



Variación de la onda de marea en la desembocadura del delta del río Magdalena (DDRM) por medio de análisis armónico.

Daniel Alejandro Manjarrez Arroyo

Pregrado de Geología

Departamento de Física y Geociencias - Universidad del Norte

Director

Ph.D. Luis Jesús Otero Díaz

Departamento de Física y Geociencias

Universidad del Norte, Barranquilla

Mayo de 2022

*Variación de la onda de marea en la desembocadura del delta del río
Magdalena (DDRM) por medio de análisis armónico*

Daniel Alejandro Manjarrez Arroyo

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

Geólogo

Director (a):

Ph.D. Luis Jesús Otero Díaz

Línea de Investigación:

Oceanografía

Universidad del Norte

Área de Ciencias Básicas, Departamento de Física y Geociencias

Barranquilla, Colombia

2022

Agradecimientos

A mis padres por el respaldo que siempre me han dado y la educación que me han brindado a lo largo de toda mi vida. Mi madre y mi padre que han sido mi motor siempre en los momentos difíciles y me ha ayudado a sobreponerme a las dificultades. A mis hermanas que siempre han traído alegría a mi vida.

A los amigos que he podido conocer durante la carrera, con los cuales he podido compartir experiencias, alegrías, tristezas y han sido una parte fundamental de mi experiencia universitaria.

A la Universidad del Norte por la oportunidad brindada a través de la beca que me otorgaron, de la que pude ser beneficiario durante mi carrera.

Al cuerpo de docentes de los distintos departamentos de la Universidad del Norte, que me acompañaron en este camino de aprendizaje y que se han esmerado en preparar de la mejor manera a los estudiantes para sus futuros profesionales.

Por último, me gustaría agradecer a mi director de trabajo de grado Luis Jesús Otero Díaz, con el cual siempre he podido mantener una buena relación y del que he podido aprender mucho a lo largo de mi carrera en distintas materias. Gracias por todo el apoyo brindado durante este proceso.

Resumen

Aproximadamente 61 días de registro del nivel del mar proporcionados por el grupo de Geociencias de la Universidad del Norte (GEO4) fueron utilizados para desarrollar un estudio de variación de la onda de marea en la desembocadura del río Magdalena (DDRM) a través de un análisis armónico. Con los registros de 1 dato/hr se hizo uso de la herramienta T-TIDE para la descomposición de la serie del nivel del mar. Este método está basado en el cálculo de las amplitudes y las fases de las componentes armónicas a partir de las series de nivel del mar. Sus componentes de marea astronómica, residuo/marea meteorológica y componentes armónicas principales fueron generadas e identificadas para las 7 estaciones distribuidas a lo largo del río, pasando desde Bocas de Ceniza (Km-1) ubicada en la desembocadura, hasta Aguas de Malambo (Km-39), ubicada 39 km río arriba de la desembocadura. Las mediciones del nivel del mar revelan una amortiguación de la onda de marea en la medida que la onda avanza río arriba. Los valores obtenidos al calcular el rango de marea promedio y el rango mareal de la componente astronómica en cada una de las estaciones (RMP y RMAP) así lo demuestran (reducción de 0.5301 y 0.3257 en la estación Km-1 hasta 0.1095 y 0.0934 en Km-39). El análisis armónico muestra una amortiguación de las componentes diurnas y semidiurnas (K_1 , O_1 , M_2 , S_2 , Q_1 y N_2) en dirección río arriba. Las principales constituyentes armónicas fueron K_1 , O_1 , M_2 a lo largo de 4 de 7 estaciones. Las componentes de largo periodo M_m y MSF muestran un crecimiento casi continuo a lo largo del río e incluso en la estación Km-39 son dos de las 3 componentes más significativas. La interacción de los efectos no lineales como la fricción con el fondo, el flujo del río, cambios en la batimetría y morfología del sistema, con las componentes armónicas generan una disipación de los armónicos de bajo periodo y una amplificación de las componentes de largo período (quincenal y mensual) debido a la afectación en menor medida de los efectos friccionales.

Palabras clave: Análisis armónico, marea astronómica, marea meteorológica, componentes armónicas.

Abstract

Approximately 61 days of sea level records provided by the Geosciences group of the Universidad del Norte (GEO4) were used to develop a study of tidal wave variation at the mouth of the Magdalena River (DDRM) through harmonic analysis. The T-TIDE tool was used to decompose the sea level series. This method is based on the calculation of the amplitudes and phases of the harmonic components from the sea level series. Its astronomical tide, residual/meteorological tide and principal harmonic components were generated and identified for the 7 stations distributed along the river, passing from Bocas de Ceniza (Km-1) located at the mouth, to Aguas de Malambo (Km-39), located 39 km upstream from the mouth. Sea level measurements reveal a damping of the tidal wave as the wave moves upstream. The values obtained by calculating the mean tidal range and the tidal range of the astronomical component at each of the stations (RMP and RMAP) demonstrate this (reduction from 0.5301 and 0.3257 at station Km-1 to 0.1095 and 0.0934 at Km-39). Harmonic analysis shows a damping of diurnal and semidiurnal constituents (K_1 , O_1 , M_2 , S_2 , Q_1 y N_2) in the upstream direction. The main harmonic constituents were K_1 , O_1 , M_2 along 4 out of 7 stations. The long period components Mm and MSF show almost continuous growth along the river and even at station Km-39 are two of the 3 most significant components. The interaction of non-linear effects such as friction with the bottom, river flow, changes in the bathymetry and morphology of the system, with the harmonic components generate a dissipation of the low period harmonics and an amplification of the long period components (fortnightly and monthly) due to the lesser extent of the frictional effects.

Keywords: Harmonic analysis, astronomical tide, meteorological tide, harmonic components

Contenido

Resumen.....	IV
Lista de figuras.....	VII
Lista de tablas.....	VIII
Lista de símbolos y abreviaturas	IX
1 Introducción.....	1
2 Planteamiento del problema.....	3
3 Objetivos.....	4
3.1 Objetivo general	4
3.2 Objetivos específicos.....	4
4 Área de Estudio.....	5
5 Metodología.....	8
5.1 Datos.....	8
5.2 Análisis armónicos de marea.....	8
6 Resultados.....	11
7 Discusiones	17
8 Conclusiones.....	20
9 Recomendaciones.....	21
10 Referencias.....	22

Lista de figuras

- Figura 4-1:** a) Geografía de la zona norte de Colombia; b) Ubicación geográfica de las estaciones empleadas. Km: Kilómetro donde se encuentra ubicada la estación respecto a la desembocadura del río Magdalena..... 6
- Figura 6-1:** Serie de (1) nivel del mar, (2) marea astronómica, y (3) marea meteorológica para cada una de las estaciones estudiadas. (a) Bocas de Ceniza, (b) Bocatoma Pto-Colombia, (c) Bavaria, (d) Port. Magdalena, (e) Dársena AAA, (f) Isla Cabica y (g) Aguas de Malambo. 11
- Figura 6-2:** Gráfico de amplitud vs frecuencia de las componentes armónicas significativas de cada estación. (a) Bocas de Ceniza, (b) Bocatoma Pto-Colombia, (c) Bavaria, (d) Port. Magdalena, (e) Dársena AAA, (f) Isla Cabica y (g) Aguas de Malambo. 15

Lista de tablas

- Tabla 4-1:** Simbología de las principales componentes astronómicas con sus respectivos periodos (hr)..... 7
- Tabla 5-1:** Estaciones mareográficas empleadas junto a su símbolo, coordenadas geográficas, periodo de medición de datos, y el periodo continuo común de todas las estaciones (PCE). * = estaciones con intervalos de datos faltantes..... 10
- Tabla 6-1:** Cota menor promedio (m), cota mayor promedio (m), rango mareal promedio (RMP) y rango de la marea astronómica promedio (RMAP) para cada una de las estaciones. 12
- Tabla 6-2:** Amplitudes medidas en metros (m) de las componentes armónicas significativas de marea para cada estación estudiada. PVA: Porcentaje de variación de la amplitud (signo negativo representa reducción y el signo positivo amplificación de la componente). 16

Lista de símbolos y abreviaturas

Símbolo	Término	Unidad SI
M_2	Principal lunar	m
K_1	Lunisolar diurna	m
S_2	Principal solar	m
O_1	Principal lunar diurna	m
N_2	Lunar elíptica mayor	m
Q_1	Lunar elíptica mayor	m
M_m	Lunar mensual	m
MSF	Lunisolar sinódica quincenal	m

Abreviaturas

Abreviatura	Término
PCE	Periodo continuo común de todas las estaciones
RMP	Rango mareal promedio
RMAP	Rango de la marea astronómica promedio

1 Introducción

Los deltas de los ríos son resultado de la interacción entre factores fluviales, geomorfológicos, meteorológicos y marinos (Syvitski & Saito, 2007; Wright & Coleman., 1973; Zhao et al., 1997). Entre estos factores están los aportes de sedimento, flujos fluviales y subterráneos, regímenes de marea, energía del oleaje y corrientes litorales (Khojasteh et al., 2021). Cualquier cambio en estos aspectos modificará los regímenes geomorfológicos y sedimentológicos de los deltas (Wang et al., 2006). Debido al cambio climático y al aumento de eventos extremos, se considera que estos pueden sufrir cambios drásticos en los años venideros, con consecuencias imprevisibles para la sociedad y los ecosistemas naturales (Ericson et al., 2006; Syvitski & Saito, 2007; Milliman et al., 2008).

La marea juega un papel importante en la configuración de los estuarios. El conocimiento de esta ayuda a prevenir inundaciones costeras, al mantenimiento del agua potable y a la ecología (transporte de materia, dinámicas de turbiditas, etcétera) (Wang et al., 2021). Estas son causadas por las fuerzas gravitacionales de la luna y el sol sobre los océanos, las cuales generan elevaciones y corrientes principalmente diurnas y semidiurnas (Pawlowicz et al., 2002). La interacción entre las mareas astronómicas y las no-linealidades generadas en los deltas provocan sobremareas (frecuencias armónicas que son múltiplos de una componente armónica principal) y mareas compuestas (armónicos creados de la suma o resta de dos frecuencias) (Lafta, 2022; Nidzieko, 2010). Esto se llama distorsión de la marea astronómica, y es causado por la fricción del fondo, el flujo del río, cambios batimétricos y la morfología (Dronkers, 1986; Godin, 1991; Oliveira et al., 2006).

Existen principalmente dos métodos para medir la marea astronómica y su variación (Guo et al., 2019). El primero es el método armónico, el cual requiere el cálculo de las amplitudes y fases de las constituyentes mareales que interactúan. El segundo es el método estadístico, el cual calcula la función de densidad de probabilidad (Nidzieko, 2010;

Song et al., 2011). Varios autores han analizado la marea astronómica utilizando un análisis armónico (Pawlowicz et al., 2002; Lafta, 2022; El-Geziry & Radwan, 2012; Matte et al., 2013; 2014; Leffler et al., 2009). Por ejemplo, El-Geziry & Radwan. (2012), concluyeron que las componentes M_m y MSF son las que más influyen en la marea astronómica de la costa de Alejandría, Egipto, utilizando el programa T-TIDE. Asimismo, Lafta (2022) encontró una disminución pronunciada de la marea en dirección río arriba; más específicamente de las componentes K_1 , O_1 , M_2 y S_2 debido a los efectos de fricción con el fondo y a la geometría del estuario.

El río Magdalena, de mayor longitud y área de drenaje entre los sistemas fluviales de Colombia, desemboca sus aguas en el mar Caribe. Su aporte de sedimentos al mar ($144 \times 10^6 \text{ t a}^{-1}$ de sedimentos en suspensión) es considerado como uno de los mayores a nivel mundial (Restrepo et al., 2006). Por lo tanto, la descarga sedimentaria del río Magdalena ha sido incluida en balances globales de flujos de sedimentos hacia los océanos (e.g. Milliman et al., 1983, 1992, 2008; Walling, 2009). Además, estas descargas fluviales han sido señaladas como responsables de efectos adversos sobre sistemas litorales (INVEMAR, 2008), ambientales (Restrepo et al., 2006) y antrópicos (Heezen, 1956; Heezen & Muñoz, 1956), a escala regional. Algunos autores han estudiado la dinámica morfológica e hidrológica del delta del río Magdalena (Restrepo, 2014; Ospino et al., 2018; Restrepo et al., 2016; Restrepo & López, (2008). No obstante, son pocos los estudios que incluyen análisis mareales. Restrepo & López (2008) concluyeron que la marea del río Magdalena es de tipo mixta, principalmente diurna, con un número de forma de 1.9 con alturas que varían entre 0.48 m (cuadraturas) y 0.64 m (sicigias). En documentos técnicos (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2004) se ha indicado que la marea alcanza una amplitud máxima de 0.20 m a aproximadamente 22 km aguas arriba de la desembocadura. Por último, Ospino et al. (2018) identificaron que las componentes armónicas predominantes en la desembocadura son K_1 , M_2 y O_1 .

2 Planteamiento del problema

En el mundo existen múltiples estudios sobre los procesos de transformación de la onda de marea en distintas zonas, por ejemplo, como en el estuario de Guadalquivir (Díez-Minguito, et al., 2012) y en el delta del Ebro (Cerralbo et al., 2014), este último posee condiciones similares a las del delta del río Magdalena al encontrarse en una zona con régimen micromareal. Sin embargo, los estudios de estos mismos procesos en el delta del río Magdalena apenas se empezaron a desarrollar en años recientes, de tal manera que pudieron definir (o redefinir) la longitud del estuario del río Magdalena en función de la amortiguación de las mareas, la fricción estuarina en función de la celeridad de las mareas, el desfase entre niveles y corrientes, la circulación residual y la longitud, y variabilidad de la intrusión salina (Álvarez-Silva et al., 2020). En cuanto a la influencia de la marea en estos procesos, no se cuenta con una amplia gama de información para el régimen micromareal de la zona de la desembocadura del delta del río Magdalena (DDRM). No se ha caracterizado como se da el proceso de amplificación o amortiguación de las componentes armónicas diurnas, semi diurnas, sobremareas y mareas compuestas, por lo que con este trabajo se busca ampliar el conocimiento respecto a análisis de armónicos de marea para una correcta caracterización de las condiciones de las componentes armónicas de marea presentes en esta zona y su transformación desde la desembocadura en dirección río arriba, con el fin de comprender la dinámica mareal en el río Magdalena.

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Caracterizar el comportamiento de la onda de marea a lo largo de la desembocadura del DDRM, su variación río arriba por medio de un análisis armónico y los factores que afectan a las componentes.

3.2 Objetivos específicos

- Descomponer la componente astronómica y su residuo (marea meteorológica) a partir de las series de tiempo de nivel del mar por medio de herramientas computacionales.
- Identificar las principales componentes armónicas de marea astronómica en la DDRM.
- Analizar y establecer el origen de las variaciones en las componentes de marea astronómica en la zona de estudio.
- Identificar patrones de amplificación o disminución de las componentes dentro del área de estudio.

4 Área de Estudio

El río Magdalena es el sistema fluvial con mayor longitud (1612 km) y área de drenaje (257400 km²) de los sistemas fluviales de Colombia, y es considerado uno de los drenajes andinos más importantes de Suramérica (Milliman & Meade, 1983; Restrepo & Kjerfve, 2000). Su cuenca ocupa el 24% del territorio nacional, y sus principales tributarios son los ríos Cauca, San Jorge, Sogamoso y Cesar (Higgins et al., 2017). Basándose en la longitud del canal y en las diferencias climáticas, geográficas e hidrológicas dentro de la cuenca del Magdalena, esta puede dividirse en tres zonas; (1) el Alto Magdalena, con un área total de drenaje de 55937 km², una precipitación media anual de 1535 mm año⁻¹ y un caudal medio de 1341 m³ s⁻¹; (2) el Magdalena Medio que ocupa la mayor superficie de la cuenca (83514 km²) y tiene la mayor precipitación (2185 mm año⁻¹), con un caudal medio de 4224 m³ s⁻¹; (3) y por último el Bajo Magdalena con un área de drenaje de 43360 km² y una precipitación media anual de 1.632 mm año⁻¹, donde el caudal aumenta significativamente, alcanzando valores tan altos como 7106 m³ s⁻¹ (IDEAM, 1990, 2001, 2003).

Debido a su ubicación geográfica existe un régimen de lluvias con un comportamiento bimodal (Poveda, 2004), en la cual hay dos temporadas húmedas (abril-mayo y octubre-noviembre), en la cual la segunda temporada el caudal medio y la tasa media de transporte de sedimentos en suspensión alcanzan valores de hasta 8063.1 m³ s⁻¹ y 531 x10³ t d⁻¹, respectivamente (Restrepo, et al. 2016). Por otra parte, la temporada seca comprende desde los meses de diciembre a abril y sus valores de caudal medios son de 4360.5 m³ s⁻¹ y tasa media de transporte de sedimentos en suspensión de 218 x10³ t d⁻¹ (Restrepo et al., 2016). La temporada de transición entre julio y agosto corresponde a disminución en las precipitaciones y unas condiciones de caudal moderado (7700 m³ s⁻¹).

El DDRM forma un delta tropical arqueado de 1690 km² caracterizado por planicies aluviales, complejos lagunares marginales y cordones litorales (Verette et al., 1992). La marea es de tipo mixta (coeficiente de Courtier F=1.9), principalmente diurna, con rangos que varían entre 0.45 y 0.64 m (Restrepo & Lopez, 2008). El DDRM está alineado con un

cañón submarino de alta pendiente ($\sim 40^\circ$), el cual se encuentra relacionado a los aportes sedimentarios del río (Ercilla et al., 2002). Varias intervenciones humanas han sido realizadas con el fin de promover la navegación comercial en el puerto de Barranquilla y mitigar los procesos sedimentarios, generando cambios geomorfológicos. En 1936 se construyeron dos tajamares en la desembocadura del río con el fin de reducir el ancho, aumentar el flujo y la capacidad de transporte de sedimentos. Actualmente la desembocadura es de 540 m de ancho y la profundidad mínima de 9.5 m (Restrepo et al., 2016

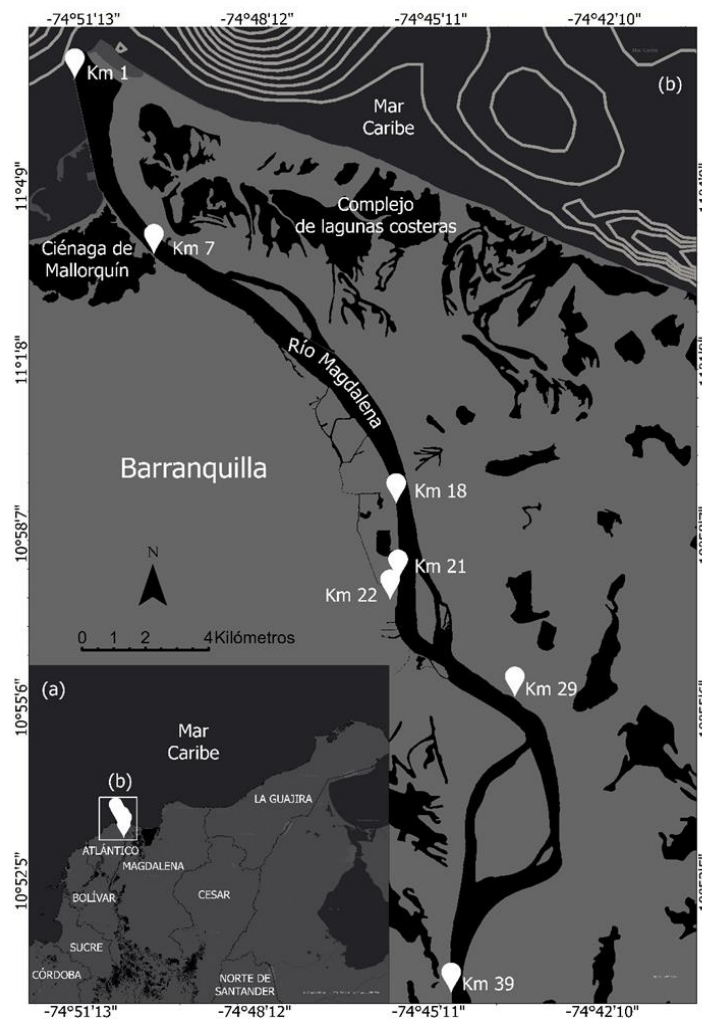


Figura 4-1: a) Geografía de la zona norte de Colombia; b) Ubicación geográfica de las estaciones empleadas. Km: Kilómetro donde se encuentra ubicada la estación respecto a la desembocadura del río Magdalena.

Tabla 4-1: Simbología de las principales componentes astronómicas con sus respectivos periodos (hr).

Símbolo	Nombre	Periodo (hr)
M_2	Principal lunar	12.42
K_1	Lunisolar diurna	23.93
S_2	Principal solar	12.00
O_1	Principal lunar diurna	25.82
N_2	Lunar elíptica mayor	12.66
Q_1	Lunar elíptica mayor	26.87
M_m	Lunar mensual	661.30
MSF	Lunisolar sinódica quincenal	354.37

5 Metodología

5.1 Datos

El grupo de investigación en Geociencias de la Universidad del Norte (GEO4) proporcionó datos instantáneos de nivel del mar de siete estaciones mareográficas distribuidas a lo largo de la desembocadura del río Magdalena en la costa Caribe colombiana (Figura 4-1, Tabla 5-1). Estos datos fueron tomados cada 15 minutos entre noviembre de 2017 y agosto de 2018. Debido a la inconsistencia en la toma de datos de las series de tiempo se analizó el periodo continuo común más largo de mediciones en las estaciones, el cual va del 8 de junio de 2018 al 6 de agosto de 2018.

5.2 Análisis armónicos de marea

La herramienta de análisis T-TIDE fue aplicada a las series de nivel del mar para obtener los constituyentes armónicos de marea y descomponer el nivel del mar en su componente astronómica y meteorológica (Pawlowicz et al., 2002; El-Geziry & Radwan, 2012). Esto permite identificar los armónicos de marea que controlan en mayor medida la marea astronómica local de cada una de las estaciones. El programa fue configurado para que haya registro de un dato cada hora.

El programa T-TIDE es un paquete de rutinas ampliamente utilizado para llevar a cabo análisis armónicos con correcciones nodales, inferencia y una variedad de opciones especificadas por el usuario (Pawlowicz et al., 2002; El-Geziry & Radwan, 2012). Este método está basado en el cálculo de las amplitudes y las fases de las componentes armónicas a partir de las series de nivel del mar. Además, puede ser utilizado para realizar predicciones utilizando las componentes analizadas. T-TIDE se basa en el concepto de poder expresar las amplitudes de marea en cualquier localización como la suma de todas sus componentes armónicas, como lo expresan la Eq (1):

$$\eta(t) = \sum_n A_n \cos\left(\frac{2\pi}{T_n}t + \varphi_n\right),$$

(1)

Donde $\eta(t)$ es el desplazamiento de la superficie del mar como función del tiempo, y A , T y φ son la amplitud, periodo y fase de las componentes armónicas respectivamente (Pawlowicz et al., 2002).

Al realizar la descomposición de la serie del nivel del mar por medio de la herramienta T-TIDE se calculó en rango de marea promedio (RMP) asociado al nivel del mar y el rango de marea astronómica promedio (RMAP) tomando la mayor y menor cota de cada ciclo lunar. Dichos valores fueron promediados y el resultado de la diferencia de ambas cotas promedio muestra como resultado el RMP para la serie del nivel del mar y el RMAP para la serie de marea astronómica. Adicionalmente, se realizó el cálculo del porcentaje de variación de la amplitud entre la estación Bocas de Ceniza y Aguas de Malambo. Estas representan a la estación más cercana a la desembocadura (Km-1) y la estación más lejana (Km-39) río arriba, respectivamente.

Tabla 5-1: Estaciones mareográficas empleadas junto a su símbolo, coordenadas geográficas, periodo de medición de datos, y el periodo continuo común de todas las estaciones (PCE). * = estaciones con intervalos de datos faltantes.

Estación	Símbolo	Latitud	Longitud	Periodo de medición	PCE
Aguas de Malambo*	Km-39	10° 49.976'N	74° 44.582'O	05/12/2017 - 06/08/2018	
Isla Cabica	Km-29	10° 55.122'N	74° 43.488'O	01/12/2017 – 06/08/2018	
Dársena AAA*	Km-22	10° 56.806'N	74° 45.659'O	16/11/2017 – 08/08/2018	08/06/2018 - 06/08/2018
Port. Magdalena	Km-21	10° 57.153'N	74° 45.520'O	12/12/2017 – 06/08/2018	
Bavaria	Km-18	10° 58.480'N	74° 45.556'O	13/12/2017 – 07/08/2018	
Bocatoma Pto - Colombia	Km-7	11° 2.804'N	74° 49.779'O	05/12/2017 – 06/08/2018	
Bocas de Ceniza	Km-1	11° 5.854'N	74° 51.160'O	07/06/2018 – 06/08/2018	

6 Resultados

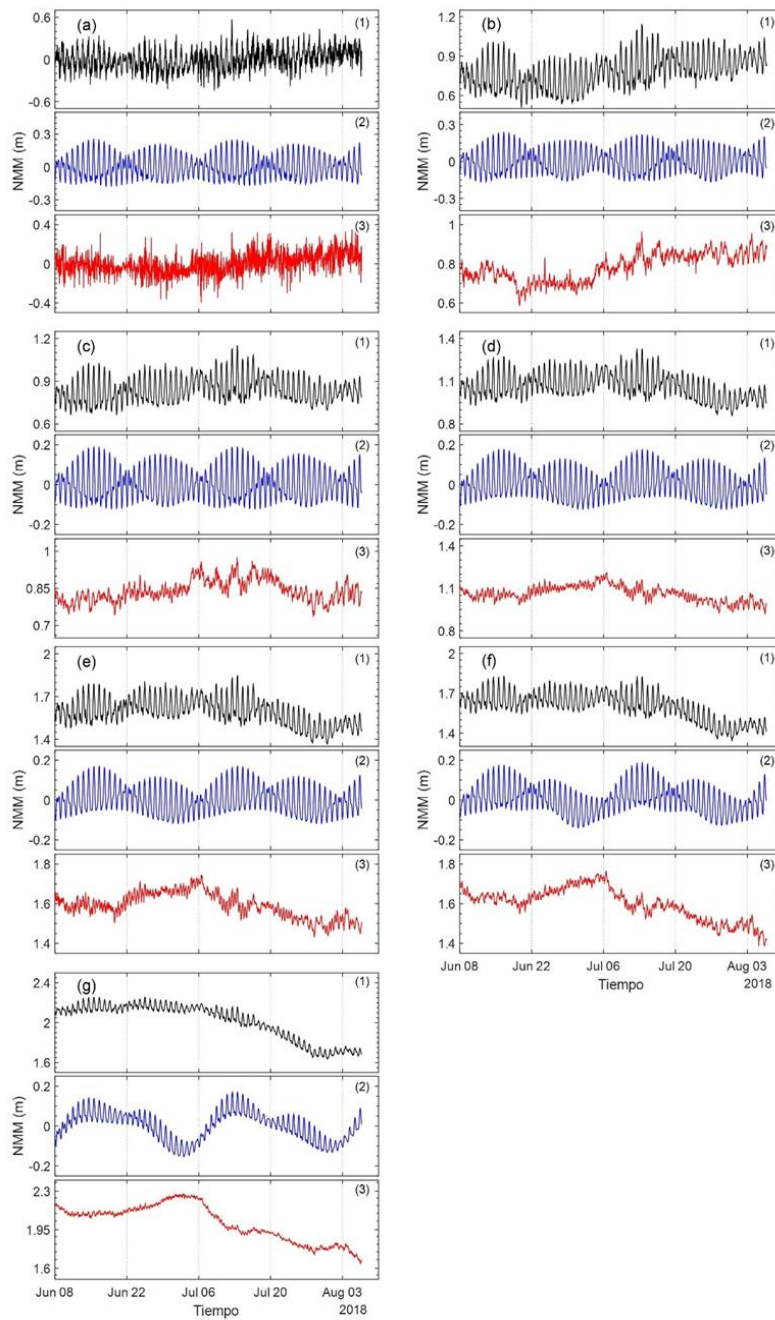


Figura 6-1: Serie de (1) nivel del mar, (2) marea astronómica, y (3) marea meteorológica para cada una de las estaciones estudiadas. (a) Bocas de Ceniza, (b) Bocatoma Pto-Colombia, (c) Bavaria, (d) Port. Magdalena, (e) Dársena AAA, (f) Isla Cabica y (g) Aguas de Malambo.

Los registros de la serie de tiempo del nivel del mar y la descomposición de esta en sus componente de marea astronómica y residuo/marea meteorológica (Figura 6-1) fueron necesarias para el cálculo del rango mareal promedio y el rango mareal astronómico promedio. Los resultados de estos cálculos se presentan en la 6-1 en donde los valores RMP van desde 0.5101 m hasta 0.1095 m, siendo el mayor valor aquel perteneciente a la estación Km-1 y el de menor valor corresponde a la estación Km-39. De igual forma en el caso del RMAP el valor máximo corresponde la estación Km-1 con 0.3257 m, y el menor a la estación Km-39 con 0.0934 m. Se puede observar que las cotas del nivel del mar en la medida que se va río arriba aumentan su magnitud, a excepción de la estación Km-29, en donde la cota mayor promedio disminuye de 1.7084, en la estación Km-22, a 1.7037 en la estación Km-29. A pesar de que las cotas del nivel del mar muestran un comportamiento creciente en su mayoría, el rango mareal promedio disminuye al igual que el rango promedio de la marea astronómica en todas las estaciones al tomar la estación Km-1 como referencia.

Tabla 6-1: Cota menor promedio (m), cota mayor promedio (m), rango mareal promedio (RMP) y rango de la marea astronómica promedio (RMAP) para cada una de las estaciones.

Estación	Nivel del mar			Marea astronómica		
	Cota menor (m)	Cota mayor (m)	RMP (m)	Cota menor (m)	Cota mayor (m)	RMAP (m)
Km-1	-0.2489	0.2812	0.5301	-0.1446	0.1811	0.3257
Km-7	0.6529	0.9608	0.3079	-0.1301	0.1683	0.2984
Km-18	0.7406	0.9814	0.2408	-0.1025	0.1328	0.2353
Km-21	0.9737	1.1892	0.2156	-0.0876	0.1157	0.2033
Km-22	1.5071	1.7084	0.2013	-0.0845	0.1087	0.1932
Km-29	1.5228	1.7037	0.1810	-0.0754	0.0976	0.1730
Km-39	1.9661	2.0756	0.1095	-0.0393	0.0541	0.0934

Por medio del análisis de armónicos de marea se puede observar que la componente K_1 , de periodo 23.93 horas, es la componente de mayor amplitud para todas las estaciones estudiadas, exceptuando la estación Aguas de Malambo (Figura 6-2). En esta última, la componente principal es la M_m , la cual posee un periodo de 661.30 horas. Para las estaciones de Bocas de Ceniza, Bocatoma Pto-Colombia, Bavaria y Port. Magdalena, las componentes con mayor amplitud, además de K_1 , son la semidiurna M_2 y la componente diurna O_1 , con periodos de 12.42 y 25.82 horas, respectivamente. Para la estación de Port. Magdalena, el valor de amplitud de la componente M_m se acerca al de las componentes O_1 y M_2 (Tabla 6-2). Dicha componente comienza a mostrar valores más altos de amplitud y en las estaciones Dársena AAA e Isla Cabica es la segunda componente de marea más importante, con amplitudes de 0.0344 y 0.0502 metros respectivamente. Para la estación de Aguas de Malambo la componente M_m pasa a ser la más importante con una amplitud de 0.0889 metros superando a la componente K_1 cuya amplitud en esta estación es de 0.0363 metros.

Las componentes diurnas y semidiurnas muestran una disminución en su amplitud para la estación Aguas de Malambo respecto a la estación Bocas de Ceniza (Tabla 6-2), en donde la amplitud de la componente K_1 se ve reducida en un 70.00% respecto a su valor inicial en la estación Bocas de Ceniza. Adicionalmente, dicha componente muestra un comportamiento decreciente en la medida que se examinan las estaciones desde la más cercana hasta la más lejana de la desembocadura. Este mismo comportamiento se puede apreciar en las componentes M_2 , O_1 y N_2 , en donde sus porcentajes de variación (PVA) indican que las amplitudes de estas componentes se reducen en un 72.25%, 67.99% y 69.53% respectivamente (Tabla 6-2). En el caso de la componente Q_1 el comportamiento varía respecto a las anteriormente mencionadas y su amplitud aumenta al pasar de la estación Bocas de Ceniza a Bocatoma Pto-Colombia, y a partir de la estación Bavaria los valores de amplitud decrecen hasta la estación Aguas de Malambo. Esta componente muestra un bajo PVA, en la cual su amplitud se vio reducida en un 2.17%. La amplitud de la componente S_2 muestra un comportamiento decreciente en la mayoría del trayecto

exceptuando la estación Bavaria, en donde la amplitud incrementa respecto a la estación Bocatoma Pto-Colombia, a partir de esta estación la amplitud decrece hasta que en las estaciones Isla Cabica y Aguas de Malambo no se reporta variación (Tabla 6-2). Además, su PVA muestra una reducción para la componente S_2 de 35.52%.

Por otro lado, las componentes M_m y MSF evidencian un comportamiento distinto. La componente M_m principalmente aumenta su amplitud desde la estación Bocas de Ceniza hasta Aguas de Malambo, exceptuando el valor registrado en la estación Bavaria donde su amplitud disminuye respecto a la estación Bocatoma Pto-Colombia (Tabla 6-2). Para esta componente el PVA evidencia un crecimiento de la amplitud de 746.66%. Para la componente MSF se exhibe un comportamiento principalmente creciente en su amplitud, exceptuando el tramo entre la estación de Bavaria y Port. Magdalena en donde los valores de amplitud disminuyen. El PVA indica que la componente MSF se amplifica en un 70.33% (Tabla 6-2).

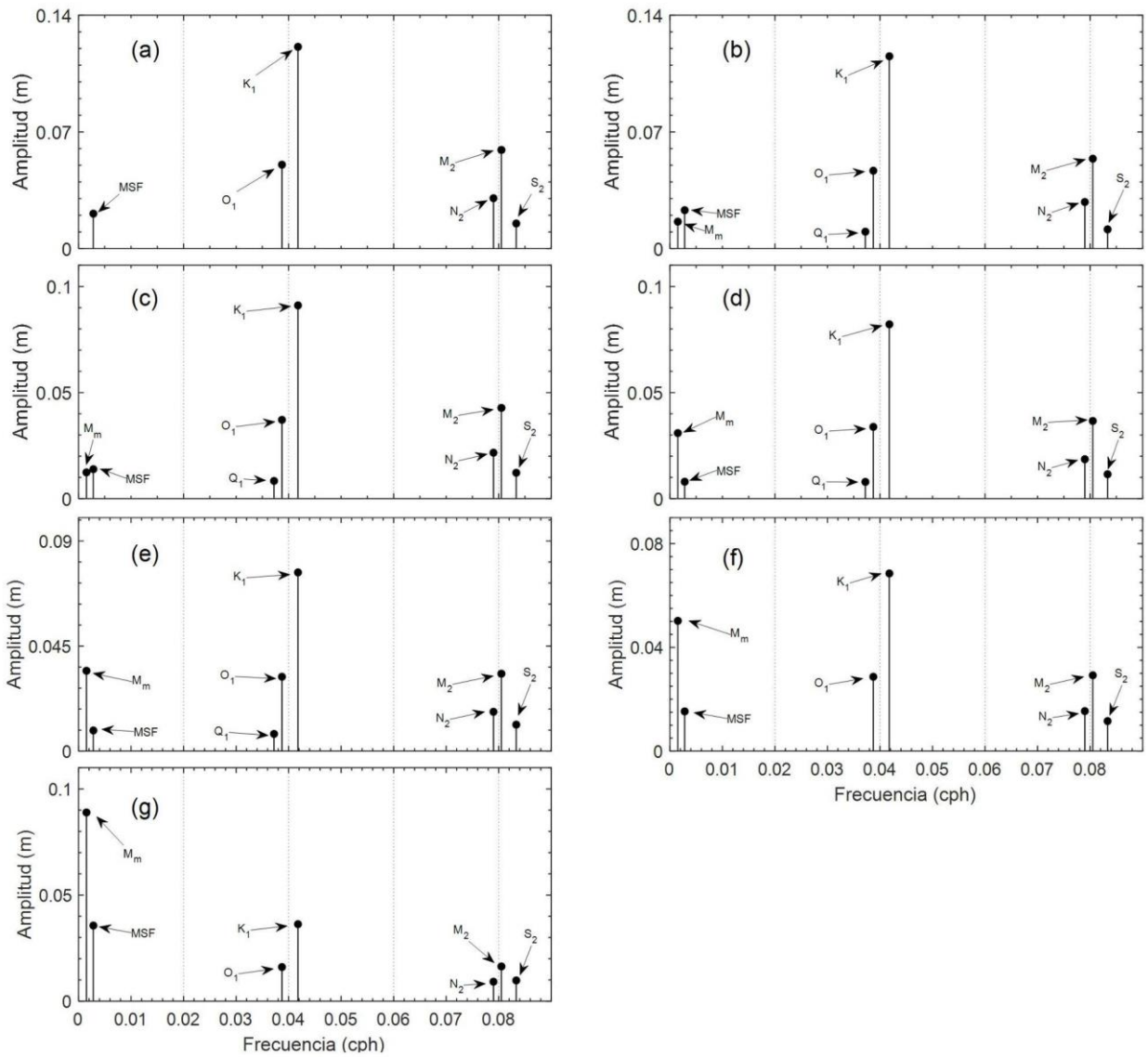


Figura 6-2: Gráfico de amplitud vs frecuencia de las componentes armónicas significativas de cada estación. (a) Bocas de Ceniza, (b) Bocatoma Pto-Colombia, (c) Bavaria, (d) Port. Magdalena, (e) Dársena AAA, (f) Isla Cabica y (g) Aguas de Malambo.

Tabla 6-2: Amplitudes medidas en metros (m) de las componentes armónicas significativas de marea para cada estación estudiada. PVA: Porcentaje de variación de la amplitud (signo negativo representa reducción y el signo positivo amplificación de la componente).

	Km-1	Km-7	Km-18	Km-21	Km-22	Km-29	Km-39	PVA (%)
M_2	0.0591	0.0539	0.0428	0.0366	0.0332	0.0292	0.0164	-72.25
K_1	0.1210	0.1153	0.0911	0.0822	0.0766	0.0685	0.0363	-70.00
S_2	0.0152	0.0116	0.0122	0.0115	0.0113	0.0098	0.0098	-35.52
O_1	0.0503	0.0467	0.0372	0.0338	0.0319	0.0287	0.0161	-67.99
N_2	0.0302	0.0280	0.0217	0.0186	0.0168	0.0154	0.0092	-69.53
Q_1	0.0046	0.0102	0.0084	0.0079	0.0074	0.0071	0.0045	-2.17
M_m	0.0105	0.0162	0.0124	0.0309	0.0344	0.0502	0.0889	746.66
MSF	0.0209	0.0230	0.0139	0.0080	0.0089	0.0153	0.0356	70.33

7 Discusiones

La magnitud del rango mareal promedio calculada para la estación Bocas de Ceniza con la serie de tiempo empleada en este trabajo muestra un valor similar a el valor calculado por Restrepo & López (2008), en donde los autores presentan un valor de 0.62 m, similar a los 0.5301 calculados en este estudio. Este rango mareal decrece de forma continua en la medida que se avanza río arriba (Tabla 6-1). El rango mareal promedio y el rango de marea astronómica promedio muestran una reducción desde 0.5301 y 0.3257 hasta 0.1095 y 0.0934. Lo cual demuestra una reducción del 79.34% y 71.63%, respectivamente. Tal comportamiento refleja una continua atenuación de la onda de marea al propagarse aguas arriba de la DDRM (Lafta, 2022).

Las oscilaciones de marea se encuentran influenciadas por multitud de fuerzas astronómicas gobernadas por complejos sistemas astronómicos no lineales, que son afectadas por múltiples factores topográficos. Las componentes armónicas diurnas y semidiurnas al ser componentes de periodo corto están claramente afectadas por los efectos no lineales dentro del río, tales como la fricción con el fondo, el flujo del río, cambios en la batimetría y en la morfología del sistema (Dronkers, 1986; Godin, 1991; Oliveira et al., 2006). Las componentes significativas que se obtuvieron en este estudio (K_1 , O_1 , M_2 , S_2 , Q_1 y N_2) muestran una atenuación en sus amplitudes río arriba, así como se demuestra con el PVA (Tabla 6-2). Componentes de periodo largo como M_m y MSF , con periodos de 27.55 días y 14.76 días respectivamente se comportan de manera distinta. En el caso de la componente M_m , la amplificación de esta componente es muy marcada en la medida que la onda de marea se desplaza río arriba. La componente quincenal MSF clasificada como marea compuesta es producto de la diferencia entre la componente semidiurna lunar (M_2) y solar (S_2) (Dronkers, 1964). Esta componente quincenal muestra un comportamiento no lineal dado por la interacción de sus armónicos constituyentes en aguas someras (Rose & Bhaskaran, 2017). Estos autores muestran que para estaciones que

se encuentran en mar abierto la componente MSF no tiene mayor predominancia, no obstante, en esta investigación no se puede corroborar esta afirmación debido a la ausencia de datos de una estación en mar abierto. Sin embargo, se puede ratificar que la ubicación geográfica y la poca profundidad en el río son esenciales para la generación de mareas no lineales de largo periodo, como las componentes quincenales y mensuales (MSF y M_m). Numerosos estudios han demostrado que la fricción es un factor importante para filtrar componentes de alta frecuencia (bajo periodo), disipándose en mayor medida estas componentes, y dejando pasar las componentes de mayor periodo (Lafta, 2022; Le Blond, 1978; Godin, 1985; Aubrey & Speer, 1985; Shetye & Gouveia, 1992; Hill, 1994). Dada la naturaleza de las ondas y sus comportamientos físicos, se podría añadir que seguramente el comportamiento de las componentes armónicas de periodo largo y corto puedan estar influenciados por las obras de origen antrópico que se han desarrollado a lo largo del tiempo en el río Magdalena.

Las oscilaciones de marea se encuentran influenciadas por multitud de fuerzas astronómicas gobernadas por complejos sistemas astronómicos no lineales, que son afectadas por múltiples factores topográficos. Las componentes armónicas diurnas y semidiurnas al ser componentes de periodo corto están claramente afectadas por los efectos no lineales dentro del río, tales como la fricción con el fondo, el flujo del río, cambios en la batimetría y en la morfología del sistema (Dronkers, 1986; Godin, 1991; Oliveira et al., 2006). Las componentes significativas que se obtuvieron en este estudio (K_1 , O_1 , M_2 , S_2 , Q_1 y N_2) muestran una atenuación en sus amplitudes río arriba, así como se demuestra con el PVA (Tabla 6-2). Componentes de periodo largo como M_m y MSF , con periodos de 27.55 días y 14.76 días respectivamente se comportan de manera distinta. En el caso de la componente M_m , la amplificación de esta componente es muy marcada en la medida que la onda de marea se desplaza río arriba. La componente quincenal MSF clasificada como marea compuesta es producto de la diferencia entre la componente semidiurna lunar (M_2) y solar (S_2) (Dronkers, 1964). Esta componente quincenal muestra un comportamiento no lineal dado por la interacción de sus armónicos constituyentes en

aguas someras (Rose & Bhaskaran, 2017). Estos autores muestran que para estaciones que se encuentran en mar abierto la componente MSF no tiene mayor predominancia, no obstante, en esta investigación no se puede corroborar esta afirmación debido a la ausencia de datos de una estación en mar abierto. Sin embargo, se puede ratificar que la ubicación geográfica y la poca profundidad en el río son esenciales para la generación de mareas no lineales de largo periodo, como las componentes quincenales y mensuales (MSF y M_m). Numerosos estudios han demostrado que la fricción es un factor importante para filtrar componentes de alta frecuencia (bajo periodo), disipándose en mayor medida estas componentes, y dejando pasar las componentes de mayor periodo (Lafta, 2022; Le Blond, 1978; Godin, 1985; Aubrey & Speer, 1985; Shetye & Gouveia, 1992; Hill, 1994). Dada la naturaleza de las ondas y sus comportamientos físicos, se podría añadir que seguramente el comportamiento de las componentes armónicas de periodo largo y corto puedan estar influenciados por las obras de origen antrópico que se han desarrollado a lo largo del tiempo en el río Magdalena

8 Conclusiones

Los efectos de amortiguación se pueden observar claramente por medio la disminución continua de los rangos mareales promedio y los rangos de marea astronómica promedio, los cuales presentan una reducción entre la estación de Bocas de Ceniza y Aguas de Malambo de 79.34% y 71.63%, respectivamente, además de mostrar una continua disminución de sus valores en cada una de las estaciones. De igual manera, los efectos no lineales como la fricción con el fondo, el flujo del río, cambios en la batimetría y morfología del sistema afectan de manera directa a las componentes diurnas y semidiurnas (K_1 , O_1 , M_2 , S_2 , Q_1 y N_2) generando la disipación de la amplitud de estas componentes armónicas río arriba. Las componentes K_1 , M_2 y O_1 , las cuales son las 3 componentes más significativas en la estación Bocas de Ceniza, presentan una reducción de su amplitud de 70.00%, 72.25% y 67.99% respectivamente, denotando una clara disipación de la energía de las componentes de corto periodo. Por el contrario, las componentes de largo periodo (M_m y MSF) principalmente se amplifican continuamente en dirección río arriba debido a que la fricción afecta en menor medida a las componentes de baja frecuencia como las componentes quincenales y mensuales.

9 Recomendaciones

Para el análisis de la componente quincenal MSF se recomienda para futuros estudios la implementación de una estación con registro de datos de nivel del mar ubicada en mar abierto. A través de esto se podría caracterizar mejor su comportamiento y corroborar si dicha componente en mar abierto no tiene mayor influencia en las ondas de marea, así como expresan algunos autores, al igual que observar el comportamiento de las otras componentes armónicas de corto y largo periodo. Adicionalmente se recomienda para futuros estudios extender el análisis más allá del kilómetro 39, con el fin de detectar cómo se comportan las componentes armónicas y hasta donde se pueden detectar. Por último, el delta del río Magdalena al estar intervenido de forma antrópica se esperaría que, debido al cambio en la geometría de la desembocadura, las ondas de marea interactúen de forma distinta a como lo hacían previamente, sin embargo, para realizar esta aseveración se necesitarían estudios más profundos y acceso a información previa a la intervención humana.

10 Referencias

- Álvarez-Silva, O. A., Solano, L., Pulido, D., Santana, J., and Villate, D., (2020). Tidal propagation and damping in the unconvergent and microtidal estuary of the Magdalena River - Caribbean Sea. [Propagación y amortiguación de la marea en el estuario no convergente y micromareal del río Magdalena - Mar Caribe], vol. 2020.
 - Aubrey, D.G. & Speer, P.E., (1985). A study of non-linear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems, [Estudio de la propagación no lineal de las mareas en sistemas de entrada/estuarios poco profundos]. Part I: Observations. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 21, p. 185-205.
 - Cerralbo, P., Grifoll, M., Valle-Levinson, A., Espino, M., (2014). Tidal transformation and resonance in a short, microtidal Mediterranean estuary (Alfacs Bay in Ebre delta), [Transformación y resonancia de la marea en un estuario mediterráneo corto y micromareal (Bahía de los Alfacs en el delta del Ebro)]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 145. Elsevier Ltd, pp. 57–68. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2014.04.020>.
- Coleman, J.M. (1981). (Ed.) *Deltas: processes of deposition and models for exploration*, [Deltas: procesos de depositación y modelos para exploración]. 2 Ed. Burgess Publishing Company, 124 p.
- Díez-Minguito, M.; Baquerizo, A.; Ortega, M.; Navarro, G.; Losada, M.A., (2012). Tide transformation in the Guadalquivir estuary (SW Spain) and process-based zonation, [Transformación de las mareas en el estuario del Guadalquivir (SO de España) y zonificación basada en procesos]. *J. Geophys. Res.* doi:10.1029/2011JC007344.

- Dronkers, J. J. (1964). Tidal computations in rivers and coastal waters. Estuarine and Coastal Waters. North-Holland, Amsterdam. New York, John Wiley.
- Dronkers, J., (1986). Tidal asymmetry and estuarine morphology. Netherlands J. Sea Res. 20 (2), 107—131. [https://doi.org/10.1016/0077-7579\(86\)90036-0](https://doi.org/10.1016/0077-7579(86)90036-0)
- El-Geziry, T., & Radwan, A. (2012). Sea level analysis off Alexandria, Egypt. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, 38(1), 1-5.
- Ercilla, G.; Alonso, B.; Estrada, F.; Chiocci, F.; Baraza, J., and Ferran, M., (2002). The Magdalena turbidite system (Caribbean Sea): Present-day morphology and architecture model. *Marine Geology*, 185(3–4), 303–318.
- Ericson, J. P., Vörösmarty, C. J., Dingman, S. L., Ward, L. G., & Meybeck, M. (2006). Effective sea-level rise and deltas: Causes of change and human dimension implications. *Global and Planetary Change*, 50(1-2), 63-82.
- Galloway, W.E. (1975). Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional systems, [Marco procesal para describir la evolución morfológica y estratigráfica de los sistemas deposicionales deltaicos]. En: Broussard, M. L. (Ed.) *Deltas, models for exploration*. Houston Geological Society, pp. 87-98.
- Godin, G (1985). Modification of river tides by the discharge. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 111, 2, p. 257-274.
- Godin, G. (1991). Frictional effects in river tides. *Tidal hydrodynamics*. New York, John Wiley, 379-402.
- Godin, G., (1999). The propagation of tides up rivers with special considerations on the upper Saint Lawrence river. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 48, 307—324.

- Guo, L., Wang, Z.B., Townend, I., He, Q., (2019). Quantification of Tidal Asymmetry and Its Nonstationary Variations. *J. Geophys. Res.-Ocean.* 124 (1), 773—787.
- Hernandez, H. (2018). Variabilidad de la estratificación y mezcla en la desembocadura del Delta del río Magdalena (Doctoral dissertation, Tesis de Maestría. Universidad del Norte).
- Heezen, B.C., (1956). Corrientes de turbidez del rio Magdalena. *Boletín de la Sociedad Geológica Colombiana.* 51/52, 135-143.
- Heezen, B.C., Muñoz, J., (1956). Magdalena turbidities in deep-sea sediments. *Proceedings of the 4th Caribbean Geological Conference, Trinidad*, pp. 317-324. Artículo del ST del Magdalena.
- Higgins, A., Restrepo, J. C., Otero, L. J., Ortiz, J. C., & Conde, M. (2017). Distribución vertical de sedimentos en suspensión en la zona de desembocadura del Río Magdalena, Colombia. *Latin american journal of aquatic research*, 45(4), 724-736.
- Hill, A.E. (1994) Fortnightly tides in a lagoon with variable choking. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 38, p. 423-434.
- IDEAM (1990). Estadísticas Hidrológicas de Colombia (1990–1993) Tomos I–II, Bogotá. 1990. Diego Samper Ediciones.
- IDEAM (2001). Estudio Ambiental de la Cuenca Magdalena-Cauca y Elementos para su Ordenamiento Territorial Technical Report and Arcinfo Database. Bogotá, Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).
- IDEAM (2003). River Database of the Magdalena drainage basin. Bogota, Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) (70 gauging stations), [Base de datos fluviales de la cuenca del río Magdalena. Bogotá, Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) (70 estaciones de aforo).

- INVEMAR (2008). Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras. Plan de acción para la creación del Subsistema Nacional de Áreas Marinas Protegidas de Colombia. Informe técnico final. D. Alonso & L. Ramírez (Eds.). 28p + anexos. Santa Marta, Colombia.
- Khojasteh, D., Glamore, W., Heimhuber, V., & Felder, S. (2021). Sea level rise impacts on estuarine dynamics: A review. *Science of The Total Environment*, 780, 146470.
- Lafta, A. A. (2022). Investigation of tidal asymmetry in the Shatt Al-Arab river estuary, Northwest of Arabian Gulf. *Oceanologia*.
- Le Blond, P.H (1978). On tidal propagation in shallow rivers, [Sobre la propagación de las mareas en ríos poco profundos], *Journal of Geophysical Research*, 83, C9, p. 4717-4721.
- Leffler, Keith & Jay, David. (2009). Enhancing tidal harmonic analysis: Robust (hybrid L1/L2) solutions. *Continental Shelf Research*. 29. 78-88.
10.1016/j.csr.2008.04.011.
- Matte, Pascal & Jay, David & Zaron, Edward. (2013). Adaptation of Classical Tidal Harmonic Analysis to Nonstationary Tides, with Application to River Tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 30. 569-589. 10.1175/JTECH-D-12-00016.1.
- Matte, P., Y. Secretan, and J. Morin. (2014). Temporal and spatial variability of tidal-fluvial dynamics in the St. Lawrence fluvial estuary: An application of nonstationary tidal harmonic analysis. *J. Geophys. Res. Oceans*, 119, 5724–5744, doi:10.1002/2014JC009791.
- Milliman, J. D., Meade, R. H., (1983). World-wide delivery of river sediment to the oceans. *Journal of Geology* 91, 1 - 21.

- Milliman, J. D., Syvitski, P.M., (1992). Geomorphic/Tectonic control of sediment discharge to the ocean: The importance of small mountainous rivers. *Journal of Geology*. 100, 525-544.
- Milliman, J.D., Farnworth, K., Jones, P., Xu, K., Smith, L., (2008). Climatic and anthropogenic factors affecting river discharge to the global ocean, 1951-2000. *Global and Planetary Change*. 62, 187-194.
- Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, (2004). Gaceta Oficial Ambiental: Resolución 1118 Septiembre 21 de 2004 – Por la cual se modifica un plan de Manejo Ambiental. Bogotá, D.C., Colombia. 24 p.
- Nidzieko, N. J. (2010). Tidal asymmetry in estuaries with mixed semidiurnal/diurnal tides. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C8).
- Oliveira, A., Fortunato, A.B., Regob, J.R., (2006). Effect of morphological changes on the hydrodynamics and flushing properties of the Óbidos lagoon (Portugal). *Cont. Shelf Res.* 26 (8), 917—942. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2006.02.011>
- Ospino, S.; Restrepo, J.C.; Otero, L.; Pierini, J., and Alvarez-Silva, O., (2018). Saltwater intrusion into a river with high fluvial discharge: A microtidal estuary of the Magdalena River, Colombia. *Journal of Coastal Research*, 00(0), 000–000. Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208.
- Pawlowicz, R., B. Beardsley, and S. Lentz, (2002): Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T-TIDE, [Análisis armónico clásico de las mareas que incluye estimaciones de error en MATLAB con T-TIDE]. *Comput. Geosci.*, 28, 929–937.
- Poveda, G. (2004). La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diaria [The hydroclimatology of Colombia: a synthesis from the inter-decadal scale to the daily scale]. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 28, 201–222.

- Restrepo, J. D., & Kjerfve, B. (2000). Magdalena river: interannual variability (1975–1995) and revised water discharge and sediment load estimates. *Journal of hydrology*, 235(1-2), 137-149.
- Restrepo, J. D., & Syvitski, J. P. (2006). Assessing the effect of natural controls and land use change on sediment yield in a major Andean river: the Magdalena drainage basin, Colombia, [Evaluación del efecto de los controles naturales y del cambio de uso de la tierra en la producción de sedimentos en un importante río andino: la cuenca del Magdalena, Colombia]. *Ambio*, 65-74.
- Restrepo, J. D., & López, S. A. (2008). Morphodynamics of the Pacific and Caribbean deltas of Colombia, South America. *Journal of South American Earth Sciences*, 25(1), 1-21.
- Restrepo, J. (2014). Dinámica sedimentaria en deltas micromareales-estratificados de alta descarga: Delta del Río Magdalena (Colombia – Mar Caribe). Universidad del Norte.
- Restrepo, J., Schrottke, K., Traini, C., Bartholomae, A., S., Ortíz, J., Otero, L and Orejarena, A. i. p (2016). Estuarine and sediment dynamics in a microtidal, tropical estuary of high fluvial discharge: Magdalena River (Colombia, South America), [Dinámica estuarina y de los sedimentos en un estuario tropical micromareal de alta descarga fluvial: Río Magdalena (Colombia, América del Sur)], *Marine Geology*, In press.
- Rose, L., & Bhaskaran, P. K. (2017). Tidal asymmetry and characteristics of tides at the head of the Bay of Bengal. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 143(708), 2735-2740.
- Shetye, S.R. and Gouveia, A.D. (1992). On the role of geometry of cross-section in generating flood-dominance in shallow estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 35, p. 113-126, 1992.

- Song, D., Wang, X.H., Kiss, A.E., Bao, X., (2011). The contribution to tidal asymmetry by different combinations of tidal constituents. *J. Geophys. Res.* 116, C12007.
<https://doi.org/10.1029/2011JC007270>
- Syvitski, J.P.M. (2005). The morphodynamics of deltas and their distributary channels, [La morfodinámica de los deltas y sus canales distribuidores]. (En PDF). Disponible en: <http://www.criba.edu.ar/scorwg122/reports/RCEMPaper.pdf>
- Syvitski, J. and Saito, Y., (2007). Morphodynamics of deltas under the influence of humans. *Global and Planetary Change*, 57(3–4), 261– 282.
- Tonda, P. L. (1999). Propagación de la onda de marea en estuarios someros (Doctoral dissertation, Universidad de Cantabria).
- Vernette, G., Mauffret, A., Bobier, C., Briceno, L., Gayet, J., (1992). Mud diapirism, fan sedimentation and strike-slip faulting, Caribbean Colombian margin. *Tectonophysics*. 202, 335-335.
- Walling, D., (2009). The impact of global change on erosion and sediment transport by rivers: current progress and future challenges. The United Nations World Water Development Report 3: Water in a Changing World. Scientific Paper. UNESCO, Paris, France. 26 p.
- Wang, S.; Hassan, M., and Xiaoping, X., (2006). Relationship between suspended sediment load, channel geometry and land area increment in the Yellow River Delta. *Catena*, 65(3), 302–314.
- Wang, Jinyang & de Swart, Huib & Dijkstra, Yoei. (2021). Dependence of tides and river water transport in an estuarine network on river discharge, tidal forcing, geometry and sea level rise. *Continental Shelf Research*. 225. 104476.
[10.1016/j.csr.2021.104476](https://doi.org/10.1016/j.csr.2021.104476).

Wright, L.D., Coleman, J.M. (1973). Variations in morphology of major river deltas as functions of ocean wave and river discharge regimes, [Variaciones en la morfología de los principales deltas fluviales en función del oleaje oceánico y de los regímenes de descarga fluvial]. Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull. 57 (2), pp. 370-398.

Zhao, Y., Zhou, W., Fei, X., (1997). Basic Evolvment Rule of Lower Yellow River Channel. Huanghe Water Conservancy Press, Zhengzhou, pp. 1 – 197 (in Chinese)

