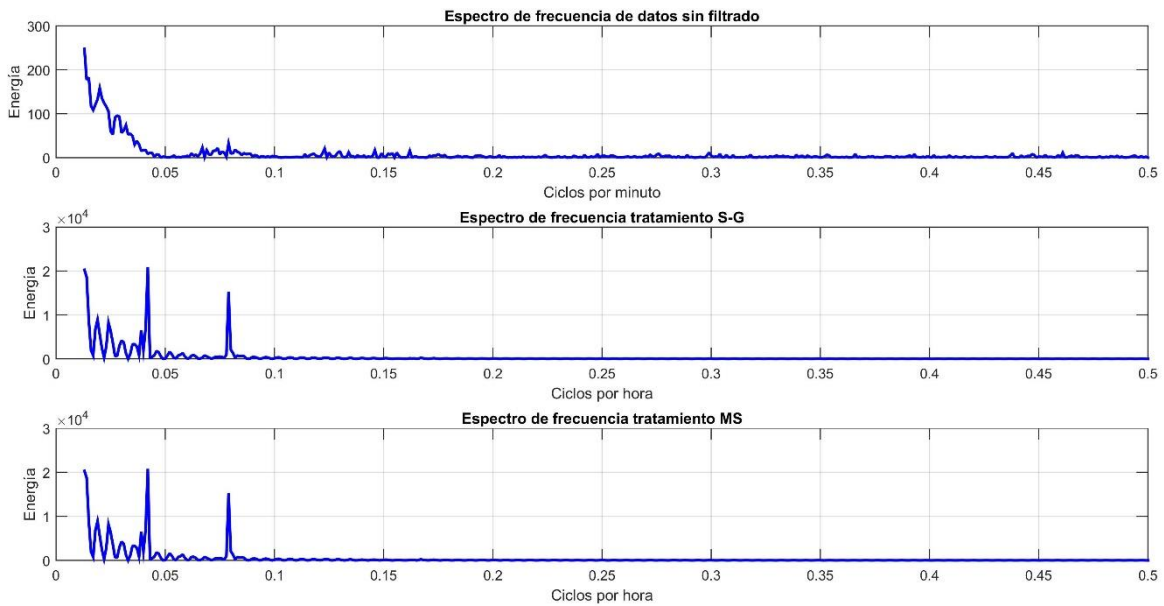


Figura 6. Espectro de frecuencia de la estación de San Andrés. Arriba, datos originales de la estación sin filtrar; medio, datos horarios filtrados aplicando el método Savitzky-Golay y abajo datos horarios filtrados aplicando el filtro medio móvil por saltos.

Se evidencia que en los datos medidos por la estación mareográfica (cada minuto), la energía es distribuida a lo largo de una amplia gama de frecuencias, lo que genera que la energía de las componentes armónicas principales se enmascare y no puedan ser identificables; sin embargo, al efectuar un filtrado de datos a partir de cualquiera de los dos métodos, S-G o media móvil por saltos, se identifican de una forma más fácil la energía de componentes diurnas y semi-diurnas asociadas a la marea. Cabe aclarar que hasta este punto estos datos no contaban con un control de calidad, por ello se evidencia gran energía agrupada en baja frecuencia.

Teniendo en cuenta lo anterior, se decidió usar el filtro de media móvil por saltos para pasar las series de tiempo minuto a minuto a series horarias, debido que este método no presenta retardo en fase como si sucede con una media móvil continua, mantiene una mayor cantidad de información en la serie en comparación con el método S-G y adicional a esto permite la identificación de las componentes diurnas y semi-diurna en las series de tiempo aún después de ser filtradas.

5.3 Tratamiento y control de calidad a series de tiempo horarias

Una vez generada la serie de tiempo horaria de nivel del mar, a toda ella se le efectuó un proceso de control de calidad, con el fin de obtener la serie de tiempo definitiva para cada estación (Figura 9).

A la serie de tiempo horaria de nivel del mar se le aplicó una media móvil por saltos con una ventana de observación de 7 datos. Esta ventana se pasó a lo largo de toda la serie de tiempo calculando un promedio y desviación estándar con los 7 datos. Se marcó como sospechoso el dato central de la ventana evaluada (posible dato atípico), si este estaba tres desviaciones estándar, por encima o por debajo del promedio de la ventana. Posterior a esto se realizó una inspección visual de la serie en secciones traslapadas de seis días resaltando los datos que se habían marcado como sospechosos. Se eliminaron los datos (i) con un valor muy superior o inferior a datos vecinos, (ii) aquellos que en varias horas presentaban el mismo valor y (iii) los que su comportamiento respecto a los datos vecinos se encontraba por encima de la variabilidad natural del nivel del mar en la región.

Posterior a esto se procedió a identificar y realizar la corrección de los cambios en la referencia vertical identificados (Figura 7), en cada serie de tiempo. Para esto se usaron las diferencias en el residuo de marea entre segmentos. Cabe aclarar que para analizar el comportamiento de la marea en el Caribe colombiano, esta corrección del desplazamiento vertical del datum no es indispensable (UNESCO/COI, 2012); sin embargo, para explicar el comportamiento del residuo meteorológico en el área de estudio, si es necesario tener el año seleccionado referido a un mismo datum vertical. Esto es especialmente importante en el Mar Caribe, donde las amplitudes de los armónicos de marea son del mismo orden de magnitud que las amplitudes de las variaciones estacionales forzadas principalmente por variables meteorológicas (Torres & Tsimplis, 2012).

Para ello, se seleccionó un periodo de tiempo de 366 días dentro del cual los datos estuvieran lo más completo posible y en la medida de las posibilidades no hubiese cambios en la referencia vertical. Cabe aclarar que este año no necesariamente corresponde al año común en todas las series de tiempo que se seleccionó

posteriormente, para el estudio de la marea y el residuo meteorológico en el área de estudio. Con este año de datos se obtuvieron las constituyentes armónicas incluyendo armónicos de largo plazo y armónicos con influencia meteorológica, a partir de los cuales se realizó un pronóstico de marea para el periodo de toda la serie de tiempo de nivel del mar.

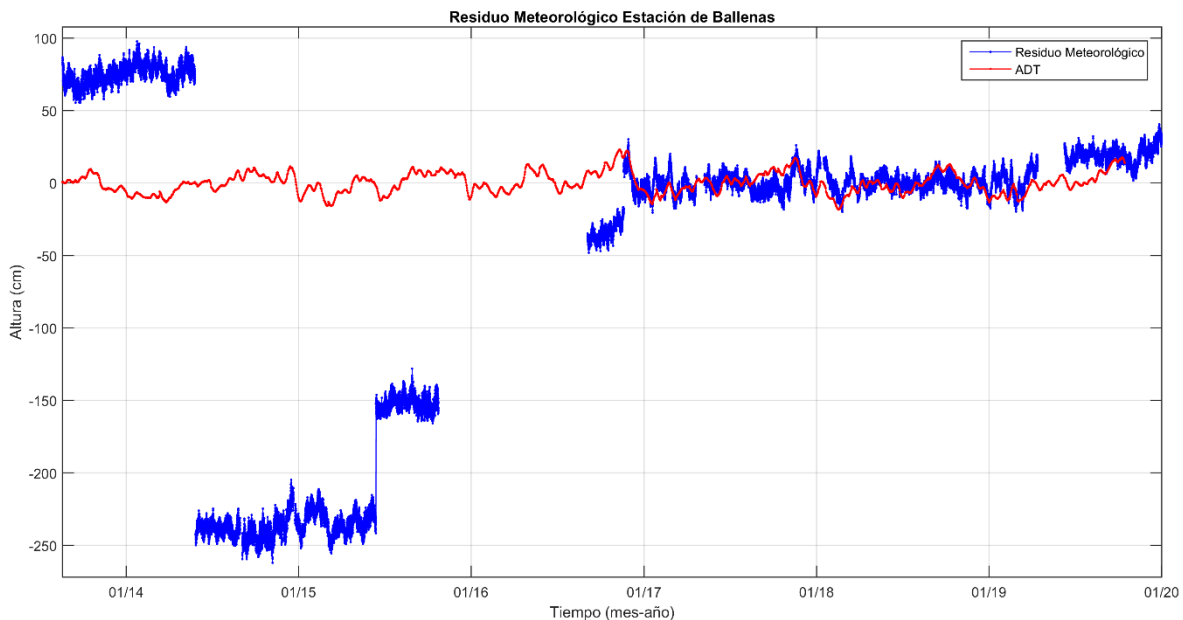


Figura 7. Residuo meteorológico de la estación de nivel del mar de Ballenas entre agosto de 2013 y diciembre de 2019, se aprecian los cambios en la referencia vertical, comparado con la serie de tiempo de ADT (Absolute Dynamic Topography) obtenida del nodo más cercano a 18 km al noreste de la estación.

Para obtener una serie de residuo de marea (serie de nivel del mar – pronóstico de marea) para toda la serie de tiempo, se realizó el siguiente procedimiento. A cada segmento en que estaba dividida la serie de tiempo de nivel del mar, se le restó su promedio. Un segmento es la fracción de serie de tiempo referida al mismo datum vertical. De esta forma, toda la serie de nivel del mar quedaba centrada en un cero aritmético, a la cual se le restó el pronóstico de marea, obteniendo de esta forma el residuo de marea. A cada segmento de residuo de marea se le sumó el promedio del mismo segmento que se usó para llevarlo al cero. De esta forma se reconstruían los mismos saltos de nivel que se observaban en la serie de nivel del mar, pero ahora, con la serie de tiempo de residuo de marea (línea azul de la Figura 7).

Para la corrección del nivel de referencia vertical se usaron series de tiempo obtenidas de mapas de ADT (Sección 4.1.3). La máxima distancia del nodo más cercano a las estaciones a las cuales se les realizó esta nivelación fue de 18.7 km (Ballenas).

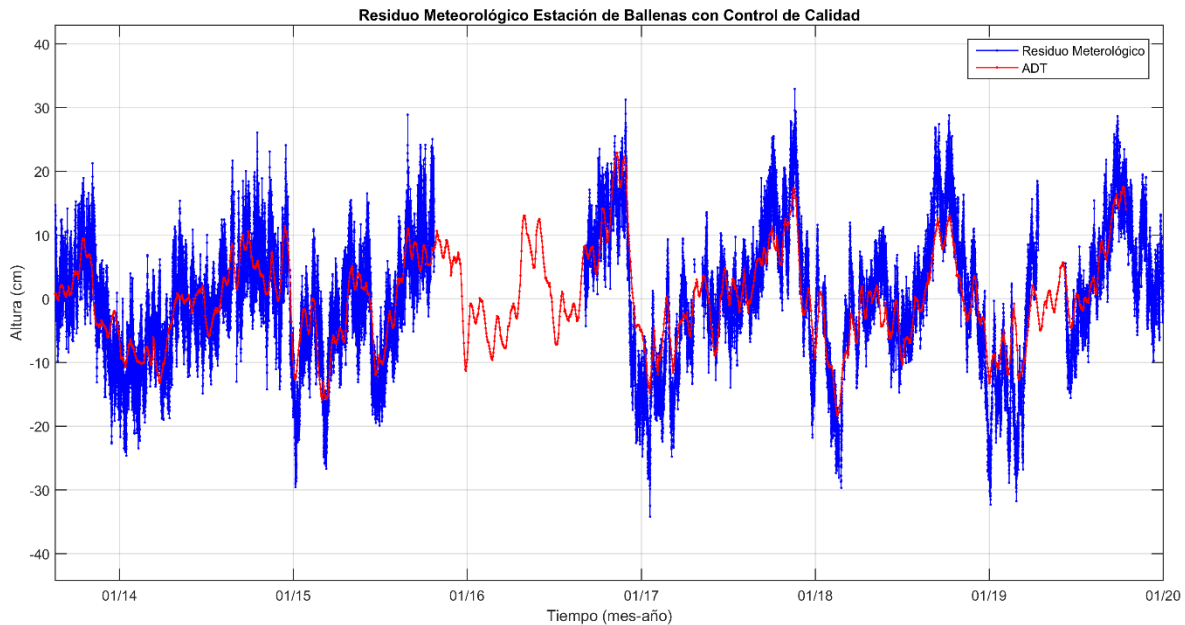


Figura 8. Residuo meteorológico de la estación de Ballenas después de aplicar el procedimiento para la recuperación del datum vertical (azul) y datos de ADT del nodo más cercano (rojo).

Tanto al residuo de marea como a los datos de ADT se les calculó el promedio de 7 días del final y comienzo de cada segmento, guardando estos valores. Todas las correcciones se aplicaron llevando todos los segmentos al datum vertical del primer segmento de la serie de tiempo. Para esto, se calculaba la diferencia vertical entre el final del primer segmento y el comienzo del segundo segmento de ADT. El valor de esta diferencia se hacía coincidir con la diferencia entre el final del primer segmento y el comienzo del segundo segmento del residuo de marea, sumando o restando un valor arbitrario al segundo segmento de residuo meteorológico. Con esto se trasladaba verticalmente el segundo segmento al nivel del primer segmento del residuo, imponiendo la diferencia vertical de ADT entre los segmentos, pero recuperando el datum vertical (Figura 8). Este valor arbitrario sumado o restado se encuentra en cada hoja de metadatos de estación en la sección 12.1.

Con la serie de tiempo ya corregida en referencia vertical se calcularon nuevamente las constituyentes armónicas usando un año (366 días) sin datos faltantes o el más completo existente para la mayoría de estaciones empleadas. Esto con el fin de comparar tanto la señal de marea como del residuo meteorológico en lo posible, con base al mismo año de datos. Las constituyentes armónicas se emplearon para pronosticar la señal de marea, la cual se restó a la serie de nivel del mar para obtener una serie de tiempo del residuo meteorológico para todo el periodo con datos disponibles, como se indica en la sección 4.2.2.

Con este residuo se volvió a realizar una inspección visual de la serie en secciones traslapadas de seis días. Al no tener la señal de marea eran más evidentes los cambios meteorológicos que generan valores extremos, facilitando el diferenciarlos de datos atípicos. Los datos clasificados como atípicos de la revisión del residuo de marea se eliminaron, teniendo en cuenta aquellos que fueron inicialmente marcados como sospechosos en la inspección visual inicial efectuada a la serie de tiempo de nivel del mar.

De esta forma las series de tiempo de nivel del mar y de residuo meteorológico, quedaron libres de datos atípicos, pero conservando datos extremos y referidas a un único datum vertical, quedando listas para continuar con el desarrollo del proyecto.

5.4 Selección del sensor

Se efectuó un análisis de los sensores de nivel del mar en tres de las trece estaciones (Ballenas, Turbo y Providencia) teniendo en cuenta su ubicación geográfica y condiciones tanto oceanográficas como meteorológicas; lo anterior, con el fin de evaluar el desempeño de cada uno de ellos después de aplicar el control de calidad descrito en el numeral 5.3.

En los resultados obtenidos y presentados en la Tabla 5, se puede evidenciar que el sensor de radar (RLS) es el que mantiene mayor cantidad de datos después del control de calidad en las tres estaciones, esto posiblemente se debe a que no se encuentra en contacto directo con el mar lo que no permite su rápido deterioro, a

diferencia de los sensores PLS y CBS en los cuales se evidenció que en algunos periodos de tiempo los datos presentaban errores por falta de calibración y/o mantenimiento del equipo. Asimismo, estos dos sensores presentaban muchos cambios en los niveles de referencia vertical, lo cual se puede atribuir a la dificultad de hacer su reinstalación después de que se efectuaba el mantenimiento preventivo, a diferencia del sensor RLS que por estar en una estructura rígida y en superficie su mantenimiento no requiere desinstalación, solo una limpieza externa.

Tabla 5. Resultados del control de calidad a las series de tiempo horarias.

<i>Estación</i>	<i>Sensor</i>	<i>Número de datos faltantes al inicio</i>	<i>Número de datos faltantes después del cc</i>	<i>Diferencia</i>	<i>Longitud final en años</i>	<i>% Datos faltantes</i>
<i>Ballenas</i>	CBS	10592	10592	6362	4.4	30.3%
	PLS	17911	29664	11753	1.9	63.9%
	RLS	9838	11187	1349	5.0	20.0%
<i>Providencia</i>	CBS	9042	13827	4785	3.9	28.5%
	PLS	597	6273	5676	2.5	22.1%
	RLS	656	1019	363	5.5	2.0%
<i>Turbo</i>	CBS	1196	7278	6082	1.2	40.7%
	PLS	138	1341	1203	1.8	7.5%
	RLS	136	365	226	1.9	2.0%

Por lo anterior la presente investigación se realiza utilizando los sensores RLS de las estaciones de la Red MPOMM, por mantener una mayor cantidad de datos después de aplicar el control de calidad. Igualmente, por no presentar tantas variaciones en los niveles de referencia vertical en comparación con los otros sensores, que pueden ser corregidas hasta cierta medida con el control de calidad aplicado.

5.5 Selección del año común para el análisis de las series de tiempo

Una vez efectuado el control de calidad a las 18 series de tiempo de nivel del mar del Caribe, los resultados fueron registrados en la Tabla 6; en esta se puede apreciar que el control de calidad permite detectar y eliminar una gran cantidad de datos atípicos de las series temporales, a excepción de aquellas obtenidas del

UHSLC las cuales ya han pasado previamente por un control de calidad. Es de resaltar que las estaciones perteneciente a la costa norte de Colombia (Puerto Estrella, Puerto Bolívar y Ballenas), presentan un alto porcentaje de datos faltantes, en comparación con las demás, lo que está asociado principalmente a la influencia del oleaje en los sectores donde fueron instalados, generando una mayor variabilidad en los datos y la aparición de datos atípicos; como también, problemas de accesibilidad para efectuar los mantenimientos de la misma debido a que estas se encuentran en lugares remotos.

Tabla 6. Resultados del control de calidad a las series de tiempo horarias.

<i>Estación</i>	<i>Número de datos faltantes al inicio</i>	<i>Número de datos faltantes después del Control de Calidad</i>	<i>Diferencia</i>	<i>Longitud final en años</i>	<i>% Datos faltantes</i>	<i>% Datos buenos del año 2018</i>
<i>Puerto Estrella</i>	16132	17432	1300	4.2	31.7%	84.8%
<i>Puerto Bolívar</i>	22706	24317	1611	3.5	43.7%	76.2%
<i>Ballenas</i>	9838	11187	1349	5.0	20.0%	91.5%
<i>Puerto Brisa</i>	337	363	26	2.3	1.7%	99.8%
<i>Santa Marta</i> ¹	1698	1704	6	5.2	3.5%	99.9%
<i>Puerto Velero</i> ²	6810	6871	61	1.9	28.2%	90.0%
<i>Cartagena</i>	8820	14172	5352	4.7	25.3%	99.6%
<i>Isla Naval</i>	2159	2979	820	6.0	5.3%	99.7%
<i>Coveñas</i>	3100	9577	6477	5.3	17.0%	98.7%
<i>Isla Fuerte</i>	869	889	20	1.9	5.0%	90.6%
<i>Turbo</i>	136	365	226	1.9	2.0%	99.9%
<i>Sapzurro</i>	579	1302	723	4.2	3.3%	99.6%
<i>El Porvenir (Panamá)</i> ¹	438	447	9	5.3	0.9%	94.9%
<i>Limon (Costa Rica)</i> ¹	0	0	0	5.4	0.0%	100.0%
<i>San Andrés</i>	2001	2752	751	6.0	4.9%	84.2%
<i>Providencia</i>	656	1019	363	5.5	2.0%	99.7%
<i>Magueyes (Puerto Rico)</i> ¹	4259	4383	124	4.9	9.2%	79.1%
<i>Bullen Bay (Curacao)</i> ¹	0	0	0	5.2	0.0%	100.0%

¹ Estaciones de UHSLC.

² El % de datos buenos corresponden a un año de datos entre 2013 y 2014, teniendo en cuenta que esta estación no tiene datos en el 2018.

Por otra parte, y de acuerdo con lo propuesto por Foreman, (1977); Pugh y Woodworth, (2014) y UNESCO/COI, (2012) para esta investigación se determinó utilizar un año de datos de 366 días, con el fin de poder identificar dentro del análisis armónico la señal anual (Sa) que es muy importante en el nivel del mar del Caribe (Torres & Tsimplis, 2011, 2014). Adicional a esto, este año debía ser común en la mayor cantidad de estaciones. De acuerdo a lo que se observa en la Figura 9 se determinó utilizar las series temporales desde las 00:00 horas del 31 de diciembre de 2017 hasta las 23:00 horas del 31 de diciembre de 2018, durante este lapso de tiempo la mayoría de las series presentan un 90% de los datos que se debían registrar. La excepción es Puerto Velero, debido que para el año 2018 no contaba con datos, se tomaron desde las 00:00 horas del 25 de agosto de 2013 hasta las 23:00 horas del 25 de agosto de 2014, con un 90% de los datos.

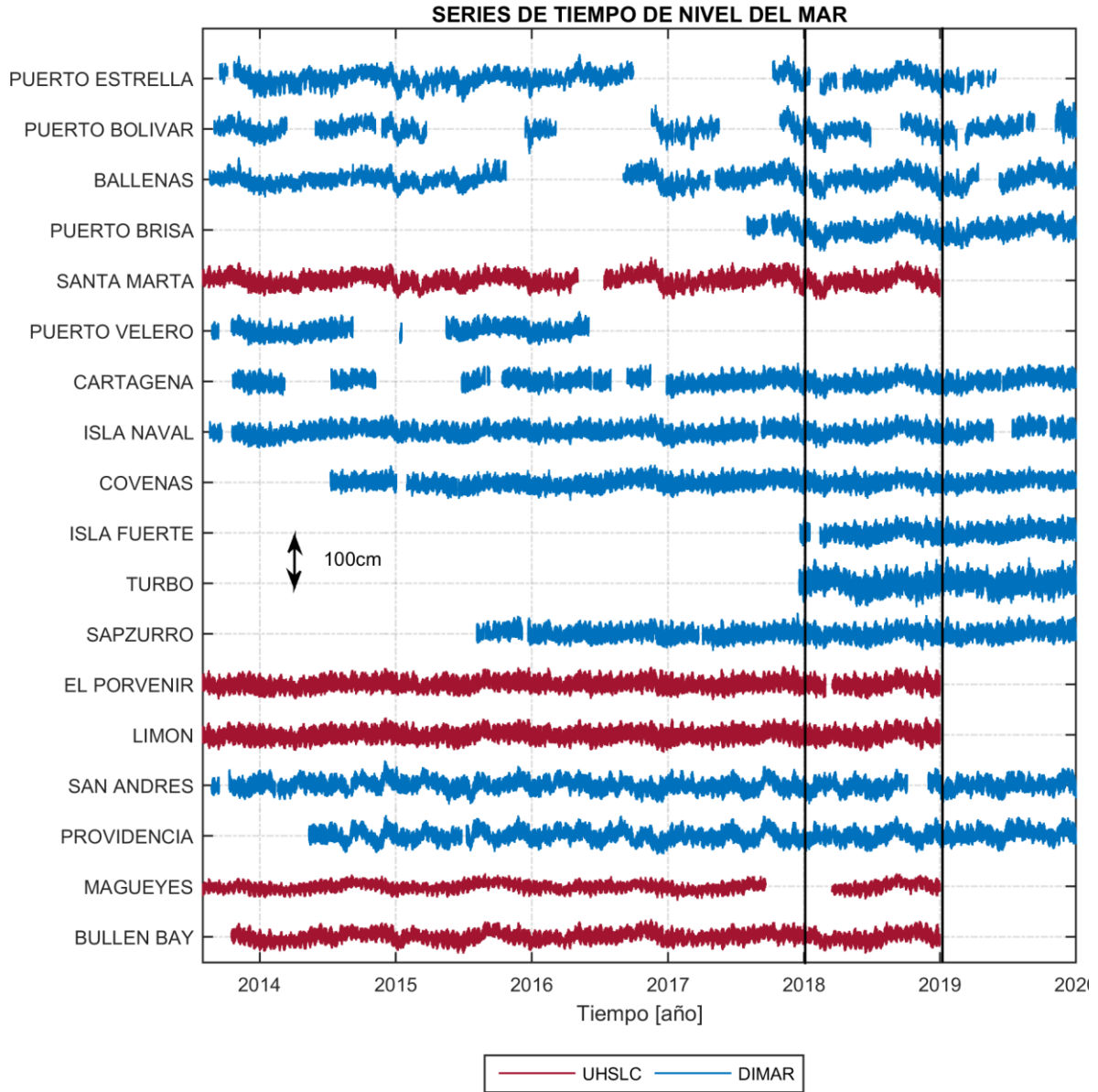


Figura 9. Series de tiempo de las 18 estaciones de nivel del mar de DIMAR y de la UHSLC, a las cuales se les aplicó el control de calidad definido previamente. Entre líneas negras verticales se destaca el lapso de tiempo común a la mayoría de series de tiempo.

6. DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA MAREA Y RESIDUO METEOROLÓGICO EN EL CARIBE COLOMBIANO

6.1 Introducción

De acuerdo con lo planteado por Medvedev *et al.* (2013), en lugares donde las amplitudes de marea pueden ser pequeñas, como el caso del Mar Caribe, su evaluación precisa es crucial para el entendimiento de la dinámica general de la cuenca. Anteriormente autores como Kjerfve (1981), Torres & Tsimplis (2011) han estudiado la marea en el Mar Caribe incluyendo pocos sensores sobre la Cuenca Colombia; de igual forma, Lozano-Duque *et al.* (2010), Molares B. (2004), Torres Parra *et al.* (2008); enfocaron su estudio de mareas en este sector con algunas limitaciones en cuanto a cobertura, extensión o continuidad en las series de tiempo empleadas. Es por ello, que estudiar la marea en la Cuenca Colombia a partir de 18 estaciones de nivel del mar, algunas que no se habían usado antes para otros estudios, no solo amplía el conocimiento de los lugares antes descritos, sino que por primera vez permite conocer el comportamiento de este fenómeno en sitios que nunca se habían analizado.

En este estudio se analiza la información recolectada en estaciones ubicadas en sitios con características específicas, como la extensión de la plataforma continental, configuración de la línea de costa, entre otros, que son importantes debido a que la onda de marea sufre deformaciones en su proceso de interacción con la profundidad, propiciando por ejemplo, la aparición de armónicos de aguas someras, que pueden ser significativos por lo que se deben incluir para realizar un muy buen pronóstico. Adicionalmente las estaciones por su ubicación, tienen diferente influencia de los vientos alisios y respuesta a eventos extremos, afectando la composición de su residuo meteorológico.

Inicialmente se evaluaron los componentes de la marea obtenidos del análisis armónico, incluyendo los constituyentes S_a y S_{sa} , con el fin de verificar su importancia relativa (Tabla 7). Como se indicó en la sección 4.2.1, el comportamiento del nivel del mar en bajas frecuencias, es analizado como parte del residuo meteorológico. Se evidencia que los armónicos S_a y S_{sa} en todas las

estaciones se encuentran entre los armónicos más energéticos. Adicionalmente, tienen gran importancia en el norte del litoral colombiano entre Puerto Estrella y Santa Marta, ubicándose para estos puertos en los primeros lugares de acuerdo a su porcentaje de energía. En estas estaciones solo K1 presenta una importancia significativa respecto a estos dos armónicos. Sin embargo, hacia el centro del litoral (Puerto Velero a Isla Naval), Ssa se registra menos importante, aunque Sa aún se destaca por encima de constituyentes de origen netamente astronómicos como K1 y M2. Este sector se destaca como una zona de transición entre los armónicos al norte y el sur. Para el resto del litoral y el archipiélago de San Andrés y Providencia los constituyentes de origen netamente astronómicos son los que presentan mayor importancia, encontrando en menor porcentaje de energía los constituyentes Sa y Ssa respecto de las estaciones al norte continental colombiano. Solamente en Providencia y Limón, Ssa es más importante que Sa.

Tabla 7. Ordenamiento de constituyentes armónicos con base en su porcentaje de energía por puerto

<i>Puerto</i>	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°
<i>Puerto Estrella</i>	SA	K1	SSA	O1	M2	P1	N2	MM	MF	S1
<i>Puerto Bolívar</i>	SA	SSA	K1	O1	M2	P1	N2	MM	MSM	S2
<i>Ballenas</i>	SA	K1	SSA	M2	O1	P1	N2	S1	MF	S2
<i>Puerto Brisa</i>	SA	K1	SSA	M2	O1	P1	N2	S2	MF	S1
<i>Santa Marta</i>	SA	K1	SSA	M2	O1	P1	N2	S2	MF	Q1
<i>Puerto Velero</i>	K1	SA	M2	O1	P1	SSA	MF	N2	S2	MSM
<i>Cartagena</i>	SA	K1	M2	O1	SSA	P1	N2	S2	MF	MM
<i>Isla Naval</i>	K1	SA	M2	O1	SSA	P1	N2	S2	MF	MM
<i>Coveñas</i>	K1	M2	SA	O1	P1	SSA	N2	MF	S2	MM
<i>Isla Fuerte</i>	K1	M2	O1	SA	P1	SSA	N2	MM	S2	MF
<i>Turbo</i>	K1	M2	SA	O1	SSA	N2	P1	MM	S2	MS4
<i>Sapzurro</i>	K1	M2	O1	SA	P1	N2	SSA	MM	S2	MF
<i>El Porvenir</i>	K1	M2	O1	SA	P1	SSA	N2	MM	MF	S2
<i>Limón</i>	K1	M2	O1	P1	SSA	N2	SA	MM	S2	Q1
<i>San Andrés</i>	K1	M2	O1	SA	SSA	P1	N2	S2	MM	MF
<i>Providencia</i>	K1	M2	SSA	O1	SA	N2	P1	S2	Q1	S1
<i>Magueyes</i>	K1	SA	O1	P1	SSA	MF	S2	MSM	MM	Q1
<i>Bullen Bay</i>	SA	K1	O1	M2	SSA	P1	N2	Q1	MF	S1

De acuerdo con lo anterior, los armónicos de fuerte componente meteorológico anual y semianual, son tan importantes en el Caribe como los armónicos de

componente netamente astronómicos. Por lo anterior, este capítulo se divide en dos secciones. En la sección 6.2, se describe y amplía el conocimiento sobre el comportamiento de la marea (forzante astronómico) en la Cuenca Colombia, a partir de los principales constituyentes armónicos para el Caribe diurnos (K1, O1 y P1), semi-diurnos (M2, N2 y S2) y uno de largo periodo (Mf). En la sección 6.3 se describe el residuo meteorológico, utilizando información de muy buena resolución y continuidad temporal, incluso en lugares no descritos previamente. La intención de esta última sección no es el analizar las variaciones estacionales en la cuenca, ya que debido a su origen meteorológico presenta alta variación temporal y para lo cual se recomienda usar series de tiempo de por lo menos 5 años (Torres y Tsimplis, 2012). La finalidad es comparar durante un año, las diferencias espaciales en el componente meteorológico de las 18 estaciones usadas en el estudio.

6.2 Descripción del comportamiento de la marea

A partir del análisis de las amplitudes y fase de los armónicos en las 18 estaciones, se obtuvieron los siguientes resultados para los principales constituyentes de la marea. Todos los armónicos mostrados en las Tabla 8 y Tabla 9 presentaron un SNR mayor a 10 en todas las estaciones (Sección 4.2.2).

El constituyente K1 es el más importante de los armónicos en todas las estaciones. Este presenta un promedio en amplitud de 9.6 cm con el menor valor en Magueyes (8 cm) y el máximo en Turbo (11.3 cm). En términos generales la amplitud disminuye de sur a norte en el Caribe, con algunas excepciones en Puerto Bolívar y Coveñas que presentan valores de 8.6 y 8.8 cm respectivamente, difiriendo de las amplitudes de sus vecinos en este constituyente. La fase muestra que en la mayoría de las estaciones la marea de K1 ocurre a la misma hora (240°).

O1 es el segundo armónico diurno más importante en el área de estudio. Este presenta un promedio en amplitud de 5.9 cm, con un comportamiento similar al de K1 donde este disminuye de sur a norte en forma general. El valor mínimo de amplitud se obtuvo en Coveñas (5 cm); el cual se puede considerar una situación particular del sitio, si se compara con las estaciones más cercanas a esta que son Isla Naval e Isla Fuerte. El segundo menor valor se registró en Providencia (5.1 cm)

y el máximo en Turbo (6.9 cm). La fase de O1 muestra que la máxima amplitud de este constituyente se presenta ~1 hora antes en las estaciones de Magueyes y Bullen Bay, al compararlo con la fase de las demás estaciones que se encuentran en la Cuenca Colombia.

El armónico P1 al igual que los otros armónicos diurnos (K1 y O1) aumenta meridionalmente de sur a norte, con su valor máximo en Turbo e Isla Fuerte (3.3 cm) y el valor mínimo en Magueyes (2.5 cm). Se destaca la estación de Puerto Velero (2.7 cm), la cual muestra una leve diferencia respecto a sus estaciones vecinas de Cartagena y Santa Marta (3.1 cm). La máxima amplitud de P1 se presenta casi a la misma hora en las 18 estaciones con un valor de fase promedio de 241°.

El armónico semi-diurno M2 es el más importante de los armónicos semi-diurnos y en algunas estaciones es el segundo en importancia de todos los armónicos (Tabla 8). Su amplitud presenta el rango más amplio ya que oscila entre valores de 0.3 y 10.2 cm, disminuyendo de sur a norte, siendo Turbo la estación que registra el valor máximo y Magueyes el valor mínimo. En Turbo la amplitud de M2 es 2.1 cm mayor a la de cualquier otra estación, lo cual está relacionado con su amplia plataforma continental y efecto de resonancia, por lo cual armónicos como M4 y M3 aparecen con amplitudes de 2.1 cm y 0.6 cm respectivamente y SNR de 452 para el M3 y 370 para el M4 (no se muestra en las tablas). La amplitud de estos armónicos de aguas someras en Turbo es mayor al de cualquier otra estación. De acuerdo con la fase, este armónico presenta una variación del noreste al suroeste, presentándose primero en el norte del litoral Caribe colombiano (Ballenas 124°) y por último en las poblaciones de El Porvenir (Panamá) y Limón (Costa Rica), con 157° y 176° respectivamente. Por otra parte, se evidencia que para Magueyes se obtuvo una fase de 68° en este armónico, sin embargo, el SNR de este constituyente, en esta estación, es el menor de todos los puntos analizados.

Es de resaltar que en Puerto Estrella este armónico se presenta un poco más tarde que su vecino más cercano al oeste, Puerto Bolívar, lo cual, difiere del comportamiento general descrito anteriormente. Esto puede estar asociado a la

ubicación geográfica de la estación por encontrarse cerca del golfo de Maracaibo - Venezuela, lo cual, sumado a una extensa plataforma continental, puede modificar el comportamiento del armónico.

N2 es el segundo armónico semi-diurno más importante, sin embargo, con amplitudes menores a la mitad de M2. Esto confirma el bajo aporte de los constituyentes semi-diurnos a la marea en el Caribe Este. La amplitud del armónico N2 aumenta de sur a norte con un valor máximo obtenido en la estación de Turbo (4 cm) y mínimo en la estación de Magueyes (0.4 cm), de forma similar a la mayoría de los constituyentes descritos. La máxima amplitud de N2 se presenta al mismo tiempo ($\sim 109^\circ$) en las estaciones de la costa colombiana entre Puerto Bolívar e Isla Fuerte y posteriormente en las demás estaciones. De todas las estaciones analizadas, Bullen Bay es la que presenta el mayor retraso (132°) en este constituyente.

En el armónico MF (periodo de 13.66 días) se obtuvieron amplitudes entre 0.9 y 2.3 cm, en Limón y Puerto Velero respectivamente, siendo este un aporte menor a los armónicos previamente descritos. El comportamiento es muy homogéneo en la mayoría de las estaciones, aunque se destacan algunas con valores mayores o menores a sus vecinos como son Puerto Estrella (1.6 cm), Puerto Velero (2.3 cm) y Coveñas (1.7 cm). En cuanto a la fase, la propagación de la onda en la Cuenca Colombia se da del suroeste al noreste del área de estudio, presentándose primero en Limón (Costa Rica) 17° y por último en Puerto Estrella 45° . Puerto Velero presenta una fase de 324° lo cual difiere del comportamiento obtenido en otras estaciones. Como los datos evaluados de esta estación corresponden al 2013, lo cual difiere al de las demás estaciones (2018); se comparó con Santa Marta e Isla Naval durante el mismo periodo (2013), obteniendo que la fase en estas últimas fue de 329° , muy cercano a lo obtenido en Puerto Velero. Es pertinente mencionar que este constituyente presenta la mayor diferencia entre los armónicos que se reportan en las dos estaciones para los años 2013 y 2018 simultáneamente. Esto muestra la poca diferencia al obtener los principales armónicos a partir de cualquier año, siempre y cuando se realice la corrección nodal.

En el análisis armónico, incluido Mf, se aplicó la corrección nodal, por lo tanto, y de acuerdo con Crawford (1982) este cambio significativo en la fase de Mf se presenta porque un año de observaciones puede ser insuficiente para resolver este constituyente. En el Caribe, las amplitudes de Mf son pequeñas por lo que no sobresale del ruido de origen meteorológico en esta frecuencia (Torres & Tsimplis, 2011). Si bien su SNR es mayor a 10, en casi todas las estaciones es menor al de los principales armónicos, con excepción de Magueyes donde es mayor al SNR de Ssa, N2 y M2 (no mostrado en la Tabla 8). Por consiguiente, promediar los valores de amplitud y fase de Mf en periodos de un año sucesivos o aplicar el análisis armónico a muchos años de datos es más preciso.

Reafirmando lo expuesto por Kjerfve (1981), Torres & Tsimplis (2011); se identificó un comportamiento inusual en el armónico S2 en el suroeste de la Cuenca Colombia. Al analizar la fase se evidenció que la propagación de este armónico se da en un sentido opuesto a lo obtenido en los otros constituyentes semi-diurnos analizados. La amplitud máxima obtenida fue de 2.2 centímetros en Turbo, 0.7 cm mayor al valor promedio para todas las estaciones de 1.5 centímetros. Hay que tener en cuenta que este constituyente responde a forzantes astronómicos y atmosféricos y típicamente la parte atmosférica corresponde a un 16% de la parte astronómica; de igual forma, las mareas radiacionales son formadas por el efecto combinado de factores periódicos asociados con la radiación del sol; los más importantes son (1) la oscilación de la temperatura del aire asociada con la temperatura superficial del mar (2) las mareas atmosféricas y (3) la brisa marina (Medvedev et al. 2013). Por lo tanto, se requieren estudios más profundos que permitan identificar aquellos factores que están generando este inusual comportamiento en el sector.

De igual forma, fue calculado y analizado el número de forma para cada uno de los lugares donde había una serie de tiempo (Tabla 9). En general, se encontró que en la mayoría de los lugares el tipo de marea es mixto principalmente diurno, a excepción de los puertos de Magueyes y Bullen Bay, donde el número de forma clasifica las mareas de tipo diurna. Asimismo, Turbo obtuvo un valor de 1.46 que la

clasifica como tipo mixto principalmente semi-diurna, lo cual difiere de las estaciones vecinas (Sapzurro e Isla Fuerte con clasificación de mixta principalmente diurna). Esta diferencia se debe a la resonancia de M2 en el Golfo de Urabá mencionada anteriormente.

Los principales constituyentes armónicos obtenidos en cada ubicación, fueron comparados con sus homólogos, obtenidos de los modelos globales de marea DTU, FES2014 y TPXO9. Se pudo evidenciar que en amplitud existen pocas diferencias en la mayoría de los constituyentes evaluados con respecto a los modelos globales, en los cuales se encontraron subestimaciones o sobrestimaciones por debajo de los 0.5 centímetros. Algunas excepciones fueron identificadas. En Coveñas, las diferencias en los constituyentes K1 y O1 superan 0.9 cm en todos los modelos evaluados y diferencias de hasta 3.5 cm (la mitad de la señal) en el constituyente M2. En Turbo, las diferencias en los armónicos semi-diurnos M2 y N2 se presentan entre -3.2 y 1.8 centímetros en dos de los modelos globales. Lo anterior puede estar asociado a la respuesta que tiene la onda por la configuración de la costa donde se encuentran los mareógrafos, teniendo en cuenta que Coveñas se encuentra dentro del Golfo de Morrosquillo y Turbo en el Golfo de Urabá.

En cuanto a la fase, al igual que la amplitud, se identificaron pocas diferencias en la comparación con los modelos globales, a excepción de lugares puntuales y en armónicos específicos; este es el caso de Turbo y Magueyes donde se observaron diferencias mayores a 15° en los constituyentes semi-diurnos M2 y N2, en por lo menos dos de los modelos globales. En Turbo estas variaciones pueden estar asociadas a las diferentes resoluciones de los modelos globales, en los cuales algunos nodos de los que se obtuvieron información, están más cerca al punto de medición que otro. Por lo tanto, existen diferencias significativas entre las fases de cada modelo para un constituyente en específico, más aún en un sector donde la onda puede ser modificada por la extensa plataforma continental sobre la que se desplaza. Adicionalmente, las diferencias encontradas en Magueyes en los constituyentes mencionados estarían relacionadas con su cercanía al punto anfodrómico del Caribe. En estos lugares, la información de los nodos de los

modelos globales, aun estando contiguos, puede presentar diferencias significativas; reafirmando lo expuesto por Torres & Tsimplis, (2011).

El armónico Mf también fue comparado con los modelos FES2014 y TPX09, teniendo en cuenta que el modelo DTU10 no cuenta con los datos de amplitud y fase de este constituyente. Como resultado, se evidenciaron diferencias mayores a 19° con valores máximos de 54° ; lo cual es importante en la fase por el periodo de Mf. En cuanto a los valores de amplitud de Mf, estos no sobrepasan los 2.3 centímetros, valor máximo registrado en la estación de Puerto Velero.

En la Sección 7.2 se continuará con el análisis de comparar los datos observados con los de los modelos globales de marea para el Mar Caribe.

Tabla 8. Comparación de amplitud de los principales armónicos de datos observados con modelos globales de marea

Nombre Estación	Amplitud [cm]																																			
	K1				O1				P1				M2				N2				S2				MF											
	O	F	T	D	O	F	T	D	O	F	T	D	O	F	T	D	O	F	T	D	O	F	T	D	O	F	T	D	O	F	T	D				
<i>Puerto Estrella</i>	9.3	-0.1	-0.3	-0.5	6.1	-0.1	-0.4	-0.9	2.9	0.0	-0.2	0.0	5.1	0.7	3.6	0.6	1.8	0.6	0.7	0.2	0.9	-0.1	0.2	-0.1	1.6	0.1	0.0									
<i>Puerto Bolívar</i>	8.6	0.7	0.4	0.0	5.6	0.3	0.1	-0.5	2.7	0.2	0.0	0.1	5.4	1.2	0.3	2.4	2.2	0.4	-0.1	0.2	1.5	-0.3	-0.3	-0.6	1.2	0.5	0.4									
<i>Ballenas</i>	9.4	0.1	-0.4	-0.8	6.1	-0.1	-0.4	-1.1	2.8	0.1	0.0	0.0	6.6	0.6	-0.4	0.8	2.5	0.3	-0.1	0.3	1.3	0.1	0.1	-0.3	1.4	0.3	0.2									
<i>Puerto Brisa</i>	9.4	0.2	-0.3	-0.5	5.7	0.3	0.0	-0.6	3.1	-0.1	-0.3	-0.2	6.4	0.7	0.0	0.6	2.4	0.3	-0.1	0.4	1.7	-0.3	-0.2	-0.6	1.2	0.5	0.5									
<i>Santa Marta</i>	9.6	-0.1	-0.5	-0.4	5.6	0.4	0.1	-0.4	3.1	-0.1	-0.3	-0.2	6.4	0.5	0.3	1.1	2.4	0.3	0.0	0.5	1.8	-0.4	-0.3	-0.6	1.2	0.5	0.5									
<i>Santa Marta 2013</i>	9.6	-0.1	-0.5	-0.4	5.7	0.3	0.0	-0.5	3.0	0.0	-0.2	-0.1	6.4	0.5	0.3	1.1	2.2	0.5	0.2	0.7	1.8	-0.4	-0.3	-0.6	2.1	-0.4	-0.4									
<i>Puerto Velero 2013</i>	9.6	0.0	-0.3	-0.1	6.0	0.0	-0.3	-0.7	2.7	0.3	0.2	0.2	6.7	0.3	0.2	0.9	2.1	0.6	0.4	0.8	1.8	-0.4	-0.3	-0.4	2.3	-0.6	-0.6									
<i>Cartagena</i>	9.8	-0.2	-0.3	-0.2	5.8	0.2	0.0	-0.4	3.1	0.0	-0.2	-0.1	7.4	-0.1	-0.1	0.6	2.9	-0.1	-0.3	0.0	1.6	-0.2	-0.1	-0.1	1.3	0.4	0.4									
<i>Isla Naval</i>	10.0	-0.2	-0.5	-0.2	6.0	0.1	-0.1	-0.5	3.1	0.0	-0.1	-0.1	7.4	0.1	0.0	1.0	2.8	0.1	-0.1	0.1	1.7	-0.2	-0.2	0.0	1.3	0.4	0.4									
<i>Isla Naval 2013</i>	10.0	-0.2	-0.5	-0.2	6.2	-0.1	-0.3	-0.7	3.2	-0.1	-0.2	-0.2	7.2	0.3	0.2	1.2	2.3	0.6	0.4	0.6	1.8	-0.3	-0.3	-0.1	1.9	-0.2	-0.2									
<i>Coveñas</i>	8.8	1.6	1.0	1.6	5.0	1.5	1.0	0.9	3.1	0.1	0.0	0.2	6.9	0.0	1.1	3.5	2.5	0.4	0.4	1.2	1.5	-0.1	0.1	0.5	1.7	0.0	0.0									
<i>Isla Fuerte</i>	10.4	-0.3	-0.6	-0.5	6.1	0.3	-0.1	-0.5	3.3	-0.1	-0.3	-0.1	7.7	0.1	-0.1	0.9	2.9	0.0	-0.2	0.0	1.5	-0.1	0.0	0.2	1.3	0.4	0.4									
<i>Turbo</i>	11.3	-0.5	-0.6	0.1	6.9	-0.1	-0.3	-0.2	3.3	0.1	0.0	0.5	10.2	-3.2	0.0	1.8	4.0	-2.5	-0.4	0.9	2.2	-1.2	-0.3	0.4	1.3	0.4	0.4									
<i>Sapzurro</i>	10.3	-0.2	-0.5	-0.8	6.4	0.1	-0.3	-0.5	3.1	0.1	0.0	0.0	7.3	0.2	0.1	0.4	2.9	-0.3	-0.3	0.1	1.5	-0.3	-0.2	-0.7	1.3	0.5	0.4									
<i>El Porvenir</i>	10.0	0.0	-0.4	-0.6	5.8	0.5	0.1	-0.2	2.9	0.3	0.1	0.1	7.3	0.5	0.0	2.8	2.6	0.0	0.0	1.6	1.4	-0.2	0.0	1.6	1.5	0.3	0.2									
<i>Limón</i>	10.0	-0.4	-0.5	-0.2	6.0	0.2	-0.2	-0.5	3.1	0.0	-0.2	0.3	8.1	0.5	0.2	-0.2	2.6	-0.2	0.0	0.2	1.4	0.6	0.4	-0.2	0.9	0.8	0.8									
<i>San Andrés</i>	9.3	-0.1	-0.4	-0.4	5.7	-0.1	-0.4	-0.6	2.9	0.0	-0.2	0.0	7.4	0.0	0.2	0.0	2.8	-0.3	-0.2	-0.4	1.5	0.0	-0.1	-0.4	1.3	0.4	0.4									
<i>Providencia</i>	8.8	0.1	-0.2	-0.4	5.1	0.2	0.0	-0.2	2.6	0.2	0.0	0.2	7.3	0.1	0.1	0.3	2.9	-0.3	-0.2	-0.5	1.5	0.0	-0.1	-0.3	1.4	0.3	0.2									
<i>Magueyes</i>	8.0	0.1	-0.3	-0.6	5.2	0.6	0.3	0.5	2.5	0.1	-0.1	-0.1	0.3	0.7	3.0	1.6	0.4	-0.1	0.2	0.2	1.1	-0.4	0.1	-0.7	1.4	0.0	0.0									
<i>Bullen Bay</i>	9.6	-0.2	-0.4	-0.5	6.5	-0.1	-0.2	-0.7	3.0	-0.1	-0.2	0.0	4.1	0.7	0.3	1.3	1.4	0.3	0.0	-0.2	0.2	0.1	0.1	0.4	1.3	0.4	0.3									
RMS		0.43	0.47	0.57		0.42	0.33	0.59		0.14	0.16	0.18		0.89	1.09	1.44		0.65	0.27	0.59		0.37	0.20	0.54		0.41	0.39									

Amplitud de los armónicos computados a partir de la serie de tiempo del 2018, salvo para Puerto Velero (2013) y las estaciones de Santa Marta e Isla Naval que fueron procesadas para ambos años. O representa el valor obtenido del análisis armónico a la serie de tiempo de nivel del mar. F es la diferencia del modelo FES2014 menos O, T es la diferencia del modelo TPX09 menos O y D la diferencia del modelo DTU10 menos O. Valores negativos representan una subestimación del modelo global respecto al valor obtenido de la serie *in situ*. Todos los armónicos registrados presentaron una relación señal ruido (SNR) mayor a 10. En la última fila se presenta la media cuadrática de las diferencias.

Tabla 9. Comparación de fase de los principales armónicos de datos observados con modelos globales de marea

Fase [grados]

Nombre Estación	K1				O1				P1				M2				N2				S2				MF				Número								
	O	F	T	D	O	F	T	D	O	F	T	D	O	F	T	D	O	F	T	D	O	F	T	D	O	F	T	D	O	F	T	D	Forma				
<i>Puerto Estrella</i>	237	0	-5	-1	234	-2	-5	-1	234	8	4	4	143	2	-1	-13	126	-9	-7	-14	71	-13	-8	22	45	-49	-49										2.59
<i>Puerto Bolívar</i>	238	0	-1	0	237	-2	-3	-2	244	-2	-4	-6	126	2	2	-1	111	-5	4	-2	73	-22	-14	19	24	-54	-28										2.05
<i>Ballenas</i>	241	-1	-2	-2	235	2	1	2	241	3	0	-3	124	0	3	-3	109	-7	4	-3	54	-13	0	10	41	-45	-45										1.95
<i>Puerto Brisa</i>	241	-1	-3	-2	238	0	-2	0	243	1	-3	-4	126	0	3	-1	105	-2	5	0	62	-22	-11	-12	37	-41	-41										1.86
<i>Santa Marta</i>	241	-1	-3	-2	237	2	0	3	243	2	-2	-3	128	0	3	-2	107	-4	3	-2	49	-12	-1	-1	44	-48	-48										1.86
<i>Santa Marta 2013</i>	240	0	-2	-1	237	2	0	3	243	2	-2	-3	129	-1	2	-3	105	-2	5	0	49	-12	-1	-1	329	27	27										1.87
<i>Puerto Velero 2013</i>	240	0	-1	-2	242	-3	-4	-1	242	3	-1	-2	133	-1	1	-7	107	-2	4	-2	45	-11	-2	14	324	32	32										1.84
<i>Cartagena</i>	242	-1	-3	-3	243	-3	-4	-2	243	3	-2	-3	133	-1	2	-6	110	-6	1	-5	46	-17	-7	13	35	-39	-39										1.73
<i>Isla Naval</i>	242	-1	-3	-3	241	-1	-2	1	245	-5	-3	-5	133	0	4	-5	109	-5	3	-3	40	-14	-3	21	34	-38	-38										1.76
<i>Isla Naval 2013</i>	241	0	-2	-2	241	-1	0	2	243	-3	-1	-3	135	-2	2	-7	110	-6	2	-4	46	-20	-9	15	329	27	27										1.80
<i>Coveñas</i>	243	0	-3	-1	240	2	1	3	246	0	-3	-3	137	2	2	-7	109	2	4	1	34	-2	2	20	29	-33	-33										1.65
<i>Isla Fuerte</i>	242	0	-2	-2	239	2	1	2	245	1	-3	-4	137	0	3	-10	109	-3	5	-2	37	-20	-6	19	30	-34	-34										1.81
<i>Turbo</i>	243	4	4	15	244	-1	3	9	246	2	3	14	149	-89	8	19	117	-49	9	41	32	-128	-3	17	33	-37	-36										1.46
<i>Sapzurro</i>	242	0	-2	1	242	-1	-2	-4	244	2	-2	-1	149	2	2	-8	114	-2	5	10	25	-29	-10	-8	32	-36	-35										1.89
<i>El Porvenir</i>	240	0	-1	2	239	1	0	-1	241	4	0	1	157	9	2	6	122	0	2	12	12	-24	-16	-109	22	19	-25										1.81
<i>Limón</i>	239	-1	-3	-3	238	-1	-1	3	241	3	-2	-4	176	6	-1	-9	128	10	3	-9	329	-11	-13	-4	17	-21	-20										1.69
<i>San Andrés</i>	237	-1	-3	-1	237	-3	-2	-3	237	6	0	-1	156	1	3	-5	112	5	8	6	358	-7	-18	26	33	-37	-37										1.68
<i>Providencia</i>	235	-1	-1	0	235	-2	0	-2	235	7	2	1	150	1	3	-3	111	0	5	6	10	-9	-20	35	41	-45	-45										1.59
<i>Magueyes</i>	234	-2	-6	-2	228	-1	-5	-1	237	-1	-6	-7	68	-30	-44	15	115	-29	-102	-25	21	-3	0	10	34	-40	-39										9.70
<i>Bullen Bay</i>	238	-1	-2	-2	232	-1	-2	0	239	2	0	-5	151	1	2	-8	132	-5	6	-12	102	52	27	68	32	-36	-36										3.74
RMS		1.2	2.9	3.8		1.8	2.5	2.9		3.6	2.6	4.8		21.2	10.3	8.3		13.6	23.3	12.5		34.5	11.3	33.0		37.9	36.5										

Fase de los armónicos computados a partir de la serie de tiempo del 2018, salvo para Puerto Velero (2013) y las estaciones de Santa Marta e Isla Naval que fueron procesadas para ambos años. O representa el valor obtenido del análisis armónico a la serie de tiempo de nivel del mar. F es la diferencia del modelo FES2014 menos O, T es la diferencia del modelo TPX09 menos O y D la diferencia del modelo DTU10 menos O. Valores negativos representan una subestimación del modelo global respecto al valor obtenido de la serie *in situ*. Todos los armónicos registrados presentaron una relación señal ruido (SNR) mayor a 10. En la última fila se presenta la media cuadrática de las diferencias. En la última columna el número de forma calculado.

6.3 Descripción del comportamiento del residuo meteorológico

El análisis del residuo meteorológico de cada estación de nivel del mar para el año 2018 (y tres estaciones en el 2013) se resume en la Tabla 10. Se evidencia una mayor desviación estándar (>9 cm) en el residuo de las estaciones del norte (Puerto Estrella, Puerto Bolívar y Ballenas) disminuyendo (<5 cm) hacia el suroeste del área de estudio (Sapzurro, El Porvernir y Limón). Esta mayor dispersión es coincidente con el mayor rango del residuo de marea. El valor máximo en el residuo, el cual indica un aumento del nivel del mar sobre la marea por causas meteorológicas, se obtuvo en Puerto Estrella y Santa Marta (29.20 cm) y el valor mínimo en Puerto Bolívar (-40.17 cm); lo que concuerda con los sitios donde la desviación estándar es mayor.

Igualmente, se observa que las estaciones al norte del litoral, entre Puerto Estrella y Santa Marta, presentan los mayores rangos de los datos, los cuales varían en más de 55 cm y presentan desviaciones estándar mayores a 8.3 cm; para las demás estaciones el rango no supera los 46.87 cm (Turbo) y el mínimo se obtuvo en Limón con 31.79 cm. Nótese la importancia del residuo con respecto a la micro marea en el Mar Caribe. De acuerdo con Torres y Tsimplis (2014), los componentes astronómico y meteorológico del nivel del mar son importantes para la generación de extremos del nivel del mar en el Caribe. Adicionalmente, mostraron como el ciclo estacional es un importante componente del residuo meteorológico, por lo cual se analiza a continuación.

Las mayores amplitudes del ciclo anual, por encima de los 8 cm, se obtuvieron en las estaciones del norte del litoral Caribe colombiano y el este del área de estudio en Magueyes y Bullen Bay (Tabla 10). La máxima amplitud se registró en la estación de Puerto Bolívar con 12.7 ± 0.5 cm. En contraste, en Providencia, se registra la mínima amplitud con 0.56 ± 0.3 cm. En términos generales el ciclo anual tiene su valor máximo entre los meses de septiembre y octubre (246° a 290°), sin embargo, para las estaciones de Turbo y San Andrés, el valor máximo se alcanza en enero y febrero respectivamente (22° a 49°), lo que indica una fase casi opuesta a la de otras estaciones (Figura 10).

Tabla 10. Resultados obtenidos del análisis del residuo de marea de cada estación de nivel del mar para el año 2018 y algunas estaciones de 2013. ¹

Estación	Residuo de marea				Ciclos anual, semianual y estacional del residuo de marea						
	Desviación Estándar (cm)	Máximo (cm)	Mínimo (cm)	Rango (cm)	Amplitud Ciclo Anual (cm)	Fase ² Ciclo Anual	Amplitud Ciclo Semianual (cm)	Fase Ciclo ² Semianual	Máximo Estacional (cm) / (mes)	Mínimo Estacional (cm) / (mes)	Rango Estacional (cm)
<i>Puerto Estrella</i>	9.32	29.20	-27.34	56.54	11.61 ± 0.4	269 ± 1.3	7.65 ± 0.3	186 ± 2.1	19.23 (oct)	-10.6 (ene)	29.86
<i>Puerto Bolívar</i>	9.08	24.86	-40.17	65.03	12.73 ± 0.5	246 ± 1.2	7.03 ± 0.4	218 ± 3.6	17.39 (oct)	-16.8 (feb)	34.21
<i>Ballenas</i>	9.21	28.78	-29.67	58.45	9.60 ± 0.4	251 ± 2.1	7.47 ± 0.3	187 ± 2.1	16.55 (sep)	-12.2 (ene)	28.79
<i>Puerto Brisa</i>	8.70	24.73	-30.67	55.40	9.32 ± 0.4	258 ± 1.8	5.91 ± 0.3	189 ± 2.7	14.94 (oct)	-10.1 (ene)	25.09
<i>Santa Marta</i>	8.33	29.20	-26.60	55.80	8.78 ± 0.4	257 ± 1.9	5.44 ± 0.3	191 ± 2.9	13.90 (oct)	-9.60 (ene)	23.51
<i>Santa Marta 2013</i>	7.14	24.35	-19.00	43.35	7.06 ± 0.2	223 ± 2.1	3.88 ± 0.3	226 ± 4.0	7.57 (sep)	-10.6 (ene)	18.17
<i>Puerto Velero 2013</i>	6.34	15.39	-20.30	35.69	6.51 ± 0.2	249 ± 2.2	2.29 ± 0.2	290 ± 5.5	8.49 (oct)	-6.35 (mar)	14.84
<i>Cartagena</i>	5.92	18.52	-20.63	39.15	7.78 ± 0.2	264 ± 1.2	3.18 ± 0.2	165 ± 3.8	10.96 (sep)	-5.69 (may)	16.65
<i>Isla Naval</i>	5.35	18.20	-19.65	37.85	6.59 ± 0.2	270 ± 1.2	3.16 ± 0.2	164 ± 3.4	9.71 (sep)	-5.65 (may)	15.36
<i>Isla Naval 2013</i>	4.19	10.15	-16.87	27.03	3.78 ± 0.2	266 ± 2.9	1.98 ± 0.2	327 ± 5.1	3.57 (nov)	-5.71 (mar)	9.28
<i>Coveñas</i>	4.62	16.63	-15.28	31.91	5.00 ± 0.2	274 ± 1.5	2.28 ± 0.2	161 ± 4.4	7.18 (sep)	-4.61 (may)	11.79
<i>Isla Fuerte</i>	5.04	15.44	-17.71	33.15	5.72 ± 0.2	278 ± 1.7	3.34 ± 0.2	158 ± 3.2	8.83 (sep)	-6.17 (may)	15.01
<i>Turbo</i>	7.77	18.78	-28.09	46.87	5.70 ± 0.3	23 ± 3.7	4.47 ± 0.3	130 ± 3.7	9.03 (feb)	-8.69 (jun)	17.72
<i>Sapzurro</i>	4.73	14.87	-19.06	33.93	3.59 ± 0.2	290 ± 3.1	2.66 ± 0.2	163 ± 3.7	5.91 (sep)	-4.79 (jun)	10.71
<i>El Porvenir</i>	4.90	19.28	-15.01	34.29	4.75 ± 0.2	278 ± 1.9	2.89 ± 0.2	156 ± 3.7	7.43 (sep)	-5.28 (may)	12.71
<i>Limón</i>	4.63	16.96	-14.83	31.79	3.46 ± 0.2	280 ± 2.7	3.03 ± 0.2	134 ± 3.4	6.05 (sep)	-5.22 (may)	11.27
<i>San Andrés</i>	6.79	17.62	-22.69	40.31	4.69 ± 0.3	49 ± 4.2	3.24 ± 0.3	196 ± 4.8	6.70 (mar)	-7.07 (jul)	13.77
<i>Providencia</i>	6.92	21.96	-19.65	41.61	0.56 ± 0.3	293 ± 32.5	4.97 ± 0.3	121 ± 2.3	5.31 (sep)	-5.41 (jun)	10.72
<i>Magueyes</i>	4.90	22.02	-14.44	36.46	11.69 ± 0.3	289 ± 1.2	4.68 ± 0.2	140 ± 2.1	14.75 (sep)	-13.6 (may)	28.35
<i>Bullen Bay</i>	6.05	21.04	-18.19	39.23	8.80 ± 0.2	288 ± 1.2	2.55 ± 0.2	159 ± 5.2	10.77 (oct)	-8.78 (may)	19.55

¹ Residuo de marea a partir de datos horarios obtenidos como se indica en la sección 4.2.2. El ciclo estacional corresponde a la suma del ciclo anual y semianual.

² Fases en grados respecto al 1 de enero.

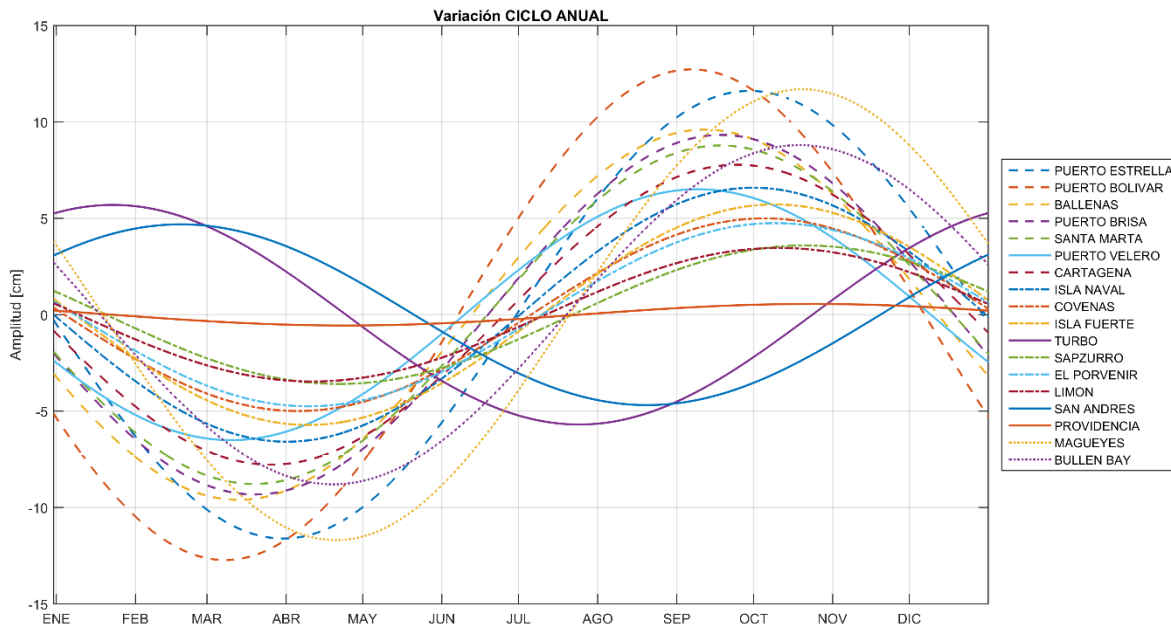


Figura 10. Variación temporal de los ciclos anuales estadísticamente significativos para el año 2018, a excepción de Puerto Velero que corresponde a 2013.

El ciclo semi-anual es menor al ciclo anual en todas las estaciones, salvo Providencia. Los valores más altos se obtuvieron al norte del litoral Caribe colombiano entre los 11°N y 13°N con más de 5 cm de amplitud (Figura 11), siendo Puerto Estrella la estación con la máxima amplitud de 7.6 ± 0.2 cm; para el resto de las estaciones la amplitud registrada se encontró desde los 2.2 ± 0.16 cm (Coveñas) hasta los 4.9 ± 0.17 cm (Providencia). En cuanto a la fase la mayoría de las estaciones presentan sus valores máximos en los meses de marzo-abril y septiembre-octubre (120° a 165°); las estaciones al norte de los 11°N presentan un retraso en sus fases alcanzando los máximos en los meses de abril y octubre (185° a 220°). Solo la estación de Puerto Velero, en el centro del litoral, presenta un retraso mayor en la fase con sus picos en los meses de mayo y noviembre ($290 \pm 5.5^\circ$), sin embargo, se debe tener en cuenta que para esta estación se usaron datos del año 2013 por ser los únicos completos para la presente investigación en este punto.

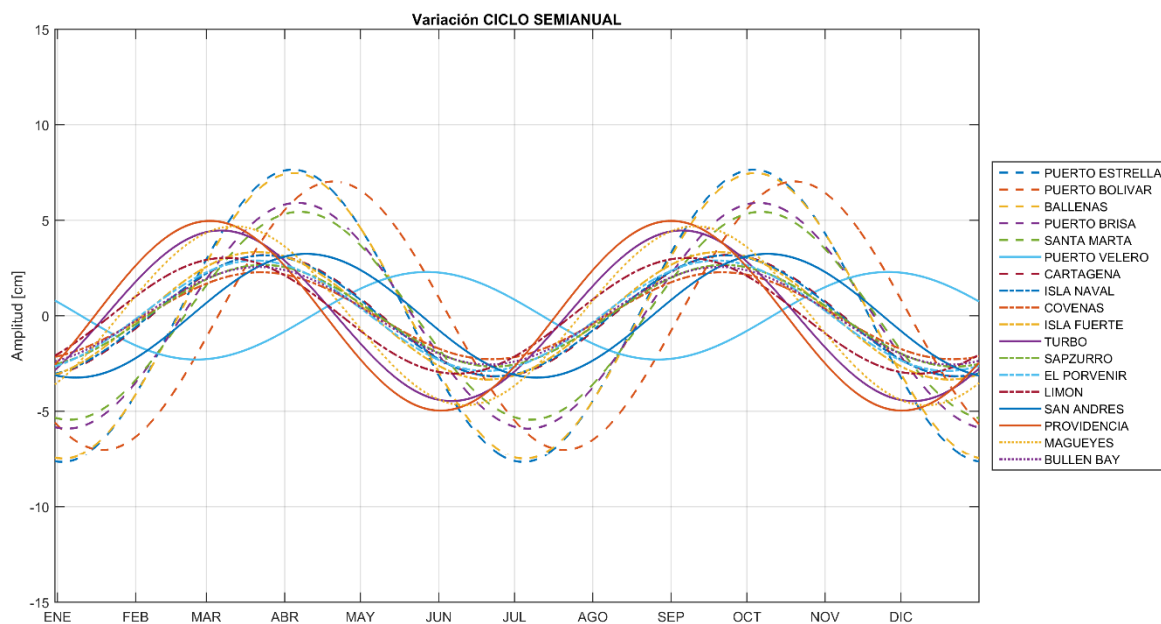


Figura 11. Variación temporal de los ciclos semi-anales estadísticamente significativos para el año 2018, a excepción de Puerto Velero que corresponde a 2013.

En la Figura 12 se muestra la variación estacional de todas las series de tiempo, como una sumatoria del ciclo anual y semi-anual. Esto es importante porque se ha encontrado que estos ciclos, en varios lugares del Caribe, no son ciclos que respondan a forzantes reales en esas frecuencias, sino que su sumatoria es la que permite comprender el comportamiento real del ciclo estacional del residuo meteorológico (Torres & Tsimplis, 2012).

Se puede observar que en la mayoría de las estaciones las mayores alturas se presentan entre los meses de septiembre y octubre con alturas que adicionan entre 5 cm y 20 cm al comportamiento de la marea. El componente meteorológico muestra como flujos de calor, presión atmosférica y cambios en circulación atmosférica y oceánica (principalmente), afectan el nivel del mar en la costa estacionalmente. Por tanto, hacia el norte de la costa colombiana, estas variaciones en el nivel del mar, causadas por fenómenos meteorológicos, son mayores que hacia el sur de la costa. Esto puede estar relacionado con mayores variaciones en los flujos de calor por su ubicación más al norte, la ubicación del chorro de viento de bajo nivel del Caribe (CLLJ) y corriente Caribe cerca a las costas de la Guajira y la surgencia, cercanía al paso de huracanes y giros oceánicos, entre otros (Montoya, 2019; Torres-Parra

et al. 2017; Torres & Tsimplis, 2012, 2013, 2014). El comportamiento particular del residuo meteorológico del nivel del mar ante estos forzantes es un tema de investigación a futuro y se debe tener en cuenta que estos cambios se dan en diferentes frecuencias.

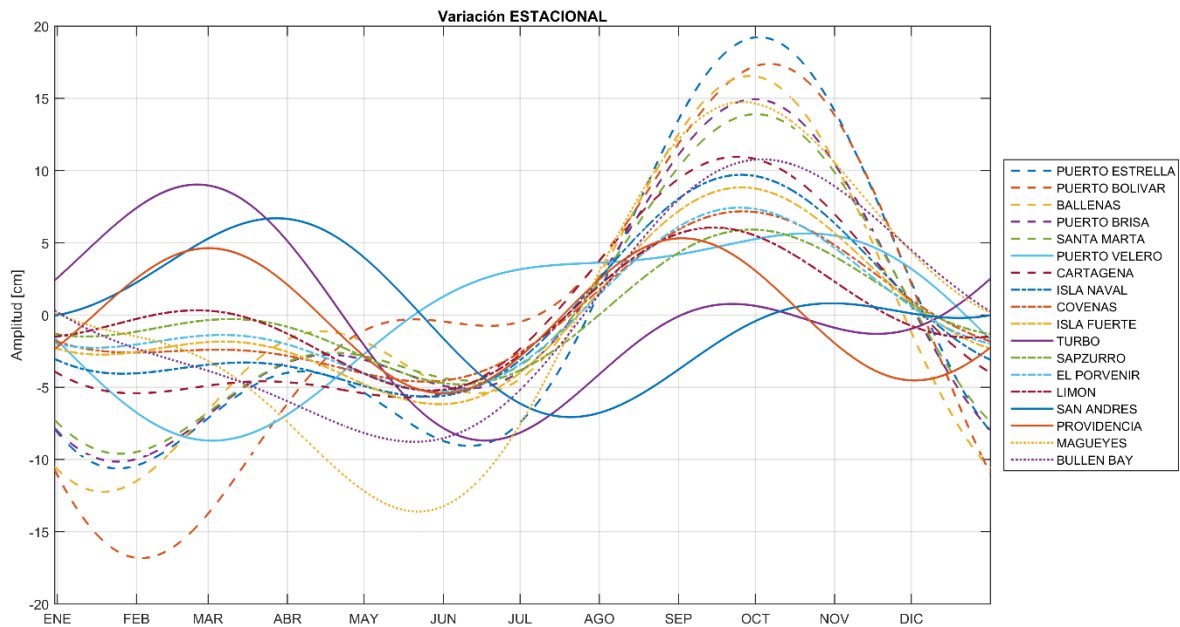


Figura 12. Variación estacional de los ciclos anuales y semianuales estadísticamente significativos para el año 2018, a excepción de Puerto Velero que corresponde a 2013.

Por otra parte, se destaca el comportamiento de las estaciones de Turbo, San Andrés y Providencia, donde a diferencia de las demás, las máximas alturas se presentan en los meses de marzo (Turbo y Providencia) y abril (San Andrés). Para San Andrés y Providencia el ciclo estacional es coincidente con la estacionalidad del giro Panamá-Colombia, indicando que las variaciones en el rotacional del estrés del viento dominan el ciclo estacional del nivel del mar en esta isla (Torres-Parra et al. 2017; Torres & Tsimplis, 2012).

También fue comparado el ciclo anual y semi-anual para las estaciones de Santa Marta e Isla Naval para el 2013 y 2018. En el ciclo anual de ambas estaciones, se evidencia como la amplitud del año 2013 fue menor, en promedio, con un 31% respecto al ciclo anual del año 2018; en cuanto a la fase el pico estas fueron menores en el 2013, con una diferencia de 34° en Santa Marta. De forma análoga el ciclo semi-anual se presenta un mes más tarde en comparación con el año 2018,

en el caso de Santa Marta $226^{\circ} \pm 4^{\circ}$, mientras que en Isla Naval $327^{\circ} \pm 5.1^{\circ}$ dos meses más tarde, este último con un comportamiento similar al presentado en Puerto Velero en 2013.

Por otra parte, al comparar el residuo de Santa Marta e Isla Naval entre el año 2013 y 2018, se observó que el rango del año 2013 es menor en promedio un 30% respecto al 2018, igualmente, existe una menor dispersión en los datos en ambas estaciones durante este año (2013). Esto indica lo variable en el tiempo de las variaciones meteorológicas que afectan el nivel del mar, dentro de las cuales también se incluyen las variaciones estacionales tal como lo demostraron Torres & Tsimplis (2012). Es debido a esta variabilidad del ciclo estacional que recomiendan usar por lo menos 5 años para evaluar este ciclo.

7. ESTIMACIÓN DE ARMÓNICOS EN LA COSTA QUE NO CUENTEN CON MEDICIONES *IN-SITU*

7.1 Introducción

Diferentes estudios sobre nivel del mar y la marea utilizan series de tiempo medidas en lugares particulares. En algunos casos se asume que estas series de tiempo son representativas para toda una región o área, lo que no considera condiciones específicas del borde costero como la configuración de la costa en áreas abiertas o semi-cerradas (bahías, estuarios, golfos, etc) (Orejarena-Rondón *et al.* 2018). Se debe tener presente que el comportamiento de la marea en un lugar particular está gobernado por las respuestas del océano y las cuencas a los forzantes astronómicos (Pugh, 1987), por lo tanto, sería ideal contar con una serie de tiempo medida para cada punto en la costa, lo cual es irrealizable. Es por ello que empleando técnicas de modelamiento numérico es posible obtener armónicos sintéticos que permitan representar la dinámica natural de la marea en un lugar.

De acuerdo con Fok (2012), los avances en la tecnología de altimetría satelital permitieron muestrear a nivel global las variaciones de la superficie del océano, principalmente después del lanzamiento del satélite TOPEX/POSEIDON. Estos registros geofísicos se han usado en numerosos estudios permitiendo importantes avances científicos como la mejora de los modelos globales de marea. Estos modelos, pueden ser utilizados en conjunto con un modelo hidrodinámico para realizar la propagación de la onda de marea desde aguas profundas hasta un punto de interés en la costa, como lo han aplicado diferentes investigadores como Orejarena-Rondón *et al.* (2018) y Torres Parra *et al.* (2008), pudiendo incluso simular procesos no lineales, que como lo afirma Ranji *et al.* (2016), es el aspecto más complejo para la predicción de la marea en las zonas costeras.

En este capítulo se documentan los principales resultados encontrados al aplicar una metodología para obtener las constituyentes armónicas de marea en un sitio en particular de la costa, cuando no existen mediciones instrumentales. Para esto se evalúa el desempeño de tres modelos globales de marea en la costa Caribe colombiana, así como la mejor configuración de un modelo hidrodinámico para

propagar la onda de marea hasta la costa, forzado con los armónicos de un modelo global de marea desde aguas profundas.

7.2 Comparación de modelos globales de marea para el Caribe colombiano

Se compararon la amplitud y fase de los armónicos extraídos de los modelos globales de marea (nodo más cercano a cada estación), descritos en la sección 4.1.2, con los armónicos obtenidos del análisis de 20 series de nivel del mar para los 18 lugares donde existen datos (dos estaciones con series de tiempo para el 2013 y 2018). Estos resultados se presentaron en las Tabla 8 y Tabla 9. Asimismo, la Tabla 11 permite observar la sumatoria cuadrática (RSS) de los errores cuadráticos medios tanto en amplitud como en fase (Ecuación 6) de los seis armónicos principales en los tres modelos globales de marea evaluados.

Tabla 11. RMS y RSS de las diferencias de amplitud y fase entre los valores medidos y los modelos globales de marea

MODELO		RMS CONSTITUYENTES ARMÓNICOS						RSS
		K1	O1	P1	M2	N2	S2	
FES2014	AMPLITUD (cm)	0.43	0.42	0.14	0.89	0.65	0.37	1.32
TPX09_v2a		0.47	0.33	0.16	1.09	0.27	0.20	1.29
DTU10		0.57	0.59	0.18	1.44	0.59	0.54	1.85
FES2014	FASE (grados)	1.2	1.8	3.6	21.2	13.6	34.5	42.9
TPX09_v2a		2.9	2.5	2.6	10.3	23.3	11.3	28.2
DTU10		3.8	2.9	4.8	8.3	12.5	33.0	36.8

El modelo global que presenta un mejor desempeño para el Caribe es el TPX09 debido que presenta los menores valores RSS, tanto en amplitud como en fase. Es de destacar que en amplitud la diferencia con el FES2014 es de solo 0.03 cm y con el DTU de 0.56 cm. En la fase se observa una diferencia mucho más marcada entre los modelos. En el caso del TPX09 y del FES2014 ambos son modelos globales de marea asimilados, mientras el DTU es un modelo semi-empírico, sin embargo, el TPX09 posee una resolución de 3.7 km, mientras que la del FES2014 es de 6.9 km y el DTU de 13.8 km; lo que permite que los nodos a partir de los cuales se extrajo la información del TPX09 se encuentren mucho más cerca de los puntos de

observación. Posiblemente esta mejor resolución espacial sea la razón para tener una menor diferencia en su fase respecto de los valores observados.

De acuerdo con lo anterior, se recomienda tomar los valores de amplitud y fase de los armónicos de TPXO9 para forzar la onda de marea desde aguas profundas hasta aguas someras. Es de destacar, que a la fecha no se conoce otro estudio que haya efectuado la comparación de diferentes modelos globales de marea en el Caribe colombiano, tomando como referencia información medida en las costas.

En la siguiente sección se emplea el modelo hidrodinámico MOHID, con el fin de establecer si la inclusión de un modelo hidrodinámico para propagar la onda de marea hacia la costa, permite mejorar la obtención de armónicos respecto a los valores observados.

7.3 Configuración y validación de un modelo hidrodinámico para la obtención de armónicos sintéticos de marea

Se empleó el modelo numérico MOHID desarrollado por el Instituto Superior Técnico – Facultad de Ingeniería Ambiental y Mecánica – Grupo de Modelamiento de Ambientes Marinos (Portugal), e Hidromod Ltda. (Portugal), tal como se describió en la Sección 4.2.3. Este modelo acepta como condición de borde información de una o varias series de tiempo de nivel del mar o las constituyentes armónicas de la marea como una solución impuesta; a partir de la cual, calcula el flujo hidrodinámico en la masa de agua, contenida dentro del dominio computacional. Sin embargo, con el fin de optimizar los tiempos de cómputo del modelo y poder evaluar la sensibilidad del mismo, ante diferentes resoluciones de malla y al número de forzantes empleados en la frontera para obtener la serie de marea; se realizaron simulaciones para 31 días del mes de enero de 2018, en San Andrés.

Una vez obtenidas las series modeladas de marea, se les realizó un análisis armónico utilizando la herramienta U_Tide con el fin de obtener la amplitud y fase de los principales constituyentes. Se establecieron las diferencias que existían entre los armónicos de la serie modelada (31 días), los del nodo más cercano del modelo global (TPXO9) al mareógrafo y la serie de tiempo medida para 31 días del mes de

enero de 2018; en la Tabla 12, se presentan las diferencias en amplitud entre armónicos, el RMS y el tiempo de cómputo utilizado para obtener la serie de marea de acuerdo a las diferentes configuraciones.

Los RMS muestran resultados iguales, sin embargo, existe una diferencia significativa en los tiempos de ejecución del modelo donde el menor tiempo obtenido fue de 19 minutos, cuando el modelo se ejecuta en una malla de 500 metros de resolución (separación entre nodos) con 1 solo punto como forzante de aguas profundas. Lo cual se explica, porque la malla de 250 metros tiene un total de 10.200 nodos de cálculo en comparación con los 2.580 que tiene la malla de 500 metros (Figura 13d), mucho menos que la primera y por ende un menor tiempo para cubrir el área total de cálculo por cada paso de tiempo.

Tabla 12. Evaluación de desempeño en función de la amplitud (cm) entre MOHID, el modelo Global TPXO9 y los datos observados para San Andrés.

	Observada	<i>Mohid</i>				TPXO9	<i>Mohid</i>			
		250m		500m			250m		500m	
<i>Armónicos</i>	Amplitud	1pto	4ptos	1pto	4ptos	Amplitud	1pto	4ptos	1pto	4ptos
<i>M2</i>	7.9	-0.4	-0.3	-0.4	-0.3	7.6	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>N2</i>	3.0	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	2.6	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>S2</i>	1.1	0.2	0.2	0.2	0.2	1.4	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2
<i>K1</i>	11.1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	9.0	2.0	2.0	2.0	2.0
<i>O1</i>	5.5	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	5.3	-0.3	-0.2	-0.3	-0.2
<i>Q1</i>	1.1	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	0.8	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
<i>RMS</i>		0.34	0.33	0.34	0.33		0.81	0.81	0.81	0.81
<i>Tiempo [minutos]</i>		237	367	19	65					

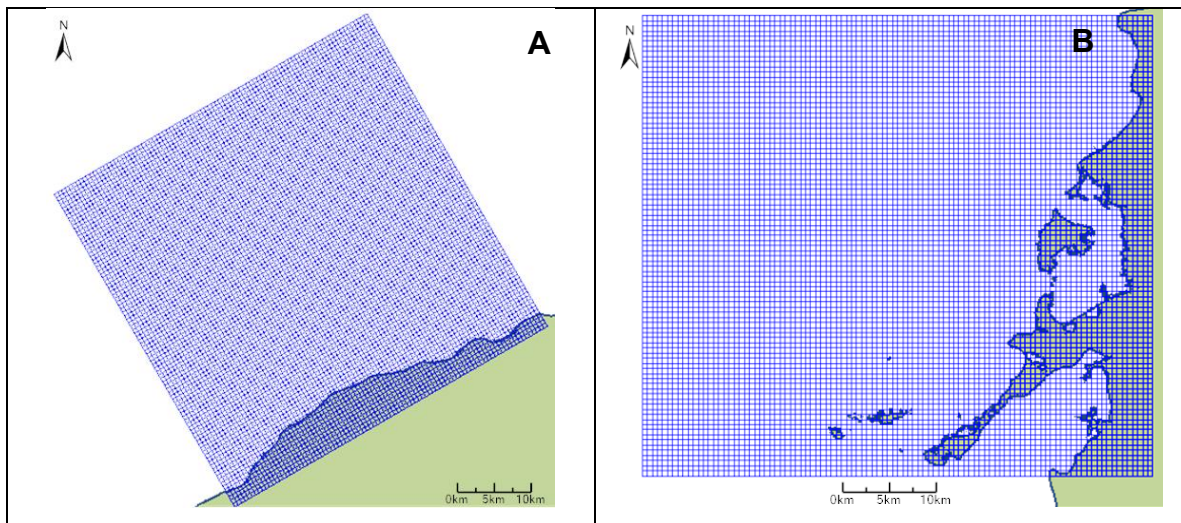
La Tabla 13 no presenta grandes diferencias en los RMS de la fase, al compararlo con las diferentes configuraciones del modelo hidrodinámico. Sin embargo, se observan diferencias significativas con la fase de los datos observados en los armónicos S2, N2 y Q1. Aunque son armónicos importantes, en esta etapa se evaluó el desempeño del modelo hidrodinámico en función del tiempo y la capacidad de representar los principales armónicos, adicional a esto solo se evalúan 31 días de simulación y por lo tanto en el caso de S2, este constituyente tiene un fuerte componente radiacional, principalmente hacia el sector de San Andrés como se

presentó en el Capítulo 6. Estas diferencias significativas se analizan más adelante una vez se obtiene un año completo de marea modelada.

Tabla 13. Evaluación de desempeño en función de la fase (°) entre MOHID, el modelo Global TPXO9 y los datos observados para San Andrés.

Resolución	Observada	Mohid				TPXO9	Mohid			
		250m		500m			250m		500m	
Armónicos	Fase	1pto	4ptos	1pto	4ptos	Fase	1pto	4ptos	1pto	4ptos
M2	150	8	9	8	9	159	-1	0	-1	0
N2	99	21	21	21	21	120	0	0	0	0
S2	11	-22	-23	-22	-23	340	9	8	9	8
K1	250	-3	-3	-3	-3	234	13	13	13	13
O1	233	2	2	2	2	235	0	0	0	0
Q1	204	24	24	24	24	229	-1	-1	-1	-1
RMS		16.22	16.53	16.22	16.53		6.48	6.24	6.48	6.24

De acuerdo con lo anterior, en la simulación de 366 días en cada una de las cuatro poblaciones seleccionadas (Ballenas, Cartagena, Turbo y San Andrés), se utilizaron mallas de 500 metros de resolución y un solo punto como forzante propagado desde un sitio con una profundidad de 1000 metros dentro del dominio computacional. La cobertura y orientación de los dominios computacionales en cada población se puede observar en la Figura 13.



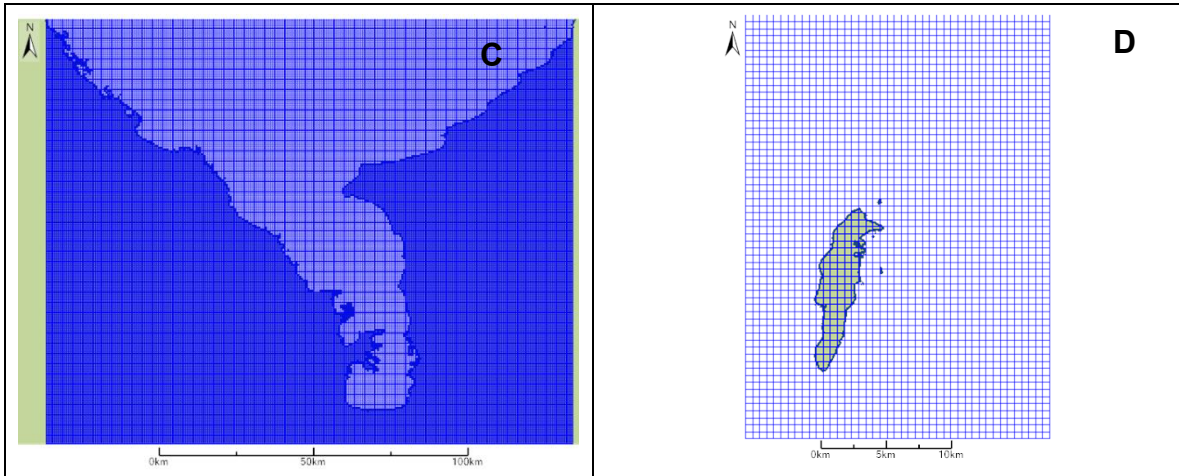


Figura 13. Dominios computacionales empleados en la propagación de la onda de marea desde aguas profundas en las poblaciones de: A) Ballenas, B) Cartagena, C) Turbo y D) San Andrés.

7.4 Evaluación de armónicos a partir de series de tiempo de marea modeladas

Se utilizaron los armónicos obtenidos de la serie de tiempo observada en el 2018 en Ballenas, Cartagena, Turbo y San Andrés (Tabla 8 y Tabla 9). Se tabularon las diferencias entre esta amplitud y fase observada y la de los armónicos calculados a partir de la serie de tiempo generada con el modelo hidrodinámico en el 2018 y los disponibles del modelo global en el nodo más cercano a cada estación. Valores negativos implican una subestimación y positivos sobre estimación, respecto a lo observado; los resultados se presentan en la Tabla 14 y la Tabla 15, donde el RMS_1 fue calculado solo con las diferencias de los armónicos más representativos del Caribe (K1, O1, P1, M2, S2, N2 y Mf) y el RMS_2 con las diferencias de todos los 15 constituyentes del modelo global TPX09 (Sección 4.2.3).

Se puede observar que en amplitud (Tabla 14) existen pocas diferencias entre lo observado, la modelación hidrodinámica y el modelo global de marea, a pesar de las diferentes configuraciones de costa y margen continental de los cuatro lugares evaluados. De igual forma, los valores de RMS_1 obtenidos en el modelo global son menores en todos los puertos respecto a los del modelo hidrodinámico, aunque son diferencias menores o iguales a 1 centímetro. Estos resultados indican, que en amplitud, el modelo global logra una buena representación de los armónicos costeros, incluso mejor que los obtenidos a partir de las simulaciones

hidrodinámicas que además tiene un costo computacional asociado a los tiempos de ejecución del modelo.

En la fase (Tabla 15) al igual que en la amplitud, el RMS_1 es menor en el modelo global para todos los puertos que en la simulación hidrodinámica. La diferencia más grande en el RMS_1 entre el modelo hidrodinámico y el modelo global se presenta en Turbo con 40° , donde la ubicación del punto del modelo global se encuentra a 200 m del lugar de instalación del mareógrafo, dentro del Golfo de Urabá.

Se destaca que el constituyente M_f , presenta diferencias muy grandes en fase, incluso al compararse con la fase de otros armónicos con amplitudes similares como S_2 o Q_1 . Esta diferencia es mucho mayor en los armónicos obtenidos a partir de la serie obtenida del modelo hidrodinámico. Esto puede obedecer a varias causas. Como se explicó en la sección 6.2, para la obtención de este constituyente a partir de datos observados; se requiere un análisis sucesivo de múltiples años (Crawford, 1982). Adicionalmente el SNR es el más bajo entre los 7 armónicos más importantes, lo cual indica mayor ruido en esta frecuencia. En el caso de las diferencias con el modelo TPX09, puede indicar problemas del modelo en la asimilación de datos en el periodo de M_f (13.66 días), al ser esta mucho mayor que los periodos de los componentes diurnos y semi-diurnos.

Por otra parte, se analizó el desempeño de todos los armónicos disponibles del modelo global con respecto a los armónicos de la serie observada (RMS_2); se puede observar que las diferencias son mayores con respecto a los principales armónicos, sin embargo, continúan estando por debajo de 1 centímetro. En la fase también se presentan mayores diferencias, generadas principalmente por armónicos de aguas someras (M_4 , M_{s4} y M_{n4}) y constituyentes con periodos mayores a 20 días (M_m). Se debe tener en cuenta que el aporte en amplitud de estos armónicos, apenas alcanza los 2.2 cm (M_{s4} en Turbo) pero estando normalmente por debajo de 1 cm. Por esta razón, se emplean los siete principales constituyentes armónicos en la generación del pronóstico, debido que estos contienen más del 90% de la energía en las ubicaciones analizadas.

Tabla 14. Amplitud (cm) de la serie de tiempo observada (O) en el 2018 y diferencias respecto de la simulación hidrodinámica (S) y modelo global TPX09 (T).

	<i>Ballenas</i>			<i>Cartagena</i>			<i>Turbo</i>			<i>San Andrés</i>		
	O	S	T	O	S	T	O	S	T	O	S	T
<i>M2*</i>	6.6	-0.12	-0.40	7.4	0.07	-0.06	10.2	0.10	-0.04	7.4	0.10	0.14
<i>S2*</i>	1.3	0.25	0.09	1.6	-0.09	-0.09	2.2	-0.32	-0.34	1.5	-0.07	-0.05
<i>N2*</i>	2.5	-0.11	-0.10	2.9	-0.19	-0.25	4.0	-0.34	-0.42	2.8	-0.14	-0.15
<i>K2</i>	0.4	0.00	0.01	0.4	-0.01	0.00	0.6	-0.09	-0.09	0.4	-0.06	-0.05
<i>K1*</i>	9.4	-0.36	-0.35	9.8	-0.29	-0.35	11.3	-0.60	-0.57	9.3	-0.40	-0.39
<i>O1*</i>	6.1	-0.46	-0.38	5.8	-0.07	-0.04	6.9	-0.46	-0.29	5.7	-0.37	-0.32
<i>P1*</i>	2.8	-0.05	-0.03	3.1	-0.13	-0.13	3.3	0.01	0.06	2.9	-0.19	-0.17
<i>Q1</i>	1.2	-0.31	-0.34	1.1	-0.20	-0.25	1.3	-0.27	-0.30	1.0	-0.16	-0.17
<i>Mm</i>	0.1	-0.05	0.76	1.2	-1.20	-0.38	2.5	-2.49	-1.66	1.4	-1.40	-0.59
<i>Mf*</i>	1.4	-1.40	0.26	1.3	-1.30	0.38	1.3	-1.30	0.42	1.3	-1.30	0.35
<i>M4</i>	0.0	0.01	0.01	0.1	0.05	0.04	2.1	0.13	-0.99	0.2	-0.02	-0.02
<i>Mn4</i>	0.0	-0.02	0.00	0.1	-0.10	-0.04	0.9	-0.80	-0.54	0.1	-0.10	-0.01
<i>Ms4</i>	0.0	-0.04	-0.02	0.1	-0.10	-0.01	2.2	-2.15	-1.52	0.2	-0.20	-0.03
<i>2n2</i>	0.6	-0.45	-0.49	0.5	-0.32	-0.37	0.8	-0.62	-0.63	0.5	-0.31	-0.30
<i>S1</i>	1.8	-1.49	-1.56	1.1	-0.77	-0.85	1.2	-0.85	-0.91	0.8	-0.47	-0.55
<i>RMS₁</i>		0.58	0.27		0.51	0.23		0.59	0.36		0.54	0.25
<i>RMS₂</i>		0.57	0.51		0.52	0.31		1.00	0.75		0.54	0.29

* El RMS₁ es calculado a partir de los principales constituyentes de la marea en el Caribe colombiano (K1, O1, P1, M2, S2, N2 y Mf). Para el RMS₂ se utilizaron todos los constituyentes del modelo global TPX09.

Tabla 15. Fase (grados respecto al 1 de enero) de la serie de tiempo observada (O) en el 2018 y diferencias respecto de la simulación hidrodinámica (S) y modelo global TPX09 (T).

	<i>Ballenas</i>					<i>Cartagena</i>					<i>Turbo</i>					<i>San Andrés</i>				
	O	SNR O	S	SNR S	T	O	SNR O	S	SNR S	T	O	SNR O	S	SNR S	T	O	SNR O	S	SNR S	T
<i>M2*</i>	124	56605	5	2E+08	3	133	96938	5	3E+08	3	149	91145	0	3E+08	8	156	92218	3	3E+08	3
<i>S2*</i>	54	4716	-2	1E+07	0	46	5166	-9	1E+07	-7	32	5044	-10	2E+07	-2	358	4453	-16	1E+07	-18
<i>N2*</i>	109	11501	2	3E+07	4	110	16477	3	2E+07	2	117	17557	3	5E+07	10	112	10605	9	4E+07	8
<i>K2</i>	67	318	-20	890000	-17	38	296	-6	850000	-4	31	385	-11	680	-3	346	324	-5	670000	-6
<i>K1*</i>	241	139859	-3	6E+08	-2	242	218050	-2	4E+08	-3	243	271681	-3	3E+08	4	237	255259	-2	4E+08	-2
<i>O1*</i>	235	57667	1	2E+08	1	243	99171	-3	1E+08	-4	244	85226	-3	1E+08	3	237	90313	-1	2E+08	-1
<i>P1*</i>	241	12647	-1	4E+07	0	243	21249	-2	4E+07	-1	246	16402	-4	3E+07	4	237	19124	1	4E+07	1
<i>Q1</i>	230	2303	-2	5E+06	-2	239	2826	-4	3E+06	-6	238	2826	-1	3E+06	4	229	2658	2	4E+06	1
<i>Mm</i>	56	4	-35	11	-64	344	27	157	6.5	9	359	71	108	930	-6	295	10	2	6.6	57
<i>Mf*</i>	41	20	-136	36	-44	35	35	-136	190	-38	33	19	-146	500	-36	33	10	98	2.6	-36
<i>M4</i>	206	16	-179	39000	-176	121	230	-41	380000	-45	165	370	-68	970000	-6	108	977	-23	850000	-22
<i>Mn4</i>	230	7	-179	15	67	358	83	129	80	-31	29	78	115	1800	12	357	193	-22	3.1	-39
<i>Ms4</i>	348	11	-135	6.5	-2	206	154	-74	22	-6	264	367	155	500	19	200	409	-179	3	-13
<i>2n2</i>	92	622	66	160000	79	93	352	76	130000	108	97	902	116	180000	117	90	319	135	290000	135
<i>S1</i>	352	5475	57	480000	-155	349	2803	50	390000	-158	7	3371	27	320000	170	78	1913	-41	650000	111
<i>RMS₁</i>			54		17			52		15			55		15			38		16
<i>RMS₂</i>			86		69			71		53			77		55			65		50

* El RMS₁ es calculado a partir de los principales constituyentes de la marea en el Caribe colombiano (K1, O1, P1, M2, S2, N2 y Mf). Para el RMS₂ se utilizaron todos los constituyentes del modelo global TPX09. De igual forma se presentan las relaciones señal ruido de los armónicos observados (SNR O) y de los simulados anuales (SNR S).

De acuerdo con lo anterior, la simulación hidrodinámica como el modelo global representan muy bien los principales constituyentes armónicos para el Caribe colombiano, incluso en lugares de amplia plataforma continental como es el caso de Turbo. Por lo cual, en los lugares donde no hay datos observados se pueden emplear directamente los datos del modelo global TPX09, tomando la información del nodo más cercano al punto de interés. Para esto se recomienda utilizar los siguientes armónicos dada su amplitud y SNR observados en la Tabla 14 y la Tabla 15: K1, O1, P1, M2, S2, N2 y Mf.

Llama la atención el caso de S1 sobre todo en Ballenas, donde su amplitud es mayor que la de S2 y Mf. A pesar de tener un fuerte SNR, no se recomienda emplearlo cuando no existan datos observados, debido a que tiene una gran diferencia en la fase con el TPX09, como también por no tener una amplitud mayor en las otras estaciones analizadas.

8. PREDICCIÓN DE LA MAREA A PARTIR DE ARMÓNICOS MEDIDOS O DE MODELOS DE MAREA GLOBALES

8.1 Introducción

Las mareas juegan un rol importante en el desarrollo de la economía de un país y desarrollo social de las comunidades que habitan cerca a la costa. En aguas costeras, las variaciones de nivel del mar debido a las mareas, tiene aplicaciones en procesos físicos tal como la disipación de energía o la surgencia de aguas profundas que está directamente relacionada a la disponibilidad de nutrientes y por tanto, con la cadena trófica. Igualmente, es importante para operaciones de tráfico marítimo y el movimiento de los buques en puertos y muelles, donde se requieren datos de mareas en tiempo real. En la disciplina de la ingeniería de costas, la información de los niveles instantáneos del agua son requeridos para el planeamiento y diseño de estructuras costeras que tienen una expectativa de vida de varias décadas (Rose, Bhaskaran, & Kani, 2015). Por tanto, contar con pronósticos adecuados de la marea en la costa es primordial para muchas actividades.

En el Caribe colombiano diferentes autores como Kjerfve, (1981); Lizano, (2006); Molares B., (2004); Torres Parra et al. (2008); Torres & Tsimplis, (2011); han investigado las mareas de forma directa o indirecta. Esto ha sentado una buena base de conocimiento sobre este fenómeno en Colombia, sin embargo, en algunos casos solo se ha llegado a la identificación de los constituyentes armónicos sin generar o evaluar la calidad de los pronósticos que se puedan obtener a partir de estos, los cuales se encuentran limitados en cuanto a la cobertura geográfica de las series de tiempo de nivel del mar disponibles.

La predicción de las mareas es única en el mundo de la predicción geofísica, ya que no existe otro fenómeno donde toda su energía sea conocida *a priori* y se encuentre solo en frecuencias muy específicas (Parker, 2007). Es por ello que en este capítulo se estudia y evalúa la generación de pronósticos de mareas para el Caribe colombiano a partir de las constituyentes armónicas obtenidas con mediciones *in-situ* o a partir de modelos de marea globales (Sección 7.4).

Dentro de esta evaluación, se tiene en cuenta el aporte de los componentes anuales y semi-anuales para poder generar un buen pronóstico, a pesar que el componente astronómico de S_a y S_{sa} son muy pequeños en comparación a otros constituyentes de marea. Si estos armónicos son evaluados en un análisis armónico de una serie anual de nivel mar, se observa que las amplitudes observadas son mayores a las que se esperaría del forzamiento puramente astronómico (Tabla 7). Esto es porque la energía en un ciclo por año (S_a) o medio año (S_{sa}) están influenciados por cambios estacionales en variables meteorológicas como presión atmosférica, vientos y temperatura que afectan el nivel del mar. Por lo tanto, para realizar la mejor predicción de nivel del mar posible, es recomendable incluir estas causas meteorológicas imponiendo las constantes armónicas de S_a y S_{sa} (Parker, 2007). En este trabajo, las variaciones de S_a y S_{sa} son incluidas a partir de valores obtenidos de altimetría satelital, en los casos de no tener datos observados de por lo menos un año en el lugar de interés.

De igual forma, las predicciones son realizadas aplicando las correcciones nodales que son importantes en el Caribe (Torres & Tsimplis, 2011). Análisis realizados de un año de datos en el tiempo de la máxima declinación lunar dará valores de M2 hasta 7.5% menores a los que se obtendrían 9.3 años después (Pugh & Woodworth, 2014), por lo cual, las predicciones debe ser ajustadas para la fecha en la que se genera. En la Figura 14 se observa la variación de la amplitud y fase del constituyente K1 para la isla de San Andrés, obtenido a partir del análisis armónico de la serie de tiempo con control de calidad, para cada año entre 2014 y 2019, sin corrección nodal; el punto central representa el valor promedio de cada año y las barras de error los intervalos de confianza calculados a un 95%. En la amplitud el valor máximo alcanza de 9.15 cm y mínimo de 8.30 cm con un rango de 0.84 cm (max-min); en la fase, el valor máximo es de 247° y mínimo de 231° . La evaluación completa de la variación nodal requiere de 19 años de datos. Debido a estas variaciones que se observan año a año, la generación de pronósticos se realizó incluyendo la corrección nodal.

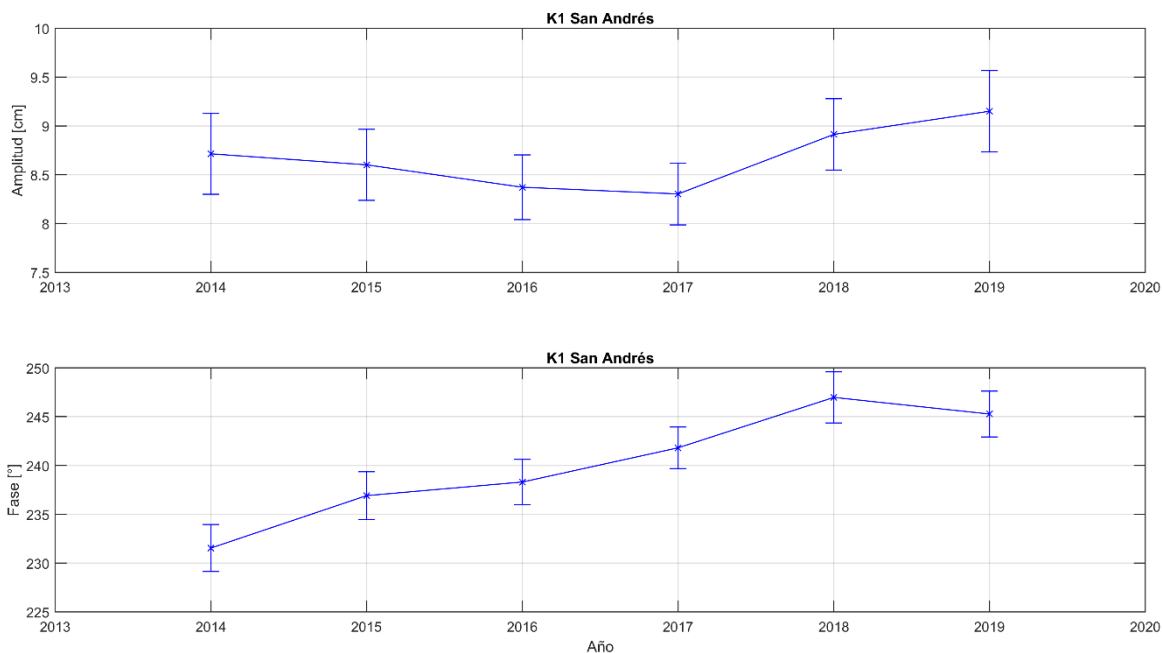


Figura 14. Modulación nodal de K1, amplitud (superior) y fase (inferior) para la estación de San Andrés del año 2014 al 2019.

8.2 Evaluación de la calidad de los pronósticos de marea

La calidad de los pronósticos fue evaluada a partir de las dos series de marea pronosticadas para el 2019. La primera utilizando datos medidos en el 2018, lo cual simula los pronósticos cuando se cuentan con observaciones del nivel del mar. La segunda con datos del modelo global TPX09, incluyendo la variación de Sa y Ssa a partir de datos de altimetría del 2018 (sección 4.2.4), obteniendo los pronósticos cuando no se tienen observaciones de nivel del mar. Las series pronosticadas fueron contrastadas con la serie de marea generada con datos de nivel del mar observados en el 2019, la cual se asume como la de mayor exactitud. Para la comparación se analizaron las diferencias entre los principales armónicos y el coeficiente de correlación (r) de la serie de tiempo.

En el caso del pronóstico simulando un lugar sin datos observados, en adición a los armónicos del modelo TPX09, se analizaron datos diarios de ADT entre el 31 de diciembre de 2017 y el 31 de diciembre de 2018, donde se obtuvieron para Sa amplitudes entre 1.6 cm y 5.7 cm en las cuatro poblaciones (Tabla 16), y fases entre 50° y 268° (Tabla 17). Para Ssa se calcularon amplitudes entre 0.9 cm y 4.5 cm y

fases entre 29° y 356°. Al comparar estos valores con los calculados a partir de datos de 2019, se observan diferencias significativas que en amplitud alcanzan los 4.5 cm (Sa en San Andrés) y en fase de hasta 155° (Sa en San Andrés) y 151° (Ssa en Turbo). Esto se debe a la alta variabilidad de los factores meteorológicos en el Caribe que afectan las mediciones de nivel mar entre un año y otro en estas frecuencias (Torres & Tsimplis, 2012). Estos resultados muestran la necesidad de mejorar el procedimiento para incluir Sa y Ssa en los pronósticos de marea cuando no se cuente con observaciones de nivel del mar.

Tabla 16. Amplitud (cm) de los armónicos de la serie de 2019 (R) y diferencias respecto al pronóstico con datos de 2018 (O) y pronóstico con los armónicos del modelo global TPX09 (T) ¹

	<i>Ballenas</i>			<i>Cartagena</i>			<i>Turbo</i>			<i>San Andrés</i>		
	R	O	T	R	O	T	R	O	T	R	O	T
<i>M2</i>	6.6	0.2	-0.3	7.4	0.1	0.1	10.3	0.1	0.0	7.3	0.2	0.4
<i>S2</i>	1.4	-0.1	0.0	1.8	-0.1	-0.2	2.4	-0.2	-0.5	1.6	-0.1	-0.1
<i>N2</i>	2.3	0.2	0.1	2.7	0.2	0.0	4.0	0.0	-0.4	2.7	0.2	0.0
<i>K1</i>	9.5	-0.2	-0.6	9.6	0.0	-0.3	11.1	0.0	-0.6	9.3	-0.1	-0.5
<i>O1</i>	5.6	0.2	-0.1	5.7	-0.1	-0.1	6.7	0.0	-0.3	5.4	0.0	-0.3
<i>P1</i>	2.9	-0.1	-0.1	2.8	0.2	0.1	3.2	0.1	0.1	2.8	0.1	-0.1
<i>Mf</i>	2.1	-0.8	-0.5	1.7	-0.4	0.0	1.5	-0.1	0.2	1.4	0.2	0.3
<i>Sa</i>	9.7	-0.9	-4.0	7.3	-0.4	-1.7	4.5	1.5	-2.9	1.2	4.0	4.5
<i>Ssa</i>	8.2	0.2	-3.7	2.9	0.5	0.5	2.1	2.9	-1.1	1.9	3.4	-1.0
RMS		0.4	1.8		0.3	0.6		1.1	1.1		1.7	1.5
r²		0.98	0.94		0.98	0.95		0.96	0.91		0.90	0.85

¹ Los valores de referencia de amplitud (R) corresponden al año 2019 sin corrección nodal, los cuales fueron obtenidos a partir de datos medidos durante ese mismo año; las diferencias de amplitud a partir de datos observados en el 2018 (O) y del modelo global TPX09 (T), se calcularon de los armónicos del pronóstico de la marea generada para el año 2019 sin corrección nodal.

² El coeficiente de correlación (r) se calculó al comparar las series de marea de 2019, todas ellas con corrección nodal.

La Tabla 16 muestra los resultados al comparar las amplitudes de los principales armónicos entre la serie de marea generada con datos de 2019 y las series pronosticadas a partir de datos medidos en el 2018 (O) y los armónicos del TPX09 (T). Se puede observar que el valor más alto en el RMS de las diferencias tanto para O como T, se obtuvo en San Andrés con 1.7 cm y 1.5 cm respectivamente; mientras que en Cartagena se obtuvieron las menores diferencias con 0.3 cm para O y 0.6

cm para T. De igual forma se analizó la diferencia entre los RMS de las dos metodologías para una misma población, encontrando que la mayor diferencia se presenta en Ballenas (1.4 cm) y la menor en Turbo (0 cm). Las únicas diferencias entre armónicos mayores a 1 cm se observan en Sa y Ssa, lo cual se debe a la gran variabilidad de este armónico en el Caribe (Torres & Tsimplis, 2012), lo cual también es evidente a partir de las diferencias de amplitud y fase entre R y O. En promedio, el RMS es levemente menor en los datos observados (0.9 cm) en comparación con los datos del modelo (1.3 cm). Esto indicaría los buenos resultados que se logran en la obtención de armónicos de marea a partir de las dos metodologías en el Mar Caribe.

Tabla 17. Fase (° a partir del 1 de enero) de los armónicos de la serie de 2019 (R) y diferencias respecto al pronóstico con datos de 2018 (O) y pronóstico con los armónicos del modelo global TPX09 (T) ¹

	<i>Ballenas</i>			<i>Cartagena</i>			<i>Turbo</i>			<i>San Andrés</i>		
	R	O	T	R	O	T	R	O	T	R	O	T
<i>M2</i>	127	1	-2	135	0	-3	152	1	-7	158	0	-3
<i>S2</i>	57	3	2	42	-3	4	27	-4	-3	355	-2	15
<i>N2</i>	113	2	-2	114	2	1	123	4	-5	120	6	-2
<i>K1</i>	251	1	3	250	-1	2	252	0	-4	246	0	2
<i>O1</i>	225	1	0	232	1	4	234	1	-2	227	1	3
<i>P1</i>	244	3	2	242	-2	-1	246	-1	-5	239	0	0
<i>Mf</i>	357	-51	0	19	-18	22	349	-45	-9	15	-15	18
<i>Sa</i>	248	9	-1	246	-14	-17	16	-10	108	255	-61	-155
<i>Ssa</i>	53	11	25	64	24	68	287	-40	-151	94	27	59
RMS		17.7	8.4		11.0	24.6		20.4	62.1		22.9	55.8

¹ Los valores de referencia de amplitud (R) corresponden al año 2019 sin corrección nodal, los cuales fueron obtenidos a partir de datos medidos durante ese mismo año; las diferencias de amplitud a partir de datos observados (O) y del modelo global TPX09 (T), se calcularon de los armónicos del pronóstico de la marea generada para el año 2019 sin corrección nodal.

Por otra parte, la Tabla 17 presenta las comparaciones efectuadas en la fase en las cuatro poblaciones con las dos metodologías. En esta se puede observar que las diferencias en los constituyentes M2, S2, N2, K1, O1 y P1 no sobre pasan los 15° y este valor más alto solo se presenta en San Andrés con el constituyente S2, el cual está fuertemente influenciado por las variaciones meteorológicas. Asimismo, se observan diferencias significativas en los constituyentes con periodos mayores a 13 días. En algunos casos el constituyente Mf llega a presentar diferencias menores

en fase cuando el pronóstico es generado con el modelo global a cuando se realiza con datos observados, como el caso de Ballenas y Turbo. Esto se da posiblemente porque el modelo global utiliza múltiples años de altimetría satelital en la asimilación de datos, lo que permite un mejor ajuste en M_f (Crawford, 1982), sin embargo, la respuesta de los constituyentes es única en cada sector y es por ello que para las otras poblaciones (Cartagena y San Andrés) las diferencias de fase a partir de datos observados es menor.

Los coeficientes de correlación (r) también fueron calculados, con el fin de comparar los pronósticos obtenidos por ambas metodologías con respecto a la serie de marea de 2019, los resultados se presentan en la última fila de la Tabla 16. En términos generales se observa una muy buena correlación directa en ambas metodologías. Para el pronóstico de marea a partir de datos observados en el 2018, el promedio de la correlación en las cuatro poblaciones alcanza 0.96, mientras que para el pronóstico a partir del modelo global es de 0.91. Esto indica una leve ventaja en el pronóstico de marea si se emplean datos observados que si se hace a partir de datos del modelo TPX09 y ADT. La mayor correlación obtenida fue de 0.98 para las poblaciones de Ballenas y Cartagena, obtenidas a partir de datos medidos y la más baja de 0.85 en San Andrés con el pronóstico generado a partir de datos del modelo global. Sin embargo, como se explicó en la Sección 6.3 la isla de San Andrés está bajo la influencia del giro Panamá – Colombia y la variabilidad año a año de los armónicos S_a y S_{sa} es muy alta; por lo cual obtuvo el RMS más alto y el coeficiente de correlación más bajo de las cuatro poblaciones.

Al comparar los resultados de ambas metodologías, se puede concluir que presentan una buena correlación para los puertos del Caribe colombiano, sin embargo, la obtención de pronósticos a partir de armónicos medidos presenta en promedio una correlación más alta con respecto a la empleada para lugares sin mediciones. Por lo cual, aunque ambas metodologías arrojan muy buenos resultados, es recomendable generar los pronósticos de marea para el Caribe colombiano a partir de los datos medidos en sitio. No obstante, la generación de pronósticos usando el modelo global TPX09 debe estar limitada únicamente a

aquellos lugares en los que no se tenga información medida de 366 días anteriores, utilizando los principales constituyentes armónicos M2, N2, S2, K1, O1, P1 y Mf e imponiendo los valores de amplitud y fase de Sa y Ssa obtenidos del año inmediatamente anterior de datos de Topografía Dinámica Absoluta. La mejor forma de incluir las variaciones estacionales en los pronósticos de marea en el Caribe, es un aspecto que debe continuar siendo investigado.

9. DISCUSIÓN

El estudio de la marea en las costas es de gran importancia teniendo en cuenta su influencia en procesos como la seguridad a la navegación, la erosión, inundaciones costeras, entre otros. Para poder analizar el comportamiento de la marea en la costa es necesario contar con series de tiempo de nivel del mar, las cuales están sujetas a diferentes tipos de errores, los cuales deben ser corregidos mediante procesos de control de calidad a los datos.

El control de calidad a las series de tiempo de nivel del mar recopiladas por DIMAR en las costas colombianas se discutió en el capítulo 5. Este proceso es importante para eliminar datos atípicos en la señal y efectuar un filtrado a los datos de alta frecuencia de nivel del mar, teniendo en cuenta que la energía de las constituyentes armónicas de la marea se puede enmascarar por otras frecuencias, lo que se considera como ruido y por tanto su cuantificación en el análisis armónico puede no ser precisa. A partir del análisis de diferentes filtros de alta frecuencia, se determinó que la media móvil por saltos presenta un mejor desempeño al mantener la energía de las componentes diurnas y semi-diurnas, sin presentar retardo en fase y mantener una mayor cantidad de datos respecto a la media móvil tradicional y al filtro Savitzky-Golay.

El análisis de las diferentes series de tiempo mostró como resultado que el sensor de nivel del mar, a partir del principio de funcionamiento de radar (RLS), tiene un mejor desempeño si se compara con los sensores que funcionan por burbujeo o por presión. Igualmente, las estaciones del norte del litoral colombiano presentan un mayor porcentaje de datos faltantes debido principalmente a las condiciones oceanográficas y meteorológicas más intensas que predominan en el área. De igual forma, se presentó un procedimiento para la corrección de los cambios verticales del datum en cada serie de tiempo, a partir de la imposición de la tendencia obtenida de altimetría satelital (Torres Parra, 2013). Aunque para analizar el comportamiento de la marea, esta corrección no es indispensable (UNESCO/COI, 2012), si es un procedimiento útil para el análisis del residuo meteorológico, variaciones estacionales o tendencias en el nivel del mar. Este procedimiento de control de

calidad se sugiere sea aplicado de manera regular a las series de tiempo de nivel del mar obtenidas y administradas por DIMAR.

De igual forma, a partir de estas 20 series de tiempo de nivel del mar a las que se les aplicó el procedimiento de control de calidad, se analizó la marea y residuo meteorológico en las costas de Colombia en el Mar Caribe. 17 estaciones correspondían al 2018 y una estación (Puerto Velero) a un año entre el 2013 y 2014. A las estaciones de Santa Marta e Isla Naval adicionalmente se le analizaron las series de tiempo de estos dos periodos. Teniendo en cuenta que las amplitudes de los armónicos de marea en el Caribe son del mismo orden de magnitud que las amplitudes de las variaciones estacionales forzadas principalmente por variables meteorológicas (Torres & Tsimplis, 2012), no se incluyeron en la marea los armónicos S_a y S_{sa} , dejándolos en el residuo meteorológico.

Los resultados de la marea confirman lo expuesto por Torres & Tsimplis (2011), donde identificaron que los principales constituyentes armónicos diurnos para el Caribe corresponden a K_1 , O_1 y P_1 , semi-diurnos a M_2 , N_2 y S_2 y M_f como el más importante de largo plazo. Siendo K_1 el armónico más importante de todos en todas las estaciones, seguido por M_2 . N_2 es el segundo armónico semi-diurno más importante, tiene amplitudes menores a la mitad de M_2 , lo que es consecuente con el bajo aporte de los constituyentes semi-diurnos a la marea en el Caribe. Se evidenció que S_2 presenta un comportamiento que difiere respecto a los otros constituyentes semi-diurnos hacia el suroeste de la Cuenca Colombia, reafirmando lo expuesto por Kjerfve (1981) y Torres & Tsimplis (2011). En este sector las diferencias de amplitud y fase de S_2 respecto a los modelos globales son significativas; sin embargo, se debe tener presente que este constituyente responde al forzamiento tanto astronómico como atmosférico donde este último corresponde a un 16% de la parte astronómica (Medvedev et al., 2013).

En términos generales, los modelos globales de marea mostraron muy buenos resultados para el Mar Caribe. Al analizar las diferencias de M_f con modelo globales de marea (FES2014, TPX09 y DTU) se evidenció que un año de datos de nivel del mar no es suficiente para obtener su amplitud y fase de forma precisa, por lo que

se recomienda calcular este armónico a partir de por lo menos 5 años de datos, coincidiendo con Crawford (1982) y Torres & Tsimplis (2011). Las principales diferencias en los constituyentes K1, O1, M2 y N2 con respecto a los modelos globales se presentaron en Turbo y Coveñas, lo que puede estar asociado a la respuesta que tiene la onda por la configuración de la costa donde se encuentran los mareógrafos, teniendo en cuenta que Coveñas se encuentra dentro del Golfo de Morrosquillo y Turbo en el Golfo de Urabá, ambos con amplias plataformas continentales.

Del análisis del residuo de marea se pudo determinar que en la parte norte del litoral colombiano se presentan los mayores rangos, siendo Puerto Bolívar el máximo con 65 cm, en tanto que para las demás estaciones el rango se mantiene entre 31 cm y 59 cm. Por lo tanto, debido a la naturaleza micro mareal del Caribe, el residuo meteorológico es muy importante en la generación de extremos en el Caribe (Torres & Tsimplis, 2014), por lo que se sugiere continuar el estudio de su comportamiento y forzantes. En esta tesis en particular, se determinó la variación estacional del residuo meteorológico en las costas, como una sumatoria del ciclo anual y el semi-anual. Se encontró que los valores máximos se presentan en los meses de septiembre y octubre en la mayoría de las estaciones del Caribe colombiano, sin embargo, en las estaciones de Turbo y Providencia este valor máximo se presenta en marzo y en San Andrés en el mes de abril. Los resultados de esta investigación confirman, con datos medidos, la estacionalidad presentada por Torres-Parra et al. (2017) y Torres & Tsimplis (2012), con algunas diferencias hacia el archipiélago de San Andrés y Providencia en los últimos meses del año. Sin embargo, este sector está fuertemente influenciado por el Giro Panamá-Colombia, por lo que se requieren más años para poder tener una climatología precisa del ciclo estacional. El trabajo de Torres & Tsimplis (2012), también propone una zonificación del ciclo estacional la cual igualmente es confirmada en esta tesis.

Por otra parte, al comparar el residuo de Santa Marta e Isla Naval entre el año 2013 y 2018, se observó que el rango del año 2013 es menor en promedio un 30% respecto al 2018, así como una menor dispersión en los datos en ambas estaciones

durante el 2013. Esto indica lo variable en el tiempo del residuo meteorológico del nivel del mar, dentro de las cuales se incluyen las variaciones estacionales. Estos resultados apoyan la recomendación de (Torres & Tsimplis, 2012) para usar por lo menos 5 años para evaluar el ciclo estacional.

Además, los datos de las estaciones de nivel del mar con control de calidad permitieron efectuar una evaluación de los tres modelos globales de marea, antes mencionados, para el Caribe. De este análisis se demostró que el modelo global con un mejor desempeño en la región es el TPX09, teniendo en cuenta que presentó los menores valores RSS, tanto en amplitud como en fase. El TPX09 posee una resolución de 3.7 km lo que permite que los nodos a partir de los cuales se extrajo la información se encuentren mucho más cerca de los puntos de observación. Posiblemente esta mejor resolución espacial sea la razón para tener una menor diferencia en su amplitud y fase respecto de los valores observados.

Otro objetivo de la tesis era el de proponer un procedimiento para obtener pronósticos de marea en lugares que carezcan de observaciones de nivel del mar. Para esto, el TPX09 fue utilizado como condiciones de borde, para propagar la onda de marea desde aguas profundas (mínimo 1000 m) hasta lugares en los que no se cuenta con mediciones. Las pruebas de desempeño demostraron que la propagación de la onda de marea se puede efectuar usando un solo nodo de modelo global como condición de frontera y una malla regular de 500 m de resolución espacial, lo que reduce los tiempos de cómputo sin sacrificar la calidad de los resultados. Para la evaluación de este procedimiento la onda fue propagada por un año (366 días) en cuatro sectores del Caribe colombiano con características diferentes en su plataforma continental. Se compararon los armónicos obtenidos de esta serie sintética con la de los armónicos de la serie de nivel del mar observado y la del modelo global de marea obtenida a partir de los armónicos del nodo más cercano al mareógrafo en estos cuatro lugares. La evaluación de la amplitud y fase (Capítulo 7), permitió determinar que para lugares en los que no se tienen mediciones de nivel del mar, para el pronóstico de la marea se recomienda utilizar los valores de los principales constituyentes armónicos del modelo global de marea,

que afectan el Mar Caribe (K1, O1, P1, M2, N2, S2 y Mf), extraídos directamente del nodo más cercano al punto de interés, ya que se evita el uso de un modelo hidrodinámico para propagar la onda de marea sin sacrificar la calidad de los pronósticos de marea obtenidos.

Finalmente, se determinó el mejor procedimiento para pronosticar la marea en el Caribe colombiano en dos casos, (i) de contar con observaciones de nivel del mar o (ii) en el caso de no contar con datos. Con los constituyentes armónicos obtenidos de una serie de tiempo medida del 2018 y de una sintética (usando los armónicos del modelo global de marea), se efectuó el pronóstico de marea para el 2019 en cuatro poblaciones del Caribe, incluyendo la corrección nodal, teniendo en cuenta que esta variabilidad es importante en el Caribe (Torres & Tsimplis, 2011). A partir de esta evaluación, se recomienda utilizar en los pronósticos los siguientes armónicos: K1, O1, P1, M2, N2, S2 y Mf. Para los pronósticos a partir de datos observados se pueden incluir otros armónicos importantes localmente, siempre y cuando la relación señal-ruido sea grande (>10).

De igual forma, para el caso de los pronósticos generados con datos observados, se evidenció la importancia de efectuarlos a partir de series con una longitud mínima de 366 días, con el fin de poder incluir Sa, el cual junto con Ssa determinan las variaciones estacionales de nivel del mar que son importantes (hasta un 77%) en la cuenca (Torres & Tsimplis (2012)). A pesar de que estos dos armónicos dependen en mayor medida de forzantes meteorológicos, se recomienda incluirlos en los pronósticos de marea para el Caribe. Al obtener un pronóstico de marea (forzantes astronómicos) e incluir las variaciones estacionales, se obtiene un resultado más cercano al comportamiento esperado de las series de nivel del mar (marea más residuo meteorológico), lo cual es deseable pues finalmente es la serie de nivel del mar la que estará afectando los procesos y actividades que se desarrollen en la costa. En la Tabla 10 se mostró que el rango máximo del residuo meteorológico fue de 65 cm (Puerto Bolívar) siendo del mismo orden de magnitud que las mareas en la Cuenca Colombia, por lo tanto, para la elaboración de los pronósticos se debe incluir Sa y Ssa.

Para los pronósticos en lugares donde no se cuenten con datos, se propuso obtener los valores de S_a y S_{sa} a partir de un nodo cercano de altimetría satelital. Este procedimiento mostró las más grandes diferencias respecto de los armónicos obtenidos de la serie de nivel del mar observado, tal y como sucedió al pronosticar el 2019 con los datos observados en el 2018. Esto se explica por la gran variabilidad temporal y espacial de los ciclos estacionales en el Caribe (Torres & Tsimplis, 2012). Por tanto, es necesario a futuro mejorar la forma de incorporar las variaciones estacionales (S_a y S_{sa}) en los pronósticos de marea, tanto para lugares con observaciones como en aquellos donde no se tienen datos de nivel del mar.

Para los pronósticos generados para el 2019 a partir de datos observados en el 2018 en las cuatro poblaciones, el coeficiente de correlación se obtuvo por encima de 0.9, encontrando un muy buen ajuste entre los pronósticos y los datos observados del año 2019. De igual forma el RMS más grande tanto en amplitud y fase fue de 1.7 cm y 2.9° respectivamente, en el puerto de San Andrés, siendo este el lugar que presenta los índices más bajos tanto en RMS como en coeficiente de correlación. La mayor dificultad en pronosticar la marea (incluyendo las variaciones estacionales) en San Andrés se debe principalmente a las diferencias en S_a y S_{sa} de un año al otro, lo cual es consecuencia de la influencia del giro Panamá-Colombia (Torres-Parra et al., 2017; Torres & Tsimplis, 2012). Para los pronósticos obtenidos a partir del modelo global TPXO9 y datos de altimetría satelital; el desempeño a partir del RMS y del coeficiente de correlación, fue mucho más bajo. Por lo tanto, la generación de pronóstico a partir del modelo global debe estar limitado únicamente para lugares en los que no se tengan mediciones. En lugares con mediciones de mucho menos de 366 días se sugiere obtener los armónicos por ambos métodos y evaluar cuales son las diferencias antes de determinar el método a emplear.

10. CONCLUSIONES

Con base en los resultados de esta investigación se ha logrado establecer la amplitud y fase de los principales constituyentes armónicos de la marea para catorce puertos en el Caribe colombiano (Tabla 8 y Tabla 9), algunos en lugares que anteriormente no habían sido investigados; como también confirmar la micromarea de tipo mixta principalmente diurna en la Cuenca Colombia.

Se propuso una metodología de control de calidad para datos de nivel del mar que permite mantener la energía de los principales constituyentes, evita desfases en tiempo y mantienen una mayor cantidad de datos respecto a otros filtros pasa bajos evaluados. Esta metodología se sugiere sea implementada por DIMAR para producir series de nivel del mar con control de calidad de acceso público.

De la evaluación de los armónicos obtenidos a partir del uso de un modelo hidrodinámico para la propagación de la onda hasta la costa, se puede concluir que el uso de la amplitud y fase de los principales constituyentes armónicos para el Caribe, obtenidos directamente del nodo más cercano del modelo TPXO9, ofrece resultados similares. Asimismo, la generación de pronósticos de marea para la Cuenca Colombia debe efectuarse en lo posible, a partir de datos observados por un periodo mínimo de 366 días teniendo en cuenta que la variación estacional es importante pero con gran variación interanual. Por lo tanto, se sugiere incluir los armónicos S_a y S_{sa} al pronóstico de mareas para obtener variaciones del nivel del mar más cercanas a las observadas y que afectan la costa. El uso de armónicos del modelo global de marea y datos de altimetría para determinar la variación estacional para la generación de pronósticos, debe estar limitado solo para lugares en los que no se tengan mediciones.

Este trabajo ha complementado el entendimiento actual de las mareas en el Mar Caribe principalmente en la Cuenca Colombia, sin embargo, estudios más profundos se deben realizar para entender la dinámica que domina sectores como el área insular (San Andrés y Providencia), donde factores meteorológicos y oceanográficos afectan directamente el comportamiento del nivel del mar,

enmascarándose en la frecuencia de constituyentes radiacionales como S2 y modulando las variaciones estacionales.

11. BIBLIOGRAFÍA

- Alsaaq, F., Kuhn, M., El-mowafy, A., & Kennedy, P. (2016). Filtering methods to extract the tide height from Global Navigation Satellite Systems (GNSS) signals for Hydrographic applications, (November), 8–10.
- Amante, C., & Eakins, B. W. (2009). *ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis* (NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24). <https://doi.org/10.7289/V5C8276M>
- Andrade, C. (2001). Las corrientes superficiales en la cuenca de Colombia Observadas con Boyas de Deriva. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 25(96), 321–335.
- Andrade, C. (2009). Variaciones temporales termo-halinas en la Cuenca de Colombia. *Boletín Científico CIOH*, (27), 8–21. <https://doi.org/10.26640/22159045.197>
- Andrade, C. (2015). *Oceanografía Dinámica de la Cuenca Colombiana. Escuela Naval de Cadetes Almirante Padilla*. Cartagena.
- Andrade, C., & Barton, E. D. (2000). Eddy development and motion in the Caribbean Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 105(C11), 26191–26201. <https://doi.org/10.1029/2000jc000300>
- Bernal, G., Osorio, A., Beier, E., Pelaez-Zapata, D., Devis, A., Sanchez, R., & Ruiz-Ochoa, M. (2015). Manifestaciones oceanográficas del “Veranillo de San Juan” en la cuenca Colombia, mar Caribe. In *Conference: XVI Congreso Latinoamericano de Ciencias del Mar - COLACMAR y XVI Seminario Nacional de Ciencias y Tecnologías del Mar*. Santa Martha, Colombia.
- Bowland, C. L., & Rosencrantz, E. (1988). Upper crustal structure of the western Colombian Basin, Caribbean Sea. *Geological Society of America Bulletin*, 100(4), 534–546. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1988\)100<0534:UCSOTW>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1988)100<0534:UCSOTW>2.3.CO;2)
- Bradshaw, E., Mjesusgarciamdieoes, M. J. G., Gomez, B. P., Raicich, F., &

- Rickards, L. ESEAS Standards for Sea Level Data Quality Control (2004).
- Caldwell, P. C., Merrifield, M. A., & Thompson, P. R. (2015). Sea level measured by tide gauges from global oceans — the Joint Archive for Sea Level holdings (NCEI Accession 0019568), Version 5.5. NOAA National Centers for Environmental Information. <https://doi.org/10.7289/V5V40S7W>
- Carrere, L., Lyard, F., Cancet, M., & Guillot, A. (2015). *FES 2014, a new tidal model on the global ocean with enhanced accuracy in shallow seas and in the Arctic region. EGU General Assembly 2015*. Vienna.
- Cheng, Y., & Andersen, O. B. (2011). Multimission empirical ocean tide modeling for shallow waters and polar seas. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(11), 1–11. <https://doi.org/10.1029/2011JC007172>
- Codiga, D. L. (2011). *Unified Tidal Analysis and Prediction Using the UTide Matlab Functions*. Narragansett, RI. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3761.2008>
- Crawford, W. R. (1982). Analysis of Fortnightly and Monthly Tides. *International Hydrographic Review*, 59(1), 131–142. Retrieved from <https://journals.lib.unb.ca/index.php/ihr/article/view/23566/27339>
- Daniel, W. (1980). *BIOESTADÍSTICA: Base para el Análisis de las Ciencias de la Salud*. (Editorial Limusa SA, Ed.). México D.F.: John Wiley & Sons, Inc.
- Egbert, G. D., & Erofeeva, S. Y. (2002). Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(2), 183–204. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2002\)019<0183:EIMOBO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2002)019<0183:EIMOBO>2.0.CO;2)
- Fok, H. S. (2012). *Ocean Tides Modeling using Satellite Altimetry. Graduate Program in Geodetic Science and Surveying*. Ohio State University.
- Foreman, M. G. (1977). Manual for tidal heights analysis and prediction, Institute of Ocean Sciences, Sidney. *Tech. Rep. Pac. Mar. Sci.*, (January). Retrieved from http://champs.cecs.ucf.edu/Library/Journal_Articles/pdfs/Manual_for_tidal_heights_analysis_and_prediction.pdf

- Foreman, M. G., & Henry, R. (1989). The harmonic analysis of tidal model time series. *Advances in Water Resources*, 12(3), 109–120. [https://doi.org/10.1016/0309-1708\(89\)90017-1](https://doi.org/10.1016/0309-1708(89)90017-1)
- Garcia, F., Palacio, C., & Garcia, U. (2011). Constituyentes De Marea En La Bahía De Santa Marta (Colombia). *Dyna*, 78(167), 142–150.
- García, M. J., Gómez, B. P., Raicich, F., Rickards, L., Bradshaw, E., Plag, H.-P., ... Isaksen, E. (2007). European Sea Level Monitoring: Implementation of ESEAS Quality Control. In *International Association of Geodesy Symposia* (Vol. 130, pp. 67–70). https://doi.org/10.1007/978-3-540-49350-1_11
- Geister, J., & Díaz, J. (2007). Ambientes arrecifales y geología de un archipiélago oceánico: San Andrés, Providencia y Santa Catalina. *Mar Caribe, Colombia (Guía de Campo)*. INVEMAR, Santa Marta. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.05.033>
- GWP-SAMTAC. (2000). *Agua para el Siglo XXI para América del Sur. Global Water Partnership (GWP)*. Retrieved from <https://www.ircwash.org/node/56276>
- Kjerfve, B. (1981). Tides of the Caribbean Sea. *Journal of Geophysical Research*, 86(C5), 4243. <https://doi.org/10.1029/JC086iC05p04243>
- Latandret-Solana, S. A., Herrera-Moyano, D. P., & Gonzalez-Montes, S. (2019). *Condiciones climáticas para la Bahía de Cartagena - Sector COTECMAR*. Cartagena.
- Lizano, O. (2006). Algunas características de las mareas en la costa Pacífica y Caribe de Centroamérica. *Ciencia y Tecnología*, 24(1), 51–64.
- Lozano-Duque, Y., Medellín-Mora, J., & Navas, G. . (2010). Contexto Climatológico y Oceanográfico del Mar Caribe Colombiano. *Biodiversidad Del Margen Continental Del Caribe Colombiano*, (October 2015), 53–84. <https://doi.org/PMID: 11252105>
- Luyendyk, B. P. (2016). Ocean basin. Retrieved January 9, 2020, from <https://www.britannica.com/science/ocean-basin>

- Marcos, M., Wöppelmann, G., Matthews, A., Ponte, R. M., Birol, F., Arduin, F., ... Stopa, J. E. (2019). Coastal Sea Level and Related Fields from Existing Observing Systems. *Surveys in Geophysics*, 40(6), 1293–1317. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09513-3>
- Masselink, G., & Hughes, M. G. (2014). *An Introduction to Coastal Processes and Geomorphology. An Introduction to Coastal Processes and Geomorphology* (1st Editio). London: Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203783740>
- Medvedev, I. P., Rabinovich, A. B., & Kulikov, E. A. (2013). Tidal oscillations in the Baltic Sea. *Oceanology*, 53(5), 526–538. <https://doi.org/10.1134/S0001437013050123>
- Molares B., R. (2004). Clasificación e identificación de las componentes de marea del Caribe colombiano. *Boletín Científico CIOH*, (22), 105–114. <https://doi.org/10.26640/22159045.132>
- Molares, R. (2004). Oceanographic Aspects in Deep Waters on the Providence Depression in May 2004, (May).
- Montoya, R. (2019). *Procesos de interacción oceano-atmósfera en la zona de surgencias de la Guajira a diferentes escalas temporales*. Universidad Nacional de Colombia.
- Montoya, R., Ruiz, M., & Bernal, G. (2014). *Variabilidad estacional e interanual del balance de calor en la capa de mezcla superficial en el mar Caribe. Avances en Recursos Hidráulicos*. Universidad Nacional de Colombia. Retrieved from http://bdigital.unal.edu.co/12588/1/386239.2014_1.pdf
- Morrison, J. M., & Nowlin, W. D. (1982). General distribution of water masses within the eastern Caribbean Sea during the winter of 1972 and fall of 1973. *Journal of Geophysical Research*, 87(C6), 4207. <https://doi.org/10.1029/jc087ic06p04207>
- Nasrin, K. S., Hosain, Z., & Alireza, A. A. (2019). Validity assessment of global tidal models in the Persian Gulf and Sea of Oman using coastal tide gauge data and

- institute of ocean sciences (IOS) software. *AIP Conference Proceedings*, 2109(9), 159–165. <https://doi.org/10.1063/1.5110132>
- Ogden, J., & James, R. (2019). Caribbean Sea. Retrieved January 9, 2020, from <https://www.britannica.com/place/Caribbean-Sea>
- Orejarena-Rondón, A. F., Otero-Díaz, L. J., Restrepo L., J. C., Ramos de la Hoz, I. M., & Marriaga-Rocha, L. (2018). Methodology for determining the mean and extreme sea level regimes (Astronomical and meteorological tides) considering scarce records in microtidal zones: Colombian Caribbean case. *DYNA (Colombia)*, 85(205), 274–283. <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n205.70677>
- OTT Hydromet. (2015). *Radar level sensor OTT RLS - Operating instructions*. Kemptem.
- OTT Hydromet. (2017). *Sensor de Burbujeo OTT CBS - Instrucciones de funcionamiento*. Kemptem.
- OTT Hydromet. (2018). *Sonda manométrica OTT PLS - Instrucciones de funcionamiento*. Kemptem.
- Padman, L., & Erofeeva, S. Y. (2015). *Tide Model Driver (TMD) Manual: Version 2.5 (2.5)*.
- Palanisamy, H., Becker, M., Meyssignac, B., Henry, O., & Cazenave, A. (2012). Regional sea level change and variability in the Caribbean sea since 1950. *Journal of Geodetic Science*, 2(2), 125–133. <https://doi.org/10.2478/v10156-011-0029-4>
- Parker, B. B. (2007). *Tidal analysis and prediction* (NOS CO-OPS No. 3). *Tidal Analysis and Prediction*. Silver Spring. <https://doi.org/10.1017/cbo9781139235778.007>
- Pugh, D. (1987). Tides, surges and mean sea level trends. *Marine and Petroleum Geology*, ((Southampton, U.K.: Sep. 14-15, 1982), London, U.K., Thomas Telford Ltd., 1983, Session III, Paper 9). [https://doi.org/10.1016/0264-8172\(88\)90013-x](https://doi.org/10.1016/0264-8172(88)90013-x)

- Pugh, D., & Woodworth, P. (2014). *Sea-Level Science Understanding Tides, Surges, Tsunamis and Mean Sea-Level Changes*.
- Ranji, Z., Hejazi, K., Soltanpour, M., & Allahyar, M. (2016). Inter-comparison of recent tide models for the Persian gulf and Oman sea. *Proceedings of the Coastal Engineering Conference*, 35(November). <https://doi.org/10.9753/icce.v35.currents.9>
- Ray, R. D. (2013). Precise comparisons of bottom-pressure and altimetric ocean tides. *J. Geophys. Res. Oceans*, 118, 4570–4584. <https://doi.org/10.1002/jgrc.20336>
- Ray, R. D., Luthcke, S. B., & Boy, J. R. (2009). Qualitative comparisons of global ocean tide models by analysis of intersatellite ranging data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114(9), 1–11. <https://doi.org/10.1029/2009JC005362>
- Ray, R., & Egbert, G. (2005). Tides in the Indonesian Seas. *Oceanography*, 18(4), 74–79.
- Rose, L., Bhaskaran, P. K., & Kani, S. P. (2015). Tidal analysis and prediction for the Gangra location, Hooghly estuary in the Bay of Bengal. *Current Science*, 109(4), 745–758.
- Ruiz Etcheverry, L. A., Saraceno, M., Piola, A. R., Valladeau, G., & Möller, O. O. (2015). A comparison of the annual cycle of sea level in coastal areas from gridded satellite altimetry and tide gauges. *Continental Shelf Research*, 92, 87–97. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2014.10.006>
- Schafer, R. W. (2011). What is a savitzky-golay filter? *IEEE Signal Processing Magazine*, 28(4), 111–117. <https://doi.org/10.1109/MSP.2011.941097>
- Seifi, F., Deng, X., & Andersen, O. B. (2019). Assessment of the accuracy of recent empirical and assimilated tidal models for the Great Barrier Reef, Australia, using satellite and coastal data. *Remote Sensing*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/rs11101211>

- Torres-Parra, R. R., Sánchez-Reyes, D. M., & Moreno-Calderón, M. Y. (2017). Variación estacional del nivel del mar en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, Mar Caribe. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 52(2), 343–352. <https://doi.org/10.4067/S0718-19572017000200013>
- Torres Parra, R. R. (2013). *Sea-Level Variability in the Caribbean Sea over the Last Century*. University of Southampton.
- Torres Parra, R. R., Otero Díaz, L. J., Franco, F. A., & Rocha, L. M. (2008). Comportamiento del nivel del mar en el litoral Caribe colombiano. *Boletín Científico CIOH*, 21(26), 8–21. <https://doi.org/10.26640/22159045.172>
- Torres, R. R., & Tsimplis, M. N. (2011). Tides and long-term modulations in the Caribbean Sea. *Journal of Geophysical Research*, 116(C10), C10022. <https://doi.org/10.1029/2011JC006973>
- Torres, R. R., & Tsimplis, M. N. (2012). Seasonal sea level cycle in the Caribbean Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(7), 1–18. <https://doi.org/10.1029/2012JC008159>
- Torres, R. R., & Tsimplis, M. N. (2013). Sea-level trends and interannual variability in the Caribbean Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(6), 2934–2947. <https://doi.org/10.1002/jgrc.20229>
- Torres, R. R., & Tsimplis, M. N. (2014). Sea level extremes in the Caribbean Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(8), 4714–4731. <https://doi.org/10.1002/2014JC009929>
- UNESCO/COI. (2012). *The Global Sea-Level Observing System (GLOSS): implementation plan, 2012*. Paris. Retrieved from <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000217832>
- Vignudelli, S., Birol, F., Benveniste, J., Fu, L. L., Picot, N., Raynal, M., & Roinard, H. (2019). *Satellite Altimetry Measurements of Sea Level in the Coastal Zone. Surveys in Geophysics* (Vol. 40). Springer Netherlands.

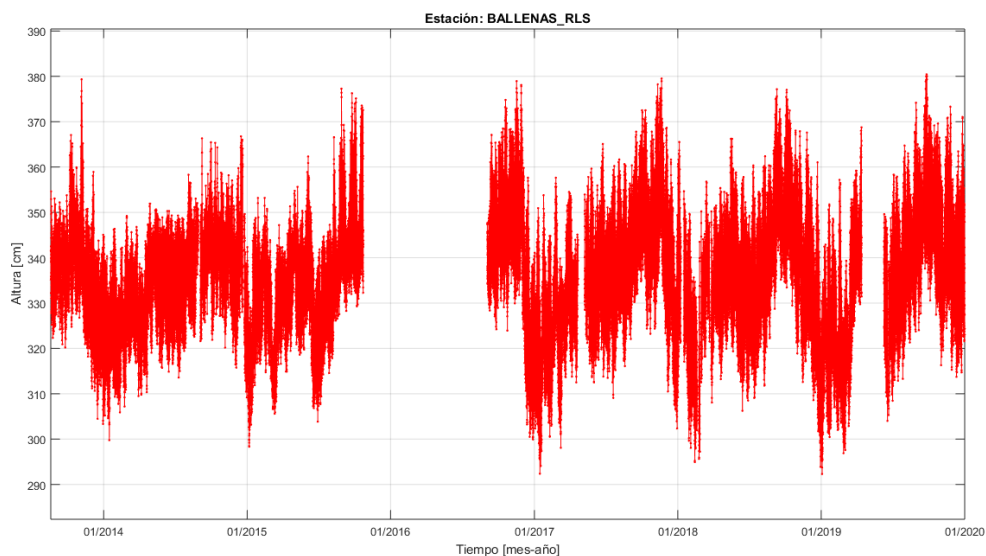
<https://doi.org/10.1007/s10712-019-09569-1>

Wert, T., Dare, P., & Clarke, J. H. (2004). Tidal height retrieval using globally corrected GPS in the Amundsen gulf region of the Canadian arctic. *Proceedings of the 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, ION GNSS 2004*, (September 2004), 1246–1255.

12. ANEXOS

12.1 Metadata control de calidad estaciones

BALLENAS



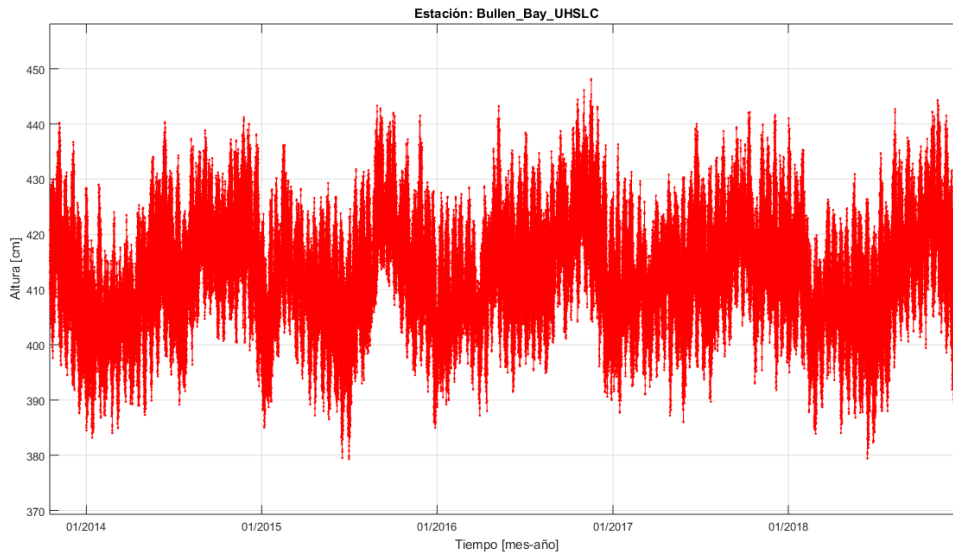
Archivo: BALLENAS_RLS.mat

DATOS HORARIOS				
NO ANALIZADOS	FALTANTES	SOSPECHOSOS	BUENOS	TOTAL
6	9576	0	44633	55823

CORRECCIONES DE NIVEL

FECHA DE INICIO	FECHA DE TÉRMINO	CORRECCIÓN APLICADA (cm)
19-08-13 11:55	26-05-14 13:06	6.06
27-05-14 22:54	29-08-14 18:08	324.30
03-09-14 21:54	13-06-15 14:00	320.04
13-06-15 14:57	23-10-15 16:08	232.56
03-09-16 02:57	18-11-16 18:17	116.37
18-11-16 21:55	01-09-18 22:17	85.51
02-09-18 10:58	14-04-19 00:06	82.89
09-06-19 16:36	01-01-20 04:04	66.31

BULLEN BAY (CURACAO)



Archivo: BULLEN_BAY_UHSLC.mat

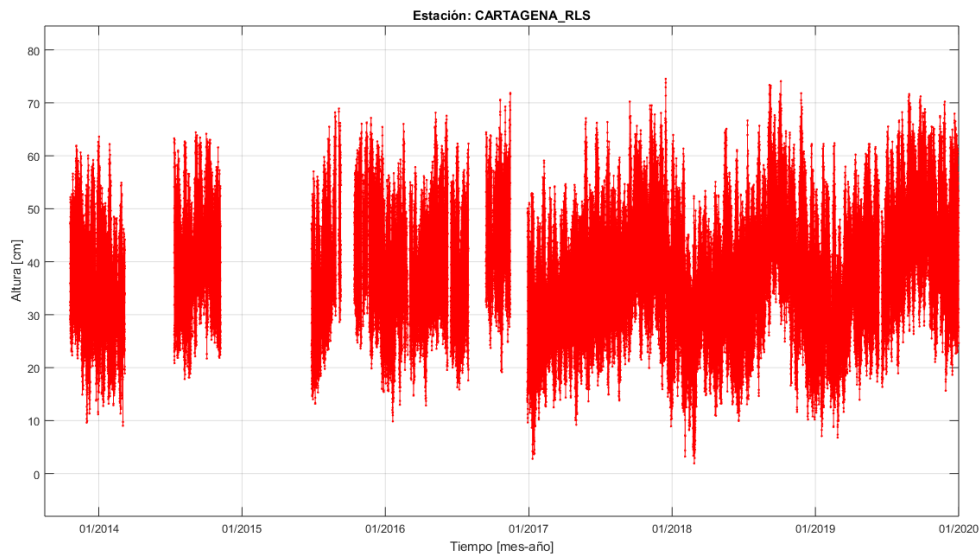
DATOS HORARIOS				
NO ANALIZADOS	FALTANTES	SOSPECHOSOS	BUENOS	TOTAL
6	0	0	45649	45655

CORRECCIONES DE NIVEL

FECHA DE INICIO FECHA DE TÉRMINO CORRECCIÓN APLICADA (cm)

NINGUNA

CARTAGENA



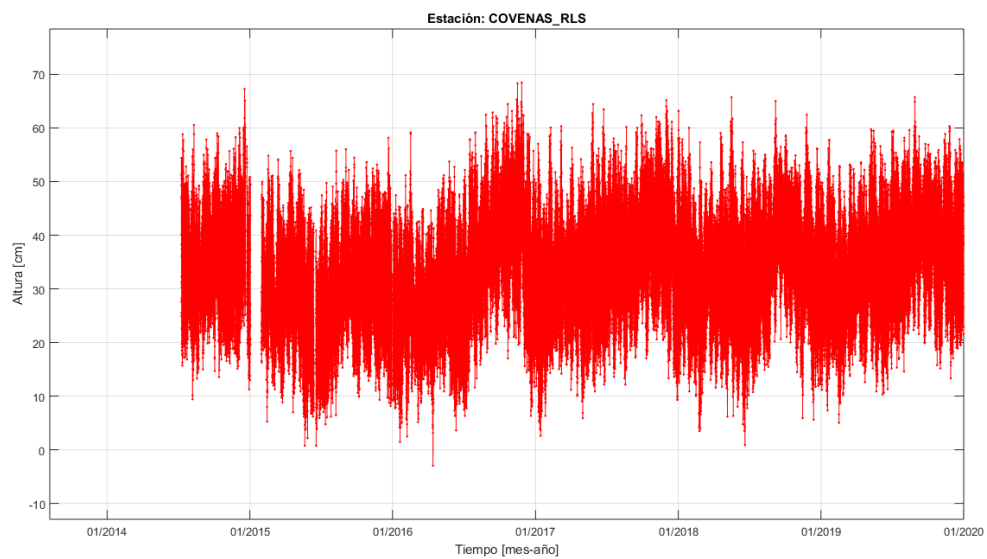
Archivo: CARTAGENA_RLS.mat

DATOS HORARIOS				
NO ANALIZADOS	FALTANTES	SOSPECHOSOS	BUENOS	TOTAL
6	14172	0	41720	55895

CORRECCIONES DE NIVEL

FECHA DE INICIO	FECHA DE TÉRMINO	CORRECCIÓN APLICADA (cm)
19-10-13 19:51	01-03-14 20:04	3.53
01-03-14 20:56	08-03-14 14:01	14.17
11-07-14 23:52	07-11-14 14:08	8.44
27-06-15 00:53	30-06-15 20:09	15.14
30-06-15 21:47	10-09-15 04:22	20.01
13-10-15 17:51	02-11-15 03:04	19.15
04-11-15 18:56	22-04-16 16:02	11.68
22-04-16 22:57	08-06-16 12:02	16.82
15-06-16 13:56	31-07-16 04:04	16.69
13-09-16 09:52	14-11-16 20:11	6.27
27-12-16 21:50	01-01-20 04:04	6.50

COVEÑAS



Archivo: COVEÑAS_RLS.mat

DATOS HORARIOS				
NO ANALIZADOS	FALTANTES	SOSPECHOSOS	BUENOS	TOTAL
6	9577	0	46528	56111

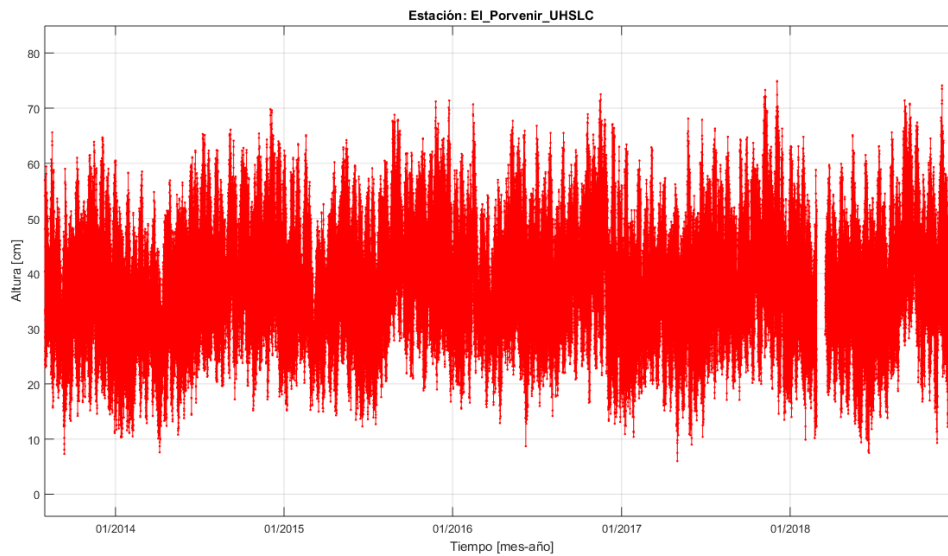
CORRECCIONES DE NIVEL

FECHA DE INICIO FECHA DE TÉRMINO CORRECCIÓN APLICADA (cm)

09-07-14 22:58 07-05-15 12:00 3.98

07-05-15 12:59 01-01-20 04:00 12.89

EL PORVENIR (PANAMÁ)



Archivo: EL_PORVENIR_UHSLC.mat

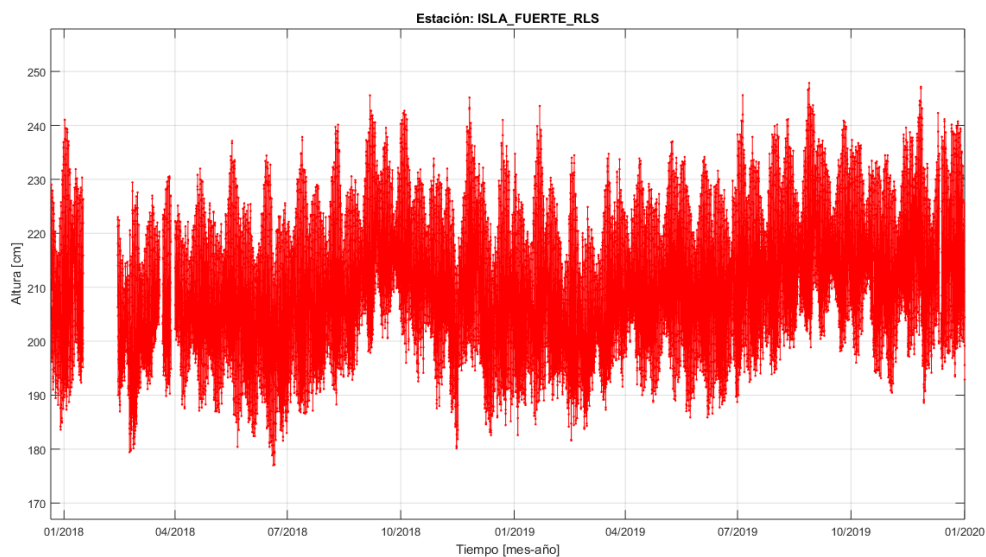
DATOS HORARIOS				
NO ANALIZADOS	FALTANTES	SOSPECHOSOS	BUENOS	TOTAL
6	447	0	47043	47496

CORRECCIONES DE NIVEL

FECHA DE INICIO FECHA DE TÉRMINO CORRECCIÓN APLICADA (cm)

NINGUNA

ISLA FUERTE



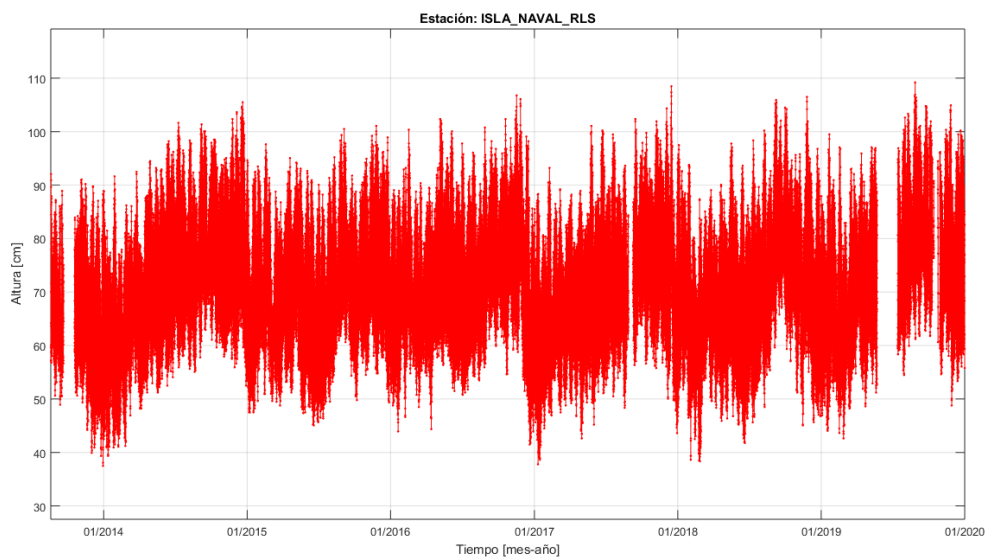
Archivo: ISLA_FUERTE_RLS.mat

DATOS HORARIOS				
NO ANALIZADOS	FALTANTES	SOSPECHOSOS	BUENOS	TOTAL
6	889	0	16888	17783

CORRECCIONES DE NIVEL

FECHA DE INICIO	FECHA DE TÉRMINO	CORRECCIÓN APLICADA (cm)
21-12-17 16:52	16-01-18 15:00	7.89
13-02-18 11:56	16-11-18 15:24	6.99
16-11-18 23:57	01-01-20 04:08	6.30

ISLA NAVAL



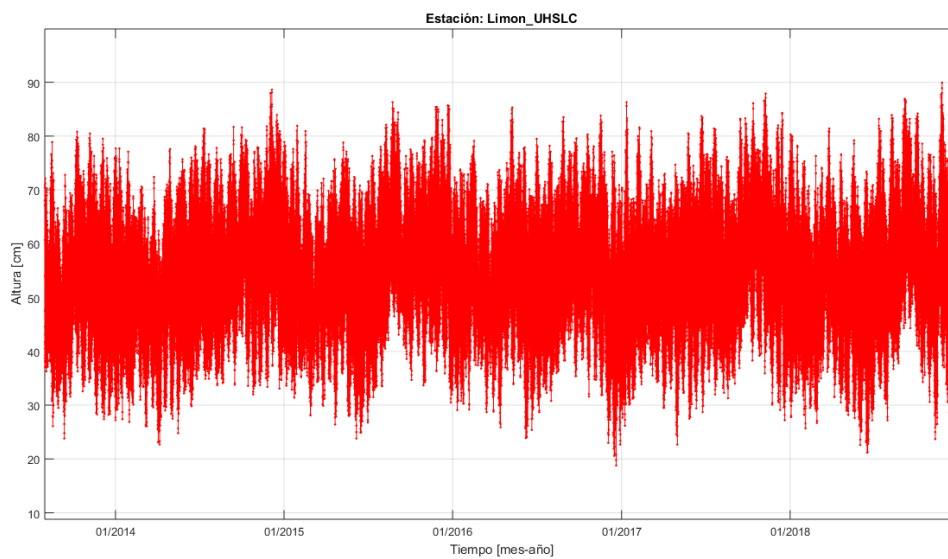
Archivo: ISLA_NAVAL_RLS.mat

DATOS HORARIOS				
NO ANALIZADOS	FALTANTES	SOSPECHOSOS	BUENOS	TOTAL
6	2976	0	52841	55823

CORRECCIONES DE NIVEL

FECHA DE INICIO	FECHA DE TÉRMINO	CORRECCIÓN APLICADA (cm)
19-08-13 08:03	20-09-13 21:02	-13.62
18-10-13 17:41	22-11-13 16:03	-9.43
22-11-13 17:58	28-02-14 16:01	-6.85
28-02-14 17:54	12-07-14 13:02	-15.76
12-07-14 20:58	21-04-16 14:03	-14.09
21-04-16 20:59	01-01-20 04:02	-23.94

LIMON (COSTA RICA)



Archivo: LIMON_UHSLC.mat

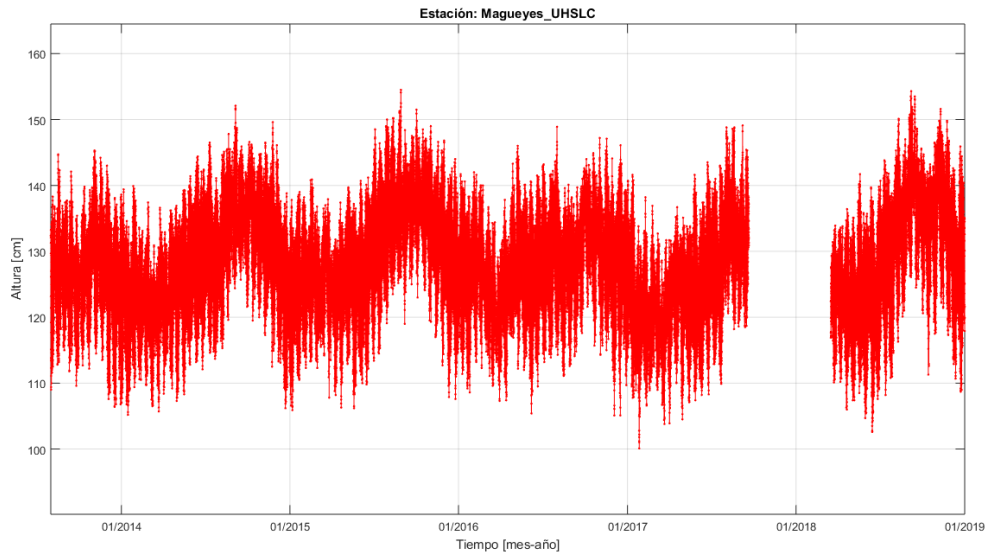
DATOS HORARIOS				
NO ANALIZADOS	FALTANTES	SOSPECHOSOS	BUENOS	TOTAL
6	0	0	47490	47496

CORRECCIONES DE NIVEL

FECHA DE INICIO FECHA DE TÉRMINO CORRECCIÓN APLICADA (cm)

NINGUNA

MAGUEYES (PUERTO RICO)



Archivo: MAGUEYES_UHSLC.mat

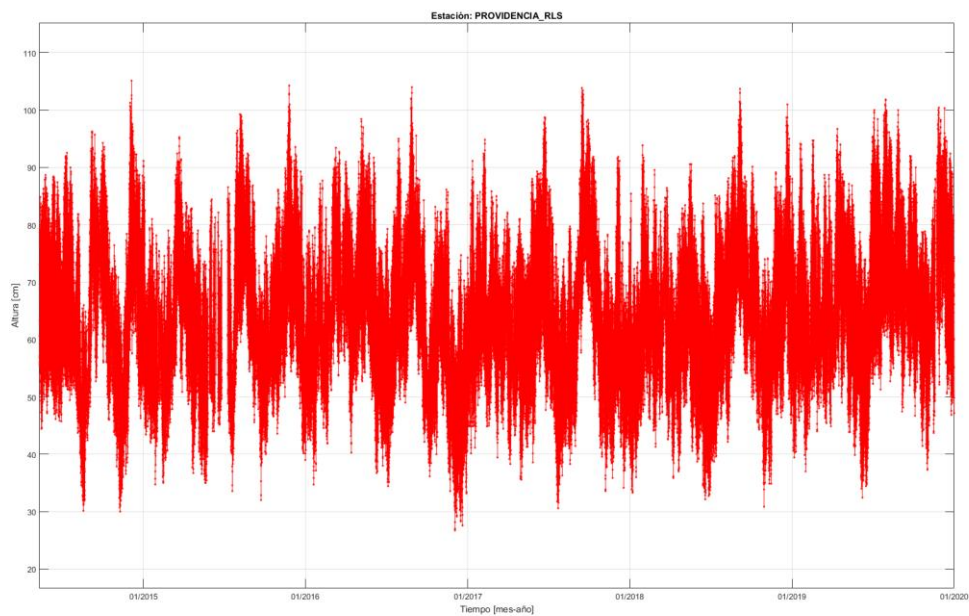
DATOS HORARIOS				
NO ANALIZADOS	FALTANTES	SOSPECHOSOS	BUENOS	TOTAL
6	4383	0	43107	47496

CORRECCIONES DE NIVEL

FECHA DE INICIO FECHA DE TÉRMINO CORRECCIÓN APLICADA (cm)

NINGUNA

PROVIDENCIA



Archivo: PROVIDENCIA_RLS.mat

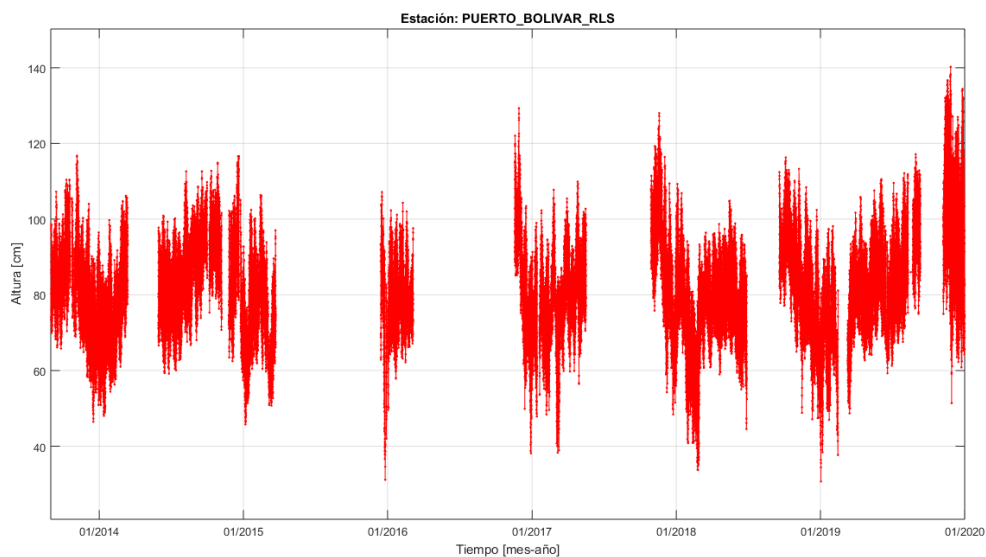
DATOS HORARIOS				
NO ANALIZADOS	FALTANTES	SOSPECHOSOS	BUENOS	TOTAL
6	1019	121	48276	49422

CORRECCIONES DE NIVEL

FECHA DE INICIO FECHA DE TÉRMINO CORRECCIÓN APLICADA (cm)

NINGUNA

PUERTO BOLÍVAR



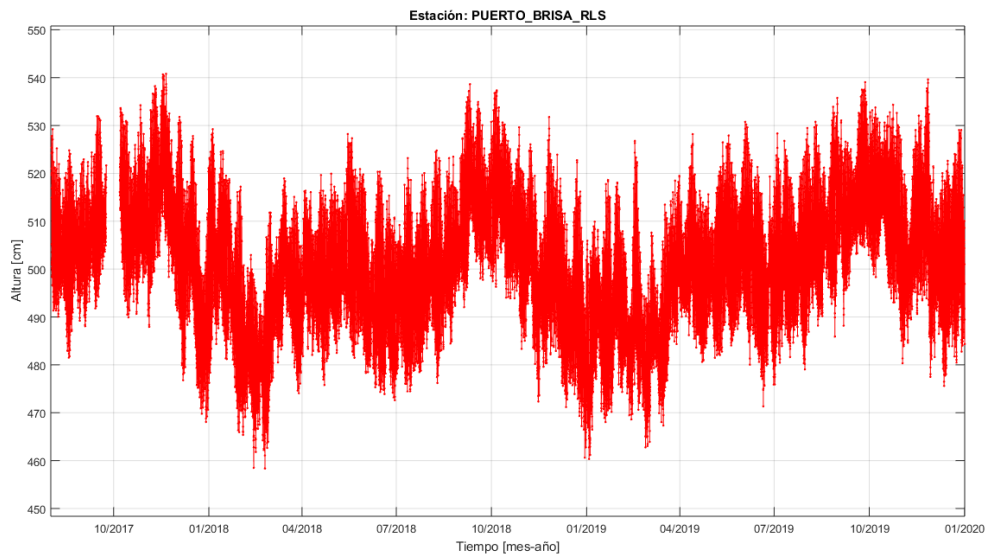
Archivo: PUERTO_BOLÍVAR_RLS.mat

DATOS HORARIOS				
NO ANALIZADOS	FALTANTES	SOSPECHOSOS	BUENOS	TOTAL
6	24317	0	31212	55535

CORRECCIONES DE NIVEL

FECHA DE INICIO	FECHA DE TÉRMINO	CORRECCIÓN APLICADA (cm)
31-08-13 17:57	03-11-13 21:01	-9.60
03-11-13 22:56	14-03-14 05:00	-20.25
30-05-14 15:57	23-03-15 23:08	30.47
14-12-15 15:59	06-03-16 00:02	14.16
17-11-16 20:57	17-05-17 18:07	13.74
28-10-17 20:57	11-05-18 14:01	12.99
11-05-18 18:55	28-06-18 17:12	-10.41
18-09-18 21:41	11-09-19 06:04	-10.15
07-11-19 15:57	01-01-20 04:07	13.41

PUERTO BRISA



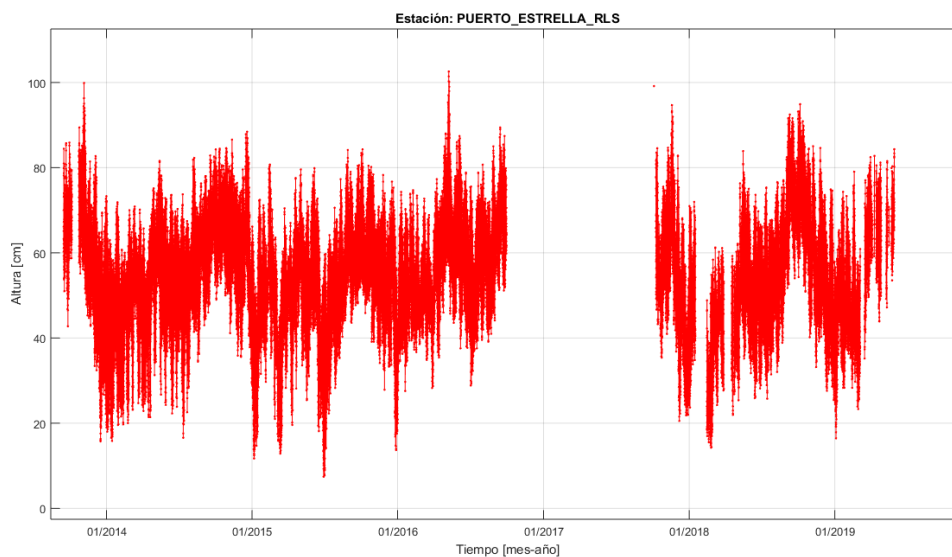
Archivo: PUERTO_BRISA_RLS.mat

DATOS HORARIOS				
NO ANALIZADOS	FALTANTES	SOSPECHOSOS	BUENOS	TOTAL
6	363	0	20822	21191

CORRECCIONES DE NIVEL

FECHA DE INICIO	FECHA DE TÉRMINO	CORRECCIÓN APLICADA (cm)
01-08-17 21:58	04-08-17 17:00	-11.93
04-08-17 17:58	15-05-18 18:00	484.79
15-05-18 18:59	01-01-20 04:01	457.62

PUERTO ESTRELLA



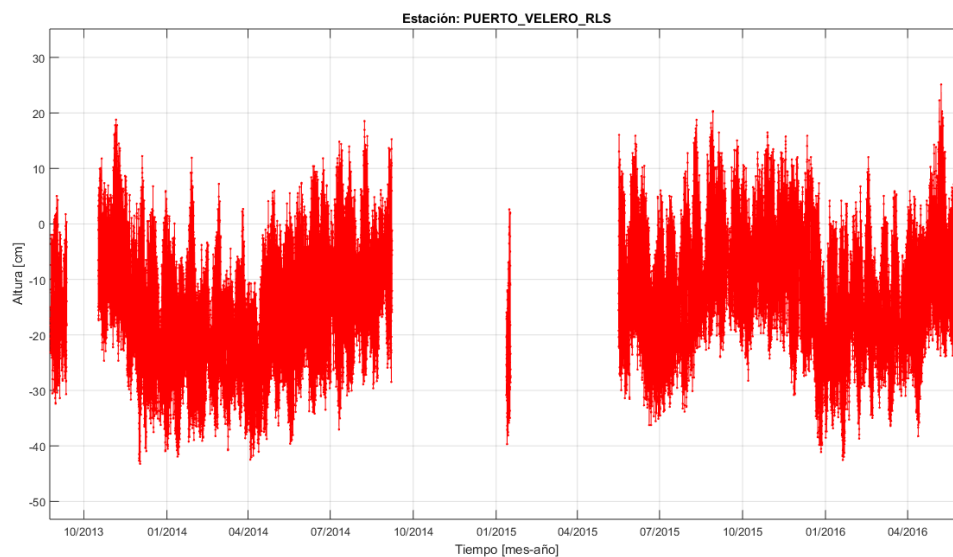
Archivo: PUERTO_ESTRELLA_RLS.mat

DATOS HORARIOS				
NO ANALIZADOS	FALTANTES	SOSPECHOSOS	BUENOS	TOTAL
6	17432	0	37557	54995

CORRECCIONES DE NIVEL

FECHA DE INICIO	FECHA DE TÉRMINO	CORRECCIÓN APLICADA (cm)
15-09-13 13:51	27-10-15 13:12	-2.75
27-10-15 23:50	30-09-16 00:06	-1.20
09-10-17 12:51	06-05-18 16:02	-15.78
07-05-18 20:54	05-03-19 20:03	-56.40
16-03-19 19:55	30-05-19 04:03	-103.45

PUERTO VELERO



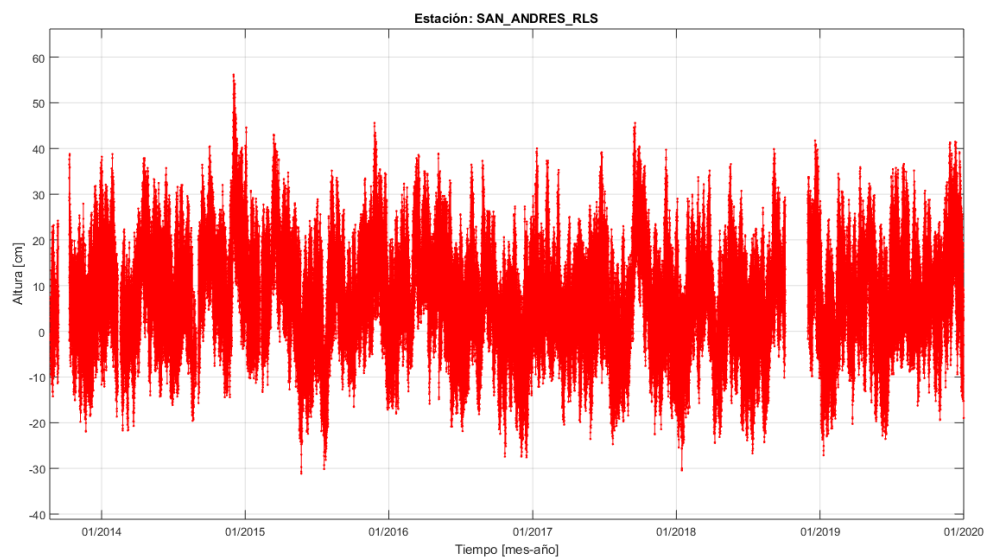
Archivo: PUERTO_VELERO_RLS.mat

DATOS HORARIOS				
NO ANALIZADOS	FALTANTES	SOSPECHOSOS	BUENOS	TOTAL
6	6868	0	17437	24311

CORRECCIONES DE NIVEL

FECHA DE INICIO	FECHA DE TÉRMINO	CORRECCIÓN APLICADA (cm)
24-08-13 23:50	12-09-13 02:04	-13.10
16-10-13 21:53	04-03-14 19:00	-121.79
04-03-14 19:58	07-09-14 16:03	-28.47
12-01-15 05:40	16-01-15 23:17	-30.96
16-05-15 13:56	25-04-16 21:00	-35.25
25-04-16 22:59	02-06-16 04:02	-23.16

SAN ANDRÉS



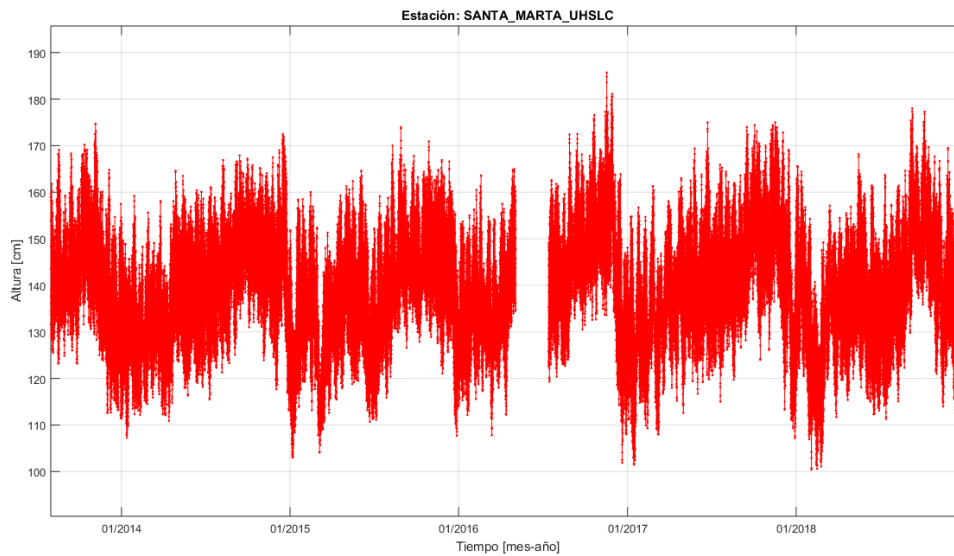
Archivo: SAN_ANDRÉS_RLS.mat

DATOS HORARIOS				
NO ANALIZADOS	FALTANTES	SOSPECHOSOS	BUENOS	TOTAL
6	2752	0	52993	55751

CORRECCIONES DE NIVEL

FECHA DE INICIO	FECHA DE TÉRMINO	CORRECCIÓN APLICADA (cm)
24-08-13 00:56	11-02-14 17:00	2.74
17-02-14 14:58	05-10-18 01:09	-114.46
30-11-18 17:58	01-01-20 04:01	-120.29

SANTA MARTA



Archivo: SANTAMARTA_UHSLC.mat

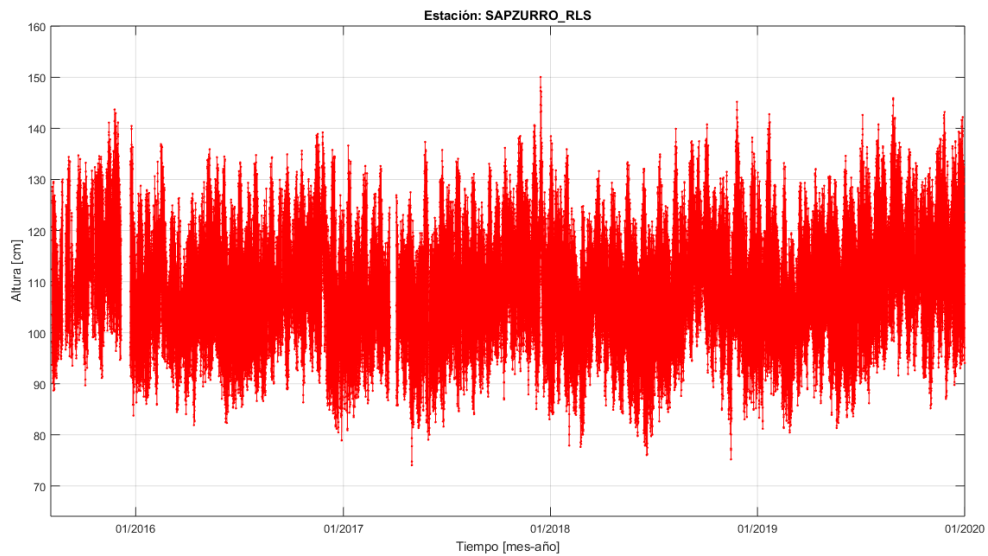
DATOS HORARIOS				
NO ANALIZADOS	FALTANTES	SOSPECHOSOS	BUENOS	TOTAL
6	1704	0	45786	47496

CORRECCIONES DE NIVEL

FECHA DE INICIO FECHA DE TÉRMINO CORRECCIÓN APLICADA (cm)

NINGUNA

SAPZURRO



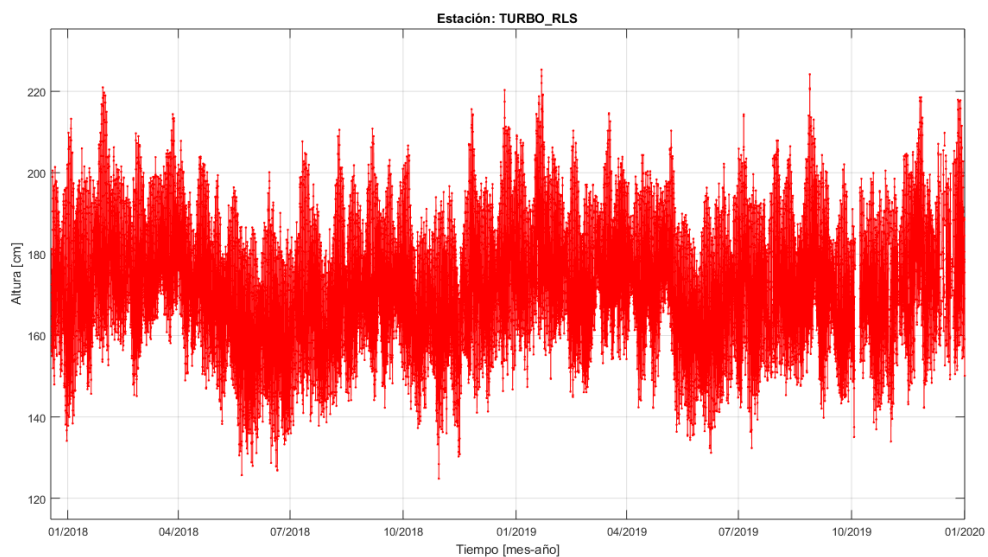
Archivo: SAPZURRO_RLS.mat

DATOS HORARIOS				
NO ANALIZADOS	FALTANTES	SOSPECHOSOS	BUENOS	TOTAL
3	1302	107	37251	38663

CORRECCIONES DE NIVEL

FECHA DE INICIO	FECHA DE TÉRMINO	CORRECCIÓN APLICADA (cm)
06-08-15 16:57	06-12-15 07:06	5.55
22-12-15 05:57	01-01-20 04:03	9.34

TURBO



Archivo: TURBO_RLS.mat

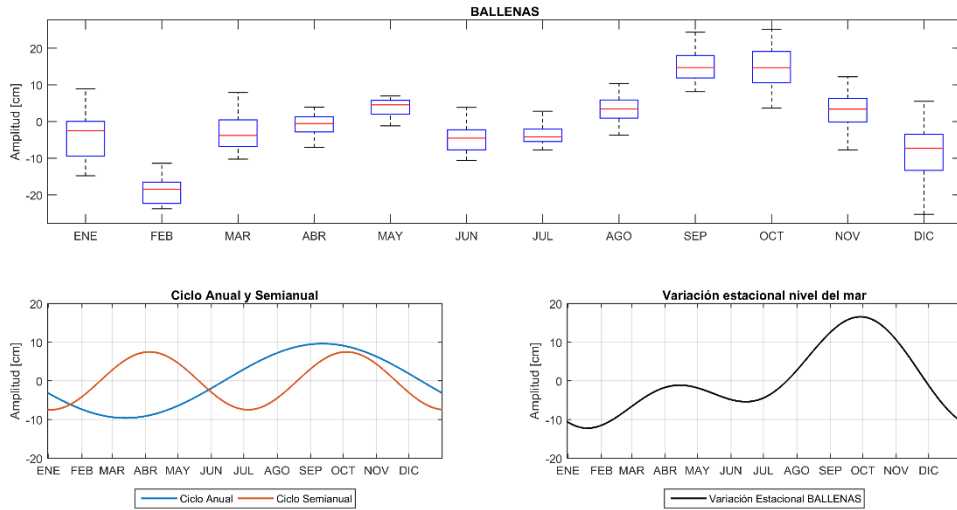
DATOS HORARIOS				
NO ANALIZADOS	FALTANTES	SOSPECHOSOS	BUENOS	TOTAL
6	362	0	17487	17855

CORRECCIONES DE NIVEL

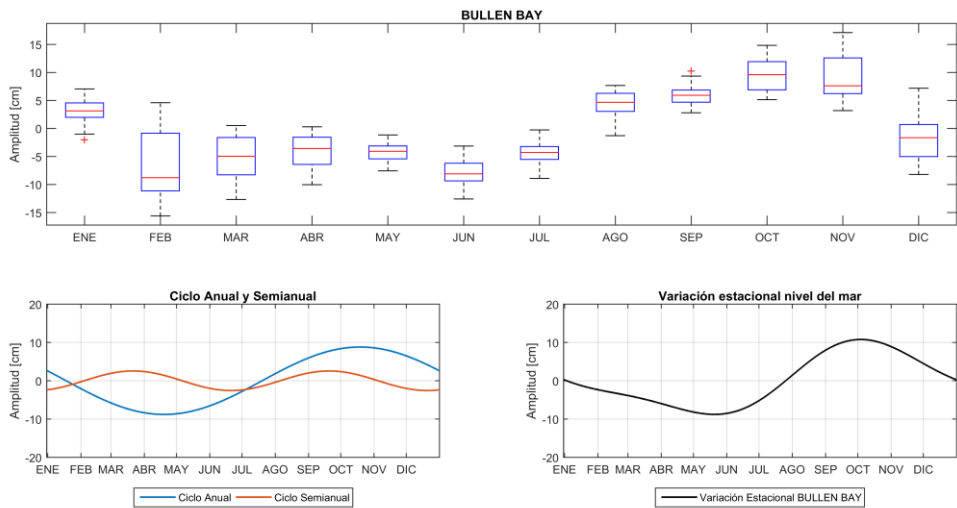
FECHA DE INICIO	FECHA DE TÉRMINO	CORRECCIÓN APLICADA (cm)
18-12-17 22:27	16-11-18 06:03	-3.03
16-11-18 08:59	03-10-19 23:19	-4.66
07-10-19 19:56	01-01-20 04:00	-1.48

12.2 Variación estacional por estación para el año 2018

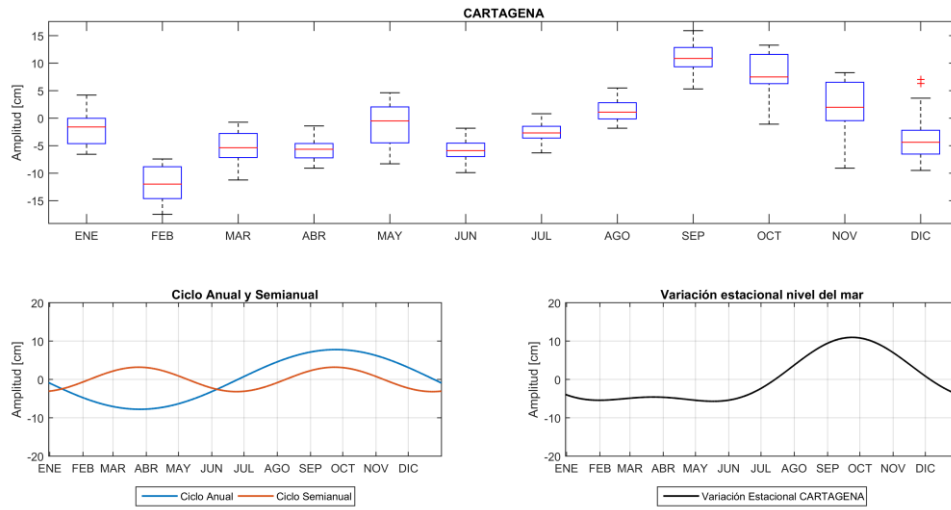
BALLENAS



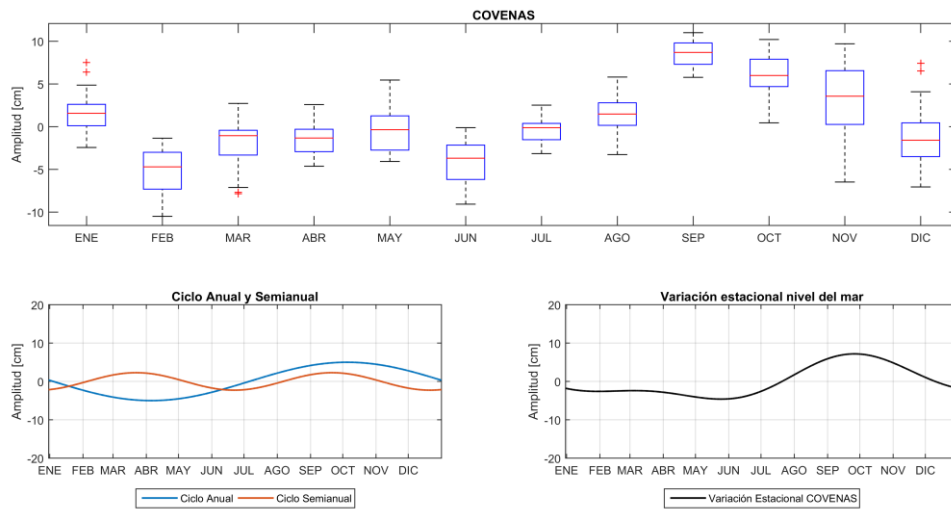
BULLEN BAY (CURACAO)



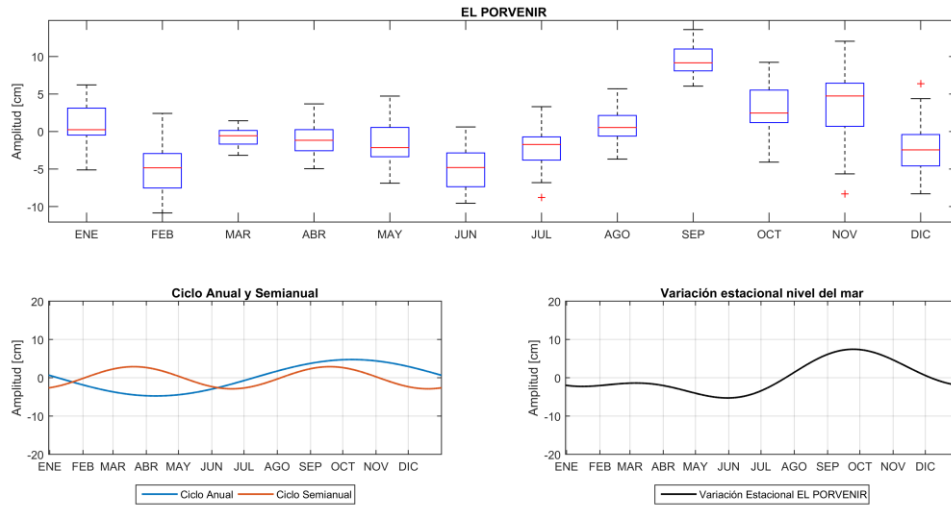
CARTAGENA



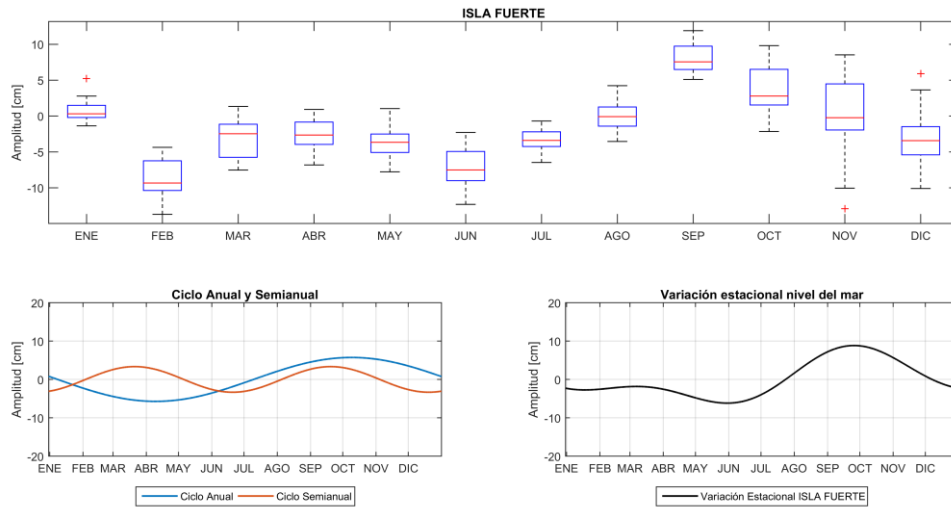
COVENAS



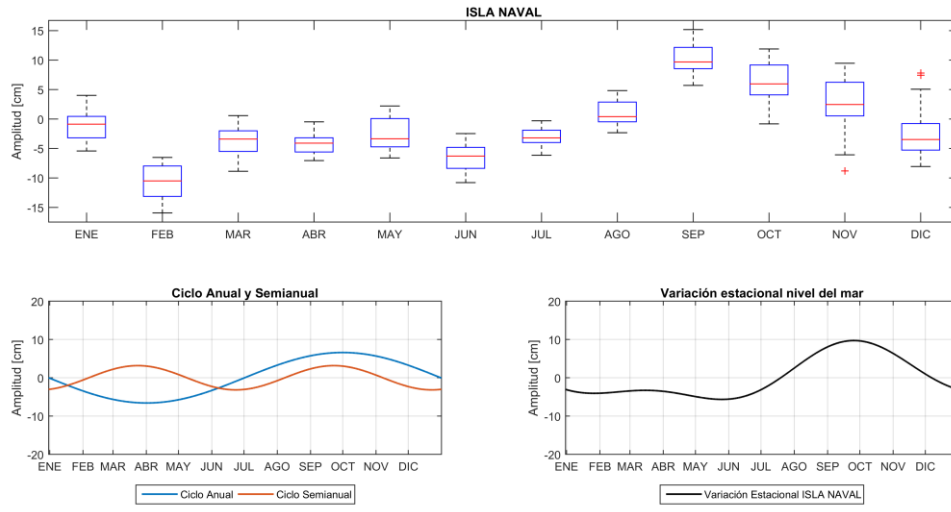
EL PORVENIR (PANAMÁ)



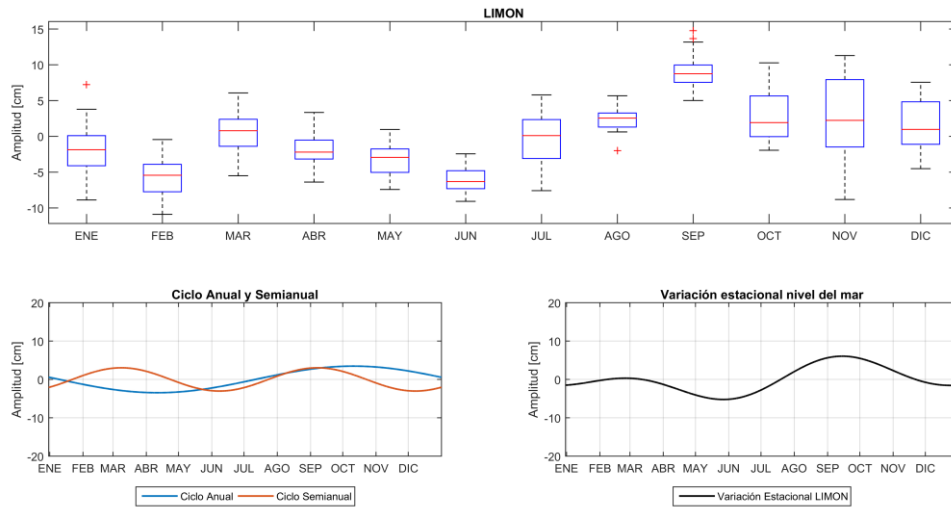
ISLA FUERTE



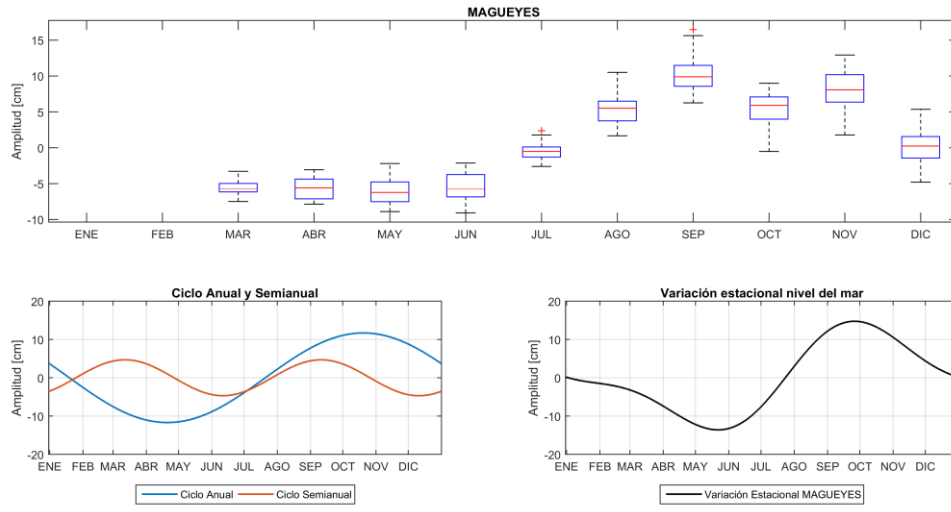
ISLA NAVAL



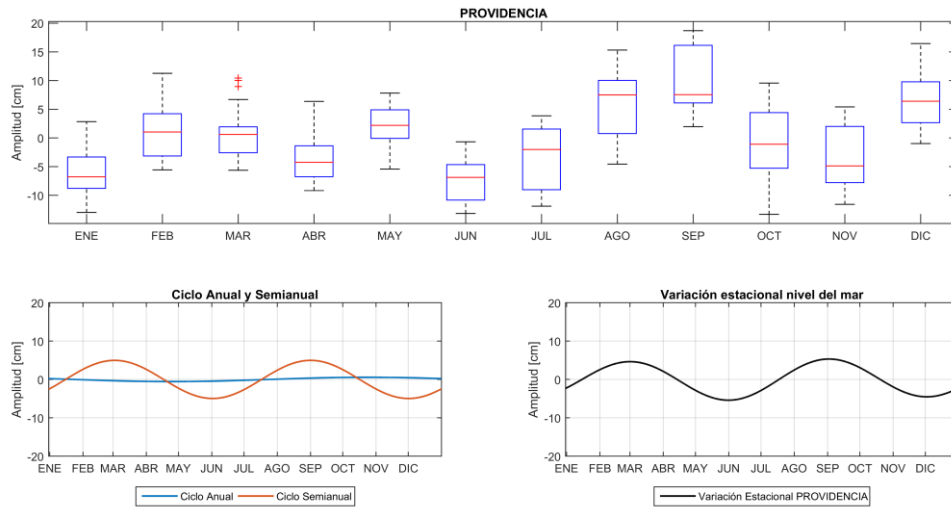
LIMON (COSTA RICA)



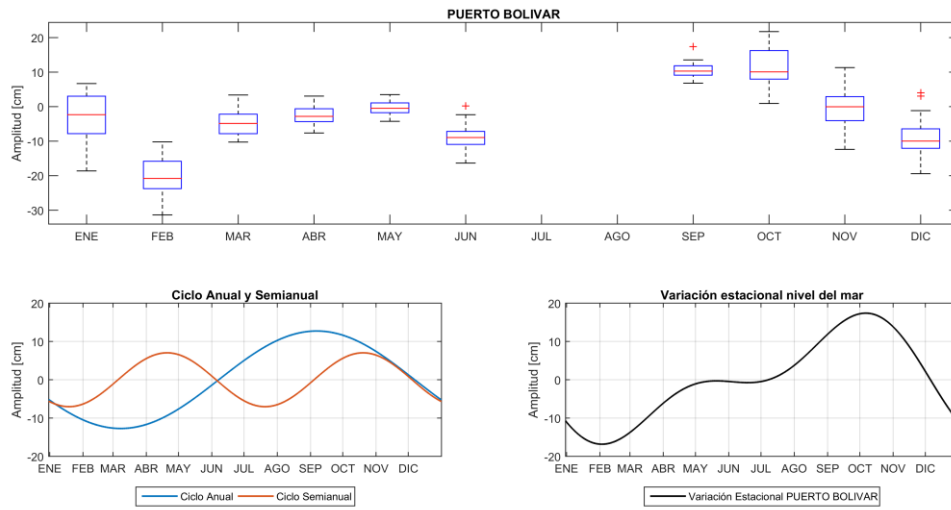
MAGUEYES (PUERTO RICO)



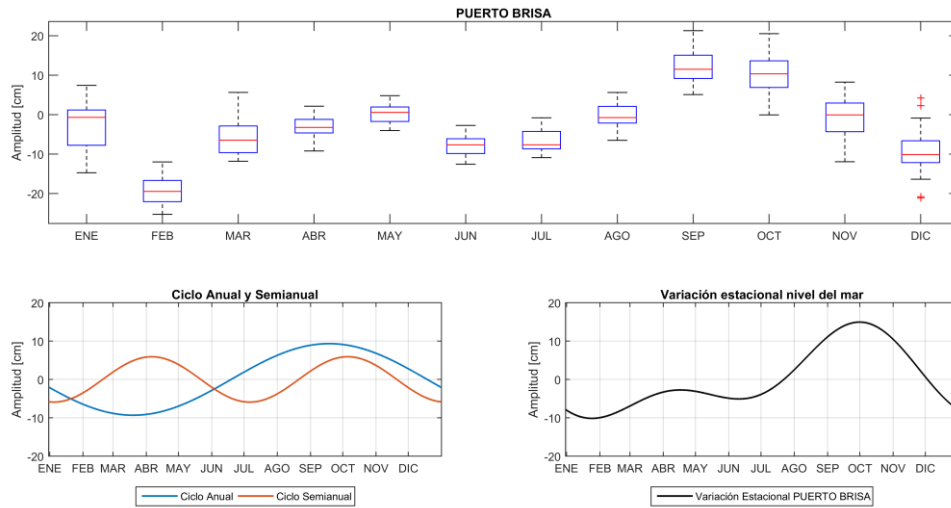
PROVIDENCIA



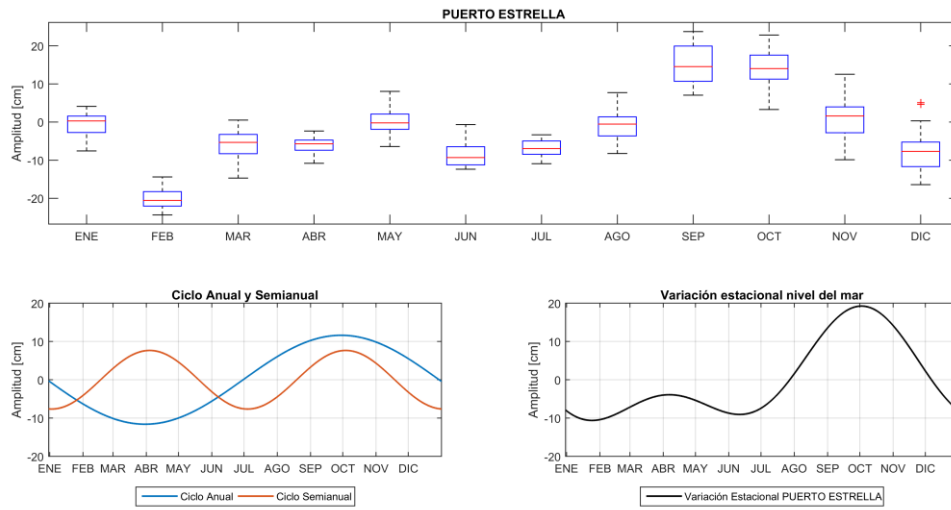
PUERTO BOLÍVAR



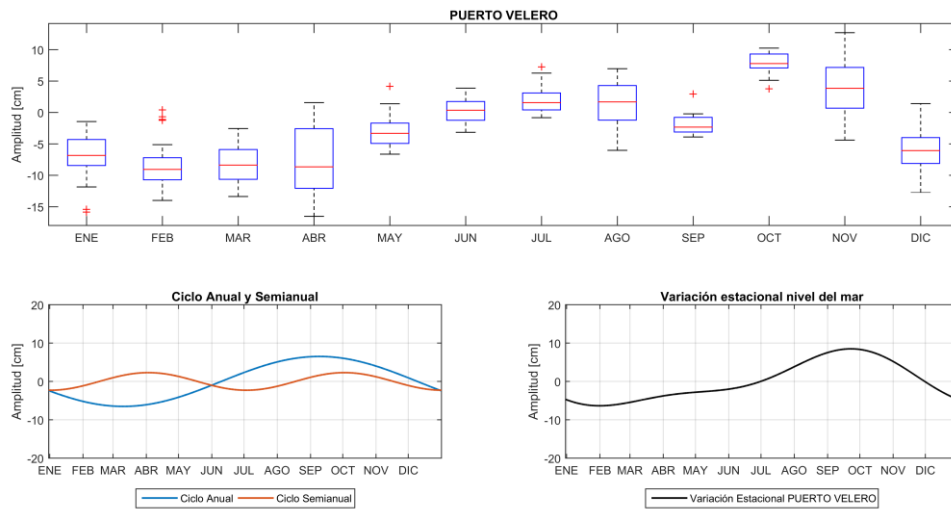
PUERTO BRISA



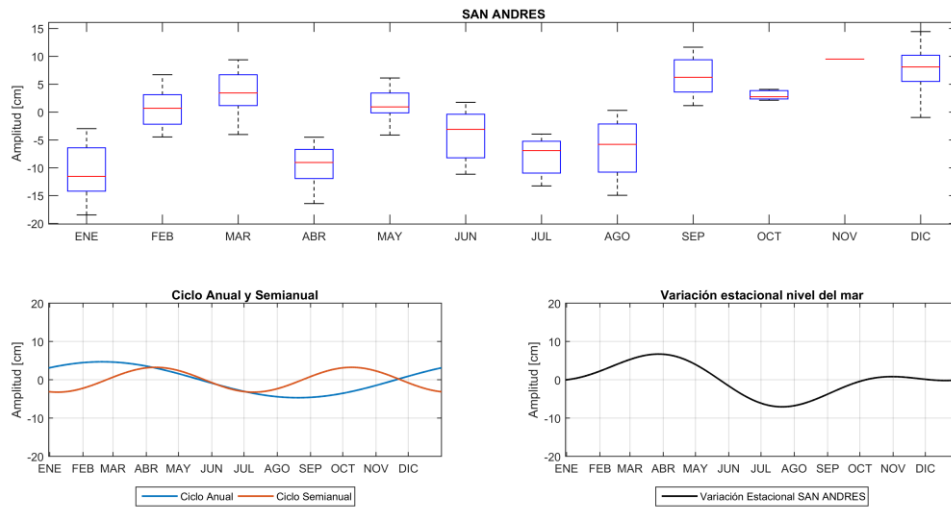
PUERTO ESTRELLA



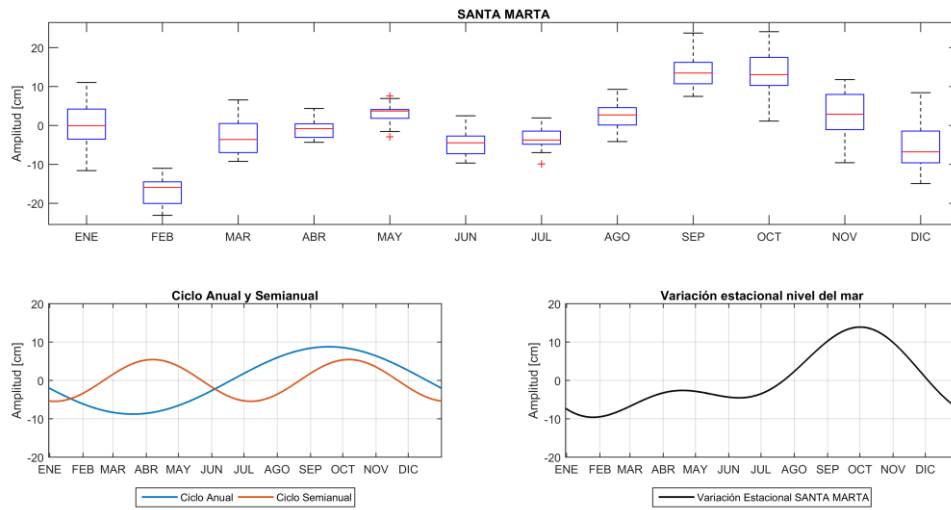
PUERTO VELERO (2013)



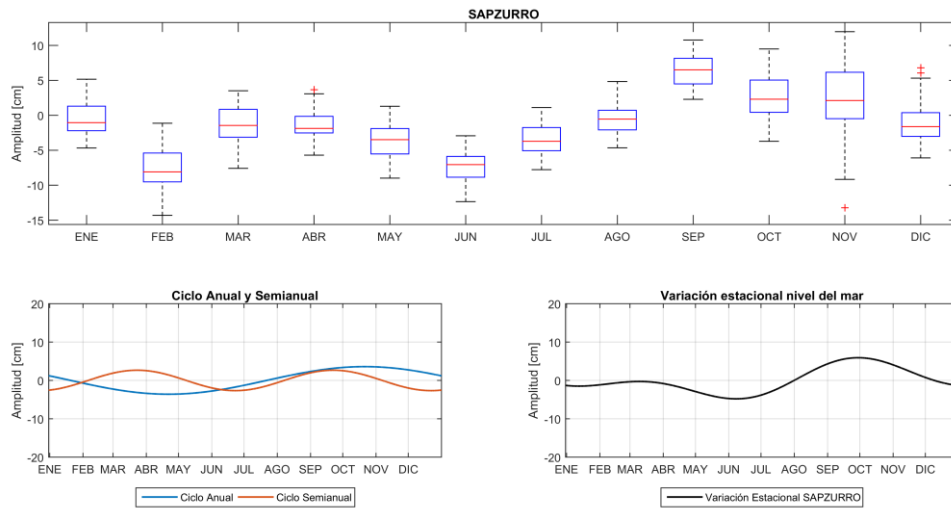
SAN ANDRÉS



SANTA MARTA



SAPZURRO



TURBO

