

*Caracterización Textural de Sedimentos Superficiales del Río Magdalena  
(Calamar, Bolívar)*

**Deysser Jose Sibaja Castillo**

*Pregrado de Geología*

*Departamento de Física y Geociencias-Universidad del Norte*



Universidad del Norte, Barranquilla  
Noviembre de 2021

*Caracterización Textural de Sedimentos Superficiales del Río Magdalena  
(Calamar, Bolívar)*

**Deysser Jose Sibaja Castillo**  
*Pregrado de Geología*  
*Departamento de Física y Geociencias-Universidad del Norte*

*Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:*  
**Geólogo**

Director  
**PhD. Juan Camilo Restrepo López**  
*Departamento de Física y Geociencias*  
*Universidad del Norte*

Co-director  
**PhD. Ana Carolina Torregroza**  
*Departamento de Gestión Industrial, Agroindustrial y de Operaciones*  
*Universidad de la Costa*



Universidad del Norte, Barranquilla  
Noviembre de 2021

## ***Agradecimientos***

*Al proyecto Global Rivers Observatory por el suministro de las muestras utilizadas en esta investigación y darme la oportunidad de aportar algo en el entendimiento del río Magdalena.*

*Al personal encargado de los laboratorios de Geotecnia y Materiales de Construcción y del laboratorio de Hidráulica e Ingeniería Ambiental de la Universidad del Norte por su colaboración en el procesamiento de las muestras de este proyecto.*

*A mi director Juan Camilo Restrepo por su liderazgo, paciencia y apoyo académico y emocional desde mi formación profesional y todo el proceso de esta investigación.*

*A mi codirectora Ana Carolina Torregroza por su interés en acompañarme en esta experiencia investigativa y el aporte de nuevas ideas.*

*A la planta del departamento de profesores del departamento de Física y Geociencias de la Universidad del Norte, especialmente a Luis José Otero Díaz por sus enseñanzas a lo largo de la carrera. De igual forma, agradezco mucho al profesor Felipe Lamus por su ayuda en los análisis realizados en este proyecto.*

*A todos mis amigos y colegas del pregrado de Geología por su compañía, sus consejos y su apoyo.*

*Y finalmente, al soporte más importante en mi vida, mi familia, en especial mi madre María Castillo Guzmán por su fuerza, compromiso, responsabilidad y apoyo para con sus hijos. Jamás encontraré una forma de agradecerles todo lo recibido. Gracias.*

## Resumen

Las características texturales de los sedimentos superficiales de fondo del río Magdalena en Calamar (Bolívar) fueron estudiadas para determinar patrones de variabilidad estacional de estos parámetros y relacionarlos con procesos hidrodinámicos del sistema como el régimen de caudales y el transporte de sedimentos en suspensión. Las muestras fueron recolectadas mensualmente desde enero hasta septiembre del año 2021 en el canal profundo del río Magdalena; fueron secadas y calcinadas para el análisis granulométrico mediante la separación de partículas por tamizado. Debido a las limitaciones de este método para la separación de la fracción limos-arcillas, éstas se clasificaron en conjunto como lodos. Los datos de distribución de tamaño se procesaron en el software GRADISTAT, dando como resultados la dominancia del grupo de las arenas (98,14 %), seguido por los lodos (1,83 %) y luego las gravas finas (0,04 %), las cuales fueron insignificantes. Las muestras presentan un tamaño medio que fluctúa entre arenas medias y finas. En promedio, la selección es moderadamente bien clasificada ( $\sigma = 0,68$ ). El índice de asimetría evidencia una predominancia hacia los finos ( $Sk = 0,20$ ) y una curtosis mesocúrtica ( $k = 1,10$ ). Durante los primeros cinco meses del año hubo una dominancia de arenas medias, la cual cambia a las arenas finas durante los siguientes meses, siendo mayo un mes de transición en las características del tamaño medio. El análisis de grupos a partir de la comparación de los parámetros texturales mostró que los meses de muestreo, se diferencian en 3 clústeres cada uno con más del 70% de similaridad. El primero corresponde a enero, febrero y mayo, el segundo a marzo y abril; el tercero a los meses de junio hasta septiembre. La comparación del caudal medio mensual y el transporte de sedimentos en suspensión evidenciaron una relación inversa con el D50 de los sedimentos, la cual fue señalada mediante el coeficiente de correlación de Pearson con valores de -0.872 y -0.875, respectivamente. Estos valores negativos se ajustan al comportamiento del tamaño medio de los sedimentos de fondo, los cuales son arenas medias en condiciones de época seca con caudales y un transporte de sedimentos de suspensión mínimos y en época húmeda, en la que estos últimos incrementan, el tamaño medio disminuye hacia las arenas finas. Por lo tanto, las condiciones del flujo y transporte se sugieren son los procesos responsables de la variabilidad de las características texturales de los sedimentos de fondo en una escala estacional.

**Palabras clave:** Parámetros texturales, variabilidad, sedimentos de fondo, caudal, transporte de sedimentos en suspensión, Río Magdalena.

## Abstract

The textural characteristics of the superficial bottom sediments of the Magdalena River in Calamar (Bolívar) were studied to determine patterns of seasonal variability of these parameters and relate them to hydrodynamic processes of the system such as the flow regime and the transport of suspended sediments. The samples were collected monthly from January to September 2021 in the deep channel of the Magdalena River; they were dried and calcined for the granulometric analysis by sieving. Due to the limitations of this method for the separation of the silt-clays fraction, they were classified together as mud. The size distribution data were processed in the GRADISTAT software, giving as results the dominance of the sand group (98.14%), followed by the muds (1.83%) and then the fine gravels (0.04%), which were insignificant. The samples have an average size that fluctuates between medium and fine sands. On average, the selection is moderately well sorted ( $\sigma = 0.68$ ). The skewness index shows a predominance of fine skewed ( $Sk = 0.20$ ) and a mesocurtic kurtosis ( $k = 1.10$ ). During the first five months of the year there was a dominance of medium sands, which changed to fine sands during the following months, with May being a transition month in the characteristics of the medium size. The group analysis from the comparison of the textural parameters showed that the sampling months differ in 3 clusters each with more than 70% similarity. The first corresponds to January, February and May, the second to March and April; the third to the months of June to September. The comparison of the monthly average flow and the transport of suspended sediments showed an inverse relationship with the D50 of the sediments, which was indicated by the Pearson correlation coefficient with values of -0.872 and -0.875, respectively. These negative values are adjusted to the behavior of the mean size of the bottom sediments, which are medium sands in dry season conditions with minimal flows and transport of suspension sediments and in the wet season, and when these increase, the size medium decreases towards fine sands. Therefore, the flow and transport conditions suggested are the processes responsible for the variability of the textural characteristics of the bottom sediments on a seasonal scale.

**Keywords:** Textural parameters, variability, bottom sediments, flow, suspended sediment transport, Rio Magdalena.

## Tabla de Contenido

Resumen .....	4
1. Introducción .....	8
2. Marco Teórico y Planteamiento del Problema .....	9
3. Objetivos .....	11
3.1. Objetivo General .....	11
3.2. Objetivos Específicos .....	11
4. Metodología .....	11
4.1. Área de estudio .....	11
4.2. Toma de muestras y recolección de datos.....	12
4.3. Procesamiento de datos y muestras .....	13
4.4. Análisis estadísticos .....	15
5. Resultados .....	16
5.1. Distribución de tamaño de partículas.....	16
5.2. Grupos texturales .....	18
5.3. Análisis de grupos.....	20
5.4. Relación del tamaño de grano con el caudal medio mensual y transporte de sedimentos en suspensión .....	21
6. Análisis de Resultados .....	23
6.1. Distribución de tamaño de partículas y parámetros texturales .....	23
6.2. Similitudes de parámetros y análisis de grupos .....	24
6.3. Relación con caudal y transporte de sedimentos en suspensión .....	25
7. Conclusiones .....	27
8. Referencias Bibliográficas .....	28
9. Anexos.....	31
Anexo 1. Parámetros texturales medidos por GRADISTAT .....	31
Anexo 2. Distribución del grupo textural de las arenas medidos por GRADISTAT. ....	31
Anexo 3. D10, D50 y D90 medidos por GRADISTAT .....	31
Anexo 3. Fotografías de minerales, a través de estereolupa. ....	32

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Denominación del tamiz y apertura en mm y $\mu\text{m}$ . .....	14
<b>Tabla 2.</b> Distribución del tamaño de grano de Udden (1914) y Wentworth (1922) modificada y adaptada en GRADISTAT .....	14
<b>Tabla 3.</b> Parámetros texturales (Método logarítmico) de Folk y Ward (1957). .....	16
<b>Tabla 4.</b> Síntesis de las características texturales de los sedimentos superficiales del fondo. ....	17

## Lista de Figuras

<b>Figura 1.</b> Área de estudio y localización de toma de muestras en Calamar (Bolívar). .....	13
<b>Figura 2.</b> Distribución de: A) Arenas y lodos. B) Tamaño medio. ....	18
<b>Figura 3.</b> Gráficas bivariantes para A): tamaño medio y selección. B): curtosis y asimetría. C): asimetría y selección.....	19
<b>Figura 4.</b> Clústeres jerárquicos. A) Comparación de tamaño medio, selección, asimetría y curtosis. B) Comparación de tamaño medio, selección, asimetría, curtosis, gravas, arenas y lodos. ....	20
<b>Figura 5.</b> Variabilidad estacional del D10, D50, D90 y Caudal mensual. ....	21
<b>Figura 6.</b> Variabilidad estacional del D10, D50, D90 y TSS. ....	22
<b>Figura 7.</b> Diagrama de dispersión y tendencia lineal: A) D50 y caudal. B) D50 y transporte de sedimentos en suspensión. ....	23

## 1. Introducción

El río Magdalena es el sistema fluvial más largo (1612 km) y con mayor área de drenaje del país (257,438 km<sup>2</sup>). Constituye la mayor fuente de sedimentos al Mar Caribe, con una descarga media de sedimentos en suspensión de  $142 \times 10^6 \text{ t a}^{-1}$  (Higgins et al., 2017; Restrepo et al., 2017; Restrepo y Kjerfve, 2000). Una de las más altas del mundo y considerada relevante dentro del análisis del transporte de sedimentos a nivel global (Milliman y Meade, 1983; Milliman et al., 1995). La carga de sedimentos del río Magdalena juega un papel clave en los procesos morfodinámicos en ambientes receptores, como los estuarios y los diferentes ambientes costeros localizados a lo largo de la costa caribe colombiana (Restrepo y Syvitski, 2006; Restrepo et al., 2006). Los ríos de alta descarga y con grandes aportes de sedimento inciden de forma significativa en la dinámica estuarina y en sus procesos bioquímicos debido a la variabilidad temporal del régimen hidrológico, los cambios en las propiedades de los sedimentos y los patrones de dispersión de sedimentos en la desembocadura (Xu et al., 2013; Sahin et al., 2017; Wang et al., 2010).

La dinámica del río Magdalena está sujeta a cambios en el régimen hidrológico. Por ejemplo, Higgins et al (2016), menciona una reducción de esta tasa de hasta 14 % entre los periodos de 1990-1999 y 2000-2010, pasando de  $169 \pm 73 \times 10^6 \text{ t a}^{-1}$  a  $145 \pm 47 \times 10^6 \text{ t a}^{-1}$  respectivamente. En las últimas décadas, los regímenes de caudales y transporte de sedimentos en suspensión exhibieron una variabilidad asociada al fenómeno del Niño Oscilación del Sur (ENSO), la migración de la ZCIT, y procesos climáticos y oceanográficos como la Oscilación Decadal del Pacífico junto con diferentes acciones antrópicas como la deforestación, la agricultura, los cambios en el uso del suelo y la minería (Restrepo y Syvitski, 2006; Restrepo et al., 2014).

Por todo lo anterior, los regímenes de caudales y transporte de sedimentos en suspensión del río Magdalena exhiben una amplia variabilidad (Higgins et al, 2016; Restrepo et al, 2016; Restrepo et al., 2014); Sin embargo, se desconoce si en este sistema fluvial, las propiedades de los sedimentos superficiales del lecho también presentan una variabilidad estacional que pueda relacionarse con los cambios en el régimen hidro-sedimentológico. Hasta la fecha, no hay investigaciones de este tipo en este sistema. Las investigaciones en el área se han enfocado en la estimación de la concentración y el análisis textural y composicional del material particulado en suspensión. No en el sedimento superficial de fondo, debido a que se ha considerado la dominancia del régimen de transporte de sedimentos en suspensión del río Magdalena, en el que se ha estimado que la carga de fondo no supera el 5% del transporte total de sedimentos (Higgins et al., 2017). Los cambios en las propiedades del sedimento superficial del fondo afectarían los procesos de resuspensión y mezcla en la capa de fondo. Por consiguiente, es pertinente analizar las propiedades texturales del sedimento para determinar si también experimentan cambios estacionales significativos y su potencial relación con procesos que ocurren a escala de cuenca y con procesos de transporte de sedimentos en suspensión. Básicamente, se pretende encontrar una relación entre el tipo de sedimento y la estacionalidad fluvial del río Magdalena.



## 2. Marco Teórico y Planteamiento del Problema

El transporte de material particulado del río ya sea en suspensión o de fondo, depende de las propiedades de las partículas y de las condiciones del flujo (Van Rijn, 1993). La estacionalidad y variabilidad climática produce cambios en el caudal y el transporte de sedimentos (Higgins et al., 2017; Restrepo et al., 2016; Restrepo et al., 2014). No obstante, se desconoce si las características físicas y texturales de los sedimentos del río Magdalena experimentan cambios similares a los que exhibe el régimen de transporte de sedimentos y si existe una conexión entre estos patrones de variabilidad. Este tipo de relaciones son importantes porque el flujo de sedimento y nutrientes (particularmente la fracción particulada) es uno de los componentes centrales en los ciclos bio-geoquímicos globales, así como en la dispersión de sustancias contaminantes (Wang et al., 2013). De igual manera, la dinámica de los sedimentos contribuye al entendimiento de los patrones de sedimentación en desembocaduras y ambientes estuarinos (Sahin et al., 2017).

Los sedimentos de fondo son importantes porque pueden atrapar contaminantes de los cuerpos de agua convirtiéndose en fuentes secundarias de contaminación, ya que bajo determinadas circunstancias de flujo se favorecen las condiciones de resuspensión y se liberan sustancias contaminantes (Burton, 2002). El análisis de los sedimentos permite obtener una aproximación a su composición textural y mineral, así como su contenido de materia orgánica (Jácome de Solórzano y Llanos de Bonilla, 1990). Existen estudios similares sobre el análisis de los sedimentos en diferentes sistemas fluviales. Por ejemplo, Okeyode y Jibiri (2013) estudiaron las características texturales de los sedimentos del río Ogun en el suroeste de Nigeria, los cuales presentaron un predominio de arenas finas a medias, sugiriendo una depositación durante bajas condiciones de energía debido a la tendencia hacia las partículas finas cuando la energía del medio que las transporta disminuye. Por otro lado, Davide et al (2003) analizaron la granulometría, los elementos principales, los nutrientes y los metales traza en los sedimentos del lecho y suspensión en el río Po (Italia), asociados a condiciones normales y de alto caudal. Se encontró una distribución bimodal de partículas: las más gruesas y con mayor contenido de carbonatos en la cuenca superior y las más finas con menor carbonato en la cuenca inferior. Además, durante las condiciones de alto caudal e inundación las concentraciones de los nutrientes y elementos traza se redujeron debido al lavado de los sedimentos contaminados del fondo y la resuspensión del material más grueso, mientras que en condiciones normales de caudal la materia orgánica es mayor en el sedimento suspendido que en el de fondo (Davide et al, 2003).

Asimismo, Remo et al (2016), estudió la variabilidad temporal de los sedimentos del fondo del canal principal en la parte superior del río Mississippi en Estados Unidos, comparando la distribución actual con la registrada en 1925. Encontraron que los tamaños de los sedimentos del lecho actuales son similares a los históricos con más del 90% de las muestras con una mediana ubicada en arena fina a gruesa y que las partículas más gruesas en los dos estudios se encontraron inmediatamente dentro o cerca de donde aflora el lecho de roca fuente. Dicha ausencia de cambios significativos en los sedimentos se sugiere es debido a que las condiciones del presente flujo son similares a las del pasado. Por otro lado, González

y Millán, (2016) estudiaron los parámetros texturales de las arenas del canal del río Portuguesa (Venezuela) y de su llanura aluvial. La primera dominada por una fracción de tamaño de arenas medias bien seleccionadas a moderadamente seleccionadas; en la segunda predominan los limos gruesos a medios muy pobremente seleccionados. Esta distribución es controlada por la influencia de diferentes factores como el área fuente de sedimentos, la distancia y los mecanismos de transporte, la composición del sedimento, y el ambiente de sedimentación, entre otros.

En el caso del río Magdalena las propiedades de los sedimentos han sido estudiadas para la carga en suspensión. Restrepo et al. (2016) determinaron que el material en suspensión se ve influenciado por la estacionalidad climática que experimenta el delta del río. En época húmeda predominan los limos gruesos, seguidos de arenas y finalmente arcillas con valores de 76.4%, 7.1%, y 16.5%, respectivamente. En la época seca predominan los limos medios, mientras que disminuye la arena y aumentan las arcillas (65.4%, 1.9% y 32.7%, respectivamente). Sin embargo, esta variabilidad no se ha estudiado para los sedimentos de fondo, por lo que se desconoce si las propiedades del sedimento de fondo en este sistema presentan una variabilidad estacional similar y en caso de presentarse, se desconoce si existe una relación que las asocie con características del sistema fluvial como el régimen de caudal o los cambios en el transporte de sedimentos.

Esta investigación se centrará en realizar una caracterización textural de los sedimentos de fondo del río Magdalena en el municipio de Calamar (Bolívar). Este sector ha sido un área de estudio pertinente para entender la dinámica de la cuenca baja del río Magdalena debido a que la ubicación del municipio coincide con la bifurcación del río (canal del dique) hacia el noroeste que conecta con la Bahía de Cartagena, así como la presencia de la estación meteorológica del IDEAM más cercana a la desembocadura del río. En consecuencia, esta estación brinda información con la cual se han realizado varias investigaciones sobre la variabilidad de las descargas fluviales al Mar Caribe, así como sus impactos en las zonas costeras (Higgins et al., 2016; Restrepo et al., 2006; Restrepo et al., 2014). El motivo de esta investigación es determinar si existe una variabilidad estacional en los sedimentos de fondo. En caso de presentarse, analizar los procesos estacionales que los producen y observar si estos cambios coinciden con los patrones de transporte de sedimentos en suspensión y el régimen de caudales. Por consiguiente, las preguntas de investigación que se quieren contestar son: ¿existen cambios estacionales significativos en las características texturales de los sedimentos de fondo?; si se presentan dichos cambios, ¿se pueden establecer patrones estacionales de variabilidad en estas características? ¿los regímenes de caudal y transporte de sedimentos en suspensión constituyen los procesos primarios que controlan dicha variabilidad?

### 3. Objetivos

#### 3.1. Objetivo General

Determinar y analizar los patrones de variabilidad estacional de las características texturales del sedimento de fondo del Río Magdalena (Calamar).

#### 3.2. Objetivos Específicos

- Identificar patrones de variabilidad estacional en las características texturales de los sedimentos
- Estimar la contribución del caudal y el transporte de sedimentos en suspensión en la variabilidad de las características texturales de los sedimentos.

### 4. Metodología

Con el fin de establecer si existe una variabilidad estacional en las características texturales del sedimento de fondo en el río Magdalena y analizar los procesos que generan esa variabilidad, esta investigación pretende hacer un análisis de las propiedades texturales del sedimento de fondo para identificar patrones en una escala estacional.

#### 4.1. Área de estudio

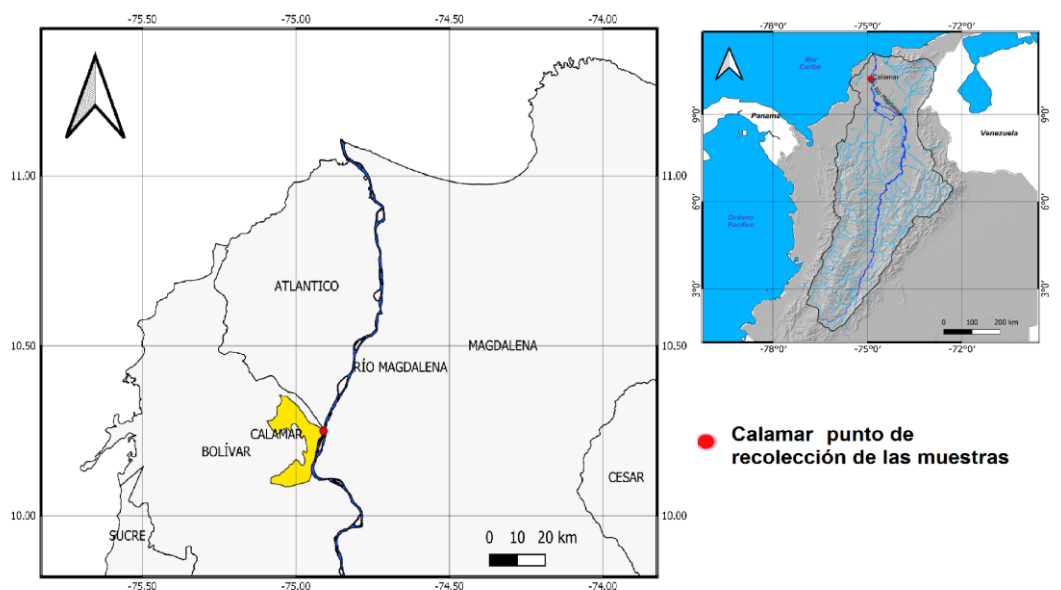
El río Magdalena es el sistema fluvial más importante del país. Con una descarga media de sedimentos en suspensión de  $142 \times 10^6 \text{ t a}^{-1}$  aporta la mayor cantidad de sedimentos al Mar Caribe en su desembocadura (Higgins et al., 2017; Restrepo et al., 2017; Restrepo y Kjerfve, 2000). Su cuenca se ha clasificado en tres zonas de acuerdo a sus características morfológicas y diferencias en los patrones climáticos e hidrológicos. El Alto Magdalena tiene un área de drenaje con  $55937 \text{ km}^2$ , experimenta una precipitación media anual de  $1.535 \text{ mm a}^{-1}$ , un caudal promedio de  $1.341 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , y una tasa promedio de transporte de sedimentos en suspensión de  $148,2 \times 10^3 \text{ ton d}^{-1}$ . El Medio Magdalena, que se extiende por  $83.514 \text{ km}^2$ , tiene las más altas precipitaciones ( $2.185 \text{ mm a}^{-1}$ ), un caudal promedio y una tasa media de transporte de sedimentos en suspensión de  $4.224 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  y  $189,2 \times 10^3 \text{ ton d}^{-1}$ , respectivamente. Finalmente, el Bajo Magdalena, con un área de drenaje de  $43.360 \text{ km}^2$ , exhibe una precipitación anual media es de  $1.632 \text{ mm a}^{-1}$ ; un caudal y transporte de sedimentos en suspensión estimados en  $7.280 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  y  $430,1 \times 10^3 \text{ ton d}^{-1}$ , respectivamente (Higgins et al., 2016; Higgins et al., 2017).

En cuanto a su variabilidad hidrológica la oscilación de la ZCIT induce un régimen bimodal en el régimen de lluvias (Poveda, 2004). Con dos estaciones húmedas en los meses de abril-mayo y octubre-noviembre. Este último coincide con el periodo de caudales máximos (noviembre:  $10287 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ). Mientras que la estación seca corresponde a los meses de enero-marzo, durante los cuales se presentan los caudales anuales más bajos (marzo:  $4068 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ) (Restrepo y Kjerfve, 2000). Los meses de transición corresponden a julio-agosto, cuando se experimenta una disminución en las lluvias y caudales moderados. La cuenca baja del Magdalena ha experimentado cambios en su régimen de transporte de sedimentos suspendidos. El río exhibió una reducción hasta de un 14% entre los periodos de 1990-1999 y 2000-2010, al pasar de una tasa de  $169 \times 10^6 \text{ t a}^{-1}$  a una de  $145 \times 10^6 \text{ t a}^{-1}$ , respectivamente debido a múltiples causas a escala total de la cuenca del río como cambios hidroclimatológicos, exposición de capas competentes y particularmente la cuenca sedimentaria de la Depresión Momposina por la acumulación de sedimentos (Higgins et al, 2016).

El municipio de Calamar se localiza en la margen izquierda del río, en el ápice del delta. Por consiguiente, en este punto el río se bifurca en dos canales; el primero conocido como Canal del Dique, se dirige en dirección noroeste hacia la Bahía de Cartagena, mientras que el canal principal sigue hacia el norte hasta su desembocadura en el Mar Caribe en Bocas de Ceniza (Restrepo et al, 2017). El municipio está rodeado por un área de colinas al sur del canal del Canal del Dique, constituidas por rocas resistentes a la meteorización y pendientes estructurales como la Serranía de Songó, ubicada al norte de San Cayetano y otras zonas más planas al oriente del río Magdalena que pertenecen a las estribaciones más bajas de la Serranía de San Jacinto. Estas zonas presentan pendientes suaves, vegetación de bosque muy seco y sedimentos de piedemonte, terrazas y diques de la planicie fluvial del río Magdalena (Barrera et al, 2001). La geología de la plancha 31 del Servicio Geológico Colombiano evidencia sedimentos cuaternarios coluvio-aluviales y fluviolacustrinos en las orillas del río Magdalena que suprayacen a rocas antiguas estratificadas. Además, una alternancia granodecreciente de arcillolitas color pardo oliva claro en capas gruesas a medias con areniscas líticas gruesas a muy gruesas pertenecientes a la formación Rancho (Barrera et al, 2001).

## 4.2. Toma de muestras y recolección de datos

Las muestras de sedimento de fondo fueron recolectadas mensualmente en Calamar (Bolívar), antes de la bifurcación en el ápice deltaico (Figura 1), entre enero y septiembre de 2021. Las muestras fueron recolectadas en el canal profundo del río Magdalena usando una draga Shipek, dentro del marco del proyecto Global Rivers Observatory. Las muestras fueron refrigeradas en una nevera para conservar sus porcentajes de humedad. También se obtuvo una serie de datos históricos del caudal medio mensual (1940-2021) y de transporte de sedimento en suspensión medio mensual (TSS) (1975-2021) en la estación del IDEAM en Calamar. Con estos datos se logró la representación gráfica de los cambios de estas variables a partir de los promedios mensuales.



**Figura 1.** Área de estudio y localización de toma de muestras en Calamar (Bolívar).

#### 4.3. Procesamiento de datos y muestras

Para calcular el contenido de humedad de las muestras de sedimentos se retiró el contenido de agua mediante un secado en un horno a una temperatura de 60° por 72 horas. El cambio del peso de la muestra después del secado determina el contenido de humedad de los sedimentos mediante la siguiente expresión,

$$H = \frac{a-b}{a-c} \times 100 \quad \text{Ecuación 1}$$

donde  $a$  es la masa del sedimento húmedo y el recipiente (g),  $b$  es la masa del sedimento seco y el recipiente (g) y  $c$  es la masa en gramos del recipiente. Las unidades de la humedad son en porcentajes. Este método se usa para determinar el contenido de agua en sedimentos y sólidos en una muestra (Zagal y Sadzawka, 2007)

Posteriormente, las muestras secas se calcinaron para eliminar el contenido de materia orgánica en un horno o mufla a una temperatura de 550° por 6 horas. La estimación de la materia orgánica (MO) se logra mediante la calcinación de la muestra de sedimentos. El método de calcinación o muflado consiste en un estimado de la materia orgánica del suelo por pérdida de peso por ignición o calcinación. Es simple y de bajo costo y es apropiado para estimar el carbono orgánico total si se calibra correctamente con metodologías de medición estandarizadas (Dadabie et al., 2018). Se aplica la siguiente expresión,

$$MO = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100 \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde  $m_1$  es la masa del recipiente (g),  $m_2$  la masa del sedimento no calcinado y el recipiente (g) y  $m_3$  es la masa del sedimento calcinado y el recipiente (g). Las unidades de MO son en porcentaje.

Posterior a esto, las muestras de sedimentos fueron separadas mediante tamices de malla cuadrada siguiendo la normativa INV E 213-13 aplicada para la separación de los sedimentos de suelos de acuerdo con el tamaño del grano. Este proceso permite a cada tamiz retener un tipo de sedimento y deja pasar los sedimentos más pequeños al siguiente. Los tamices seleccionados para este análisis fueron los Numero 5, 6, 10, 18, 35, 60, 120 y 230. La tabla 1 representa la denominación del tamiz y su apertura en mm y  $\mu\text{m}$ .

**Tabla 1.** Denominación del tamiz y apertura en mm y  $\mu\text{m}$ .

<b>Tamiz</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>10</b>	<b>18</b>	<b>35</b>	<b>60</b>	<b>120</b>	<b>230</b>
<b>mm</b>	4	3.35	2	1	0.5	0.25	0.125	0.063
<b><math>\mu\text{m}</math></b>	4000	3350	2000	1000	500	250	125	63

La clasificación del sedimento se ajustó a la escala de Udden (1914) y Wentworth (1922) (Tabla 2). Parte del sedimento logró pasar el tamiz número 230 que separa las arenas y limos, este material quedó en el plato inferior del montaje de tamices y se genera una incertidumbre sobre el contenido de limos y arcillas presentes. Por tal motivo, ese contenido se pesó y se clasificó conjuntamente como lodo, grupo textural que contiene la fracción limo-arcillas.

**Tabla 2.** Distribución del tamaño de grano de Udden (1914) y Wentworth (1922) modificada y adaptada en GRADISTAT

<b>Tipo de sedimento</b>	<b>Tamaño de Partícula</b>		
	<b><math>\mu\text{m}</math></b>	<b>mm</b>	<b>phi</b>
<b>Gravas finas</b>	4000	4	-2
<b>Gravas muy finas</b>	2000	2	-1
<b>Arenas muy gruesas</b>	1000	1	0
<b>Arenas gruesas</b>	500	0,5	1
<b>Arenas medias</b>	250	0,25	2
<b>Arenas finas</b>	125	0,125	3
<b>Arenas muy finas</b>	63	0,063	4
<b>Lodos (arcillas y limos)</b>	< 63	< 0,063	5

Los pesos retenidos en cada uno de los tamices fueron ingresados a la herramienta GRADISTAT (Blott y Kenneth 2001). Este programa clasifica la distribución del tamaño de los sedimentos a partir de la escala de Udden (1914) y Wentworth (1922) y determina otros parámetros como la media, la selección, la asimetría, la curtosis, D50, D10 y D90 entre otros, por medio del método de momentos y el logarítmico de Folk y Ward (1957) presentados en la tabla 3. Los parámetros de Folk y Ward (1957) definen la selección como una medida que señala el grado de similaridad entre los tamaños de todas las partículas de una muestra y los clasifica desde muy mal clasificado a muy bien clasificado. La asimetría es una medida que hace referencia a la simetría de una distribución de elementos a la izquierda o derecha de la media aritmética sin necesidad de graficarla. La curtosis establece la forma de la curva de distribución, si esta es achatada o escarpada; a mayor grado de curtosis la forma de la curva será más apuntada o escarpada (Tabla 3).

#### 4.4. Análisis estadísticos

Se realizó un dendrograma o clustering en el software MATLAB R2021a para determinar el grado de similitud entre los sedimentos a partir de la comparación del tamaño medio, selección, asimetría, curtosis y los porcentajes de gravas, arenas y lodos de las muestras. El tipo de clúster escogido es el jerárquico o dendrograma aglomerativo el cual genera grupos a partir de la distancia euclidiana más cercana entre 2 clústeres con valores similares o parecidos. También se analizó la relación entre el D50 con el caudal y transporte de sedimentos en suspensión (escala estacional), mediante el coeficiente de correlación de Pearson. Por medio de este coeficiente se estima si existe una relación estadística entre estas variables mediante la expresión,

$$r_{xy} = \frac{\sum z_x z_y}{N} \quad \text{Ecuación 3}$$

donde  $x$ ,  $y$  son las variables a comparar y  $Z_{x,y}$  es la desviación estándar de las variables.  $N$  es el número de datos. Se realizó una prueba de hipótesis ( $p$ -valor) para determinar la significancia estadística de esta relación.

**Tabla 3.** Parámetros texturales (Método logarítmico) de Folk y Ward (1957).

<b>Parámetro</b>	<b>Clasificación</b>	<b>Fórmula</b>
<b>Selección (<math>\sigma</math>)</b> <0,35 $\phi$ 0,35 $\phi$ a 0,50 $\phi$ 0,50 $\phi$ a 0,70 $\phi$ 0,70 $\phi$ a 1,00 $\phi$ 1,00 $\phi$ a 2,00 $\phi$ 2,00 $\phi$ a 4,00 $\phi$ >4,00 $\phi$	Muy bien clasificado Bien clasificado Moderadamente bien clasificado Moderadamente clasificado Pobremente clasificado Muy pobremente clasificado Extremadamente mal clasificado	$\sigma_I = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6.6}$ <b>Ecuación 4</b>
<b>Asimetría (<math>Sk</math>)</b> +0,3 a +1,0 +0,1 a +0,3 +0,1 a -0,1 -0,1 a -0,3 -0,3 a -1,0	Asimetría hacia los muy finos Asimetría hacia los finos Simétrica Asimetría hacia los gruesos Asimetría hacia los muy gruesos	$Sk_I = \frac{\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)}$ <b>Ecuación 5</b>
<b>Curtosis (<math>k</math>)</b> < 0,67 0,67 a 0,90 0,90 a 1,11 1,11 a 1,50 1,50 a 3,00 > 3,00	Muy platicúrtica Platicúrtica Mesocúrtica Leptocúrtica Muy leptocúrtica Extremadamente leptocúrtica	$K_G = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2.44(\phi_{75} - \phi_{25})}$ <b>Ecuación 6</b>

## 5. Resultados

### 5.1. Distribución de tamaño de partículas

Las características texturales de los sedimentos superficiales de fondo del río Magdalena (Tabla 4) exhiben un tamaño de grano que fluctuó entre 2,82  $\phi$  y 1,47  $\phi$ , con un tamaño medio de arenas finas (2,17  $\phi$ ). Dicho valor es muy cercano al límite entre arenas



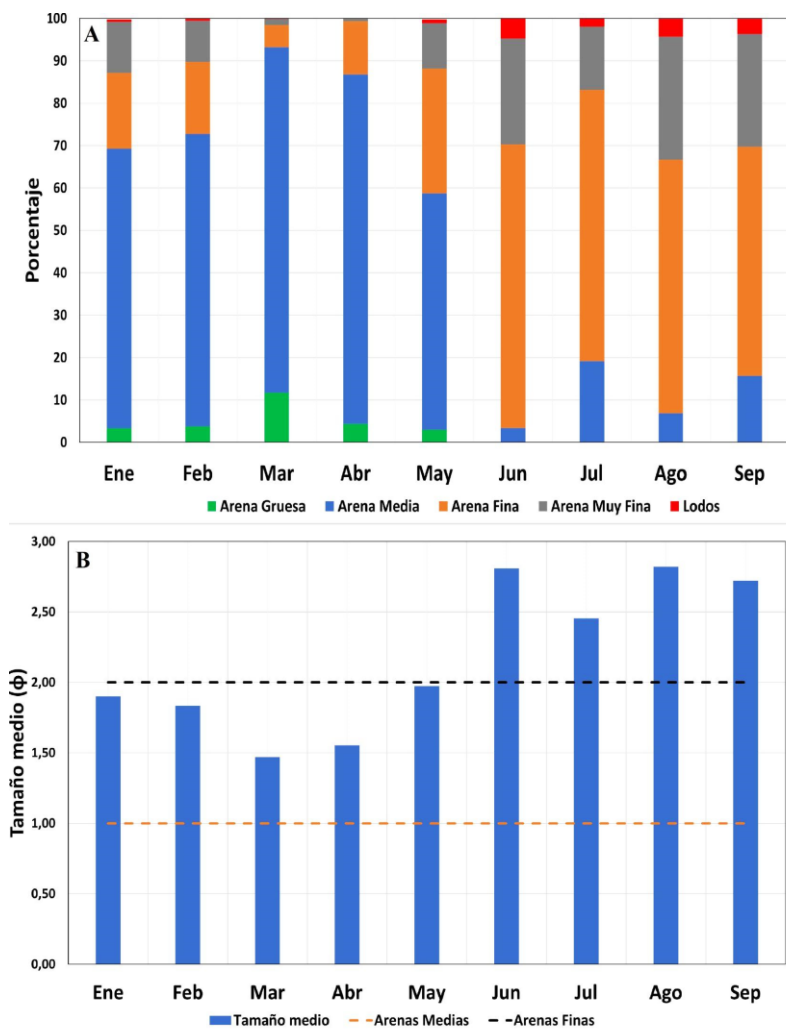
medias y finas. En promedio, la selección es moderadamente bien clasificada ( $\sigma = 0,68$ ). El índice de asimetría evidencia una predominancia hacia los finos ( $Sk = 0,20$ ) y una curtosis mesocúrtica ( $k = 1,10$ ). Las muestras, son dominadas por el grupo de las arenas (medias y finas). Este grupo textural representa hasta el 98,14 %, seguido por los lodos con una media de 1,83 % y luego las gravas finas 0,04 % (Tabla 4).

**Tabla 4.** Síntesis de las características texturales de los sedimentos superficiales del fondo.

Características texturales	Parámetros estadísticos			
	Promedio	Desviación estándar	Valor máximo	Valor mínimo
Tamaño de grano ( $\phi$ )	2,17	0,54	2,82	1,47
Selección ( $\sigma$ )	0,68	0,13	0,80	0,46
Asimetría ( $Sk$ )	0,20	0,17	0,42	-0,05
Curtosis ( $k$ )	1,10	0,16	1,32	0,92
Grava (%)	0,04	0,05	0,13	0,00
Arena (%)	98,14	1,85	100,00	95,30
Lodo (%)	1,83	1,86	4,70	0,00

La Figura 2A evidencia la predominancia de arenas en cada una de las muestras. Todos los meses presentan un porcentaje de arenas superior al 95%, se destaca abril con 100% en sedimentos en el rango de las arenas. Los primeros cinco meses muestran un porcentaje de lodos que no superan el 1%. Por otra parte, los meses entre junio y septiembre presentaron una disminución en las arenas, a medida que los lodos aumentan. Especialmente en junio (4,7%) y agosto (4,2%) que exhibieron los valores máximos. La presencia de los grupos texturales de las gravas y arenas muy gruesas son incipientes, en ningún mes superaron el 0,5%. En abril, mayo, junio y julio no se presentaron gravas (Figura 2A - Anexo 1).

Las muestras presentaron un comportamiento bimodal muy marcado entre las arenas medias y finas. Durante los primeros cinco meses del año las arenas gruesas se encuentran en menor proporción; no obstante, en marzo representaron el 11,71% de la muestra. El grupo que más predomina son las arenas medias, las cuales superan el 65%. La mayor proporción se presentó en abril (82,40 %). A partir de mayo, en los últimos cuatro meses del monitoreo, las arenas gruesas son insignificantes ( $< 0,02\%$ ), disminuyen las arenas medias hasta ( $< 20\%$ ) y aumentan las arenas finas ( $> 59\%$ ) y arenas muy finas ( $> 14\%$ ). El mes con mayor porcentaje de arena fina y muy fina es junio, con el 66,92% y el 25,01%, respectivamente). Mayo representa valores intermedios entre estos dos grupos, es el mes con una proporción más equitativa entre arenas medias y finas, con un 55,8 % y un 29,40 %, respectivamente (Figura 2A - Anexo 2)



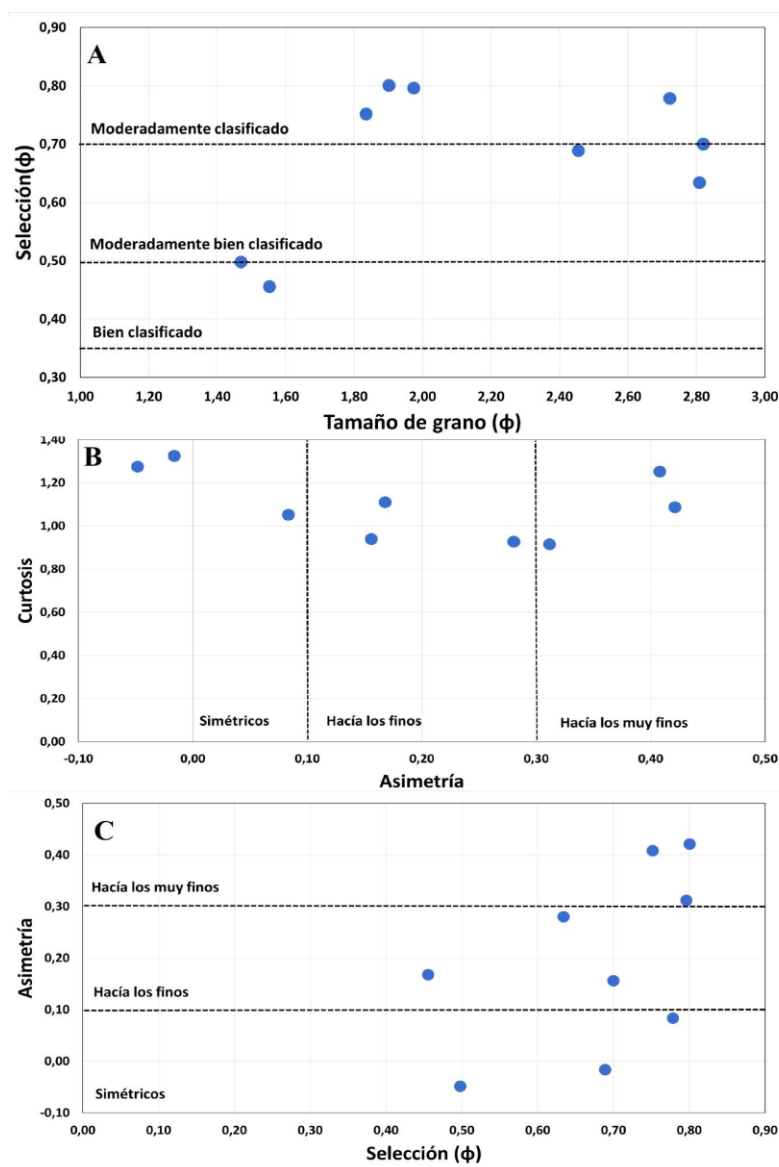
**Figura 2.** Distribución de: A) Arenas y lodos. B) Tamaño medio.

La Figura 2B muestra la distribución mensual del tamaño medio de los sedimentos. Se observa que los primeros cinco meses del año corresponden a arenas medias (1,0  $\phi$  a 2,0  $\phi$ ). Los mayores tamaños corresponden a los meses de marzo (1,47  $\phi$ ) y abril (1,55  $\phi$ ). Los meses de enero y febrero y mayo se ubican casi en el límite de las arenas medias y finas, Luego de este último el tamaño medio disminuye hasta el rango de las arenas finas (2,0  $\phi$  a 3,0  $\phi$ ) de los cuales junio, agosto tienen los menores tamaños (2,81  $\phi$  y 2,82  $\phi$ , respectivamente), ambos muy cerca de las arenas muy finas (3  $\phi$  a 4  $\phi$ ) (Figura 2B - Anexo 1).

## 5.2. Grupos texturales

La relación entre el tamaño medio y la selección permite identificar tres grupos texturales. Los dos primeros conformados por arenas medias bien clasificadas (0,35  $\phi$  a 0,50  $\phi$ ) y moderadamente clasificadas (0,70  $\phi$  a 1,00  $\phi$ ); el tercer grupo constituido por arenas

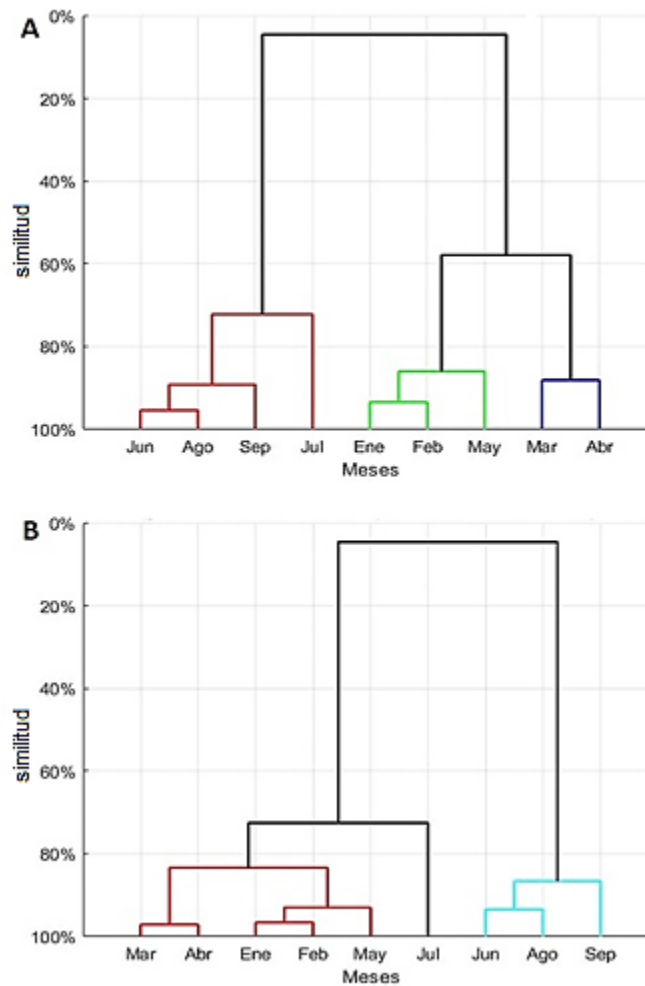
finas que varían entre moderadamente clasificadas y moderadamente bien clasificadas ( $0,50 \phi$  a  $0,70 \phi$ ). Las muestras tienen una predominancia de sedimentos moderadamente clasificados (figura 3A). La relación entre la asimetría y curtosis evidencia nuevamente tres grupos. El primero es simétrico ( $+0,1$  a  $-0,1$ ) con curtosis leptocúrtica ( $1,11$  a  $1,5$ ) y mesocúrtica ( $0,90$  a  $1,11$ ); un segundo grupo con asimetría hacia los finos ( $+0,1$  a  $+0,3$ ) tiene una curtosis mesocúrtica y leptocúrtica; finalmente el tercero hacia los muy finos ( $+0,3$  a  $+1,0$ ) leptocúrtico y mesocúrtico (Figura 3B). Además, la relación entre la asimetría y selección evidencia una posible relación en la que a medida que la selección disminuye, la asimetría se vuelve más positiva hacia los finos y muy finos; en este segmento es donde se concentran la mayoría de los datos. Finalmente, se destaca un grupo pequeño de sedimentos bien clasificados simétrico (-) y asimétrico hacia los finos (Figura 3C), el cual está asociado al grupo de arenas medias bien clasificadas (Figura 3A) y leptocúrticas (Figura 3B).



**Figura 3.** Gráficas bivariantes para A): tamaño medio y selección. B): curtosis y asimetría. C): asimetría y selección.

### 5.3. Análisis de grupos

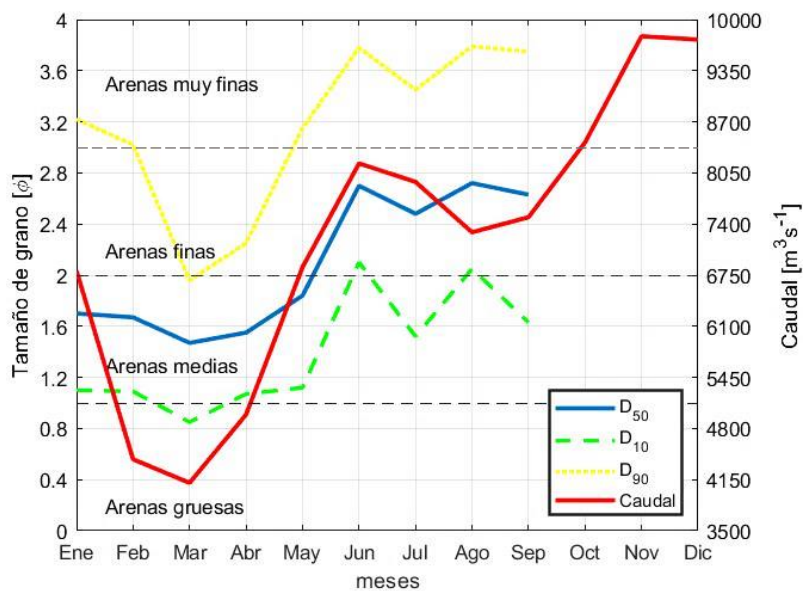
Las similitudes de las muestras en los parámetros de tamaño medio, selección, asimetría y curtosis se muestran en la Figura 4A. Se diferencian 3 grupos, cada uno con una similitud superior al 70%. El grupo rojo corresponde a los últimos cuatro meses de muestreo (junio-septiembre). De estos últimos, junio y agosto son los más semejantes entre sí (> 90%). Estos meses corresponden a arenas finas ( $1\phi - 2\phi$ ), moderadamente bien clasificadas ( $0,50\phi$  a  $0,70\phi$ ), con asimetría hacia los finos (+0,1 a +0,3) y mesocúrticas (0,90 a 1,11). Este grupo es diferente al clúster de los primeros cinco meses del año; los cuales, se aglomeran en 2 subgrupos (verde y azul) con una similitud entre sí mayor a 80%: el primero conformado por los meses de enero, febrero y mayo (verde), los cuales son muestras de sedimentos de arenas medias ( $2\phi - 3\phi$ ), moderadamente clasificadas ( $0,70\phi$  a  $1,00\phi$ ), asimetría hacia los muy finos (+0,3 a +1,0) y varían entre leptocúrticas (1,11 a 1,50) a mesocúrticas; el segundo grupo corresponde a los meses de marzo y abril (azul), constituido por arenas medias bien clasificadas ( $0,35\phi$  a  $0,50\phi$ ), leptocúrticas y varían entre muestras simétricas (+0,1 a -0,1) y hacia los finos. Los datos de estos parámetros se observan en el anexo 1.



**Figura 4.** Clústeres jerárquicos. A) Comparación de tamaño medio, selección, asimetría y curtosis. B) Comparación de tamaño medio, selección, asimetría, curtosis, gravas, arenas y lodos.

La inclusión de otras variables como los porcentajes de gravas, arenas y lodos, ocasiona un cambio en los patrones de similitud (Figura 4B). Bajo esta condición se diferencian dos principales grupos. El primero (rojo) con una similitud mayor al 80% para los primeros cinco meses del muestreo. De manera similar que en el primer dendrograma. El segundo grupo (azul aguamarina) conformado por los meses de junio, agosto y septiembre es menos semejante con el grupo rojo y en particular a las características de julio, el cual es más proximal al grupo rojo con un porcentaje de similitud de  $>70\%$ .

#### 5.4. Relación del tamaño de grano con el caudal medio mensual y transporte de sedimentos en suspensión

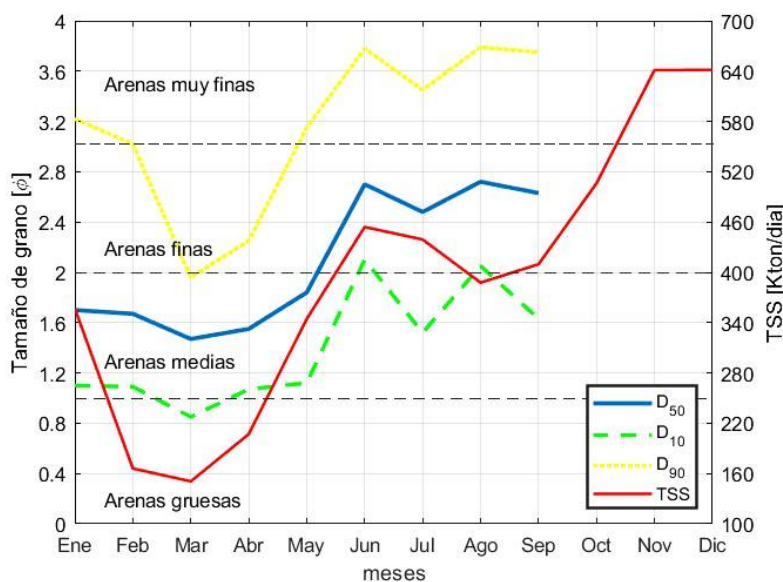


**Figura 5.** Variabilidad estacional del D10, D50, D90 y Caudal mensual.

El comportamiento del caudal medio mensual muestra patrones estacionales que coinciden con los cambios observados en el tamaño de los sedimentos (Figura 5). Durante el primer trimestre los caudales son los más bajos del año, con un valor mínimo en marzo ( $4108 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ), en el cual el D50 varía dentro del rango de arenas medias. Los meses de abril y mayo presentan un aumento del caudal que coincide con el comienzo de una transición del D50 hacia el límite entre las arenas medias y finas ( $2 \phi$ ). Los meses de junio y julio conforman un primer pico en la serie de caudales (junio,  $8171 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ), en los cuales el D50 corresponde a arenas finas ( $2,7 \phi$  y  $2,48 \phi$ , respectivamente). Por otra parte, los meses de agosto y septiembre indican una reducción en los caudales que precede a los caudales máximos, siendo noviembre ( $9788 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ) el más alto. Este comportamiento del caudal coincide con una variabilidad del D50 dentro del rango de las arenas finas durante los meses de julio, agosto y septiembre. EL D10 de los sedimentos fluctuó en su mayoría en tamaños de arena media, sin embargo, solo en el mes de marzo se ubicó en arenas gruesas. En junio y

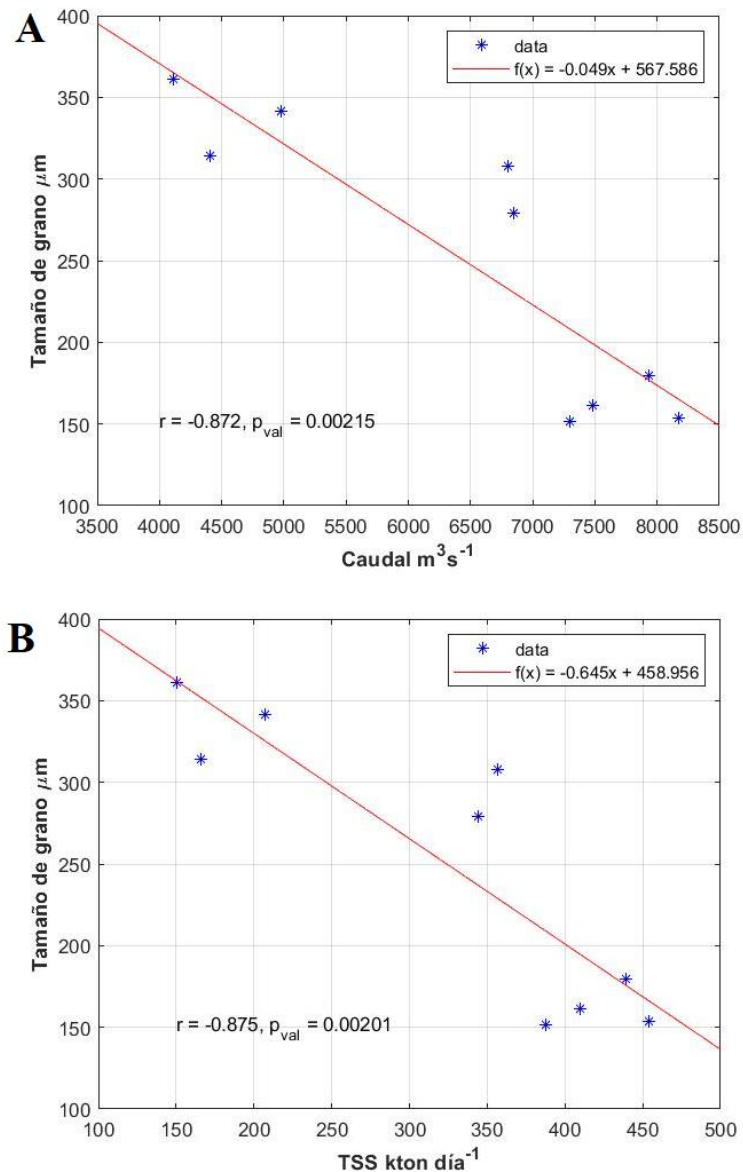
septiembre cambió a arenas finas. Por otra parte, el D90 presentó una variabilidad marcada entre los tamaños de arenas finas desde enero hasta mayo y se ubicó entre las arenas muy finas desde junio a septiembre.

La gráfica de la serie del transporte mensual de sedimentos en suspensión (TSS) (Figura 6) muestra un transporte mínimo en los primeros meses, siendo marzo ( $150,64 \text{ Kton } d^{-1}$ ) el valor más pequeño. Durante este mes, el D50 tuvo una tendencia a la fracción más gruesa dentro de las arenas medias. En mayo el TSS es moderado ( $344,35 \text{ Kton } d^{-1}$ ) y empieza a incrementarse en la segunda parte del año. El TSS presenta dos picos, el primero en junio ( $439,12 \text{ Kton } d^{-1}$ ), y el segundo entre los meses de noviembre y diciembre con más de  $640,0 \text{ Kton } d^{-1}$ . Asimismo, el comportamiento del D50 presenta pequeñas variaciones en el rango de las arenas finas durante los meses posteriores a mayo. De la misma manera que ocurre con el caudal medio, un incremento en transporte de sedimentos en suspensión coincide con tamaños de grano en arenas finas y particularmente un D90 que varía dentro de las arenas muy finas. Una disminución en el transporte se relaciona con D50 de arenas medias, un D10 de arenas medias a gruesas y un D90 en arenas finas.



**Figura 6.** Variabilidad estacional del D10, D50, D90 y TSS.

La prueba de correlación de Pearson entre el D50 y el caudal arrojó un coeficiente negativo ( $r$ ) de  $-0.872$ , por lo que las variables se correlacionan inversamente; un  $p$ -valor de  $0,00215$  menor al valor de significancia de  $0.005$  (Figura 7A). Es decir que el caudal y el D50 si guardan una relación. Este resultado también se presentó comparando el D50 con el transporte de sedimentos en suspensión, con un coeficiente negativo ( $r$ ) de  $-0.875$  y un  $p$ -valor de  $0,002$  (Figura 7B). Los diagramas de dispersión de las figura 7(A,B), muestran la relación inversa entre el D50 ( $\mu\text{m}$ ) con el caudal y transporte de sedimentos por medio de la línea de tendencia con pendiente negativa.



**Figura 7.** Diagrama de dispersión y tendencia lineal: A) D50 y caudal. B) D50 y transporte de sedimentos en suspensión.

## 6. Análisis de Resultados

### 6.1. Distribución de tamaño de partículas y parámetros texturales

Las características texturales de los sedimentos superficiales del fondo del río Magdalena experimentan una variabilidad estacional claramente definida. Los sedimentos están dominados en casi su totalidad por el grupo textural de las arenas, seguido de los lodos (Figura 2A). No obstante, el tamaño medio de los sedimentos presentó un comportamiento

bimodal, diferenciado en dos grupos: en el primero predominan las arenas medias durante los meses de enero a mayo; mientras que en el segundo grupo predominan las arenas finas desde junio a septiembre (Figura 2B). El mes de mayo tiene la proporción más equitativa entre arenas medias y finas, siendo un punto intermedio entre los dos principales tamaños de grano presentados en los meses del muestreo (Figura 2A). La tendencia a la disminución del tamaño de las partículas en la última parte del año favorece la dominancia principalmente de arenas finas, así como porcentajes considerables de arenas muy finas y en menor proporción los lodos, durante los meses de junio a septiembre (Figura 2A).

La selección de los sedimentos fue muy variada, fluctuando entre bien clasificados a moderadamente clasificados (Figura 3A). Los sedimentos fueron en promedio moderadamente bien clasificados. Este parámetro es coherente con los resultados de tamaño de grano, en los cuales, a pesar de exhibir predominancia de arenas medias y finas en los dos principales grupos, también se encontró fracción de lodos y en menor medida arenas gruesas (Figura 2A). Una selección moderadamente bien clasificada de sedimentos junto con tamaños de arenas medias y finas indicaría que los sedimentos han sufrido procesos significativos de erosión y transporte desde las áreas fuente, lo cual favorece la tendencia a una uniformidad en el tamaño y redondez de las partículas, ya que el tamaño de grano y su morfología dependen de la abrasión inducida por el transporte (González y Milán, 2016; Van Rijn, 1993; Udden, 1914;).

Los parámetros de asimetría y curtosis (Figura 3B) son medidas empleadas para describir la distribución de los datos en función de su forma y relación con la media aritmética. La curtosis promedio fue mesocúrtica, es decir que la distribución de los datos fue homogénea respecto a la media. Además, la asimetría fluctuó desde simétrica hasta asimétrica hacia los muy finos, y el promedio fue asimétrica hacia los finos. La relación de asimetría y curtosis evidencia que la distribución de cada una de las muestras es cercana a la media, debido a que los mayores porcentajes se concentran en el rango de las arenas; particularmente las arenas medias y finas. Sin embargo, existe una mezcla discreta de arenas gruesas y sedimentos finos; la adición de pequeñas cantidades de lodos genera un sesgo a valores positivos de asimetría, es decir hacia la fracción más fina (Folk y Ward, 1957). Por otra parte, los sedimentos moderadamente clasificados predominan en una asimetría hacia los finos y muy finos. Esto puede ser explicado por la adición de partículas finas en la distribución que empeoran la selección y aumentan la asimetría a valores positivos (Folk y Ward, 1957).

## **6.2. Similitudes de parámetros y análisis de grupos**

A partir de los parámetros de tamaño medio, selección, asimetría y curtosis se encontraron tres grupos que comparten similitud entre ellos (Figura 4A). El grupo conformado por los meses de enero, febrero y mayo, los cuales comparten una similitud > 80% a partir de un análisis considerando estos cuatro parámetros texturales. A su vez, este grupo es más semejante al grupo de abril y marzo, que comparten tres parámetros similares, excepto la asimetría. El tercer grupo está formado por los meses de junio, julio, agosto y septiembre, de los cuales los sedimentos de junio y agosto son parecidos en los cuatro parámetros (similitud >90%). El dendrograma muestra una separación de las características de los sedimentos muy similar en la vista solo con el tamaño medio de grano (Figura 2B). De esta manera, antes de mayo el material particulado de fondo es muy similar entre sí, con



una distribución muy parecida. Estas características cambian en los últimos meses, con una fracción más fina en los sedimentos de junio a septiembre.

La Figura 4B, evidencia qué añadir más variables al análisis de grupos como los porcentajes de gravas, arenas y lodos sólo cambió ligeramente la relación de los sedimentos, mostrando una relación más cercana del mes de julio con los sedimentos de los primeros cinco meses (similitud >70%). Es posible que este cambio se deba a que este mes tiene una influencia moderada de arenas medias y pocos lodos, lo cual es muy diferente si se compara con los porcentajes de arenas y lodos de junio, agosto y septiembre. Por consiguiente, este comportamiento es más cercano con las características de los primeros cinco meses del año (Figura 2A – Anexo 2).

### 6.3. Relación con caudal y transporte de sedimentos en suspensión

El tamaño de los sedimentos superficiales de fondo del río Magdalena presentaron una variabilidad estacional comparable con los cambios en el caudal medio mensual y transporte medio de sedimentos en suspensión (Figuras 5 y 6). Los sedimentos mayores a  $250\ \mu\text{m}$  ( $2\phi$  a  $3\phi$ ), se presentan en la época seca, en la que se presentan los menores caudales. Marzo constituye el límite más bajo con arenas medias. De la misma forma, una disminución en la fracción particulada hacia las arenas finas coincidió con la época de aumento de caudales. Los meses de abril a mayo representan meses de transición hacia una partícula finas, siendo mayo un punto de cambio en la variabilidad del tamaño de grano y caudal. Esta misma relación se observó para el transporte de sedimentos en suspensión (Figura 6). Los meses con un menor transporte son aquellos con predominancia de arenas medias y cuando el transporte aumenta los sedimentos son arenas finas. La reducción del tamaño de grano a una escala estacional parece tener relación con la hidrodinámica del río Magdalena, respecto a cambios en el caudal y transporte de sedimentos en suspensión.

Este sistema se ha categorizado por tener periodos de baja, moderada y alta descarga debido al régimen de lluvias, los cuales modifican los niveles de caudales y transporte en una escala anual e interanual (Higgins et al, 2016; Restrepo y Kjerfve, 2000;); Durante las épocas secas se presentan los menores caudales que coinciden con una disminución en el transporte de sedimentos en suspensión y durante las húmedas, el transporte de sedimentos en suspensión aumenta, así como el caudal. Los meses de transición exhiben la mayor variabilidad del caudal y concentración de sedimentos en suspensión (Higgins et al., 2016). Por consiguiente, estos procesos sí pueden incidir en la diferenciación de los tamaños de granos de los sedimentos de fondo ya que el tamaño medio y la clasificación de los sedimentos en diferentes sistemas están controlados hidráulicamente, así como por el nivel de energía del ambiente (Griffiths, 1967; Cupul-Magaña et al, 2016). De la misma forma, Van Rijn (1993), menciona que la aceleración o desaceleración del flujo induce cambios en el asentamiento y resuspensión de partículas del fondo. Además, el río Magdalena presenta una dominancia del régimen de transporte de sedimentos en suspensión (Higgins et al 2017), con partículas más finas como lodos y arcillas, por lo que es posible que las arenas del fondo sean lo suficientemente pesadas como para ser transportadas en su totalidad por suspensión y, por lo tanto, son transportadas sobre el lecho como carga de fondo.

El coeficiente de correlación y el *p-valor* indican que el caudal y el transporte de sedimentos en suspensión mantienen una relación inversa con el tamaño de los sedimentos

(Figura 7A, B). El D50 de los sedimentos se encuentra en el rango de las arenas medias en época de bajos caudales y transporte; disminuye hacia las arenas finas en la época de altos y moderados caudales (meses de transición) y cuando el transporte de sedimentos en suspensión es alto. Por lo tanto, existe una relación inversa entre el tamaño de las partículas del sedimento superficial de fondo y el régimen de caudal y transporte de sedimentos en suspensión del río Magdalena. Sin embargo, en otros sistemas, el tamaño de grano de los sedimentos no solo depende de cambios en el caudal y transporte de sedimentos en suspensión. Singh et al (2007) mencionan que el tamaño de los sedimentos de fondo de la cuenca del río Ganges en la cordillera del Himalaya varían ampliamente entre arenas medias a muy finas debido de diferentes factores cómo la distancia de las áreas fuente, la geología regional, el aporte de sus tributarios, la morfología del canal y los cambios en el flujo asociados a la estacionalidad climática, los cuales cuando incrementan, ocasionan una turbulencia en el fondo favoreciendo la suspensión de las partículas más gruesas. Por otra parte, Jiang et al (2020), señalan que los sedimentos del fondo del canal del río Mekong en Vietnam cerca de su desembocadura corresponden a arenas finas con menos del 30% en lodos durante la época seca y bajos caudales; en la época húmeda y de altos caudales aumentan las arenas y el contenido de lodo varía en diferentes puntos aguas arriba de la desembocadura. Sin embargo, estos cambios también se relacionaron con la interacción del régimen de marea.

Otro factor que podría incidir en los patrones texturales de los sedimentos es su mineralogía. Folk y Ward (1957), mencionan que es necesario analizar la mineralogía de los sedimentos cuando se tiene un bimodalidad en el tamaño de grano. Si la fuente es diferente, la composición mineral debería ser diferente y si es la misma, entonces las fracciones de diferente tamaño tienen la misma composición, pero sufren procesos de abrasión que modifican su morfología. De igual manera, Franzinelli y Potter (1983), sugieren que el clima de una cuenca hidrográfica y la distancia de transporte influyen en la composición de arenas fluviales. Tomando en cuenta esto, se presentan fotos de la mineralogía de las muestras, las cuales son muy homogéneas en cuanto a su composición (Anexo 3). Predominan los cuarzos que son muy competentes a la abrasión, seguido de minerales ferromagnesianos como anfíboles; micas, clastos metamórficos y magnéticos. Sin embargo, los minerales son más sub-redondeados y esféricos en los sedimentos asociados a arenas finas, durante condiciones de caudales altos y moderados. Por otra parte, los sedimentos de la época seca son más gruesos, menos esféricos y sub-redondeados a sub-angulares. En síntesis, se observó preliminarmente que la mineralogía de los sedimentos no cambia significativamente, pero si su morfología. Lo que sugiere que las áreas fuentes de éstos son las mismas, pero en diferentes épocas las condiciones de flujo y transporte modifican su geometría. Por todos estos aspectos, los sedimentos de fondo del río Magdalena están más influenciados por los procesos de la hidrodinámica el río que por cambios de las áreas fuentes, de esta manera, el caudal y el transporte asociados a una determinada época del año determinan las características texturales de los sedimentos de fondo en una escala estacional.

## 7. Conclusiones

Las propiedades texturales de los sedimentos superficiales de fondo del río Magdalena en Calamar (Bolívar), presentaron cambios estacionales marcados por el predominio del grupo textural de las arenas, especialmente las medias y finas, las cuales varían de moderadamente seleccionadas a bien seleccionadas, con asimetría hacia los finos y muy finos y pueden ser mesocúrticas y leptocúrticas. El análisis de estas cualidades por medio de clústeres jerárquicos permitió establecer un patrón de similitudes entre los diferentes meses de muestreo a partir de la comparación de los parámetros texturales. Estas cualidades son compartidas en 3 diferentes grupos. El primero entre los meses de enero, febrero y mayo; el segundo corresponde a los meses de marzo y abril, finalmente el tercero está conformado por los meses de junio a septiembre. Sin embargo, esta clasificación es susceptible a la adición de variables en el análisis de grupos.

El tamaño de los sedimentos está influenciado por los cambios en el régimen de caudales y transporte de sedimentos en suspensión, con los cuales comparte una relación inversa mediante los valores negativos del coeficiente de correlación de Pearson y la tendencia lineal. El material particulado de fondo corresponde a arenas finas en época húmeda con caudales altos y moderados, así como un mayor transporte de sedimentos en suspensión. En contraste, en época seca, con valores mínimos de caudal y transporte de sedimentos en suspensión los sedimentos están dominados por una fracción de arenas medias. De la misma manera, el mes de mayo representa un límite para la diferenciación de tamaños de grano. Por lo que, la variabilidad de características texturales de los sedimentos en una escala estacional está controlados por procesos hidrodinámicos a escala de cuenca.

La composición mineral de los sedimentos de fondo no presentó cambios significativos, por lo que la variabilidad de las características no se relaciona con cambios en el suministro de áreas fuentes sino por la hidrodinámica del río. De esta manera, los mecanismos de transporte y la dinámica del flujo pueden suponer cambios en la morfología y los parámetros texturales de los sedimentos en una escala temporal estacional. Por lo tanto, el régimen de caudales y transporte de sedimentos en suspensión se sugieren como los procesos que controlan la variabilidad de los sedimentos de fondo del río Magdalena en Calamar.

## 8. Referencias Bibliográficas

- Barrera, R., Reyes, G., Guzmán, G., & Franco, J. (1999). Geología de la Plancha 31 Campo de la Cruz. *INGEOMINAS*. Bogotá.
- Blott, S. J., & Pye, K. (2001). GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth surface processes and Landforms*, 26(11), 1237-1248.
- Burton, G. A. 2002. Sediment quality criteria in use around the world. *Limnology*, 3(2), 65-76. <https://doi.org/10.1007/s102010200008>
- Cupul-Magaña, L. A., Mösso-Aranda, C., Sierra, J. P., Martí, E., Ferman-Almada, J. L., Rodilla, M., & Sánchez-Arcilla, A. (2006). Caracterización y patrones de distribución de los sedimentos superficiales en Bahía Cullera, España. *Ciencias marinas*, 32(4), 617-629.
- Dabadie, M., Pérez, C., Arturi, M., Goya, J., & Sandoval, M. (2018). Calibración del método de pérdida de peso por ignición para la estimación del carbono orgánico en Inceptisoles del NE de Entre Ríos. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 117(1), 157-162.
- Davide, V., Pardos, M., Diserens, J., Ugazio, G., Thomas, R., & Dominik, J. (2003). Characterisation of bed sediments and suspension of the river Po (Italy) during normal and high flow conditions. *Water research*, 37(12), 2847-2864.
- Folk, R. L., & Ward, W. C. (1957). Brazos River bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Research*, 27(1), 3-26. <https://doi.org/10.1306/74D70646-2B21-11D7-8648000102C1865D>
- Franzinelli, E., & Potter, P. E. (1983). Petrology, chemistry, and texture of modern river sands, Amazon River system. *The Journal of Geology*, 91(1), 23-39
- González, O., & Millán, Z. (2016). Granulometría de los sedimentos fluviales del canal principal y llanura aluvial del río Portuguesa, Venezuela. *Revista de Investigación*, 40(87), 122-147.
- Griffiths IC. 1967. *Scientific Methods in the Analysis of Sediments*. McGraw-Hill, New York.
- Higgins, A., Restrepo, J. C., Ortiz, J. C., Pierini, J., & Otero, L. (2016). Suspended sediment transport in the Magdalena River (Colombia, South America): Hydrologic regime, rating parameters and effective discharge variability. *International Journal of Sediment Research*, 31(1), 25-35.
- 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.
- Jácome de Solórzano, M., Llanos de Bonilla, L. (1990). Estudio de la materia orgánica en los sedimentos del río Jubones, en el área comprendida entre el puente La Iberia hasta su desembocadura. *Acta oceanográfica del pacífico*, (6).

Jiang, Y., Saito, Y., Ta, T. K. O., Wang, Z., Gugliotta, M., & Nguyen, V. L. (2020). Spatial and seasonal variability in grain size, magnetic susceptibility, and organic elemental geochemistry of channel-bed sediments from the Mekong Delta, Vietnam: Implications for hydro-sedimentary dynamic processes. *Marine Geology*, *420*, 106089.

Milliman, J. D., & Meade, R. H. (1983). World-Wide Delivery of River Sediment to the Oceans. *The Journal of Geology*, *91*(1), 1–21. doi:10.1086/628741

Milliman, J. D., Rutkowski, C., & Meybeck, M. (1995). River discharge to the sea: a global river index (GLORI). LOICZ Reports and Studies. The Hague, The Netherlands. *Netherlands Institute for Sea Research*.2

Okeyode, I. C., & Jibiri, N. N. (2013). Grain size analysis of the sediments from Ogun River, South Western Nigeria. *Earth Science Research*, *2*(1), 43.

Poveda, G. (2004). La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, *28*(107), 201-222.

Remo, J. W., Heine, R. A., & Ickes, B. S. (2016). Particle size distribution of main-channel-bed sediments along the upper Mississippi River, USA. *Geomorphology*, *264*, 118-131.

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. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2007.09.002>

Restrepo, J.C., Orejarena, A., Torregroza, A.C., 2017. Suspended sediment load in northwestern South America (Colombia): a new view on variability and fluxes into the Caribbean Sea. *Journal of South American Earth Sciences*, *80*, 340-352. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.10.005>.

Restrepo, J. C., Ortíz, J. C., Pierini, J., Schrottke, K., Maza, M., Otero, L., & Aguirre, J. (2014). Freshwater discharge into the Caribbean Sea from the rivers of Northwestern South America (Colombia): Magnitude, variability and recent changes. *Journal of Hydrology*, *509*, 266-281.

Restrepo, J. C., Schrottke, K., Traini, C., Ortíz, J. C., Orejarena, A., Otero, L., ... & Marriaga, L. (2016). Sediment transport and geomorphological change in a high-discharge tropical delta (Magdalena River, Colombia): Insights from a period of intense change and human intervention (1990–2010). *Journal of Coastal Research*, *32*(3), 575-589.

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. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00269-9](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00269-9).

Restrepo, J.D., Zapata, P., Díaz, J.M., Garzón-Ferreira, J., García, C.B. (2006). Fluvial fluxes into the Caribbean Sea and their impact on coastal ecosystems: the Magdalena River, Colombia. *Glob. Planet. Chang.* *50* (1–2), 33–49. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2005.09.002>.

Sahin, C., Guner, H. A. A., Ozturk, M., & Sheremet, A. (2017). Floc size variability under strong turbulence: observations and artificial neural network modeling. *Applied Ocean Research*, 68, 130-141. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2017.08.012>

Singh, M., Singh, I. B., & Müller, G. (2007). Sediment characteristics and transportation dynamics of the Ganga River. *Geomorphology*, 86(1-2), 144-175.

Udden, J. A. (1914). Mechanical composition of clastic sediments. *Bulletin of the Geological Society of America*, 25(1), 655-744.

Van Rijn, L. C. (1993). Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas Volumen I. Amsterdam: *Aqua publications*, 690 p

Wang, H., Yang, Z., Saito, Y., Liu, P., Sun, X., Wang, Y., 2007. Stepwise decreases of the Huanghe (Yellow River) sediment load (1950-2005): impacts of climate change and human activities. *Glob. Planet. Change* 57, 331-354. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.01.003>.

Wang, Y. P., Voulgaris, G., Li, Y., Yang, Y., Gao, J., Chen, J., & Gao, S. (2013). Sediment resuspension, flocculation, and settling in a macrotidal estuary. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(10), 5591-5608. <https://doi.org/10.1002/jgrc.20340>

Wentworth, C. K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The journal of geology*, 30(5), 377-392. <https://doi.org/10.1086/622910>

Xu, H., Wolanski, E., Chen, Z. (2013). Suspended particulate matter affects the nutrient budget of turbid estuaries: modification of the LOICZ model and application to the Yangtze Estuary. *Estuarine Coastal Shelf Science* 127, 59–62. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.04.020>.

Zagal, E., & Sadzawka, A. (2007). Protocolo de métodos de análisis para suelos y lodos. Universidad de Concepción, Servicio Agrícola y Ganadero: Santiago, Chile. 5,10,18

## 9. Anexos

### Anexo 1. Parámetros texturales medidos por GRADISTAT

Mes	Media ( $\phi$ )	Selección ( $\phi$ )	Asimetría	Curtosis	Gravas (%)	Arenas (%)	Lodos (%)
<b>Enero</b>	1,90	0,80	0,42	1,09	0,12	99,27	0,61
<b>Febrero</b>	1,83	0,75	0,41	1,25	0,01	99,52	0,47
<b>Marzo</b>	1,47	0,50	-0,05	1,28	0,00	99,94	0,06
<b>Abril</b>	1,55	0,46	0,17	1,11	0,00	100,00	0,00
<b>Mayo</b>	1,97	0,80	0,31	0,92	0,13	98,96	0,90
<b>Junio</b>	2,81	0,63	0,28	0,93	0,00	95,30	4,70
<b>Julio</b>	2,46	0,69	-0,02	1,32	0,00	98,08	1,92
<b>Agosto</b>	2,82	0,70	0,16	0,94	0,02	95,77	4,21
<b>Septiembre</b>	2,72	0,78	0,08	1,05	0,04	96,37	3,59

### Anexo 2. Distribución del grupo textural de las arenas medidos por GRADISTAT.

Mes	Clasificación (%)				
	Muy gruesa	Gruesa	Media	Fina	Muy fina
<b>Enero</b>	0,08	3,30	66,01	17,84	12,05
<b>Febrero</b>	0,04	3,82	68,94	16,97	9,75
<b>Marzo</b>	0,06	11,71	81,50	5,22	1,45
<b>Abril</b>	0,06	4,39	82,40	12,54	0,62
<b>Mayo</b>	0,07	2,94	55,80	29,40	10,74
<b>Junio</b>	0,00	0,01	3,36	66,92	25,01
<b>Julio</b>	0,01	0,09	19,15	63,94	14,89
<b>Agosto</b>	0,02	0,04	6,88	59,71	29,12
<b>Septiembre</b>	0,02	0,07	15,63	54,04	26,61

### Anexo 3. D10, D50 y D90 medidos por GRADISTAT

Mes	D50	D10	D90
<b>Enero</b>	1,70	1,10	3,22
<b>Febrero</b>	1,67	1,09	3,02
<b>Marzo</b>	1,47	0,85	1,96
<b>Abril</b>	1,55	1,07	2,25
<b>Mayo</b>	1,84	1,12	3,15
<b>Junio</b>	2,70	2,10	3,78
<b>Julio</b>	2,48	1,52	3,45
<b>Agosto</b>	2,72	2,05	3,79
<b>Septiembre</b>	2,63	1,63	3,75



**Anexo 3. Fotografías de minerales, a través de estereolupa.**