



**UNIVERSIDAD  
AUTONOMA DEL  
ESTADO DE MÉXICO**



Instituto Interamericano de Tecnología y  
Ciencias del Agua

**“ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL EFECTO  
DE LA MATERIA ORGÁNICA EN LA  
FLOCULACIÓN DE SEDIMENTOS”**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
**Maestro en Ciencias del Agua**

PRESENTA

**CARLOS BRYAN RODRÍGUEZ CASTRO**

DIRECTOR DE TESIS

**DR. JUAN ANTONIO GARCÍA ARAGÓN**

TUTORES ADJUNTOS

**DR. HUMBERTO SALINAS TAPÍA Y DR. VÍCTOR JAVIER  
DÍAZ PALOMAREZ**

**Noviembre 2024**



# RESUMEN

Actualmente, se ha caracterizado que en los ambientes naturales la composición de los flóculos es diversa, conformándose de carga inorgánica, carga orgánica, sustancias xenobióticas, gotas aceite, el espacio entre poros y el agua. Hoy en día, el interés por determinar el efecto que tiene la carga orgánica en la floculación ha cobrado relevancia debido al inminente cambio climático, y las diferentes alteraciones antropogénicas de los cauces naturales, que provocan variaciones en las condiciones químicas y biológicas del agua, modificando el efecto en la floculación y la deposición final de sedimentos.

En el presente trabajo, se buscó determinar el efecto de las fracciones orgánicas (FO) materia orgánica particulada (MOP) y del carbono orgánico disuelto (COD) en la floculación de sedimentos. Para tal efecto, se experimentó en un canal rotatorio anular (CRA) con muestras de los dos ríos más grandes de México, y se comparó su comportamiento con una muestra de un origen distinto, como lo fue la del centro acuícola el Zarco, la cual se creyó, tenía una composición orgánica muy distinta, y así poder relacionar y contrastar las FO y las condiciones hidrodinámicas del CRA con la floculación.

Los experimentos en el CRA consistieron en evaluar la evolución del tamaño de los flóculos en el tiempo. La técnica de velocimetría por rastreo de partículas (Particle Tracking Velocimetry: PTV) fue utilizada para determinar el diámetro equivalente de los flóculos. Una vez formados los flóculos en el CRA, usando una columna de sedimentación, y aplicando también la técnica PTV, se determinó el tamaño de los flóculos y su velocidad de caída. Por método gravimétrico se midió la MOP como la división de los sólidos suspendidos volátiles entre los sólidos suspendidos totales (SSV/SST), y con el analizador COT se determinó el carbón orgánico disuelto (COD) de cada muestra. También se obtuvieron imágenes en el microscopio óptico del IITCA con capacidad 100x para visualizar algún componente, fuera inorgánico u orgánico. Finalmente, se analizaron los resultados de la investigación y se presentan las relaciones entre las FO, condiciones hidrodinámicas, y tamaño de los flóculos durante los experimentos en el CRA.

El análisis de las fracciones orgánicas revela que la muestra de El Zarco presenta un alto contenido de materia orgánica particulada (MOP) (48.8%), con abundante presencia de diatomeas observadas en las imágenes capturadas con el microscopio óptico. En comparación, el río Grijalva contiene un mayor porcentaje de MOP (26.25%) que el río Usumacinta (9.97%), y ambos ríos presentan concentraciones similares de carbono orgánico disuelto (COD). La muestra de El Zarco tiene una concentración de COD tres veces menor que la de los ríos. Las diferencias en la composición orgánica de las muestras se atribuyen a alteraciones antropogénicas en los cauces, tiempos de retención del agua y a la influencia de los organismos acuáticos presentes en cada cuerpo de agua.

Los resultados confirmaron que, en función de las fracciones orgánicas (FO), los procesos de floculación ocurrieron de manera distinta en cada muestra. Los flóculos del río Grijalva, con mayor contenido de materia orgánica particulada (MOP) que los del río Usumacinta, mostraron una agregación significativa bajo condiciones de bajas fuerzas hidrodinámicas, pero fueron susceptibles a la ruptura bajo fuerzas hidrodinámicas medias y altas. Los sedimentos del río Usumacinta son ricos en carbono orgánico disuelto (COD), el cual está compuesto en gran parte por sustancias húmicas, que provocaron la estabilización del tamaño de los flóculos. La muestra del centro acuícola El Zarco respalda estudios anteriores que sugieren que la presencia de microalgas mejora la adhesión entre partículas debido a las sustancias poliméricas extracelulares (SPE), que son biopolímeros naturales de alto peso molecular y cadenas largas.

Los experimentos de velocidad de caída mostraron diferencias en la estructura fractal de los flóculos entre las muestras: los flóculos del río Grijalva presentaron la mayor porosidad, mientras que los del río Usumacinta se dividieron en dos grupos, uno compacto y otro poroso, en concordancia con hipótesis previas. En la muestra de El Zarco también se identificaron dos grupos de flóculos, uno de alta porosidad y otro más compacto; sin embargo, su distribución no coincidió con las teorías de densidad y fractalidad establecidas, sugiriendo que ambos grupos de flóculos podrían ser distintos e independientes entre sí.

# ABSTRACT

In natural environments, the composition of flocs is known to be diverse, comprising inorganic and organic matter, xenobiotic substances, oil droplets, pore spaces, and water. Recently, interest in determining the effect of organic matter on flocculation has grown significantly due to the ongoing impact of climate change and various anthropogenic alterations to natural watercourses. These changes lead to variations in the chemical and biological conditions of the water, thereby affecting flocculation processes and the final deposition of sediments.

This study aims to determine the effect of organic fractions, specifically particulate organic matter (POM) and dissolved organic carbon (DOC), on sediment flocculation. For this purpose, experiments were conducted in an annular flume (AF) using samples from the two largest rivers in Mexico, and their behaviour was compared with a sample from a different source, the El Zarco aquaculture centre, which was assumed to have a markedly different organic composition. This comparison was intended to explore the relationship between the organic fractions and the hydrodynamic conditions in the AF and their influence on flocculation.

The AF experiments involved monitoring the evolution of floc size over time. Particle Tracking Velocimetry (PTV) was employed to measure the equivalent diameter of the flocs. Once formed in the AF, the flocs were transferred to a settling column, where their size and settling velocity were determined using PTV. Gravimetric techniques and a TOC analyser were used to quantify POM and DOC in each sample. Additionally, optical microscopy at IITCA, with a magnification capacity of 100x, was used to visualise specific components, whether inorganic or organic. Finally, the study presents an analysis of the relationships between the organic fractions, hydrodynamic conditions, and floc size observed during the AF experiments.

The analysis of organic fractions revealed that the sample from El Zarco has a high content of particulate organic matter (POM) (48.8%), with an abundant presence of diatoms observed in images captured with an optical microscope. In comparison, the Grijalva River contains a higher percentage of POM (26.25%) than the Usumacinta River (9.97%), with both rivers presenting similar concentrations of dissolved organic carbon (DOC). The El Zarco sample contains a DOC concentration three times lower than that of the rivers. Differences in the organic composition of the samples are attributed to anthropogenic alterations of river channels, water retention times, and the influence of aquatic organisms in each aquatic environment.

The results confirmed that, based on the organic fractions (OF), flocculation processes occurred differently across samples. Flocs from the Grijalva River, with a higher POM content than those from the Usumacinta River, showed significant aggregation under low hydrodynamic forces but were susceptible to breakage under medium and high hydrodynamic forces. Sediments from the Usumacinta River are rich in DOC, largely composed of humic substances, which contributed to floc size stabilisation. The El Zarco sample supports previous studies suggesting that the presence of microalgae enhances particle adhesion due to extracellular polymeric substances (EPS), which are natural biopolymers with high molecular weight and long chains.

Settling velocity experiments revealed differences in floc structure and porosity across samples. Flocs from the Grijalva River exhibited the highest porosity, while those from the Usumacinta River were categorised into two groups: one compact and one porous, consistent with previous hypotheses. The El Zarco sample also showed two distinct floc groups, one highly porous and the other more compact; however, their distribution did not align with established density and fractal theories, suggesting that these two floc groups may be distinct and independent.

# TABLA DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS .....	II
RESUMEN .....	III
ABSTRACT .....	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
ÍNDICE DE TABLAS .....	XVI
SIMBOLOGÍA.....	XVIII
LISTA DE ACRÓNIMOS .....	XX
Capítulo 1. Introducción .....	1
1.1. Antecedentes .....	3
1.1. Problemática .....	7
1.2. Justificación contextual y científica .....	8
1.3. Hipótesis .....	8
1.4. Objetivos .....	8
1.4.1. Objetivo General .....	8
1.4.2. Objetivos específicos .....	9
Capítulo 2. Marco teórico .....	10
2.1. Estructura de los flóculos .....	10
2.2. Variables que afectan el fenómeno de floculación en los cuerpos de agua .....	12
2.3. Mecanismos de floculación .....	13
2.4. Impacto de la MO en la floculación .....	17
2.5. Medición de la MO .....	18
2.6. Microscopía.....	19
2.7. Técnicas ópticas .....	21
2.1.1 Técnica PIV .....	21
2.1.2 Técnica PTV.....	22
2.7.1. Concentración por medio de técnicas ópticas .....	23
2.8. Características hidrodinámicas de los canales rotatorios anulares (CRA) .....	23
2.9. Densidad de los flóculos .....	25
2.10. Velocidad de caída de los flóculos .....	26
2.10.1. Modelo semiempírico de velocidad de caída de Khelifa & Hill (2006).....	28
2.10.2. Comportamiento viscoso e inercial de los flóculos en velocidad de caída ..	29

2.10.3. Teorías clásicas de floculación .....	29
2.10.4. Teorías modernas de floculación .....	31
2.10.5. Esquema de solución de ecuación de balance de población (PBE).....	35
<b>Capítulo 3. Materiales y métodos .....</b>	<b>37</b>
3.1. Obtención y origen de las muestras .....	38
3.2. Medición de diferentes fracciones orgánicas .....	39
3.2.1. Medición de CO por oxidación por dicromato de potasio .....	40
3.2.2. Medición de materia orgánica particulada (MOP) por método gravimétrico...	43
3.2.3. Medición de COD mediante analizador COT .....	46
3.3. Obtención experimental de velocidad de corte y tasa de corte en el CRA .....	46
3.4. Medición de los diámetros de los agregados aplicando la técnica PTV .....	51
3.5. Cálculo de velocidad de caída en la columna de sedimentación.....	54
3.6. Granulometría .....	57
3.7. Identificación de materia orgánica por medio de microscopia .....	57
3.8. Ecuación de balance de población (PBE).....	58
<b>Capítulo 4. Resultados .....</b>	<b>60</b>
4.1. Medición de diferentes fracciones orgánicas .....	60
4.1.1. Medición de materia orgánica (MOP) particulada por medio de método gravimétrico.....	60
4.1.2. Medición de carbón orgánico disuelto (COD) mediante analizador COT.....	61
4.2. Velocidad de corte y tasa de corte en el CRA .....	61
4.3. Floculación.....	69
4.3.1. Floculación en la muestra del Río Grijalva .....	69
4.3.2. Floculación en la muestra del Río Usumacinta .....	74
4.3.3. Floculación en los sedimentos del centro acuícola el Zarco .....	79
4.4. Velocidad de caída y densidad .....	84
4.4.1. Velocidad de caída de los sedimentos del Río Grijalva .....	84
4.4.2. Velocidad de caída de los sedimentos del Río Usumacinta.....	87
4.4.3. Velocidad de caída de los sedimentos del Zarco .....	91
4.5. Identificación de materia orgánica por medio de microscopia .....	95
4.6. Ecuación de balance de población.....	100
<b>Capítulo 5. Análisis de resultados .....</b>	<b>103</b>
5.1. Fracciones orgánicas .....	103
5.2. Floculación, densidad y velocidad de caída de las muestras.....	105
<b>Capítulo 6. Conclusiones .....</b>	<b>114</b>



<b>Capítulo 7. Recomendaciones .....</b>	<b>116</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>117</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>123</b>
<b>Anexo 1: Código de solución de ecuación de balance de población de acuerdo con (Furukawa &amp; Watkins, 2012).....</b>	<b>123</b>
<b>Anexo 2: Diámetros característicos <math>d_{50}</math>, <math>d_{75}</math> y <math>d_{90}</math> de los flóculos de los ríos Grijalva y Usumacinta y del Centro Acuícola El Zarco .....</b>	<b>125</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.1.</b> Representación esquemática de la doble capa difusa. La partícula está cargada positivamente y está rodeada inmediatamente por contraiones negativos, posteriormente se encuentra la capa difusa. (Adachi et al., 2012) .....	14
<b>Figura 2.2.</b> Mecanismos de coagulación y floculación (Suopajarvi, 2015).....	14
<b>Figura 2.3.</b> Configuración típica de una cadena polimérica adsorbida en la superficie de una partícula (Adachi et al., 2012). .....	15
<b>Figura 2.4.</b> Puente polimérico como mecanismo de floculación. La línea punteada representa la doble capa difusa alrededor de la partícula (Adachi et al., 2012). .....	16
<b>Figura 2.5.</b> Modelo conceptual de floculación por SPE y de estabilización por SH (Lee et al., 2017) .....	18
<b>Figura 2.6.</b> Tinción de partículas de exopolímeros vistas en microscopio óptico. A) Partículas teñibles de commasie. B) Partículas de exopolímeros transparentes. Thornton, (2018) .....	20
<b>Figura 2.7.</b> Diagrama de la teoría DLVO. Modificado de (Thomas et al., 1999).....	33
<b>Figura 3.1.</b> Metodología del proyecto de investigación “Análisis experimental del efecto de la materia orgánica en la floculación de sedimentos” .....	37
<b>Figura 3.2.</b> Estanque acuícola con cría de truchas en Centro Acuícola el Zarco, La Marquesa, Estado de México .....	38
<b>Figura 3.3.</b> Salida de canal de lodos de los estanques de acuicultura del centro acuícola el Zarco (López-Rebollar, 2019) .....	39
<b>Figura 3.4.</b> Curva de calibración obtenidas a partir de las alícuotas de la solución patrón de sacarosa. La curva de calibración sirve para obtener posteriormente las concentraciones de C de las muestras .....	42
<b>Figura 3.5.</b> Material adherido a filtro de fibra de vidrio después de ser filtrado Whatman GF/F, tamaño de poro igual a 0.7 $\mu\text{m}$ .....	42
<b>Figura 3.6.</b> Determinación de CO por oxidación por dicromato de potasio de acuerdo con García-Galvis & Ballesteros-González (2005) .....	43
<b>Figura 3.7.</b> Ejecución de método gravimétrico A) Equipo de filtrado del laboratorio de calidad del agua del IITCA, B) Filtros con material retenido .....	44

<b>Figura 3.8.</b> Método de medición de sólidos suspendidos totales y sólidos suspendidos fijos mediante método gravimétrico .....	45
<b>Figura 3.9.</b> Montaje experimental para aplicación de técnicas ópticas en el CRA del laboratorio de visualización del IITCA (Salinas-Tapia & Garcia-Aragón, 2015).....	47
<b>Figura 3.10.</b> Método de obtención de curvas de calibración de parámetros hidrodinámicos del CRA .....	50
<b>Figura 3.11.</b> Árbol de experimentos .....	51
<b>Figura 3.12.</b> Entorno de procesamiento de software PTV-SED v2.1 .....	54
<b>Figura 3.13.</b> Adquisición de imágenes de partículas para cálculo de velocidad de caída utilizando una columna de sedimentación de medidas 3 x 5 x 100 cm. Las imágenes son capturadas en el tercio inferior de la columna, cuando estabilizan su trayectoria completamente vertical .....	55
<b>Figura 3.14.</b> Ejemplo de identificación de centroides de partículas. En el enfoque de la imagen se observa el desplazamiento de la partícula en un lapso .....	56
<b>Figura 4.1.</b> Sólidos en las muestras (SST, SSF y SSV) versus concentración en mg/L en el eje vertical primario y, contenido de MOP en % en eje vertical secundario, calculado como SSV/SST.....	60
<b>Figura 4.2.</b> Concentración de elementos disueltos CT – Carbono Total, CI – Carbono Inorgánico, COT – Carbono Orgánico Total y NT – Nitrógeno Total .....	61
<b>Figura 4.3.</b> Perfiles de velocidad horizontal calculados a partir de mediciones PIV en el CRA para obtención de parámetros hidrodinámicos. A) bajas revoluciones. B) altas revoluciones .....	62
<b>Figura 4.4.</b> Perfiles de velocidad vertical calculados a partir de mediciones PIV en el CRA para obtención de parámetros hidrodinámicos. A) bajas revoluciones. B) altas revoluciones .....	63
<b>Figura 4.5.</b> Perfiles de velocidad de corte calculados a partir de mediciones PIV en el CRA para calibración de parámetros hidrodinámicos. A) bajas revoluciones. B) altas revoluciones ....	63
<b>Figura 4.6.</b> Perfiles de tasa de corte calculados a partir de mediciones PIV en el CRA para calibración de parámetros hidrodinámicos. A) bajas revoluciones. B) altas revoluciones ....	64
<b>Figura 4.7.</b> Perfiles de velocidad tangencial de los experimentos de este trabajo $\omega F = 2.8$ , $\omega T = 4.1$ , $\omega T/\omega F = 1.46$ .....	65
<b>Figura 4.8.</b> Perfiles de velocidad tangencial en simulación de ANSYS FLUENT de Salinas-Tapia et al. (2014), $\omega F = 3.0$ , $\omega T = 4.5$ , $\omega T/\omega F = 1.5$ .....	65

<b>Figura 4.9.</b> Curvas de calibración hidrodinámica para diferentes correlaciones. Los parámetros hidrodinámicos fueron promediados en la altura (60 mm) para cada combinación aplicada en este experimento. A) Velocidad de corte versus tasa de corte. B) RPM de canal vs velocidad de corte. C) RMP de canal vs tasa de corte .....	67
<b>Figura 4.10.</b> Floculación de la muestra del río Grijalva para condiciones hidrodinámicas $u * 1 = 3.2 \text{ cm/s}$ y $G1 = 82 \text{ s}^{-1}$ A) Variación del promedio de los tamaños en la vertical, B) Ajuste de distribuciones de frecuencias de diámetros a curvas log normal.....	70
<b>Figura 4.11.</b> Floculación de la muestra del río Grijalva para condiciones hidrodinámicas $u * = 4.4 \text{ cm/s}$ y $G = 124 \text{ s}^{-1}$ A) Variación del promedio de los tamaños en la vertical, B) Ajuste de distribuciones de frecuencias de diámetros a curvas log normal .....	72
<b>Figura 4.12.</b> Floculación de la muestra del río Grijalva para condiciones hidrodinámicas $u * = 5.2 \text{ cm/s}$ y $G = 158 \text{ s}^{-1}$ A) Variación del promedio de los tamaños en la vertical, B) Ajuste de distribuciones de frecuencias de diámetros a curvas log normal .....	74
<b>Figura 4.13.</b> Floculación para condiciones hidrodinámicas $u * = 3.2 \text{ cm/s}$ y $G = 82 \text{ s}^{-1}$ de la muestra del río Usumacinta A) Variación del promedio de los tamaños en la vertical, B) Ajuste de distribuciones de frecuencias de diámetros a curvas log normal .....	75
<b>Figura 4.14.</b> Floculación para condiciones hidrodinámicas $u * = 4.4 \text{ cm/s}$ y $G = 124 \text{ s}^{-1}$ de la muestra del río Usumacinta A) Variación del promedio de los tamaños en la vertical, B) Ajuste de distribuciones de frecuencias de diámetros a curvas log normal .....	77
<b>Figura 4.15.</b> Floculación para condiciones hidrodinámicas $u * = 6.2 \text{ cm/s}$ y $G = 194 \text{ s}^{-1}$ de la muestra del río Usumacinta A) Variación del promedio de los tamaños en la vertical, B) Ajuste de distribuciones de frecuencias de diámetros a curvas log normal .....	79
<b>Figura 4.16.</b> Floculación para condiciones hidrodinámicas $u * = 3.2 \text{ cm/s}$ y $G = 82 \text{ s}^{-1}$ de la muestra del Zarco A) Variación del promedio de los tamaños en la vertical, B) Ajuste de distribuciones de frecuencias de diámetros a curvas log normal.....	80
<b>Figura 4.17.</b> Floculación para condiciones hidrodinámicas $u * = 4.4 \text{ cm/s}$ y $G = 124 \text{ s}^{-1}$ de la muestra del Zarco A) Variación del promedio de los tamaños en la vertical, B) Ajuste de distribuciones de frecuencias de diámetros a curvas log normal.....	82
<b>Figura 4.18.</b> Floculación para condiciones hidrodinámicas $u * = 5.2 \text{ cm/s}$ y $G = 158 \text{ s}^{-1}$ de la muestra del Zarco A) Variación del promedio de los tamaños en la vertical, B) Ajuste de curvas log normal a distribuciones de frecuencias de diámetros .....	84
<b>Figura 4.19.</b> Velocidad de caída del río Grijalva. A) Datos de velocidad de caída de y B) Velocidad de caída promedio para 51 intervalos de tamaño de partícula y dimensión fractal $F = 1.43$ .....	85

<b>Figura 4.20.</b> Dimensión fractal empírica de muestra del río Grijalva para serie de datos de $d_f$ dividida en dos grupos. A) $d_f$ versus $\omega_f$ y B) $d_f$ versus $\Delta\rho$ .....	86
<b>Figura 4.21.</b> Dimensión fractal empírica de datos experimentales y tamaño de partícula primaria de acuerdo con modelo de Khelifa & Hill (2006) de muestra del río Grijalva. A) De acuerdo con datos de velocidad de caída y B) De acuerdo con datos de densidad efectiva ..	86
<b>Figura 4.22.</b> Análisis de diámetros característicos en los experimentos de floculación del río Grijalva A) $d_{50}$ , B) $d_{75}$ y C) $d_{90}$ .....	87
<b>Figura 4.23.</b> Velocidad de caída del río Usumacinta. A) Datos de velocidad de caída de y B) Velocidad de caída promedio para 33 intervalos de tamaño de partícula y dimensión fractal $F = 1.69$ .....	88
<b>Figura 4.24.</b> Dimensión fractal empírica de muestra del río Usumacinta para serie de datos de $d_f$ dividida en dos grupos. A) $d_f$ versus $\omega_f$ y B) $d_f$ versus $\Delta\rho$ .....	89
<b>Figura 4.25.</b> Dimensión fractal empírica de datos experimentales y tamaño de partícula primaria de acuerdo con modelo de Khelifa & Hill (2006) de muestra del río Usumacinta. A) De acuerdo con datos de velocidad de caída y B) De acuerdo con datos de densidad efectiva ..	89
<b>Figura 4.26.</b> Análisis de diámetros característicos en los experimentos de floculación del río Usumacinta. A) $d_{50}$ , B) $d_{75}$ y C) $d_{90}$ .....	90
<b>Figura 4.27.</b> Velocidad de caída del Zarco. A) Datos de velocidad de caída de y B) Velocidad de caída promedio para 28 intervalos de tamaño de partícula y dimensión fractal $F = 1.75$ ....	91
<b>Figura 4.28.</b> Dimensión fractal empírica de muestra del Zarco para serie de datos de $d_f$ dividida en dos grupos. A) $d_f$ versus $\omega_f$ y B) $d_f$ versus $\Delta\rho$ .....	92
<b>Figura 4.29.</b> Dimensión fractal empírica de datos experimentales y tamaño de partícula primaria de acuerdo con modelo de Khelifa & Hill (2006) de muestra del Zarco. A) De acuerdo con datos de velocidad de caída y B) De acuerdo con datos de densidad efectiva .....	92
<b>Figura 4.30.</b> Análisis de diámetros característicos en los experimentos de floculación del Zarco. A) $d_{50}$ , B) $d_{75}$ y C) $d_{90}$ .....	93
<b>Figura 4.31.</b> Sedimentos del río Grijalva. A) Capturadas con objetivo 40x, B) Tamaños de flóculos capturadas con objetivo 100x, C) Tamaño de pequeñas partículas en flóculo capturadas con objetivo 100x .....	95
<b>Figura 4.32.</b> Sedimentos del río Usumacinta. A) Capturadas con objetivo 40x, B) Capturadas con objetivo 40x y, C) Capturadas con objetivo 100x.....	96

<b>Figura 4.33.</b> Fotografías de diatomeas. A) Muestra de agua “El Zarco” capturadas con objetivo 10x, B) Filtro con tamaño de poro 0.45 $\mu\text{m}$ capturadas con objetivo 10x y, C) Enfoque de una diatomea capturadas con objetivo 100x.....	97
<b>Figura 4.34.</b> Diatomeas en muestra de agua el Zarco. A) Distintos géneros de diatomeas (posiblemente Amphora y Cymbella) capturadas con objetivo 40x y, B) Agregado de diatomeas capturadas con objetivo 100x.....	97
<b>Figura 4.35.</b> Enfoque de diatomea con residuos a su alrededor, posiblemente SPE. A) Identificación de diatomea capturadas con objetivo 10x, B) Enfoque de diatomea capturadas con objetivo 100x.....	98
<b>Figura 4.36.</b> Sustancia polimérica extracelular A) observada en el microscopio capturadas con objetivo 10x. B) Capturadas con objetivo 40x.....	98
<b>Figura 4.37.</b> Diferentes enfoques de un agregado observada en el microscopio capturadas con objetivo 40x.....	98
<b>Figura 4.38.</b> Sustancias poliméricas extracelulares teñida con tinción azul alcian capturadas con objetivo 100x.....	99
<b>Figura 4.39.</b> Flóculos de la muestra del zarco. A), B) Medición de diámetros característicos a partir de fotografía capturadas con objetivo 40x. C), D) Medición de diámetros característicos capturadas con objetivo 100x.....	99
<b>Figura 4.40.</b> Evolución temporal de la distribución de población de flóculos A) Resultados presentados por Furukawa & Watkins (2012) y, B) Resultados del algoritmo desarrollado en este proyecto.....	100
<b>Figura 4.41.</b> Análisis de sensibilidad de variables de la ecuación (3.8). A) Radio de partícula primaria variable B) Coeficiente $k_f$ variable y C) Dimensión fractal variable.....	102
<b>Figura 5.1.</b> Contenido de sólidos suspendidos volátiles (MOP) carbono orgánico total disuelto y nitrógeno total disuelto.....	104
<b>Figura 5.2.</b> Contenido porcentual de sólidos suspendidos volátiles (materia orgánica particulada), carbono orgánico total (disuelto) y nitrógeno total (disuelto).....	105
<b>Figura 5.3.</b> Diámetros característicos de las 3 muestras para condición hidrodinámica $u_* = 3.2$ cm/s. A) $di = d_{50}$ , B) $di = d_{75}$ , C) $di = d_{90}$ y D) $di = d_m$ . Muestra del río Grijalva MOP=26.25% y COD=17.67mg/L; muestra del río Usumacinta MOP=9.97 y COD=14.78 mg/L; y muestra del Zarco MOP=48.79% y COD=5.14 mg/L.....	107
<b>Figura 5.4.</b> Diámetros característicos de las 3 muestras para condición hidrodinámica $u_* = 4.2$ cm/s. A) $di = d_{50}$ , B) $di = d_{75}$ , C) $di = d_{90}$ y D) $di = d_m$ . Muestra del río Grijalva	

MOP=26.25% y COD=17.67mg/L; muestra del río Usumacinta MOP=9.97 y COD=14.78 mg/L; y muestra del Zarco MOP=48.79% y COD=5.14 mg/L. .... 109

**Figura 5.5.** Diámetros característicos de las 3 muestras para condición hidrodinámica  $u_* = 5.2 \text{ cm/s}$ . A)  $d_i = d_{50}$ , B)  $d_i = d_{75}$ , C)  $d_i = d_{90}$  y D)  $d_i = d_m$ . Muestra del río Grijalva FO=26.25% y COD=17.67mg/L; muestra del río Usumacinta MOP=9.9%7 y COD=14.78 mg/L; y muestra del Zarco FO=48.79% y COD=5.14 mg/L. .... 110

# ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2.1.</b> Componentes de la estructura de los flóculos Ho et al., (2022).....	11
<b>Tabla 2.2.</b> Ventajas y desventajas de la aplicación de experimentos en canal anular. Elaboración propia de acuerdo con (Booij, 1994; Gharabaghi et al., 2007; Partheniades & Kennedy, 1967) .....	24
<b>Tabla 2.3.</b> Valores comunes para $C_D$ en tratamiento de aguas residuales (Ghanem et al., 2013; R. Gregory et al., 1999) .....	27
<b>Tabla 2.4.</b> Kernels para coeficiente de frecuencia de colisión. Modificado de Burd & Jackson, (2009) .....	33
<b>Tabla 2.5.</b> Esquema de solución numérico de ecuación de balance de población .....	36
<b>Tabla 3.1.</b> Reactivos utilizados para la implementación de la técnica de determinación de CO por oxidación por dicromato de potasio .....	40
<b>Tabla 3.2.</b> Valores teóricos de concentración de C de alícuotas de solución madre de sacarosa al 5 % (Solución A).....	41
<b>Tabla 3.3.</b> Revoluciones por minuto aplicadas en el canal y en la tapa del CRA .....	48
<b>Tabla 3.4.</b> Condiciones hidrodinámicas de los experimentos de floculación en el CRA.....	52
<b>Tabla 3.5.</b> Tiempos de obtención de imágenes en experimentos del CRA.....	52
<b>Tabla 3.6.</b> Procedimiento de granulometría .....	57
<b>Tabla 3.7.</b> Valores de parámetros para reproducción de resultados de Furukawa & Watkins (2012) y expresiones y valores propuestos para el cálculo en el presente trabajo .....	58
<b>Tabla 4.1.</b> Condiciones geométricas y mecánicas en los experimentos relacionados con la obtención de los parámetros hidrodinámicos de la presente investigación y condiciones en simulación de ANSYS FLUENT de Salinas-Tapia et al. (2014).....	65
<b>Tabla 4.2.</b> Descripción de condiciones operacionales e hidrodinámicas que se aplicaron en los experimentos para los distintos sedimentos en el CRA.....	68
<b>Tabla 4.3.</b> Diámetro promedio de los flóculos de la muestra del río Grijalva a lo largo del experimento $u_* = 3.2 \text{ cm/s}$ y $G = 82 \text{ s}^{-1}$ .....	69
<b>Tabla 4.4.</b> Diámetro promedio de los flóculos de la muestra del río Grijalva a lo largo del experimento $u_* = 4.4 \text{ cm/s}$ y $G = 124 \text{ s}^{-1}$ .....	71



<b>Tabla 4.5.</b> Diámetro promedio de los flóculos de la muestra del río Grijalva a lo largo del experimento $u^* = 5.2 \text{ cm/s}$ y $G = 158 \text{ s}^{-1}$ .....	73
<b>Tabla 4.6.</b> Diámetro promedio de los flóculos de la muestra del río Usumacinta a lo largo del experimento $u^* = 3.2 \text{ cm/s}$ y $G = 82 \text{ s}^{-1}$ .....	76
<b>Tabla 4.7.</b> Diámetro promedio de los flóculos de la muestra del río Usumacinta a lo largo del experimento $u^* = 4.4 \text{ cm/s}$ y $G = 124 \text{ s}^{-1}$ .....	76
<b>Tabla 4.8.</b> Diámetro promedio de los flóculos de la muestra del río Usumacinta a lo largo del experimento $u^* = 6.2 \text{ cm/s}$ y $G = 194 \text{ s}^{-1}$ .....	78
<b>Tabla 4.9.</b> Diámetro promedio de los flóculos de la muestra del Zarco a lo largo del experimento $u^* = 3.2 \text{ cm/s}$ y $G = 82 \text{ s}^{-1}$ .....	81
<b>Tabla 4.10.</b> Diámetro promedio de los flóculos de la muestra del Zarco a lo largo del experimento $u^* = 4.4 \text{ cm/s}$ y $G = 124 \text{ s}^{-1}$ .....	81
<b>Tabla 4.11.</b> Diámetro promedio de los flóculos de la muestra del río Usumacinta a lo largo del experimento $u^* = 5.2 \text{ cm/s}$ y $G = 158 \text{ s}^{-1}$ .....	83
<b>Tabla 4.12.</b> Resumen de dimensión fractal $F$ y tamaño de partícula primaria $d_p$ de los sedimentos del río Grijalva, Usumacinta y centro acuícola el Zarco .....	94

# SIMBOLOGÍA

$\Delta t$	Incremento de tiempo
$\Delta\rho, \rho_E$	Densidad efectiva o exceso de densidad
$\alpha$	Coefficiente de eficiencia de colisión
$\beta$	Coefficiente de frecuencia de colisión entre partículas
$\gamma$	Factor de ruptura
$\delta$	Espesor de recubrimiento de materia orgánica
$\varepsilon$	Tasa de disipación de energía turbulento
$\theta$	Fracción de la superficie de una partícula cubierta por una sustancia polimérica
$\mu$	Viscosidad dinámica
$\nu$	Viscosidad cinemática
$\rho_a$	Densidad aparente de flóculo
$\rho_f, \rho_p, \rho_w$	Densidad de flóculo, densidad de partícula primaria y densidad del agua, respectivamente
$\rho_{SST}$	Densidad de sólidos suspendidos volátiles
$\omega_t, \omega_b$	Revoluciones por minuto en tapa y en canal, respectivamente
$\omega_s$	Velocidad de caída
$A_p$	Proyección del área de la partícula
$b$	Ancho de canal rotatorio anular
$C_D$	Coefficiente de arrastre
$D_p$	Diámetro de partícula
$d_p$	Diámetro de partícula primaria
$d_f$	Diámetro de flóculo
$D_{50}, D_{75}, D_{90}$	Diámetros característicos
$d_i, d_j, d_k$	Diámetro de partículas $i, j, k$
$F$	Dimensión fractal
$f_{inorg}, f_{org}$	Fracción inorgánica y fracción orgánica, respectivamente
$G$	Tasa de corte del canal
$g$	Aceleración de la gravedad
$h$	Altura de flujo en canal rotatorio anular
$i$	Número de bin $i$ , número de partículas primarias que forman al flóculo
$k$	Constante de Boltzmann
$M_{inorg}, M_{org}$	Masa de material inorgánico y masa de material orgánico, respectivamente

$M_p, M_w$	Masa de las partículas primarias y masa del agua, respectivamente
$M_T$	Masa total de flóculo
$n_i, n_j, n_k$	Concentración de partículas de tamaño $i, j$ y $k$ , respectivamente
$Re$	Número de Reynolds de partícula
$r_{hi}$	Radio hidrodinámico
$r_p$	Radio de partícula primaria
$S$	Tasa de ruptura
$T$	Temperatura
$u_*$	Velocidad de corte
$\overline{u}$	Fluctuaciones de velocidad en dirección horizontal ( $U_{rms}$ )
$V_{inorg}, V_{org}$	Volumen de masa inorgánica y volumen de masa orgánica, respectivamente
$V_p$	Volumen de partícula
$V_p, V_w$	Volumen de partículas primarias y volumen del agua, respectivamente
$V_T$	Volumen total de flóculo
$v_x, v_y$	Velocidad en dirección $x$ y $y$ , respectivamente
$\overline{w}$	Fluctuaciones de velocidad en dirección vertical ( $W_{rms}$ )

# LISTA DE ACRÓNIMOS

FO	Fracción orgánica
MOP	Materia orgánica particulada
COD	Carbón orgánico disuelto
CRA	Canal rotatorio anular
SPE	Sustancias poliméricas extracelulares
COT	Carbono orgánico total
MO	Materia orgánica
SST	Sólidos suspendidos totales
SSF	Sólidos suspendidos fijos
SSV	Carbono orgánico volátiles
SH	Sustancias húmicas
IITCA	Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencia del Agua
PTV	Velocimetría por rastreo de partículas, por sus siglas en inglés
PIV	Velocimetría por imagen de partículas, por sus siglas en inglés
PET	Partículas exopoliméricas transparentes

# Capítulo 1.

## Introducción

En este proyecto el esfuerzo está direccionado por reconocer las propiedades que diferentes componentes de la materia orgánica MO, o fracciones orgánicas (FO), añaden a los flóculos de ambiente natural para desarrollar mecanismos de agregación y ruptura. En los ambientes naturales, donde un flóculo es un compuesto heterogéneo, es complicado comprender las interacciones que se dan entre el flóculo, la carga orgánica, las condiciones hidrodinámicas, la agregación y ruptura, por lo cual, el objetivo de este proyecto es comprender las relaciones entre las variables anteriormente mencionadas y los procesos de floculación. Se especula que de acuerdo con el contenido de cada FO se presentaran mecanismos de floculación distintos.

Para alcanzar el objetivo propuesto y validar la hipótesis, en este trabajo se presenta en el capítulo 1 los antecedentes, donde se recopilan las investigaciones desarrolladas que facilitan la comprensión de la interacción de distintas FO en la floculación de sedimentos; la mayoría de estas investigaciones se han dado en partículas y componentes orgánicos homogéneos. En el capítulo 3, el marco teórico muestra el sustento de las teorías de agregación de partículas y la implicación, que, en el fenómeno, tiene la presencia de polímeros de cadena corta y larga. En el capítulo 4, que es la metodología, se explican los procedimientos experimentales y analíticos que se realizaron en esta investigación para alcanzar el objetivo propuesto. El capítulo 5, se dan los resultados de los experimentos. En el capítulo 6, se buscaron las relaciones entre las variables medidas y la agregación y ruptura que se dio en los experimentos en el CRA. En el capítulo 7 y 8, se dan las

conclusiones y recomendaciones, respectivamente, que derivan del análisis de resultados y del alcance de este proyecto.

Se decidió trabajar con muestra de tres sitios distintos: las primeras dos muestras provenientes de los ríos más grandes de México, el río Grijalva y el río Usumacinta, y la tercera se obtuvo de los tanques de acuicultura del centro acuícola el Zarco. Se decidió ocupar estas 3 muestras porque se pensó que tienen una composición de MO distinta.

Se aplicaron 3 técnicas para medir diversas FO: determinación de carbono orgánico (CO) por oxidación por dicromato de potasio, determinación de materia orgánica particulada (MOP) por método gravimétrico, y determinación de carbono orgánico disuelto (COD) mediante analizador COT.

Para conocer las condiciones hidrodinámicas del CRA utilizó PIV. El procedimiento consistió en medir la velocidad de flujo con PIV para diferentes revoluciones de canal y tapa del CRA (combinaciones), para posteriormente calcular velocidades de corte y tasas de corte. Se escogieron tres combinaciones para aplicar a las muestras.

Una vez obtenidas las características hidrodinámicas del CRA y medidas diferentes FO de las muestras, se procedió a aplicar los experimentos principales en el CRA para medir la evolución del tamaño de los flóculos. La técnica de velocimetría por rastreo de partículas (Particle Tracking Velocimetry: PTV) fue utilizada para determinar el diámetro equivalente de los flóculos. Se capturaron imágenes hasta los 105 minutos con el fin de evaluar en que lapsos existía agregación y en cuales había ruptura, con el fin de relacionar estos resultados con la condición hidrodinámica y con el contenido de las diferentes FO.

Una vez formados los flóculos de cada muestra, después de los experimentos en el CRA, se utilizó una columna de sedimentación y se aplicó la técnica PTV para determinar la velocidad de caída de los flóculos. Estos resultados se utilizaron para estimar la dimensión fractal de los flóculos y el tamaño de partícula primaria, características físicas de los flóculos que se relacionaron con los resultados de las FO y de la floculación.

La muestra del río Grijalva obtuvo un alto porcentaje de MOP, y con baja velocidad de corte los flóculos lograron aumentar considerablemente su tamaño, pero cuando se aplicó la tasa de corte media y alta los flóculos tendieron a la ruptura. Los cálculos de dimensión fractal indican una alta porosidad debido a su contenido de MOP, lo cual concuerda con el

comportamiento mostrado en los experimentos en el CRA donde se expone eficiencia de adhesión, pero también fragilidad cuando se aplican velocidades de corte medias y altas.

Las muestras del río Usumacinta obtuvieron una fuerte relación con la estabilización de tamaños de los flóculos debido a la presencia mayoritaria de COD, el cual, en investigaciones previas de ríos, se ha caracterizado por estar compuesto en gran medida por sustancias húmicas, y por lo tanto los tamaños de los flóculos durante los experimentos tendieron a estabilizarse. Los flóculos del río Usumacinta fueron los más compactos de acuerdo con la dimensión fractal calculada, condición que concuerda con el desempeño mostrado en los experimentos en el CRA.

La muestra del Zarco mostro tendencia a desarrollar su tamaño más grande bajo las condiciones experimentales aplicadas en esta investigación debido a la presencia de MOP compuesta mayoritariamente por microalgas que mejora la capacidad de adhesión entre partículas debido a la presencia de sustancias poliméricas extracelulares (SPE), polímeros naturales de alto peso molecular y cadena larga el diámetro de estos flóculos aumentó hasta 28% su tamaño inicial. Los flóculos del Zarco presentaron una dimensión fractal baja reflejando flóculos porosos, como los característicos por la presencia de diatomeas y SPE, pero también se expuso una dimensión fractal muy alta, probablemente debida a la presencia de desechos fecales de las truchas.

## *1.1. Antecedentes*

Los sedimentos en suspensión (diámetro < 63  $\mu\text{m}$ ) representan, a nivel mundial, más del 90% de la carga de material solido que desemboca en los estuarios. Estos son el principal vehículo de transporte de nutrientes y contaminantes, por lo que son los responsables de fenómenos físicos y químicos en la desembocaduras y costas. Además, son fundamentales en la morfología de los ríos, por lo que son un indicador crítico del grado de alteración en el medio acuático (Droppo & Ongley, 1994; Livsey et al., 2022).

La representación precisa del transporte de sedimentos finos da información acerca de la deposición final y de la bioacumulación de muchas sustancias toxicas, además de la posibilidad de limitar nutrientes, por ejemplo, el carbón orgánico (CO), que en la actualidad es un tema mayor debido a la gran carga que se transporta a través de los ríos hacia las costas, modificando el balance autótrofo y heterotrófico (Cai et al., 2015; R. G. M. Spencer et al., 2016; Stone et al., 2021).

Los procesos básicos implicados en el transporte de sedimentos son diferentes para el caso de sedimentos no cohesivos y cohesivos. En estos últimos, existe un proceso dinámico de agregación y desagregación de partículas suspendidas. La agregación es el proceso de adherencia de partículas, que da como resultados conjuntos de partículas, conocidas como flóculos. Por otro lado, la desagregación de grandes flóculos forma flóculos de menor tamaño o incluso partículas primarias (Ho et al., 2022). A este proceso descrito se le llama floculación y resulta fundamental para el entendimiento del proceso de transporte (Stone et al., 2021).

Los esfuerzos por caracterizar el papel de la MO en el fenómeno de floculación han sido estudiados por diversos autores. Algunos investigadores han experimentado utilizando diversos polisacáridos específicos para determinar el impacto de cada uno en el proceso de floculación; también se han hecho experimentos con muestras naturales de diversos sitios (Furukawa et al., 2009; Lee et al., 2019; Zeichner et al., 2021).

Furukawa et al. (2009), realizaron experimentos para investigar los mecanismos de agregación y ruptura de partículas suspendidas en condiciones simuladas de ríos y estuarios. Los experimentos se basaron en la combinación de arcilla montmorillonita utilizando concentración de 8 mg/L, y distintos tipos de MO, ácido húmico y goma quitina en el rango de salinidad 0 – 7.2 psu (por sus siglas en inglés, unidades prácticas de salinidad, equivalente a 1 mg de sales /g de agua).

En el sistema compuesto de arcilla montmorillonita con agua artificial de mar (ASW, por sus siglas en inglés) con 0 salinidad, los resultados mostraron que el diámetro de las partículas se mantuvo en 200 nm (nanómetro) después de 60 minutos de mezclado. Sin embargo, cuando la salinidad aumentó a 1.8, 3.6 y 7.2 psu, se detectó un aumento en el diámetro de las partículas, lo que indica la formación de agregados. Este comportamiento se atribuyó a las fuerzas iónicas.

En el sistema compuesto de arcilla montmorillonita y ácido húmico (4.8 mg/L), y de arcilla montmorillonita y goma quitina (1.6 y 4.8 mg/L) con ASW a diferentes niveles de salinidad, se observó un incremento poco significativo en el diámetro de los agregados.

Verney et al. (2009), realizaron sondeos en 3 estaciones en el estuario del río Seine, Francia, cada 2 meses durante 14 meses, muestreando en periodos de similar turbulencia para después replicar experimentos en un frasco de experimentación de floculación,



estudiando durante estos, los parámetros de concentración, MO, salinidad, turbulencia y presencia de diatomeas. Los experimentos se estandarizaron de modo que la turbulencia fuera igual en todos los experimentos. Los resultados mostraron que el parámetro que tiene la mayor correlación con la floculación fue la concentración de material suspendido, concluyendo también, que la presencia de diatomeas y de la MO, en general, fue el segundo factor de mayor impacto que afectó la floculación.

Lee et al. (2019), estudiaron el rol que tiene la MO en los procesos de floculación en ambientes naturales, tomando como sitio de muestreo el río Nakdong en el sur de Corea del Sur. Se tomaron muestras durante un año y esas muestras fueron filtradas a través de membranas de 1.2  $\mu\text{m}$  (micrómetros), para tener las componentes pequeñas de la MO y retirar MO grande, como algas. Los experimentos se hicieron en jarras de experimentación estándar. Se realizaron mezclas de caolín con diversos volúmenes de las muestras. Los resultados de los experimentos, con el agua cruda y filtrada, mostraron las condiciones más favorables para la floculación se daban en la temporada de sequía, donde la muestra se tornaba más lacustre, la MO tomaba más origen acuagénico y era la temporada con mayor concentración de algas, lo anterior asociado a la producción de biopolímeros. Por otro lado, en la temporada de lluvia, se favoreció la estabilización de los sedimentos debido al origen terrígeno de las sustancias húmicas de los sedimentos arrastrados hacia el río.

Zeichner et al. (2021), cuantificaron el rol de la MO a través de la medición de la velocidad de caída en cuerpos con baja salinidad, llevando a cabo experimentos con distintas combinaciones de polímeros (macromoléculas orgánicas (goma xantana y goma guar)) y arcilla mineral (esmectita y caolinita). Se observó que los polímeros tienen un efecto sustancial, variado y no lineal en la floculación y velocidad de caída de la arcilla. En los experimentos con polímeros se formaron flóculos visibles, los cuales sedimentaron notablemente más rápido que las partículas primarias que no flocularon (partículas primarias de diámetro medio  $D_{50} = 1 \mu\text{m}$  y velocidad de caída  $\omega = 2.205 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ ). En general, la velocidad de caída de los flóculos incrementa con la concentración de MO. La goma guar fue la más efectiva alcanzando velocidad de caída  $\omega \sim 10^{-3} \text{ m/s}$ .

En el Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencia del Agua (IITCA) se han estudiado diversos agregados, sus mecanismos de floculación, y velocidad de caída tomando muestras utilizando gravas y arenas, además de sedimentos del río Grijalva y Usumacinta, y de tanques acuícolas.

Salinas-Tapia (2007), caracterizó la velocidad de caída de sedimentos no cohesivos, en un canal de pendiente variable de secciones 0.10x0.20 m y longitud de 2.0 m, utilizando la técnica PTV. Para la realización de este proyecto se desarrolló un algoritmo PTV (Salinas-Tapia et al., 2006) (que es la base de lo que actualmente se utiliza en el IITCA) para identificar sedimentos en un rango amplio de diámetros además de formas irregulares, ya que otros software, en ese momento, solo tenían facilidades de visualización y cálculo para partículas trazadoras (circulares).

Díaz-Palomarez (2015), determinó experimentalmente con el sistema PTV, la velocidad de caída de sedimentos cohesivos, con muestras de heces y sobrantes de alimentos de truchas provenientes del “Centro Acuícola el Zarco “. Con los resultados procesados a partir del sistema PTV, se obtuvo una expresión para calcular el coeficiente de arrastre ( $C_d$ ), (Garcia-Aragon et al., 2014) dependiente del número de Reynolds, y se calibró el modelo teórico de velocidad de caída, presentando un buen ajuste a estos resultados experimentales.

Zepeda-Mondragon et al. (2022), implementaron holografía digital para calcular la dimensión fractal de sedimentos cohesivos de los ríos Usumacinta y Grijalva, y aplicaron la ecuación de densidad de agregados de Lau & Krishnappan (1994). Igualmente se utilizó una ecuación para el cálculo de la dimensión fractal propuesta por Garcia-Aragon et al. (2014), encontrando que ambas ecuaciones ofrecen resultados confiables de predicción de dimensión fractal una vez que los diámetros de los sedimentos son conocidos.

López-Rebollar et al. (2023), estudiaron de manera experimental y simulación CFD, la eficiencia de sedimentación en un tanque de recirculación para acuicultura. En sus experimentos incluyeron el cálculo de la velocidad de caída por medio de PTV, utilizando muestras provenientes de tanques de acuicultura del Zarco. Las velocidades de caída estuvieron dentro del rango de 0.7-2.5 cm/s y los diámetros observados en 0.14-1.6 mm.

Izquierdo-Ayala et al. (2023), estudiaron el comportamiento temporal de la floculación en el sistema bajo de los ríos Grijalva y Usumacinta. Los parámetros hidrodinámicos se derivaron de mediciones de velocidad en campo. Los sólidos suspendidos fueron reformados en un canal anular y después sus tamaños y velocidad de caída fueron medidos utilizando PTV.

Como resultado de los antecedentes locales, en nuestro centro de investigación, podemos notar que la floculación de partículas se ha estudiado con relación a condiciones

hidrodinámicas, pero no se ha tomado en cuenta el contenido de MO, y menos analizado como los mecanismos de floculación se dan en relación con el contenido de diferentes FO, por lo que este trabajo podría aportar esas relaciones.

### *1.1. Problemática*

Los procesos de floculación y su influencia en el transporte han sido estudiados especialmente para el caso de ambientes salinos como estuarios y desembocaduras (Guo et al., 2021; Winterwerp, 2002). Estas investigaciones se han centrado en materia en suspensión de contenido no biológico, como las arcillas, por lo que hay un vacío en la comprensión del efecto de la MO en la eficacia de la adhesión y la disminución de la fuerza de repulsión electrostática, lo que es importante para la modelación en sistemas ricos en MO (Furukawa & Watkins, 2012). El interés por conocer las consecuencias de la MO en la floculación se ha incrementado recientemente, y como resultado, se han identificado relaciones entre diferentes FO y la floculación (Furukawa et al., 2009; Zeichner et al., 2021).

En años recientes, el efecto de la MO en el fenómeno de floculación ha recibido especial atención. Las opiniones sobre este tema se han diversificado con respecto a los planteamientos que existían en un principio (Furukawa et al., 2009; Zeichner et al., 2021). Inicialmente, se postulaba que la MO tenía una correlación positiva con la agregación de partículas y que el tamaño de los flóculos aumentaba en relación con la concentración de MO, sin embargo, en las últimas dos décadas, se han realizado experimentos con distintos tipos de MO, algunas de origen acuagénico (lo organismos las producen) y otras de origen externo producto de la erosión de suelos (Furukawa et al., 2009; Lee et al., 2019; Zeichner et al., 2021). Se han encontrado mecanismos de agregación diferentes ante la presencia de los distintos tipos de MO. Algunas variantes de MO (origen acuagénico como microalgas) sí poseen una correlación positiva con el aumento del tamaño de los flóculos, mientras que otras aumentan la fuerza de repulsión electrostática (origen externo como sustancias húmicas) (Furukawa et al., 2009; Lee et al., 2019; Zeichner et al., 2021).

En los ambientes naturales, la composición fisicoquímica de las partículas y los tipos de MO varían enormemente, complicando la caracterización y la representación de los procesos de floculación (Ho et al., 2022; Nghiem et al., 2022). Para abordar este problema, proponemos caracterizar muestras de diferentes fuentes, midiendo diversas FO por medio de: oxidación por dicromato de potasio, método gravimétrico y carbón orgánico disuelto (COD) mediante analizador COT, así como una identificación por microscopía; después

proponemos aplicar diferentes condiciones hidrodinámicas a las muestras para encontrar relaciones entre las FO medidas y las condiciones hidrodinámicas.

## *1.2. Justificación contextual y científica*

La importancia de la investigación es determinar el impacto de la MO en los procesos de floculación de las muestras de los ríos Grijalva, Usumacinta y centro acuícola el Zarco. Estos conocimientos permitirán relacionar de manera más profunda los procesos de transporte de contaminantes y nutrientes en cauces fluviales, lo cual dará pauta a caracterizar de modo más precisa procesos ecológicos. Lo anterior beneficiará la conservación de los hábitats a través de toma de decisiones para usos de suelo o acciones de remediación, con lo cual, la población en general resulta beneficiada.

Esta investigación permitirá conocer el rol protagónico que tiene el contenido de algunas FO en el proceso de floculación en ríos; además podría dar como resultado una caracterización del comportamiento de los sedimentos de acuerdo con estas FO presentes en cuerpos de agua.

## *1.3. Hipótesis*

La floculación de sedimentos cohesivos se ve afectada por la presencia de microorganismos vivos, así como sustancias húmicas provenientes de la erosión y arrastre de suelos, las heces de los animales acuáticos y las Sustancias Poliméricas Extracelulares (SPE), entre otras.

En esta investigación se asume que la concentración de MO es un indicador importante de varios mecanismos de aglomeración de partículas finas. En este trabajo se utilizaron muestras de tres distintas fuentes (ríos del sureste de México y tanques de acuicultura) buscando demostrar la hipótesis principal, es decir, la eficiencia de la MO como mecanismo de floculación.

## *1.4. Objetivos*

### **1.4.1. Objetivo General**

Analizar el efecto de la MO en la floculación en sedimentos cohesivos provenientes de los ríos Grijalva, Usumacinta y de tanques de acuicultura. Para tal efecto se propone hacer mediciones de diferentes FO, y realizar experimentos en el CRA y columna de

sedimentación para determinar diámetros, concentración y velocidad de caída. Con lo anterior se dilucidarán los mecanismos de floculación representados por la variación en el tamaño de los flóculos durante los experimentos en el canal anular y su relación con los demás parámetros medidos.

#### 1.4.2. Objetivos específicos

- Caracterizar las muestras de distintos orígenes a través de mediciones de diferentes FO por medio de distintas técnicas, e identificar el tipo de MO presente en los sedimentos por medio de microscopía, para determinar la composición orgánica de los flóculos.
- Identificar el comportamiento de agregación y ruptura de los flóculos, utilizando la técnica de velocimetría por rastreo de partículas (PTV) en experimentos donde se midan los tamaños de flóculo en un lapso y posteriormente, en estado estacionario, se mida la velocidad de caída de los agregados para relacionar estas mediciones con el contenido de MO.
- Analizar el efecto de la materia orgánica en la floculación de los sedimentos, tomando en cuenta las mediciones de la concentración, los diámetros medidos en el experimento en el canal anular, la velocidad de caída y el porcentaje de materia orgánica para determinar tal efecto

# Capítulo 2.

## Marco teórico

La floculación es aquel mecanismo que envuelve los procesos de agregación de partículas primarias para formar partículas más grandes, y es también afectado por la ruptura de flóculos grandes para formar flóculos más pequeños (Ho et al., 2022).

La floculación determina las características de densidad, de velocidad de caída y sobre todo de la deposición final de la carga sólida de los cuerpos de agua. Sin embargo, con los cambios de uso de suelo cambian las condiciones de floculación (Ho et al., 2022).

En los ambientes acuáticos los flóculos tienen una composición heterogénea. Los flóculos se componen mayormente de tres grupos: componentes inorgánicos como arcillas y minerales, componentes biológicos como fitoplancton y SPE, y componentes químicos como iones y sustancias húmicas. Una mejor comprensión de la composición heterogénea de los flóculos mejorará nuestro conocimiento sobre sus propiedades de composición y estructura, así como la dinámica de los sedimentos en los ambientes acuáticos (Ho et al., 2022).

### *2.1. Estructura de los flóculos*

Los flóculos son una formación heterogénea de estructuras compuestas de un elemento biológico activo (principalmente bacterias, aunque en algunas ocasiones otros organismos pueden sumarse), un elemento biológico no vivo (por ejemplo, detritos), partículas inorgánicas (por ejemplo, arcilla), y agua almacenada o fluyendo a través de los poros

(Droppo, 2001). Ho et al. (2022), da una descripción más detallada de los componentes de los flóculos (Tabla 2.1).

La agregación de los flóculos es consecuencia del vencimiento de las fuerzas de repulsión electrostáticas (FE) entre las partículas individuales de sedimentos finos con respecto a las fuerzas de atracción de Van der Waals (FW) (Lorenzo-Acosta, 2006). El vencimiento de las fuerzas repulsivas de las partículas se puede dar mediante procesos físicos, químicos o biológicos, en un proceso dinámico, por lo que las condiciones ambientales cambian la manera en que los agregados se transportan (Bungartz et al., 2006).

**Tabla 2.1.** Componentes de la estructura de los flóculos Ho et al., (2022)

<b>Grupo</b>	<b>Componente</b>	<b>Estados</b>	<b>Fuentes</b>
<i>Materia inorgánica</i>			
	-Partículas minerales	-Particulado -Coloidal	-Naturaleza (erosión y meteorización) -Antropogénica
	-Metales naturales	-Particulado -Coloidal -Disuelto	-Naturaleza (meteorización)
<i>Materia orgánica</i>			
	-Microorganismos	-Particulado -Coloidal	-Naturaleza (fitoplancton y bacterias) -Actividades humanas (acuicultura, contaminación difusa, eutrofización)
	-Partículas orgánicas no vivas	-Particulado -Coloidal	-Naturaleza (restos celulares, heces) -Actividades humanas (acuicultura, contaminación difusa, eutrofización)
	-Sustancias poliméricas extracelulares	-Particulado -Coloidal -Disuelto	-Naturaleza (producción por alga o por bacteria)
	-Partículas exopoliméricas transparentes	-Particulado -Coloidal	-Naturaleza (producción por alga o por bacteria)
	-Partículas teñibles de commasie	-Particulado -Coloidal	-Naturaleza (producción por alga o por bacteria)

Continuación de Tabla 2.1

	-Sustancias húmicas	-Coloidal -Disuelto	-Naturaleza (secreción o descomposición de plancton y bacterias acuáticas)
<i>Agua y espacio de poro</i>			
	-Agua dentro y alrededor de los flóculos		-Naturaleza (ríos, lagos y costas)
	-Espacio de poro		
<i>Sustancias xenobióticas</i>			
	-Micro plásticos	-Particulado -Coloidal	-Actividades humanas (empaques de alimentos, desechos domésticos y agricultura)
	-Nanopartículas de manufactura	-Particulado -Coloidal	-Actividades humanas (cosméticos, pinturas, catalizadores, lubricantes)
<i>Gotas de aceite</i>	-Gotas de aceite	-Emulsión -Coloidal	-Actividades humanas y artificiales (fractura de línea de conducción, falla en la perforación de pozos) -Sedimentos petrolíferos naturales

## 2.2. Variables que afectan el fenómeno de floculación en los cuerpos de agua

Los procesos de floculación en cuerpos de aguas turbulentas tienen correlación con diversos parámetros físicos, biológicos y químicos, los principales son: el tamaño de partícula primaria del sedimento, la concentración volumétrica del sedimento ( $C_m$ ), la intensidad de la turbulencia, la temperatura, la concentración de materia orgánica (fracción de la superficie del sedimento cubierta por materia orgánica,  $\theta$ ), (Chao & Jia, 2011; Nghiem et al., 2022), la mineralogía de los sedimentos (molar Al/Si del sedimento suspendido del río) y concentraciones de especies disueltas (densidad de carga relativa del agua del río,  $\Phi$ ) (Nghiem et al., 2022).

Para que dos partículas colisionen, se necesita velocidad o movimiento de los fluidos. Los mecanismos de agregación, dados por la diferencia de velocidades, que gobiernan el fenómeno de floculación son los siguientes (Thomas et al., 1999; Winterwerp, 2002):



1. El movimiento browniano provoca la colisión de partículas para formar agregados, fuerzas de atracción conocidas como de Van der Waals (FW) (floculación periquinética).
2. Las partículas con mayor velocidad de caída, interceptan a las de menor velocidad. Estas colisiones entre partículas pueden resultar en agregados (sedimentación diferencial).
3. Los movimientos turbulentos hacen que las partículas colisionen y formen flóculos, por otra parte, la tasa de corte que provoca la turbulencia puede alterar los flóculos nuevamente, ocasionando ruptura del flóculo (floculación ortoquinética).

Aunque en la mayoría de los ambientes naturales, la turbulencia tiene la mayor correlación con los procesos de floculación, factores como la concentración y cantidades de materia orgánica disuelta y particulada afectan también la tasa de agregación (Droppo & Ongley, 1994). Por ejemplo, el carbono orgánico particulado (COP), puede contener varias formas de MO, como lo son: detritos, macrófitos, microorganismos y sus secreciones, por ejemplo, partículas exopoliméricas transparentes (PET, un tipo de SPE). Estos últimos, son geles que existen en la interfase entre material particulado y disuelto, y son flexibles y extremadamente aglutinadores, y, por tanto, capaces de promover la agregación de las partículas, aumentando la eficiencia de colisión y la fuerza del flóculo (Bungartz et al., 2006; Mietta et al., 2009; Passow, 2002).

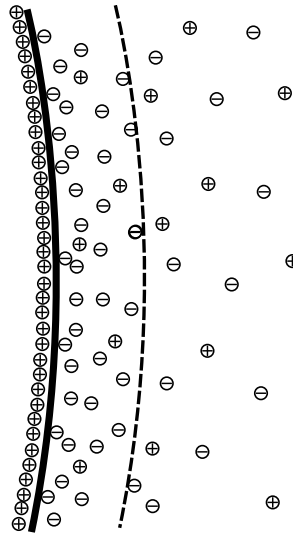
### *2.3. Mecanismos de floculación*

Las partículas inorgánicas en el medio acuoso tienen una carga eléctrica (comúnmente negativa) considerable, por lo que atraen contraiones alrededor de su superficie formando una atmósfera iónica (Figura 2.1). El desarrollo de esta capa difusa de iones previene la agregación con otras partículas, ya que esta capa iónica aumenta la presión osmótica del solvente en la región de separación entre dos partículas (Adachi et al., 2012).

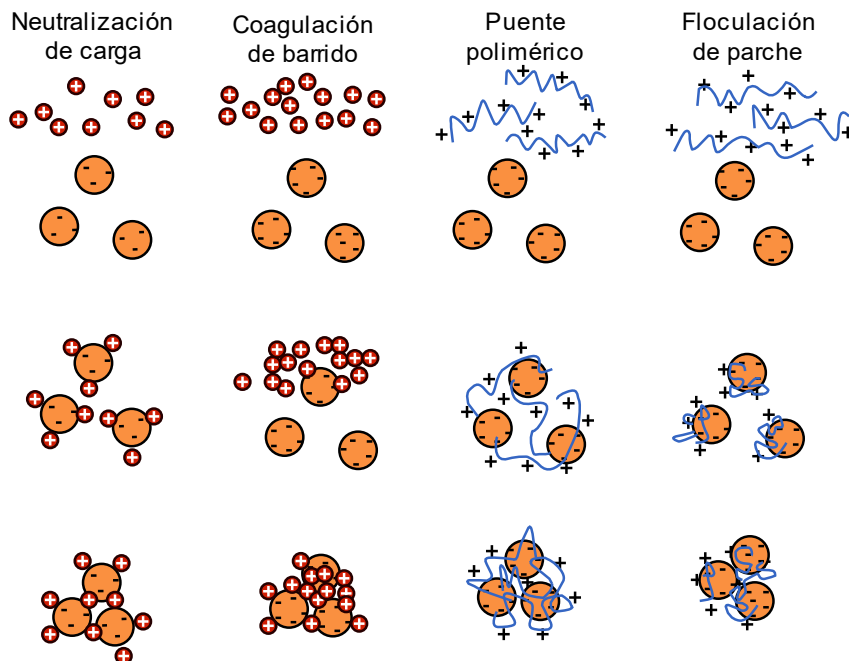
Cuando dos partículas se acercan demasiado entre sí, una fuerza universal de atracción actúa sobre ellas, permitiéndoles adherirse, esta fuerza es denominada fuerza de Van der Waals (Adachi et al., 2012).

Por otro lado, para que la agregación suceda de manera más fácil, las partículas pueden desestabilizarse, debido a la adición de coagulantes solubles en agua o existencia de floculantes. Para que ocurra la coagulación, las partículas suspendidas deben ser

eléctricamente neutralizadas, mientras que en la floculación las partículas se conectan a través de cadenas moleculares (Suopajärvi, 2015).



**Figura 2.1.** Representación esquemática de la doble capa difusa. La partícula está cargada positivamente y está rodeada inmediatamente por contraiones negativos, posteriormente se encuentra la capa difusa. (Adachi et al., 2012)



**Figura 2.2.** Mecanismos de coagulación y floculación (Suopajärvi, 2015)

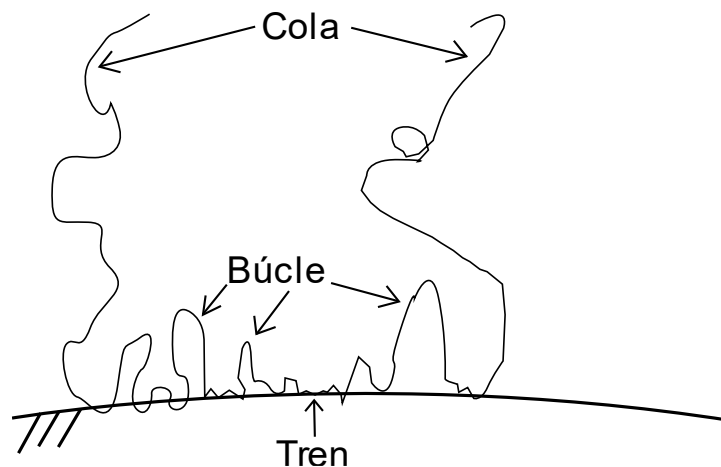
Un mecanismo identificado para que suceda la coagulación de partículas sucede cuando, por ejemplo, un coagulante con carga positiva es adsorbido en la superficie de partículas

cargadas negativamente. El coagulante penetra en la doble capa difusa, rodeando la partícula, reajustando la capa haciéndola más densa y delgada, lo que ayuda a la partícula a moverse más cerca de otras partículas, este mecanismo es llamado neutralización de carga (Suopajärvi, 2015).

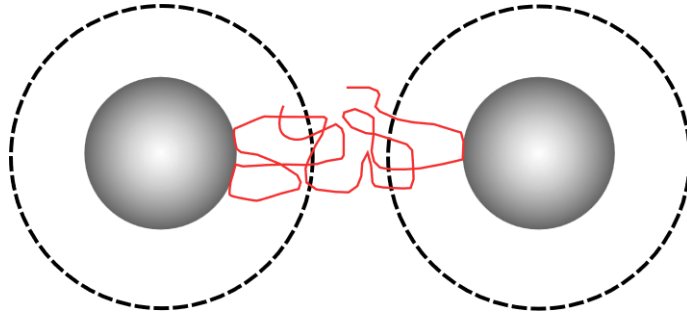
Otro mecanismo es llamado coagulación por barrido, el cual se refiere a la existencia de sales metálicas, que cuando existen en concentraciones muy altas causa la precipitación de hidróxido metálico amorfo, en el cual las partículas pueden quedar atrapadas (Suopajärvi, 2015).

En lo que se refiere a la floculación, se reconocen dos mecanismos principales de floculación relacionados con la adsorción de polímeros. Cualquiera de los dos mecanismos está dominado en el proceso de adsorción de los polímeros en la superficie de la partícula. Cuando solo la superficie parcial de una partícula está cubierta por polímeros pueden aparecer uno de estos dos mecanismos que llevan a la floculación, llamados neutralización de carga y puente polimérico (Adachi et al., 2012; J. Gregory & Barany, 2011).

En el proceso del puente polimérico, el primer contacto de una partícula con un polímero resulta en un estado estable en el que el polímero presenta bucles, colas y trenes (Figura 2.3). Las colas largas pueden alcanzar otras partículas y adsorberse en su superficie formando así un flóculo. La extensión de la cadena del polímero debe de ser el doble de la capa difusa para poder formar un puente (Figura 2.4) (Adachi et al., 2012).



**Figura 2.3.** Configuración típica de una cadena polimérica adsorbida en la superficie de una partícula (Adachi et al., 2012).



**Figura 2.4.** Puente polimérico como mecanismo de floculación. La línea punteada representa la doble capa difusa alrededor de la partícula (Adachi et al., 2012).

Los flóculos que de este mecanismo derivan, pueden ser muy largos, incluso bajo altas condiciones turbulentas. También es importante mencionar que este mecanismo les proporciona a los flóculos flexibilidad, lo cual puede contribuir a la fuerza de los flóculos ya que puede presentarse estiramiento antes del rompimiento (J. Gregory & Barany, 2011).

Según J. Gregory & Barany (2011), las siguientes consideraciones son las más importantes en el mecanismo de puente polimérico:

- Los polímeros más efectivos son lineales, con alto peso molecular.
- Existen relaciones óptimas de polímeros, correspondientes a bajas cantidades adsorbidas (típicamente del orden de 1 mg por gramo de partículas). Cuando hay exceso de polímeros la re-estabilización podría ocurrir.
- La fuerza iónica puede ser un factor importante y la presencia de ciertos iones metálicos es en ocasiones crucial
- Fuertes, y por tanto grandes, flóculos son formados a través del puente polimérico, pero flóculos rotos no pueden volver a crecer fácilmente.

En el caso del mecanismo de floculación por neutralización de carga para polímeros, se ha referido al mecanismo más bien mencionando un caso particular, al que llaman floculación de parche (patching flocculation, en inglés). En este caso, el polímero se adsorbe en la superficie de una partícula opuestamente cargada, dando como resultado una distribución plana y no uniforme de la superficie de carga, lo cual lleva a parches con exceso de carga del polímero. El polímero se adhiere fuertemente a la superficie y las colas se extienden poco hacia el solvente. La atracción electrostática directa, entre los parches cargados eléctricamente opuestos a la superficie de la partícula descubierta, promueve la agregación (Adachi et al., 2012; Deng et al., 2022; J. Gregory & Barany, 2011; Suopajarvi, 2015).

Deng et al. (2022), reporta un mecanismo adicional relacionado con los microorganismos existentes en el medio acuoso. Este mecanismo de floculación es llamado floculación de barrido, y consiste en que los microorganismos pueden formar redes poliméricas con protuberancias y canales a través del puente de sus SPE. Cuando la sedimentación de este tipo aparece, varias partículas finas pueden quedar atrapadas.

#### *2.4. Impacto de la MO en la floculación*

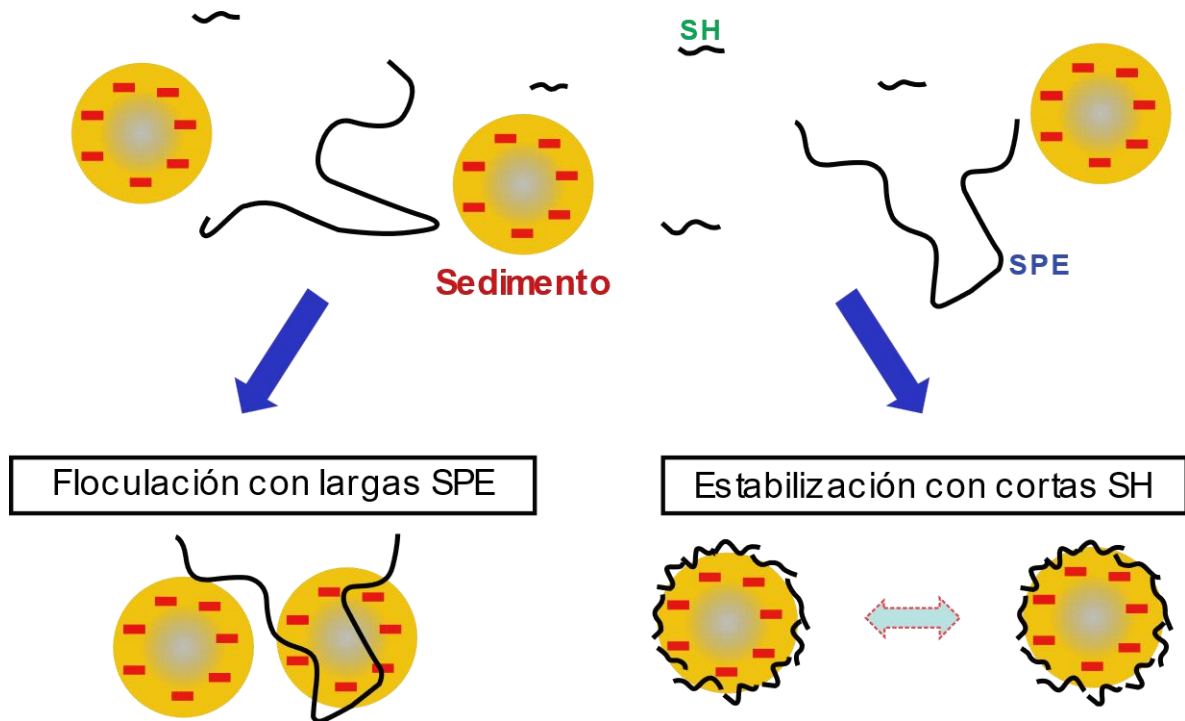
En los ambientes naturales predominan los flóculos con altos contenidos de MO. Contrario a los flóculos de composición predominantemente inorgánica, aquellos con altos contenidos de MO, no han sido suficientemente analizados. Los flóculos orgánicos son afectados por la carga de nutrientes y la disponibilidad de CO<sub>2</sub>, lo que a su vez afecta las comunidades microbianas de fitoplancton e invertebrados, y, por lo tanto, la producción de SPE (Larsen et al., 2009; Wotton, 2007).

La MO es un componente importante de los cuerpos de agua y tiene origen autóctono y terrígeno. La MO terrígena es arrastrada desde la cuenca durante los periodos de lluvia, mientras que la MO autóctona es producida in situ por microorganismos que viven en el agua. Las sustancias húmicas (SH) y las sustancias poliméricas extracelulares (SPE) son componentes típicos de la MO, y ambos son polímeros, las primeras de cadena corta y bajo peso molecular y las segundas de cadena larga y alto peso molecular (Lee et al., 2019).

Lee et al. (2017), encontraron que la composición de la MO en el río Nakdoog se hizo acuagénico con abundancia de biopolímeros y componentes de la MO similares a las proteínas durante las temporadas de estiaje, y la MO se transformó a origen más pedogénico con predominancia de SH durante las temporadas de lluvia.

Furukawa et al. (2009), encontraron que al combinar arcilla montmorillonita con ácido húmico, la agregación de las partículas fue inhibida. Lo cual comprueba que macromoléculas orgánicas, que son un componente principal de los ríos, previenen la agregación de arcilla aumentando la repulsión electrostática entre la superficie y los bordes (formas laminares) de las partículas debido a la rápida adsorción en los bordes y el aumento de su carga negativa, y por introducción de la repulsión estérica, es decir, a la interferencia entre partículas causada por la adhesión del polímero en la superficie de la partícula.

Se han reportado que material orgánico natural como las SH fueron adsorbidas en partículas de arcilla mineral, obstaculizando la floculación de las partículas en estuarios (Adachi et al., 2012).



**Figura 2.5.** Modelo conceptual de floculación por SPE y de estabilización por SH (Lee et al., 2017)

Los microorganismos acuáticos, de los cuales las diatomeas son el componente más amplio perteneciente al fitoplancton, son responsables de la producción de SPE y otras sustancias poliméricas. Esta característica les permite a los microorganismos adherirse unos con otros y formar flóculos biológicos, y después capturar partículas de sedimento, siendo el resultado de esta adhesión flóculos biominerales. Gran parte de los estudios en la floculación relacionados con microorganismos son hechos con diatomeas (Deng et al., 2022).

Un estudio más profundo de las características morfológicas y de transporte de flóculo orgánicos es necesario para mejorar la predicción de distribución de carbono orgánico particulado (COP) y otros nutrientes en ambientes naturales (Larsen et al., 2009).

## 2.5. Medición de la MO

La principal componente de la MO es el CO, y por ello es común que se confundan, o se refieran a uno o al otro indistintamente (Martínez et al., 2008). El carbono orgánico particulado (COP) grueso mide más de 1 mm, mientras que el COP fino mide entre

1 – 0.5  $\mu\text{m}$ , finalmente el carbono orgánico disuelto (COD) es aquel que mide menos de 0.5  $\mu\text{m}$  (Allan & Castillo, 2007). Con todo rigor, el carbono orgánico total (COT) en una muestra de agua corresponde a una muestra sin filtrar (Drever, 1988).

La cantidad de materia orgánica particulada (MOP) puede medirse a través de distintos métodos. La pérdida por ignición consiste en la combustión del material orgánico del material retenido en un filtro de 0.45  $\mu\text{m}$  (métodos gravimétricos); algunos otros métodos son el análisis elemental, del cual resultan la concentración de COP, y la cromatografía líquida de alta resolución (CLAR), que brinda como resultado la concentración de pigmentos, por ejemplo, la clorofila a.

Por otro lado, la materia orgánica disuelta (MOD) en sistemas acuáticos está compuesta de numerosos compuestos orgánicos con un amplio rango de peso molecular, como lo pueden ser micromoléculas, ácidos orgánicos, o macromoléculas, ácidos fúlvicos y húmicos (Ho et al., 2022).

El analizador de COT es un aparato de laboratorio de química que sirve para la medición del carbono disuelto (CT) y sus partes orgánicas (COT) e inorgánica (CI), ya que el material sólido se retiene en un filtro, usualmente de 0.45  $\mu\text{m}$ . Bajo la presión del filtrado varios materiales coloidales, organismos plantónicos y detritos, pueden romperse y pasar a través de los poros. Todos los analizadores de COT trabajan convirtiendo la MO en dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). En realidad, un analizador de COT solamente da la estimación del carbono orgánico disuelto (Urbansky, 2001).

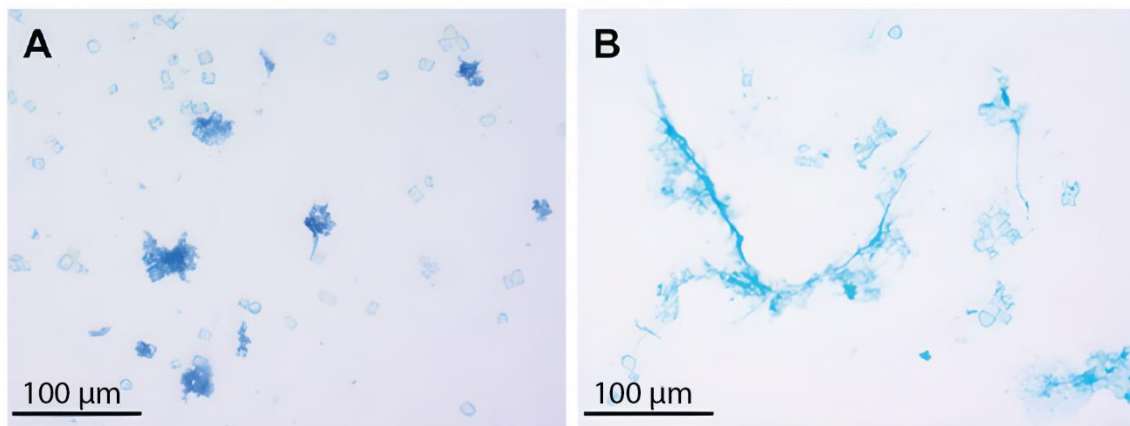
Ho et al. (2022), indica que, según su revisión, las SPE pueden ser una parte significativa de la MOD o de la MOP, dependiendo de su tamaño molecular y se cuantifican utilizando análisis de proteínas y carbohidratos totales.

## *2.6. Microscopia*

El comportamiento de los flóculos depende de su tamaño, porosidad, densidad, composición. Estos datos son parámetros de entrada para muchos modelos que predicen el comportamiento y deposición final de sedimentos. Para comprender mejor su estructura se han estudiado los flóculos a través de diversos aparatos de microscopia como lo son: microscopia de transmisión electrónica, microscopia electrónica de barrido, microscopía de barrido láser confocal, microscopía óptica y holografía digital (K. L. Spencer et al., 2021).

Se entiende por microscopio a todo aquel apoyo que permita visualizar objetos por debajo de la resolución alcanzada por el ojo humano ( $250\ \mu\text{m}$ ). El microscopio óptico es una composición de lentes, prismas o espejos que permite obtener una resolución de por lo menos  $0.2\ \mu\text{m}$  (de Juan Herrero, 1999).

Thornton, (2018), presenta imágenes obtenidas con un microscopio óptico (Figura 2.6), de partículas teñibles de commasie y de sustancias poliméricas transparentes (un tipo de SPE). Para las primeras ocupó la tinción denominada azul de commasie, y azul alcían para las segundas.



**Figura 2.6.** Tinción de partículas de exopolímeros vistas en microscopio óptico. A) Partículas teñibles de commasie. B) Partículas de exopolímeros transparentes. Thornton, (2018)

Para la obtención de las imágenes, las muestras acuosas son filtradas a través de un filtro de policarbonato de  $0.45\ \mu\text{m}$ , así el material retenido es teñido con azul brillante de comassie a pH 7,4. Estas partículas son invisibles para el microscopio óptico al menos que sean teñidas con el colorante. Este colorante ha sido usado para cuantificar proteínas, por lo que las partículas teñibles de commasie son caracterizadas como partículas que contienen proteínas (Thornton, 2018).

Las PET son comúnmente retenidas en filtros de policarbonato de tamaño  $0.45\ \mu\text{m}$  o  $0.2\ \mu\text{m}$ . Estas son teñidas con colorante catiónico llamado azul alcían, que tiñe los polisacáridos ácidos (Thornton, 2018).



## 2.7. Técnicas ópticas

Las técnicas ópticas son utilizadas en fluidos para medir campos de velocidad, temperatura, densidad y concentración química. Su principio se basa en la medición simultánea de desplazamientos de imagen de muchas partículas visibles o trazadores. Dentro de las técnicas utilizadas para realizar estas mediciones se encuentran la velocimetría por pulso láser, las cuales son técnicas no intrusivas (Adrian, 1986).

Para las mediciones de velocidad en un solo punto, se utiliza comúnmente la velocimetría por láser Doppler. Para obtener mediciones de campos de velocidades y obtener valiosa información de patrones de movimiento, se utilizan técnicas como fluorescencia plana inducida por láser, velocimetría por rastreo de partículas (PTV, por sus siglas en inglés), velocimetría por rastreo molecular, velocimetría por imágenes de partículas (PIV, por sus siglas en inglés), por mencionar algunos (Adrian, 1986, 1991).

Las mediciones fotogramétricas se pueden realizar a través de materiales transparentes si se conoce el índice de refracción del material y si las superficies que separan los materiales se pueden describir matemáticamente.

### 2.1.1 Técnica PIV

Adrian (1997), menciona que un elemento conceptual importante de la técnica PIV es el proceso mediante el cual se logra extraer automáticamente vectores de mediciones de una imagen. La imagen puede ser dividida en áreas de dimensión  $D_I$  las cuales son referidas como cuadros de interrogación.

Cada cuadro contiene varias imágenes de partículas. El análisis de desplazamientos de imágenes en cada cuadro por medio de métodos de correlación espacial (autocorrelación o correlación cruzada) lleva a un promedio estimado del desplazamiento de las partículas en el cuadro. Esta aproximación es válida para el caso en el cual hay muchas partículas en el cuadro de interrogación. Se busca la condición de que haya muchas partículas en cada cuadro de interrogación en el plano de la imagen, para que haya una alta probabilidad de obtener vectores velocidad que representan el movimiento promedio de las partículas (Adrian, 1997).

## 2.1.2 Técnica PTV

La técnica PTV (Particle Tracking Velocimetry, por sus siglas en inglés) ha sido ampliamente utilizada y está basada en la medición de coordenadas de partículas individuales (trazadores). Estas requieren una identificación confiable, relación multi imagen, determinación multitemporal y de coordenadas de cada partícula (Maas et al., 1993).

La descripción de la técnica PTV es descrita por Salinas-Tapia, (2007)

La técnica PTV (Particle Tracking Velocimetry, PTV) basa su principio de operación en la adquisición de imágenes a alta velocidad y resolución espacial, empleando un dispositivo de carga acoplada (Charge Couple Device, CCD, por sus siglas en inglés) sobre una región de flujo sembrada con partículas trazadoras (de densidad similar a la del fluido). La región se ilumina con una hoja de luz que proviene de un láser pulsado de doble cavidad, con la finalidad de que al hacer contacto con los trazadores dispersen luz que es grabada por el sensor de la cámara, donde cada pulso ilumina la misma partícula en tiempos distintos, por lo que es posible observarla en dos posiciones diferentes sobre una misma imagen. Después, por medio de un procesamiento digital, se mide la distancia que separa cada par de partículas y considerando el tiempo entre cada pulso de luz se determina la velocidad de estas. El procedimiento anterior se automatiza usando algoritmos desarrollados en algún lenguaje de programación, lo que facilita y estandariza el análisis.

Para el procesamiento de las imágenes, se utiliza el software PTV-SED v2.1, desarrollado en el Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA) para analizar la velocidad de caída en flujos de dos fases. El procedimiento se divide en dos fases (Salinas-Tapia et al., 2006):

1. Implica el mejoramiento de la calidad de imágenes a través de filtros espaciales.
2. Implica la detección de partículas en cada pulso, y este a su vez 5 etapas:
  - i. Identifica máximos y mínimos (negro o blanco) sobre la imagen de partículas para determinar sus tamaños.

- ii. A partir de la intensidad de píxeles de la partícula que está siendo evaluada, se forma un área circular, determinando el área de la sección transversal de la partícula, y luego su equivalente diámetro.
- iii. A partir del área de la sección transversal y la intensidad de píxel, se determinan las coordenadas (x, y).
- iv. Los pares de las partículas detectadas en el doble pulso son identificados y se determina la distancia que separa sus centroides ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ).
- v. Las velocidades de las partículas son calculadas usando la ecuación  $(v_x, v_y) = \left(\frac{\Delta x}{\Delta t}, \frac{\Delta y}{\Delta t}\right)$ .

### 2.7.1. Concentración por medio de técnicas ópticas

Osborn et al., (2021), propone un método para medir la concentración de sedimentos suspendidos (CSS) a partir de imágenes obtenidas a través de una cámara digital. Para poder medir la CSS es necesario conocer el volumen seco, la densidad y el volumen total de la muestra. Para obtener la CSS se estima el volumen de sedimento por volumen de muestra para después convertirlo a masa utilizando la densidad. Para calcular la concentración de un número  $n$  de imágenes, se hace uso de la ecuación ( 2.1 ):

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \rho_{a,ij} V_{f,ij}}{n V_{IM}} \quad (2.1)$$

donde  $k$  = número de partículas en cada imagen;  $V_{f,ij}$  = es el volumen de la  $j$ -ésima partícula en la  $i$ -ésima imagen;  $\rho_{a,ij}$  = es la densidad aparente masa seca entre volumen mojado de ese flóculo en particular; y  $V_{IM}$  = es el volumen de la región tomada en la imagen capturada por la cámara.

## 2.8. Características hidrodinámicas de los canales rotatorios anulares (CRA)

Desde la década de los 60, se han utilizado los CRA como herramienta para estudiar sedimentos cohesivos y analizar fenómenos como la erosión, floculación y deposición (Booij, 1994; Partheniades & Kennedy, 1967). Un CRA típico cuenta con dos elementos móviles rotacionales: la tapa del canal y el propio canal, los cuales pueden rotar de forma independiente. La tapa rotatoria genera un flujo uniforme tangencial, pero para minimizar el

flujo secundario en el canal, es necesario que éste gire en sentido opuesto. En la Tabla 2.2 se condensan las ventajas e inconvenientes de la utilización de CRA.

Krishnappan (1993), a través de experimentos describió el comportamiento hidráulico de un canal anular. Midió los campos de velocidad tangencial usando un anemómetro láser Doppler, para dos casos: caso 1, en el que solo rotaba la tapa, y caso 2, en el que ambos elementos del canal anular rotaban simultáneamente. En ambos casos se realizaron nueve mediciones cada 3 cm, a partir de las cercanías con las paredes internas del canal hasta las cercanías con las paredes externas. Para el caso 1, la velocidad tangencial incrementa a medida que las mediciones se acercan a las paredes externas; para el segundo caso 2, en todas las mediciones, cercanos al fondo, se encontraron velocidades similares, y también se observa que tanto cerca del fondo como de la tapa se sigue una ley logarítmica en todas las mediciones.

**Tabla 2.2.** Ventajas y desventajas de la aplicación de experimentos en canal anular. Elaboración propia de acuerdo con (Booij, 1994; Gharabaghi et al., 2007; Partheniades & Kennedy, 1967)

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Evita el uso de bombas de recirculación	Se desarrollan fuertes flujos secundarios en el canal que llevan a distribuciones indeseadas de esfuerzo cortante en la dirección radial
Evita condiciones de entradas y salida de flujo	Estas corrientes de recirculación también hacen que los agregados tomen diferentes regiones del flujo con diferentes esfuerzos cortantes.
Produce distribuciones uniformes de esfuerzo cortante en la dirección del flujo	

Algunos autores han aplicado teoría de hidrodinámica de canales a los CRA para obtener una caracterización hidrodinámica del fluido. Kahl et al. (2008) utilizó técnicas ópticas para obtener lecturas de 169 puntos en una sección de 30 x 42 cm en el sentido del flujo del CRA. De estas lecturas obtuvo las siguientes mediciones: velocidad horizontal  $u$ , velocidad vertical  $w$ , y sus raíces medias cuadráticas en ambas direcciones ( $u'$ ,  $w'$ ). Con ellas calculo la tasa de disipación de energía en la sección rectangular como:

$$\varepsilon = \overline{u'w'} \frac{du}{dz} \quad (2.2)$$

donde  $\varepsilon$  = tasa de disipación de energía,  $\frac{du}{dz}$  = gradiente de velocidad horizontal y  $\overline{u'w'}$  = es el promedio del producto de las fluctuaciones.

La velocidad de corte y tasa de corte se calculan de la siguiente manera (Winterwerp et al., 2006).

$$u_* = \sqrt{\overline{u'w'}} \quad (2.3)$$

$$G = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\nu}} \quad (2.4)$$

donde  $u_*$  = velocidad de corte,  $G$  = tasa de corte y  $\nu$  = viscosidad cinemática.

## 2.9. Densidad de los flóculos

El entendimiento de la sedimentación de partículas y agregados requiere del entendimiento de propiedades físicas como la densidad y el tamaño (Ghanem et al., 2013).

Debido a su naturaleza fractal de los flóculos, existen diversos enfoques para entender la densidad de un flóculo. Los flóculos son un grupo fractal de partículas inorgánicas y orgánicas (entre otros componentes) y agua (Fall et al., 2021; Thomas et al., 1999).

El exceso de densidad o densidad efectiva ( $\Delta\rho$ ) y la densidad aparente ( $\rho_a$ ) de un flóculo son comúnmente utilizadas para caracterizar propiedades de los flóculos. El exceso de densidad es la relación de la densidad húmeda del flóculo menos la densidad del agua ( $\Delta\rho = \rho_f - \rho_w$ ). Tomando en cuenta una composición heterogénea del flóculo, la relación del exceso de densidad puede ser descrita por la siguiente ecuación.

$$\Delta\rho = \rho_f - \rho_w = \frac{M_p + M_w}{V_p + V_w} - \frac{M_w}{V_w} \quad (2.5)$$

donde  $M_p$  = suma de masa de las partículas primarias;  $M_w$  = masa del agua;  $V_p$  = suma del volumen de las partículas primarias;  $V_w$  = volumen del agua.

La densidad aparente es la relación de la masa seca (suma de masa de las partículas primarias,  $M_p$ ) del flóculo dividida entre su volumen ( $V_f$ ).

$$\rho_a = \frac{M_p}{V_f} \quad (2.6)$$

Tomando en cuenta que los flóculos son una composición de partículas orgánicas e inorgánicas, Fall et al. (2021) utilizó la ecuación ( 2.7 ) para estimar  $\rho_p$  denotada por  $\rho_{SST}$  (densidad de los sólidos suspendidos totales)

$$\rho_{SST} = \frac{M_T}{V_T} = \frac{M_{inorg} + M_{org}}{V_{inorg} + V_{org}} = \left[ \frac{1 - f_{org}}{\rho_{inorg}} + \frac{f_{org}}{\rho_{org}} \right]^{-1} \quad (2.7)$$

donde  $\rho_{SST}$  = densidad de sólidos suspendidos volátiles;  $M_T$  = masa total del flóculo;  $V_T$  = volumen total del flóculo;  $M_{inorg}$  = masa del material inorgánico;  $M_{org}$  = masa del material orgánico;  $V_{inorg}$  = volumen del material inorgánico;  $V_{org}$  = volumen del material orgánico;  $f_{inorg}$  = fracción inorgánica y;  $f_{org}$  = fracción orgánica.

Investigadores como Kranenburg (1994) han desarrollado modelos para explicar la relación de la naturaleza fractal de los flóculos con el exceso de densidad, tomando en cuenta que la composición de los flóculos es de un número determinado de partículas primarias y agua. La dimensión fractal es un parámetro que describe la estructura del flóculo; es una representación numérica de que tan irregular es el flóculo, cuya irregularidad está atribuida a la distribución espacial de las partículas primarias (Ghanem et al., 2013). Este modelo de densidad efectiva ha sido base para el desarrollo de modelos de velocidad de caída. La relación presentada por Kranenburg (1994) es la ecuación ( 2.8 ).

$$\rho_f - \rho_w = (\rho_p - \rho_w) \left( \frac{D}{d_p} \right)^{F-3} \quad (2.8)$$

donde  $\rho_f$  = densidad efectiva del flóculo;  $D$  = diámetro equivalente del flóculo;  $F$  = dimensión fractal en 3 dimensiones y;  $d_p$  = diámetro de la partícula primaria.

## 2.10. Velocidad de caída de los flóculos

La velocidad de caída que considera partículas discretas bajo fuerzas únicamente gravitacionales puede ser calculada mediante la ecuación ( 2.9 ) (Ghanem et al., 2013) :

$$\omega_s = \left[ \frac{2g(\rho_p - \rho_w)V_p}{C_D\rho_w A_p} \right]^{0.5} \quad (2.9)$$

donde  $w_s$  = velocidad de caída (m/s);  $g$  = aceleración de la gravedad (9.81 m/s<sup>2</sup>);  $\rho_p$  = densidad de la partícula (kg/m<sup>3</sup>);  $\rho_w$  = densidad del agua (kg/m<sup>3</sup>);  $V_p$  = volumen de la partícula (m<sup>3</sup>);  $A_p$  = proyección del área de la partícula (m<sup>2</sup>); y  $C_D$  = coeficiente de arrastre.

La relación entre el volumen de una partícula esférica y su área proyectada es (Ghanem et al., 2013):

$$\frac{V_p}{A_p} = \frac{2D}{3} \quad (2.10)$$

donde  $V_p$  = volumen de la partícula;  $A_p$  = área proyectada;  $D$  = diámetro.

Sustituyendo la ecuación ( 2.10 ) en la ecuación ( 2.9 ) se obtiene la ecuación de velocidad de caída para partículas esféricas.

$$\omega_s = \left[ \frac{4g(\rho_p - \rho_w)D}{3C_D\rho} \right]^{0.5} \quad (2.11)$$

La ecuación anterior está relacionada con una buena aproximación de la densidad efectiva  $\Delta\rho = \rho_p - \rho_w$ , por lo que varios modelos han sido propuestos (Khelifa & Hill, 2006).

El coeficiente de arrastre  $C_D$ , es un número adimensional que depende de las condiciones de flujo alrededor de la partícula, la orientación de sedimentación, el número de Reynolds, la forma de la partícula y la permeabilidad de la partícula. Algunos valores convencionales de  $C_D$  son presentados en la Tabla 2.3.

**Tabla 2.3.** Valores comunes para  $C_D$  en tratamiento de aguas residuales (Ghanem et al., 2013; R. Gregory et al., 1999)

Número de Reynolds (Re)	Tipo de flujo	$C_D$
$10^{-4} \leq Re \leq 1$	Laminar	$C_D = \frac{24}{Re}$
$1 \leq Re \leq 500 - 1000$	Transitorio	$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{3}{Re^{0.5}} + 0.34$
$500 - 1000 \leq Re \leq 2 \times 10^5$	Turbulento	$\sim 0.44$
$Re > 2 \times 10^5$	Turbulento	0.10

Por otro lado, la ecuación de empírica de Raudkivi (1976) es también ampliamente utilizada:

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0.15Re^{0.687}) \quad (2.12)$$

En la cual según Khelifa & Hill, (2006), el número de Reynolds es calculado de acuerdo con la ecuación ( 2.13 ).

$$Re = \frac{\omega_s D_f}{\nu} \quad (2.13)$$

donde  $\omega_s$  = velocidad de caída;  $D_f$  = diámetro equivalente del flóculo;  $\nu$  = viscosidad cinemática del agua. Con todo rigor, el parámetro  $Re$  se denomina Reynolds de partículas.

### 2.10.1. Modelo semiempírico de velocidad de caída de Khelifa & Hill (2006)

Khelifa & Hill (2006), proponen un modelo para calcular la densidad de los flóculos, el cual es muy parecido al presentado por Kranenburg (1994) (ecuación ( 2.8 )), para después combinar este modelo con la ley de Stokes, y así generar a la vez un nuevo modelo de velocidad de caída. Combinando la ecuación ( 2.11 ) y ( 2.12 ) con la ecuación ( 2.8 ) obtenemos la ecuación de velocidad de caída ( 2.14 ), la cual, si consideramos la dimensión fractal  $F$  constante, es el modelo propuesto por Winterwerp (1998).

$$w_s = \frac{1}{18} g \frac{\rho_p - \rho_w}{\mu} d^{3-F} \frac{D^{F-1}}{1 + 0.15 Re^{0.687}} \quad (2.14)$$

donde  $\mu$  = viscosidad cinemática del agua.

Khelifa & Hill (2006) propone una variación en la dimensión fractal que va desde  $F = 3$  para partículas sólidas (partículas primarias, en caso de flóculos) y  $F = 2$  para flóculos grandes. Por lo anterior considera razonable un decaimiento continuo de la dimensión fractal a medida que el tamaño de los flóculos aumenta, proponiendo una función potencial (ecuación ( 2.15 )).

$$F = \alpha' \left( \frac{D_f}{d_p} \right)^{\beta'} \quad (2.15)$$

donde  $\alpha$  y  $\beta$  son coeficientes de los cuales,  $\alpha' = 3$  y  $\beta'$  puede ser calculado como

$$\beta' = \frac{\log(F/3)}{\log\left(\frac{D_{fc}}{d_p}\right)} \quad (2.16)$$

donde  $D_{fc}$  es un tamaño característico de los flóculos, el cual Khelifa & Hill (2006) indican como  $D_{fc} = 2\,000 \mu\text{m}$ .



## 2.10.2. Comportamiento viscoso e inercial de los flóculos en velocidad de caída

Como bien se ha revisado en los apartados anteriores, la velocidad de caída de los flóculos es afectada por el coeficiente de arrastre, y este a su vez es función del número de Reynolds de partículas ( $Re$ ). La teoría dicta que  $Re$  determina qué valor de  $C_D$  debe utilizarse para calcular la velocidad de caída. En este aspecto, Strom & Keyvani (2011) compararon el comportamiento de los modelos de velocidad de caída de flóculos tanto propio y de Winterwerp (1998), contra los valores teóricos de velocidad de caída para esferas dada por la ecuación ( 2.11 ) en su régimen viscoso ( $Re < 1$ ), aplicando la ley de Stokes, y los valores de la ecuación ( 2.11 ) dados en su régimen inercial ( $Re > 10^3$ ).

De este modo, Strom & Keyvani (2011), muestran una población de flóculos con comportamientos distintos en función de  $Re$ , o bien, en función del tamaño. A estos dos comportamientos los llamo viscoso (flóculos más pequeños) e inercial (flóculos de mayor tamaño); el tamaño de flóculo que separó estos comportamientos en su trabajo fue  $d_f = 500 \mu m$ , aproximadamente.

Por otro lado Fall et al. (2021), realizó mediciones in situ en el estuario del río York, y desarrolló un método para solucionar la dimensión fractal, el tamaño y densidad de la partícula primaria, ajustando una dimensión fractal a estimaciones de densidad efectiva como función del diámetro. Sus resultados permitieron correlacionar las propiedades de los flóculos como TSS, tamaño medio y  $d_p$  con la fracción orgánica.

Otros resultados de Fall et al. (2021) muestran gráficamente la correlación entre el diámetro de los flóculos con la velocidad de caída y, el diámetro de los flóculos con la densidad efectiva del flóculo. Sus resultados coinciden con las hipótesis de Strom & Keyvani (2011), separando la población de flóculos en dos grupos, microflóculos y macroflóculos, con un límite entre ambos grupos con  $d_f = 160 \mu m$ . Sus resultados de  $F$  para microflóculos y macroflóculos derivados de la relación  $d_f$  vs  $\omega_s$  son  $F = 2.55$  y  $F = 2.08$ , respectivamente, y los derivados de la relación  $d_f$  vs  $\rho_E$  son  $F = 2.54$  y  $F = 2.05$ , respectivamente.

## 2.10.3. Teorías clásicas de floculación

Casi todos los modelos de floculación están basados en una ecuación fundamental basada en la tasa de floculación TF (Thomas et al., 1999):

$$TF = \alpha\beta(i,j)n_in_j \quad (2.17)$$

donde  $\alpha$  es el coeficiente de eficiencia de colisión,  $\beta(i,j)$  es el coeficiente de frecuencia de colisión entre partículas de tamaño  $i$  y  $j$ , y  $n_i$  y  $n_j$  son las concentraciones de partículas para los tamaños  $i$  y  $j$ , respectivamente (Thomas et al., 1999).

El coeficiente  $\beta$  está relacionado con el mecanismo de floculación que ocurre entre las partículas: ortoquinética, periquinética o por sedimentación diferencial; por otro lado, el coeficiente  $\alpha$  toma valores de entre 0 y 1, y representa el porcentaje de las colisiones entre partículas que lleva a aglomeraciones.

El primer intento por modelar la floculación fue realizado por Smoluchowski (1917). Puesto que sus ecuaciones son el corazón de muchos modelos desarrollados, se considera que todas están desarrolladas bajo los preceptos de Smoluchowski. La ecuación a la cual se hace mención es la siguiente, donde la tasa de cambio de la concentración  $n$  está dada por:

$$\frac{dn_i}{dt} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{i-1} \beta(i,j)n_in_j - \sum_{k=1}^{\infty} \beta(i,k)n_in_k \quad (2.18)$$

donde los subíndices  $i, j$  y  $k$  representan tamaños discretizados de partículas y donde  $i$  es equivalente al número de partículas primarias que conforman el flóculo. El primer término del lado derecha de la igualdad representa el incremento en partículas de tamaño  $k$ , dadas por dos partículas cuyo volumen total es igual al del flóculo  $k$ . El factor  $\beta$  es el coeficiente de agregación que depende de los diferentes mecanismos de colisión. El segundo término del lado derecho representa la pérdida de partículas de tamaño  $k$  debido a la agregación con partículas de otros tamaños. La ecuación define la razón de cambio en la concentración de partículas  $k$ .

El modelo de Smoluchowski se considera como un modelo rectilíneo debido a que se desprecian todas las fuerzas que se dan entre partículas hasta el momento de su contacto, además de que, la adhesión de partículas se da para todo contacto, la eficiencia de colisión es de 100% (Thomas et al., 1999).

Smoluchowski (1917), realizó una serie de simplificaciones para resolver la ecuación ( 2.18 ), las cuales son:

- El factor de eficiencia de colisión ( $\alpha$ ) es igual a 1.
- El movimiento del flujo se efectúa en el régimen laminar.
- Las partículas primarias son monodispersas, es decir, todas del mismo tamaño.
- No hay rompimiento de flóculos
- Todas las partículas son esféricas y se mantienen así después de la colisión
- Las colisiones solamente se dan entre dos partículas.

Dadas las simplificaciones anteriores, Smoluchowski desarrolló las siguientes expresiones para la frecuencia de colisiones debido a floculación periquinética y ortoquinética.

$$\beta_{periquinética} = \left(\frac{2kT}{3\mu}\right) \left(\frac{1}{d_i} + \frac{1}{d_j}\right) (d_i + d_j) \quad (2.19)$$

$$\beta_{ortoquinética} = \left(\frac{1}{6}\right) \left(\frac{du}{dy}\right) (d_i + d_j)^3 \quad (2.20)$$

Camp and Stein (1943), propusieron una ecuación para describir la tasa de colisión ortoquinética ( 2.21 ) sustituyendo el valor de la velocidad de corte  $du/dy$ , por un valor el cual llamaron gradiente de velocidad cuadrática media  $G$ , o mejor conocida como tasa de corte. También propusieron una expresión para modelar la tasa de colisión dada por velocidad de sedimentación diferencial ( 2.22 ) (Han & Lawler, 1992; Thomas et al., 1999).

$$\beta_{ortoquinética} = \left(\frac{G}{6}\right) (d_i + d_j)^3 \quad (2.21)$$

$$\beta_{sedi\_dif} = \left(\frac{g\pi}{72\mu}\right) (\rho_p - \rho_l) (d_i + d_j)^3 |d_i - d_j| \quad (2.22)$$

#### 2.10.4. Teorías modernas de floculación

En comparación con los modelos rectilíneos, los modelos curvilíneos toman en cuenta las fuerzas hidrodinámicas cuando dos partículas están cerca una de otra (Thomas et al., 1999).

Cuando las partículas se aproximan por cualquiera de los 3 mecanismos (periquinética, ortoquinética y sedimentación diferencial), fenómenos que no se toman en cuenta a grandes distancias, toman relevancia cuando las partículas están muy cerca del contacto: primero, el agua entre las partículas es movida fuera de la trayectoria (efecto de las fuerzas hidrodinámicas); segundo, las fuerzas de atracción de van der Waals que existen entre ambas partículas se hace significativa a cortas distancias (teoría DLVO, nombre dado por las siglas de sus propulsores, Deryaguin and Landau (1941) y por Verwey and Overbeek (1948)); tercera, si las partículas tienen superficies cargadas, una capa difusa de iones con la carga opuesta al de las superficies inducido en el fluido rodeando cada partícula (Han & Lawler, 1992).

- Efecto de fuerzas hidrodinámicas entre partículas: En las teorías clásicas, se desprecian las fuerzas entre partículas hasta el momento de contacto entre ellas, además se considera que todo contacto conlleva a adhesión, haciendo que el valor  $\alpha$  sea igual a 1. Cuando las partículas están muy cerca entre sí, el agua en medio de ellas se propulsió y se expulsa de ese espacio, haciendo que las partículas giren, y, por ende, modifiquen la trayectoria rectilínea que se asume en los modelos clásicos de floculación.
- Teoría DLVO: La combinación de las fuerzas electrostáticas de repulsión y de las fuerzas de van der Waals entre dos partículas fue propuesta por Deryaguin and Landau (1941) y por Verwey and Overbeek (1948). Esta teoría es llamada DLVO, y considera como adición la resultante de la interacción de estas dos fuerzas. El resultado puede ser mostrado como un diagrama de energía potencial (Thomas et al., 1999).

Así, los modelos curvilíneos predicen magnitudes de colisión alrededor de 0.5 menos para floculación periquinético, entre 2 y 3 veces menos para floculación por sedimentación diferencial y 5 veces menos para la floculación ortoquinética (Thomas et al., 1999).

Burd & Jackson, (2009), muestran expresiones que refieren al coeficiente de frecuencia de colisión, también conocidas como “kernels”, tanto para modelos rectilíneos como curvilíneos (Tabla 2.4).

Las suposiciones de Smoluchowski otorgan la facilidad de encontrar soluciones analíticas a los procesos de floculación, pero estos sistemas están limitados a dichas suposiciones.

Para realizar una mejor modelación del fenómeno de floculación, y de las fuerzas que interactúan entre partículas se han desarrollado diversas teorías (Thomas et al., 1999).

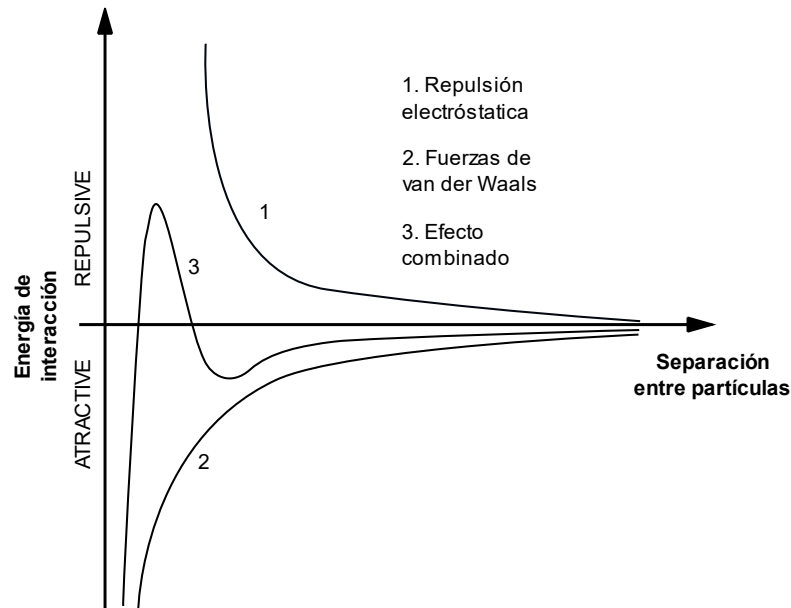


Figura 2.7. Diagrama de la teoría DLVO. Modificado de (Thomas et al., 1999)

Tabla 2.4. Kernels para coeficiente de frecuencia de colisión. Modificado de Burd & Jackson, (2009)

Mecanismo	Kernel rectilíneo	Kernel curvilíneo
Movimiento Browniano	$\left(\frac{2kT}{3\mu}\right)\left(\frac{1}{d_i} + \frac{1}{d_j}\right)(d_i + d_j)$	
Tasa de corte laminar	$\left(\frac{G}{6}\right)(d_i + d_j)^3$	
Tasa de corte turbulento	$\left(\frac{1}{6}\right)\left(\frac{\varepsilon}{\nu}\right)^{\frac{1}{2}}(d_i + d_j)^3$	$1.225 \frac{\rho^2}{1 + 2\rho^2} \left(\frac{\varepsilon}{\nu}\right)^{\frac{1}{2}}(d_i + d_j)^3$
Sedimentación diferencial	$\left(\frac{\pi}{8}\right)(d_i + d_j)^2  w_i - w_j $	$\left(\frac{\pi}{8}\right)(d_i + d_j)^2  w_i - w_j $

Modelos de floculación más recientes incluyen la ruptura de flóculos, como la ecuación de balance de población (PBE, por sus siglas en inglés) ( 2.23 ) (Furukawa & Watkins, 2012).

$$\frac{dn_i}{dt} = \frac{1}{2} \alpha \sum_{j=1}^{\infty} \beta_{i-j,j} n_{i-j} n_j - \alpha n_i \sum_{k=1}^{\infty} \beta_{i,k} n_k - S_i n_i + \sum_{m=i+1}^{\infty} \gamma_{i,m} S_m n_m \quad (2.23)$$

Los dos primeros términos del lado derecho de la igualdad ( 2.23 ) son términos que definen floculación; la primera expresión da la razón de formación de flóculos de tamaño  $i$  debido a la colisión entre dos partículas más pequeñas de clase  $j$  y  $k$ ; el segundo término da la razón de desaparición de partículas de clase  $i$  debido a la colisión con otras partículas. El tercer y cuarto término son expresiones de fragmentación; la tercera expresión del lado derecho es la razón de pérdida de flóculos de tamaño  $i$  por ruptura; y el cuarto termino la formación de flóculos de clase  $i$  por la ruptura de flóculos más grandes (Furukawa & Watkins, 2012; Wickramasinghe et al., 2005).

El factor  $\alpha$  de ligamiento describe la fracción de la colisión que resulta en agregación. El factor de ruptura es  $\gamma$ . La tasa de ruptura  $S$  es una función del tamaño del flóculo y de la tasa de corte.

La relación entre el radio de la partícula y el número de partícula primarias se da por la ecuación ( 2.24 ) (Furukawa & Watkins, 2012).

$$r_{hi} = r_p \left( \frac{i}{k_f} \right)^{1/F} \quad (2.24)$$

donde  $F$  es la dimensión fractal y  $k_f$  hace referencia a un coeficiente que toma valores de entre 1.81 – 2.37.

La inclusión del efecto de la materia orgánica se propone realizarla modificando los parámetros  $\beta$  y  $\gamma$ , que están análogamente relacionados con los coeficientes  $k_A$  y  $k_B^{-1}$  propuestos por Smellie Jr & La Mer (1958).

$$k_A, k_B^{-1} \propto \theta(1 - \theta) \quad (2.25)$$

Donde  $\theta$  es la fracción de la superficie del sedimento cubierta por una sustancia polimérica.

Para determinar los valores de  $k_A$  y  $k_B^{-1}$  se consideran los pasos y suposiciones seguidas por Nghiem et al. (2022), en el cual la determinación del coeficiente  $\theta$ , se da a través de la formula siguiente:

$$\theta = \frac{V_{OM}}{V_{shell}} = \frac{\left( \frac{\% OM}{100} \right) \frac{\rho_p}{\rho_{OM}} D_p^3}{(D_p + \delta)^3 - D_p^3} \quad (2.26)$$

Donde  $V_{OM}$  es el volumen de la materia orgánica,  $V_{shell}$  es el volumen de materia orgánica con espesor  $\delta$  uniformemente distribuida en la superficie de granos esféricos de diámetro  $D_p$ .

### 2.10.5. Esquema de solución de ecuación de balance de población (PBE)

Furukawa & Watkins (2012), muestran de manera explícita un esquema de solución de la ecuación ( 2.23 ), para lo cual, integrando numéricamente para  $t$ , puede calcularse la evolución de la distribución de la población del tamaño  $i$  del flóculo. La población del flóculo de clase  $i$  para el tiempo  $T + \Delta t$  está dada por la ecuación ( 2.27 ):

$$n_{i,T+\Delta t} = n_{i,T} + \Delta t \left( \frac{1}{2} \alpha \sum_{j=1}^{\infty} \beta_{i-j,j} n_{i-j} n_j - \alpha n_i \sum_{k=1}^{\infty} \beta_{i,k} n_k - S_i n_i + \sum_{m=j+1}^{\infty} \gamma_{i,m} S_m n_m \right) \quad (2.27)$$

En este punto es apropiado separar en 4 partes el lado derecho de la igualdad.

$$A_i = \sum_{j=1}^{i-1} \beta_{i-j,j} n_{i-j,T} n_{j,T} \quad (2.28)$$

$$B_i = n_{i,T} \sum_{k=1}^N \alpha_{i,k} \beta_{i,k} n_{k,T} \quad (2.29)$$

$$C_i = S_i n_{i,T} \quad (2.30)$$

$$D_i = \sum_{m=j+1}^N \gamma_{i,m} S_m n_{m,T} \quad (2.31)$$

De este modo, para cada paso de tiempo  $T$ , la ecuación ( 2.27 ), puede ser expresada para cada tamaño de partícula  $i$  como se indica en la Tabla 2.5.

**Tabla 2.5.** Esquema de solución numérico de ecuación de balance de población

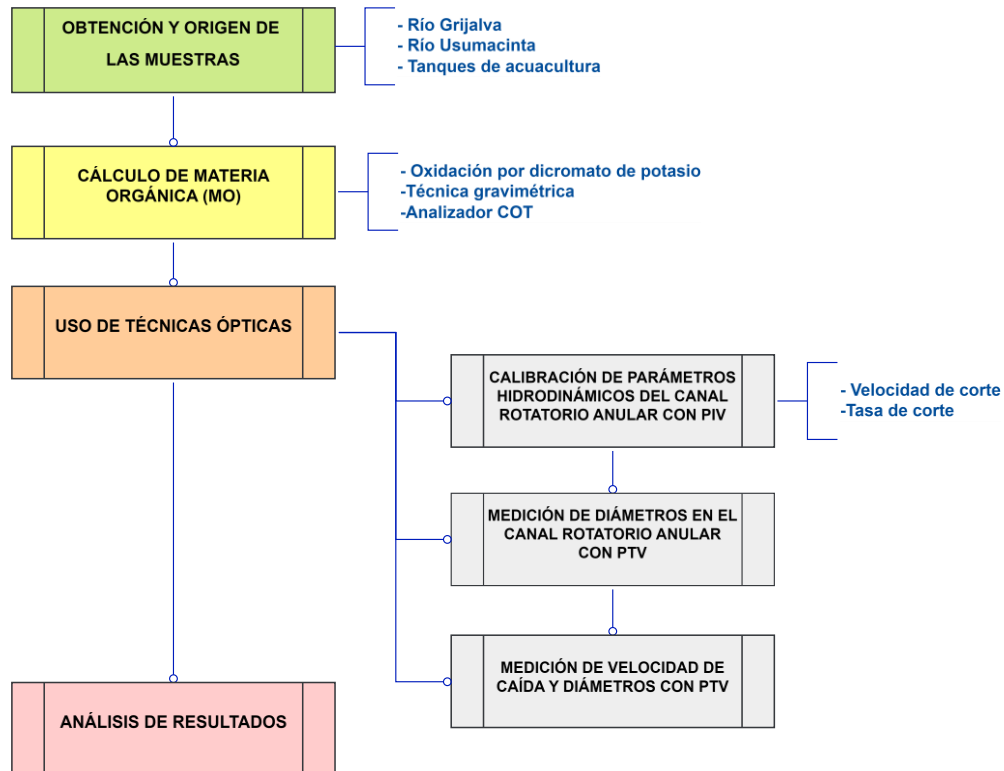
<i>i</i>	<i>id</i>	<i>Expresión</i>
1	A <sub>1</sub>	<i>N/A</i>
	B <sub>1</sub>	$n_1(\beta_{1,1}n_1 + \beta_{1,2}n_2 + \beta_{1,3}n_3 + \dots + \beta_{1,N-1}n_{N-1} + \beta_{1,N}n_N)$
	C <sub>1</sub>	$S_1 n_1$
	D <sub>1</sub>	$\gamma_{1,2} S_2 n_2 + \gamma_{1,3} S_3 n_3 + \gamma_{1,4} S_4 n_4 + \dots + \gamma_{1,N-1} S_{N-1} n_{N-1} + \gamma_{1,N} S_N n_N$
2	A <sub>2</sub>	$\beta_{1,1} n_1 n_1$
	B <sub>2</sub>	$n_2(\beta_{2,1}n_1 + \beta_{2,2}n_2 + \beta_{2,3}n_3 + \dots + \beta_{2,N-1}n_{N-1} + \beta_{2,N}n_N)$
	C <sub>2</sub>	$S_2 n_2$
	D <sub>2</sub>	$\gamma_{2,3} S_3 n_3 + \gamma_{2,4} S_4 n_4 + \gamma_{2,5} S_5 n_5 + \dots + \gamma_{2,N-1} S_{N-1} n_{N-1} + \gamma_{2,N} S_N n_N$
3	A <sub>3</sub>	$\beta_{2,1} n_2 n_1 + \beta_{1,2} n_1 n_2$
	B <sub>3</sub>	$n_3(\beta_{3,1}n_1 + \beta_{3,2}n_2 + \beta_{3,3}n_3 + \dots + \beta_{3,N-1}n_{N-1} + \beta_{3,N}n_N)$
	C <sub>3</sub>	$S_3 n_3$
	D <sub>3</sub>	$\gamma_{3,4} S_4 n_4 + \gamma_{3,5} S_5 n_5 + \gamma_{3,6} S_6 n_6 + \dots + \gamma_{3,N-1} S_{N-1} n_{N-1} + \gamma_{3,N} S_N n_N$
N-1	A <sub>N-1</sub>	$\beta_{N-2,1} n_{N-2} n_1 + \beta_{N-3,2} n_{N-3} n_2 + \dots + \beta_{2,N-3} n_2 n_{N-3} + \beta_{1,N-2} n_1 n_{N-2}$
	B <sub>N-1</sub>	$n_{N-1}(\beta_{N-1,1}n_1 + \beta_{N-1,2}n_2 + \beta_{N-1,3}n_3 + \dots + \beta_{N-1,N-1}n_{N-1} + \beta_{N-1,N}n_N)$
	C <sub>N-1</sub>	$S_{N-1} n_{N-1}$
	D <sub>N-1</sub>	$\gamma_{N-1,N} S_N n_N$
N	A <sub>N</sub>	$\beta_{N-1,1} n_{N-2} n_1 + \beta_{N-2,2} n_{N-3} n_2 + \dots + \beta_{2,N-2} n_2 n_{N-2} + \beta_{1,N-1} n_1 n_{N-1}$
	B <sub>N</sub>	$n_N(\beta_{N,1}n_1 + \beta_{N,2}n_2 + \beta_{N,3}n_3 + \dots + \beta_{N,N-1}n_{N-1} + \beta_{N,N}n_N)$
	C <sub>N</sub>	$S_N n_N$
	D <sub>N</sub>	<i>N/A</i>



# Capítulo 3.

## Materiales y métodos

El presente trabajo de investigación se realizó en diferentes etapas, que a su vez fueron subdivididas en subetapas necesarias para la describir los experimentos propuestos para validar técnicamente los objetivos y aceptar o rechazar la hipótesis. En la Figura 3.1, se muestran las etapas que se ejecutaron en este trabajo.



**Figura 3.1.** Metodología del proyecto de investigación “Análisis experimental del efecto de la materia orgánica en la floculación de sedimentos”

### 3.1. *Obtención y origen de las muestras*

Las muestras se obtuvieron de tres sitios: las primeras dos de los ríos más grandes de México, el río Grijalva y el río Usumacinta, y la tercera se obtuvo de los tanques de acuicultura del centro acuícola el Zarco, La Marquesa, Estado de México.

Se decidió ocupar estas tres muestras porque tienen una composición de MO muy distinta; las muestras de los ríos tienen principalmente contenido mineral y en menor medida MO con predominancia de carbono orgánico disuelto (COD); y la del centro acuícola el Zarco con alto contenido de MOP y predominancia de SPE.

En el laboratorio del IITCA, se cuenta con un banco de muestras tomados en los ríos Grijalva y Usumacinta por Izquierdo-Ayala et al. (2023), correspondientes a la temporada de lluvias (agosto 2019).

Por otro lado, se tomaron muestras procedentes de los tanques de acuicultura (Figura 3.2) localizados en el “Centro Acuícola el Zarco”, los cuales, se deduce, son composición de MO casi en su totalidad, ya que el tiempo de retención largo con baja turbulencia promueve la reproducción de microorganismos y microalgas además de contener desechos de las truchas y restos de sus alimentos. El muestreo se realizó el 15 de febrero de 2023 en el centro acuícola el Zarco, para lo cual se abrió una válvula general que purgó los estanques acuícolas, recogiendo el material en bidones de 20 L en la salida de un canal de lodos. Este método de recolección fue realizado anteriormente por López-Rebollar (2019), el cual incluye en su tesis la foto del canal de salida de lodos (Figura 3.3).



**Figura 3.2.** Estanque acuícola con cría de truchas en Centro Acuícola el Zarco, La Marquesa, Estado de México

Los experimentos se hicieron a las tres muestras para hacer una comparación entre los comportamientos de floculación de acuerdo con sus diferentes FO.



**Figura 3.3.** Salida de canal de lodos de los estanques de acuicultura del centro acuícola el Zarco (López-Rebollar, 2019)

### ***3.2. Medición de diferentes fracciones orgánicas***

En esta investigación se decidió aplicar tres métodos para medir directa o indirectamente diversas fracciones orgánicas. Las técnicas seleccionadas son las siguientes:

1. Método 1. Determinación de carbono orgánico (CO) por oxidación por dicromato de potasio: Este método se aplica regularmente a suelo, por lo que es necesario conocer el peso de la muestra húmeda y seca. A pesar de lo anterior, se decidió aplicar esta técnica y comprobar experimentalmente si sirve para conocer el CO en muestras acuosas.
2. Método 2: Determinación de materia orgánica particulada (MOP) por método gravimétrico: Este método se aplica con material filtrado en membranas con apertura  $0.7 \mu\text{m}$ .
3. Método 3 Determinación de carbono orgánico disuelto (COD) mediante analizador COT: Este dio como resultado el COD, CI, CT y NT, es decir, partículas de diámetro menor a  $0.45 \mu\text{m}$ .

Se seleccionaron estos métodos porque los resultados pueden ser complementarios en el caso de los métodos 2 y 3 (materia orgánica particulada y carbono orgánico disuelto), y por lo tanto comparable con el método 1 que mide el carbono de la toda la muestra.

### 3.2.1. Medición de CO por oxidación por dicromato de potasio

Se realizó la técnica de oxidación por dicromato de potasio de acuerdo con la Figura 3.6. Para la implementación de este método se utilizaron filtros Whatman GF/F, tamaño de poro igual a 0.7  $\mu\text{m}$  y los reactivos que se enlistan la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1.** Reactivos utilizados para la implementación de la técnica de determinación de CO por oxidación por dicromato de potasio

No.	Reactivo
1	Dicromato de potasio ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) 0.17 M
2	Ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) concentrado
3	Sacarosa ( $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$ ) al 5%

El primer paso fue preparar una solución madre de sacarosa al 5 %. La concentración de C en una solución con 100 ml de agua desionizada se calculó a partir de los pesos moleculares de la sacarosa (342.3 g/mol) y la del carbono (12.011 g/mol). El peso de la sacarosa en la balanza analítica fue de 5.0375 g, de modo que la concentración de C en la solución madre se calcula como:

$$\frac{5.0375g \text{ Sacarosa}}{0.1 L} \left| \frac{1 \text{ mol Sacarosa}}{342.3 \text{ g Sacarosa}} \right| \left| \frac{12 \text{ mol C}}{1 \text{ mol Sacarosa}} \right| \left| \frac{12.011 \text{ g C}}{1 \text{ mol}} \right| \left| 1000 \frac{mg}{g} \right| =$$
$$= 21211.36 \frac{mg}{L}$$

De la solución madre se tomaron alícuotas de 1, 2.5, 5, 7, 10 y 12.5 ml en matraces aforados de 25 ml y se llevaron a volumen con agua destilada para generar la solución intermedia, después de cada uno se tomaron 0.5 ml en matraces aforados de 25 ml para generar la solución patrón, se les agregó 1.67 ml de ácido sulfúrico y 1.67 ml de dicromato de potasio y se agitaron vigorosamente durante 1 minuto, se llevaron a volumen de 25 ml con agua destilada, se agitaron nuevamente durante un minuto y después se dejaron reposar durante dos horas. El sobrenadante de cada uno se trasvaso a tubos de ensayo, y finalmente se dejaron reposar 24 horas antes de hacer lecturas en el espectrofotómetro (modificado de García-Galvis & Ballesteros-González (2005)).

En la Tabla 3.2 se realizaron cálculos de los valores teóricos de concentración de C de las soluciones patrón tomando en cuenta la concentración de la solución madre y las soluciones intermedias. Estos cálculos de concentración de C deberían ser cercanos a los

resultados del espectrofotómetro. En el espectrofotómetro se tomaron las lecturas de absorbancia de los puntos para generar la curva de calibración a longitud de onda de 585 nm.

Las lecturas realizadas en el espectrofotómetro se utilizaron para calcular y generar la curva de calibración (Figura 3.4). El coeficiente de determinación de la curva de ajuste de la regresión lineal fue de  $R^2 = 0.999$ .

**Tabla 3.2.** Valores teóricos de concentración de C de alícuotas de solución madre de sacarosa al 5 % (Solución A)

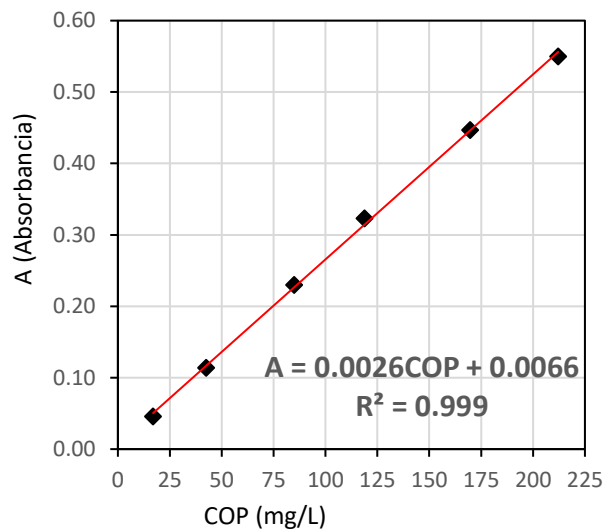
<b>Solución B mL/25mL</b>	<b>Concentración (mg/L)</b>	<b>Solución C mL/25mL</b>	<b>Concentración, mg/L</b>
1.0	842.0	0.5	16.8
2.5	2105.0	0.5	42.1
5.0	4210.0	0.5	84.2
7.0	5894.0	0.5	117.8
10.0	8420.0	0.5	168.4
12.5	10525.0	0.5	210.5

Solución A es la solución madre, solución B es la solución intermedia, solución C es la solución patrón.

Se consideraba filtrar las muestras en filtros Whatman GF/F, tamaño de poro igual a 0.7  $\mu\text{m}$  y obtener una masa de 0.05 g de muestra seca. En este proceso de filtrado se retenía, entre otros componentes, COP. De acuerdo a las soluciones intermedias que se realizaron en este trabajo para generar la curva de calibración, se pretendía aplicar 1.67 ml de ácido sulfúrico y 1.67 ml de dicromato de potasio a la muestra seca para oxidar el carbono y posteriormente repetir el procedimiento que se realizó a la solución patrón antes de tomar sus lecturas: agitar vigorosamente durante 1 minuto, llevar a volumen de 25 ml con agua destilada, agitar nuevamente durante un minuto y dejar reposar durante dos horas, trasvasar el sobrenadante a tubos de ensayo, y finalmente dejar reposar 24 horas antes de hacer lecturas en el espectrofotómetro.

El problema de la utilización de esta técnica fue la transferencia del material retenido en el filtro. Una vez filtrada la muestra, se ingresó a la estufa a una temperatura de 65 °C en un lapso de 24 horas, con la intención de eliminar toda humedad; sin embargo, una vez culminado ese tiempo se intentó tanto con una espátula como con un cúter retirar el

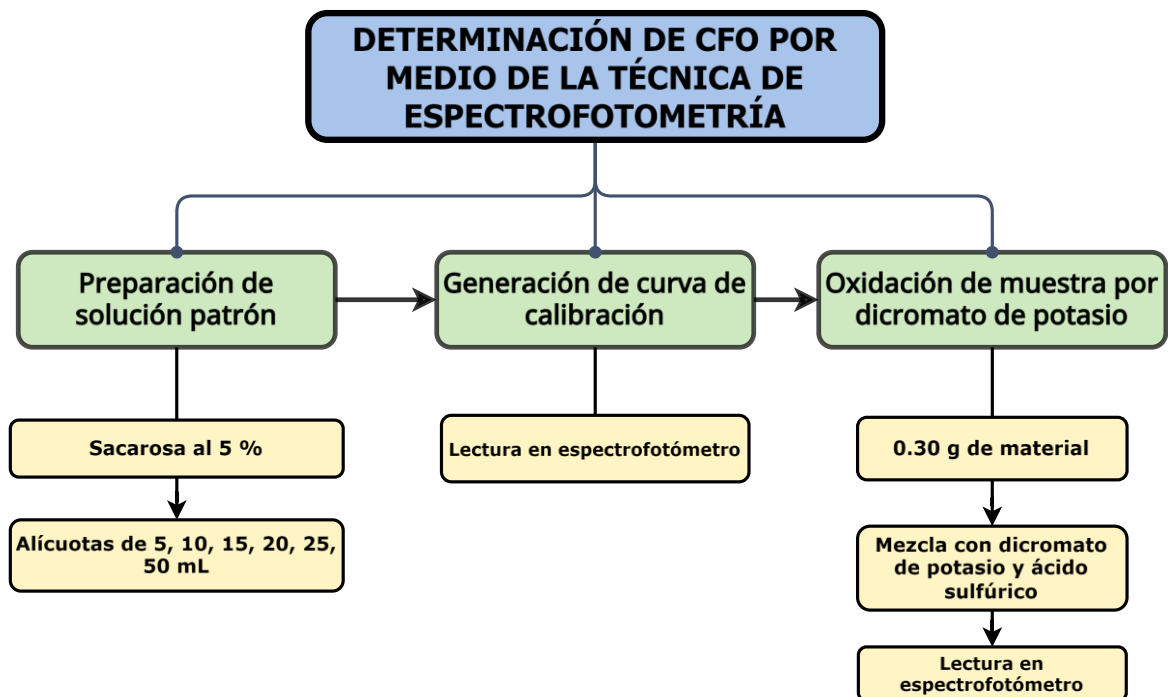
material, observando que éste se adhirió al filtro y cuando se removía del filtro traía consigo residuos de papel (Figura 3.5).



**Figura 3.4.** Curva de calibración obtenidas a partir de las alícuotas de la solución patrón de sacarosa. La curva de calibración sirve para obtener posteriormente las concentraciones de C de las muestras



**Figura 3.5.** Material adherido a filtro de fibra de vidrio después de ser filtrado Whatman GF/F, tamaño de poro igual a 0.7  $\mu\text{m}$



**Figura 3.6.** Determinación de CO por oxidación por dicromato de potasio de acuerdo con García-Galvis & Ballesteros-González (2005)

### 3.2.2. Medición de materia orgánica particulada (MOP) por método gravimétrico

Se efectuó un ensayo para determinar la MOP por el método gravimétrico utilizando filtros de fibra de vidrio con tamaño de poro  $0.45 \mu\text{m}$  y el equipo de filtrado (Figura 3.7.A). Las diferentes etapas del método que se realizó están ilustradas en la Figura 3.8.

Se comenzó llevando los filtros a peso constante, es decir, se retiró la humedad contenida en las membranas por contacto con la atmósfera. Para lo anterior, se ingresaron los filtros en la mufla durante 20 minutos a una temperatura de  $550^{\circ}\text{C}$ , se traspasaron a la estufa durante 10 minutos a una temperatura de  $105^{\circ}\text{C}$ , y se ingresaron 10 minutos al desecador, finalmente se tomaron las lecturas de sus pesos en una balanza analítica.

Ya que los filtros estaban a peso constante se filtraron las muestras. De cada muestra se filtraron por triplicado 160 ml, de modo que se contó con el suficiente material para realizar mediciones confiables (Figura 3.7.B). Luego se deshidrataron durante 1 h en la estufa a  $105^{\circ}\text{C}$ , se colocaron en el desecador por 10 minutos y se pesaron en la balanza; este peso de filtro más material retenido se relaciona a los sólidos suspendidos totales (SST).

Posteriormente, se volatilizó la MOP de los sedimentos en la mufla, lo cual consistió en ingresar las muestras a la mufla por una hora a una temperatura de 550°C y después traspasarlos a la estufa por una hora a 105°C, se colocaron en el desecador por 10 minutos y se tomaron las lecturas de pesos. El peso del filtro más el material se relaciona a los sólidos suspendidos fijos (SSF); finalmente, la diferencia entre SST – SSF nos dio como resultado los sólidos suspendidos volátiles (SSV), relacionados con la MOP.



**A**



**B**

**Figura 3.7.** Ejecución de método gravimétrico A) Equipo de filtrado del laboratorio de calidad del agua del IITCA, B) Filtros con material retenido



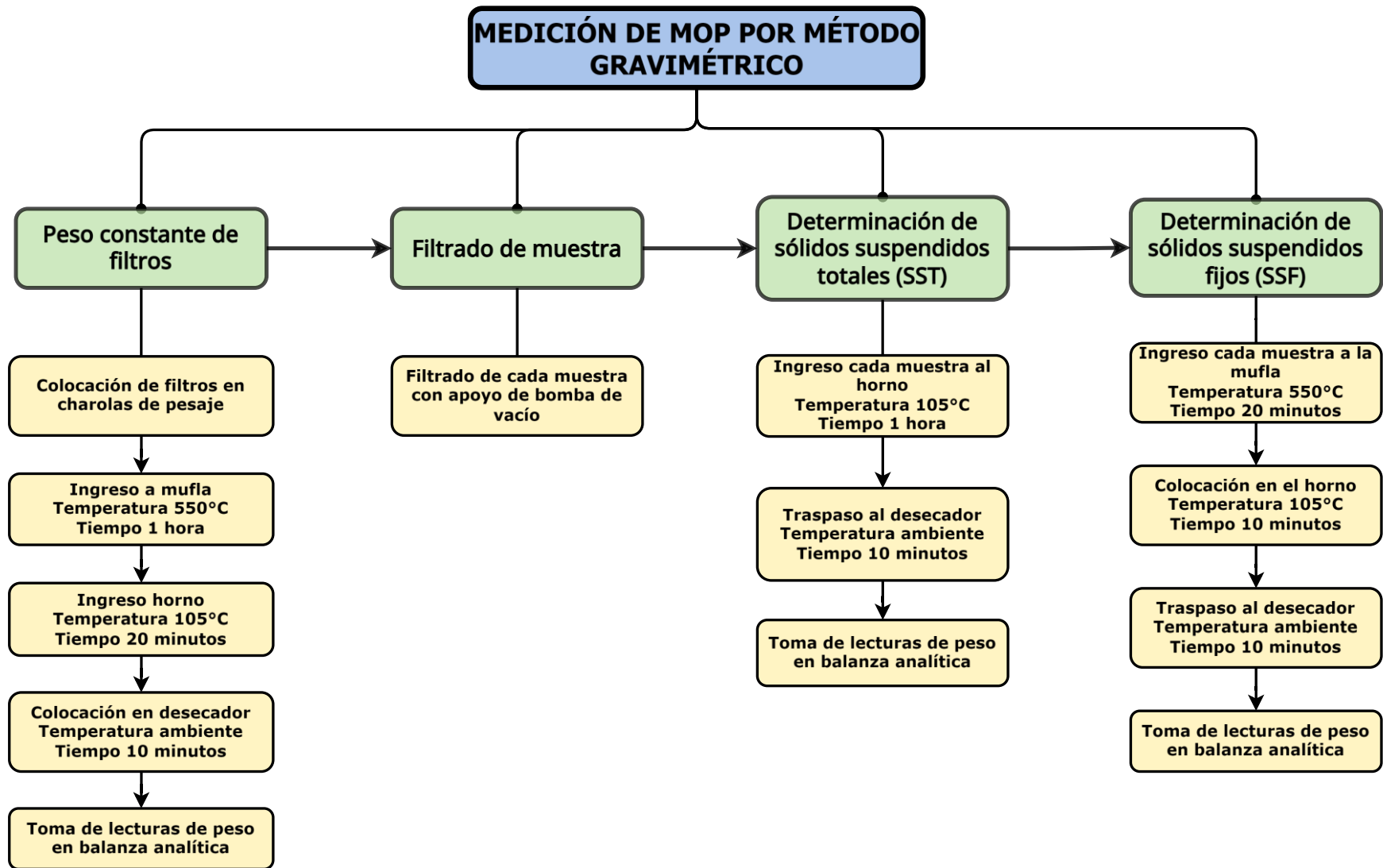


Figura 3.8. Método de medición de sólidos suspendidos totales y sólidos suspendidos fijos mediante método gravimétrico

### 3.2.3. Medición de COD mediante analizador COT

Las muestras fueron analizadas en un analizador COT modelo TOC – L marca Shimadzu, para medir carbono total (CT), carbono inorgánico (CI), COD y NT en el Centro Conjunto de Investigación de Química Sustentable UNAM - UAEMéx

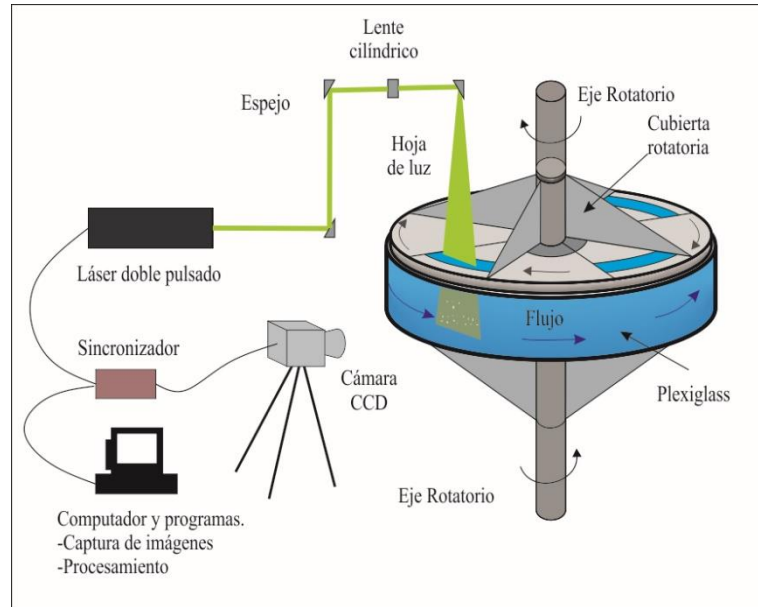
Se llevaron las tres muestras en frascos de plástico de 250 ml, de los cuales se extrajeron solo 10 ml y se trasladaron a tubos de centrifuga, y estos se centrifugaron 4000 revoluciones por minuto, con lo que las partículas más pequeñas precipitaron al fondo de los tubos. Se ingresaron los tubos de centrifugado al automuestreador del analizador COT y se programó el dispositivo para obtener las lecturas.

### 3.3. *Obtención experimental de velocidad de corte y tasa de corte en el CRA*

El IITCA cuenta con el siguiente equipo para la aplicación de técnicas ópticas en el CRA: canal anular de diámetro exterior promedio de 1.52 m, con dimensiones internas del canal de 15 x 12 cm, láser doble pulsado Nd:Yag láser (15 mJ) que sirve para introducir una lámina de luz para iluminar el área de captura, cámara JAI CCD de alta velocidad (250 fps y resolución de 1600 x 1400 pixeles) la cual se debe montar perpendicularmente a la lámina de luz y sincronizar con los pulsos (Figura 3.9).

Para estimar la velocidad de corte y la tasa de corte (parámetros hidrodinámicos de interés) que se producen durante las pruebas en el CRA, se realizaron experimentos utilizando agua destilada y trazadores de poliamida ( $d = 20 \mu m$ ), utilizando técnicas ópticas, en este caso PIV.

En estos experimentos se obtiene como resultado velocidad en la dirección del flujo ( $u$ ) y la velocidad vertical ( $w$ ), con el fin de determinar perfiles de velocidad, velocidad de corte ( $u_*$ ) y tasas de corte ( $G$ ). Después, las revoluciones de operación del CRA se relacionaron con los parámetros hidrodinámicos, de cada relación se graficó una nube de puntos y se ajustó una línea de tendencia al mejor coeficiente de correlación  $R^2$ .



**Figura 3.9.** Montaje experimental para aplicación de técnicas ópticas en el CRA del laboratorio de visualización del IITCA (Salinas-Tapia & García-Aragón, 2015).

Se giro el canal y tapa a diferentes velocidades y se obtuvieron imágenes doble pulsadas para aplicar la técnica PIV. Las revoluciones a las cuales se giró el CRA fueron determinadas a partir de la teoría de Booij, (1994), donde la combinación óptima de velocidad de giro canal y tapa que minimizan el flujo secundario están dadas por:

$$\frac{\omega_t}{\omega_b} + 1 \cong -1.17 \frac{h}{b} \quad (3.1)$$

donde  $\omega_t$  = revoluciones de la tapa (revoluciones por minuto);  $\omega_b$  = revoluciones del canal;  $h$  = altura de flujo y;  $b$  = ancho de canal.

Salinas-Tapia et al. (2014), realizo simulaciones CFD para conocer la hidrodinámica del canal rotatorio anular, encontró que la relación  $\omega_t/\omega_b$  óptima (minimización de corrientes secundarias) para datos  $h = 7.5$  cm y  $b = 15$  cm es de 1.5, mientras que para  $h = 10$  cm y  $b = 15$  cm es de 1.66. Para nuestro estudio se decidió utilizar la expresión ( 3.1 ) y los datos  $h = 6$  cm y;  $b = 15$  cm, con lo que la relación  $\omega_t/\omega_b$  es igual a 1.45.

En la Tabla 3.3 se encuentran las condiciones operacionales del CRA, calculadas con la ecuación ( 3.1 ), bajo las cuales se capturaron imágenes para la obtención de los parámetros hidrodinámicos.

**Tabla 3.3.** Revoluciones por minuto aplicadas en el canal y en la tapa del CRA

<b>Revoluciones por minuto canal (RPM)</b>	<b>Revoluciones por minuto tapa (RPM)</b>
2	2.9
2.8	4.1
3.7	5.4
4.5	6.6
6.5	9.5
7.5	11
8.0	12
9.0	13.2
10.2	15
11.5	16.9
12.5	18.4

Para realizar los cálculos de los parámetros hidrodinámicos se deben obtener las velocidades de las imágenes que se capturan mientras el canal está en operación, estas imágenes deben ser procesadas en un software especial.

El procesamiento de las imágenes se llevó a cabo con el software proVISION-XS Explorer®, y proVISION-XS PIV®; el primero sirve para crear un grupo de imágenes secuenciales por pares y la visualización de resultados; el segundo es el que sirve para calibrar las imágenes, modificar parámetros de procesamiento, y propiamente para procesamiento PIV.

Para realizar el procesamiento con PIV en proVISION-XS® se definió una malla de 50 x 50 cuadros de interrogación, se escogió que el tipo de procesamiento sería adaptativo y se aplicó un filtro laplaciano para mejorar las imágenes.

En cada uno de los cuadros de interrogación, proVISION-XS® calculó el promedio del vector velocidad ( $u, w$ ). Para cada serie de imágenes se obtuvimos una matriz  $m \times n = 50 \times 50$  vectores de velocidad. Esto significa que la altura de flujo está dividida en 50 espacios equidistantes y que en cada una de estas franjas se obtienen 50 datos de velocidad ( $u, w$ ). Además, el software obtiene velocidad media cuadrática horizontal ( $u_{rms}$ ) y velocidad media cuadrática vertical ( $w_{rms}$ ). El subíndice  $rms$ , se refiere al termino en inglés Root Mean Square.  $u_{rms}$  y  $w_{rms}$  pueden interpretarse como la magnitud absoluta del promedio de las fluctuaciones de la velocidad en cada cuadro de interrogación.

A partir de los datos  $u, w, u_{rms}$  y  $w_{rms}$ , se obtienen el gradiente de velocidad promedio en la dirección del flujo y el esfuerzo de Reynolds.

$$\frac{dU_i}{dy} = \left| \frac{U_{mean_i} - U_{mean_{i-1}}}{y_i - y_{i-1}} \right| \quad (3.2)$$

$$\overline{U'W'} = \frac{1}{n} \sum_1^n U_{rms} * W_{rms} \quad (3.3)$$

En este caso se obtiene un valor de  $\frac{dU}{dy}$  y  $\overline{u'w'}$  para cada espacio equidistante en la que se divide la vertical, en adelante llamada por simplicidad franja (en la ecuación ( 3.2 ),  $i = 1:1:50$ ). En el caso de  $\overline{u'w'}$ ,  $n = 50$  (espacios equidistantes en los que se divide la dimensión vertical de la imagen). Se obtienen entonces 50 resultados  $\frac{dU}{dy}$  y  $\overline{u'w'}$ , uno en cada franja. El promedio de velocidad en la  $i$ -ésima franja, se obtuvo como  $U_{mean_i} = \frac{1}{n} \sum_1^n u_i$ .

La velocidad de corte,  $u_*$  y la tasa de corte  $G$ , se obtuvieron entonces como sigue:

$$u_* = \sqrt{\overline{U'W'}} \quad (3.4)$$

$$\varepsilon = \frac{dU}{dy} * \overline{U'W'} \quad (3.5)$$

$$G = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\nu}} \quad (3.6)$$

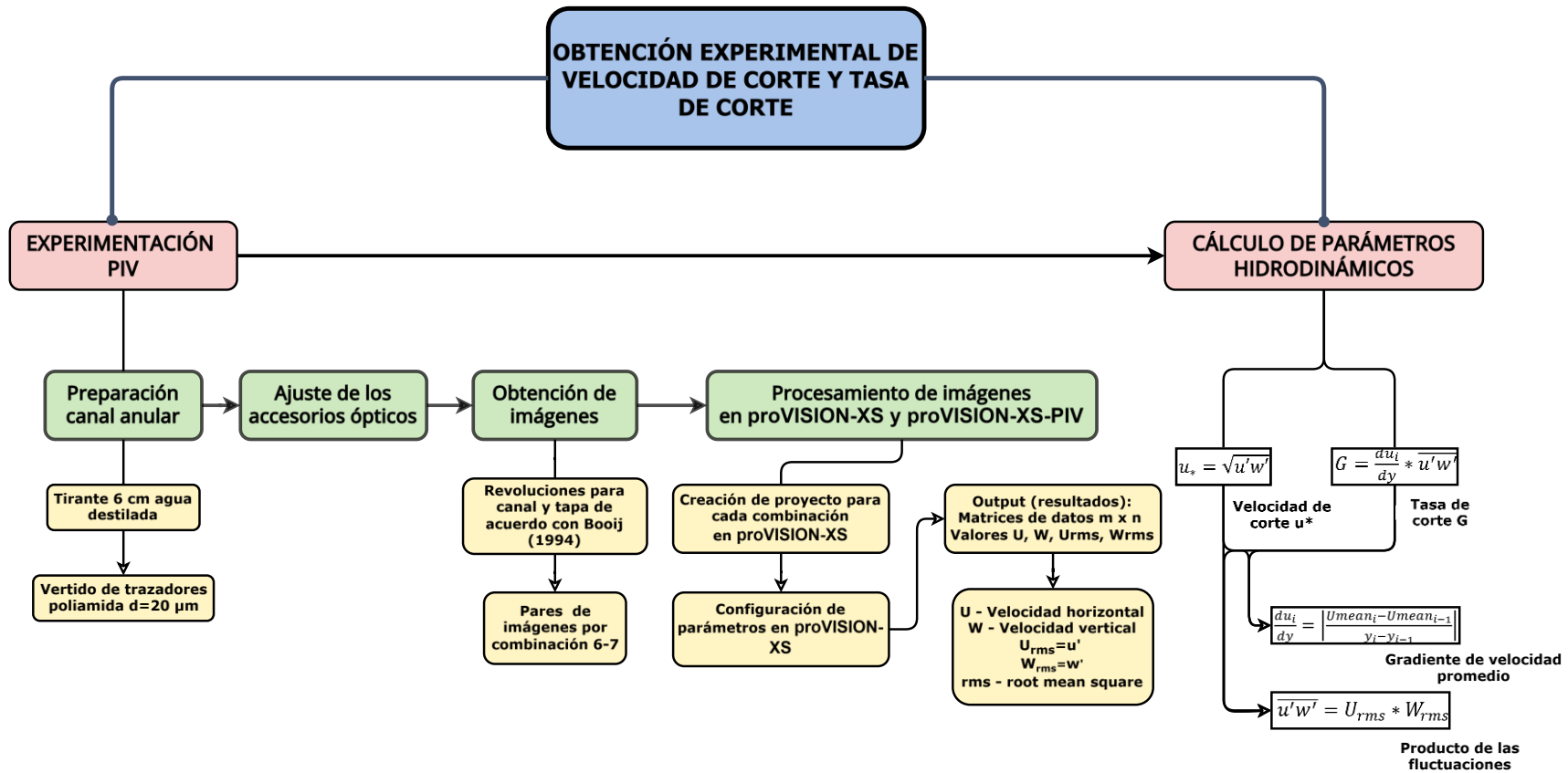


Figura 3.10. Método de obtención de curvas de calibración de parámetros hidrodinámicos del CRA

### 3.4. Medición de los diámetros de los agregados aplicando la técnica PTV

Conocidas las condiciones hidrodinámicas del CRA y el contenido de MO de cada sedimento, se programaron los experimentos según un diseño de experimentos (Figura 3.11) con el fin de tener control de las variables de las que se requirió extraer información.

En la Figura 3.11, el nivel “S”, se refiere al tipo de sedimento que ingresa al canal rotatorio anular, mientras que el nivel “CH” se refiere a la velocidad de corte y tasa de corte (condición hidrodinámica) que se aplica a la muestra, y el nivel “t” se refiere al número de capturas que se realizaron durante el experimento en diferentes tiempos.

El uso del CRA es para lograr que los flóculos se formen de acuerdo con diferentes condiciones de tasa y velocidad de corte, y la medición de los diámetros de los agregados durante el experimento se hace con la técnica PTV con imágenes monopulsadas.

Las condiciones hidrodinámicas a las cuales se decidió someter las muestras se encuentran en la Tabla 3.4, y son producto de dos consideraciones:

- 1) Se reviso visualmente el comportamiento de los sedimentos en el canal, y se seleccionaron condiciones en las cuales hubiera resuspensión
- 2) Condiciones homologas de velocidad de corte  $u_*$  en los ríos Grijalva-Usumacinta (Izquierdo-Ayala et al., 2023).

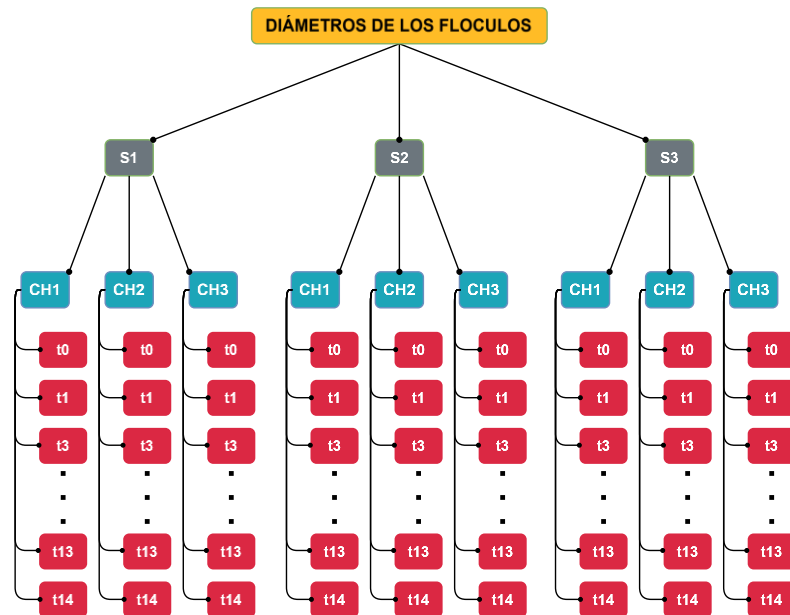


Figura 3.11. Árbol de experimentos

**Tabla 3.4.** Condiciones hidrodinámicas de los experimentos de floculación en el CRA

Escenario	Nivel		Nivel		
1	S1	Río Grijalva	CH1	$u_{*1}$	$G_1$
			CH2	$u_{*2}$	$G_2$
			CH3	$u_{*3}$	$G_3$
1	S2	Río Usumacinta	CH1	$u_{*1}$	$G_1$
			CH2	$u_{*2}$	$G_2$
			CH3	$u_{*3}$	$G_3$
1	S3	Tanque de acuacultura "el Zarco"	CH1	$u_{*1}$	$G_1$
			CH2	$u_{*2}$	$G_2$
			CH3	$u_{*1}$	$G_3$

Los experimentos en el CRA tuvieron una duración total de 105 minutos, y se tomaron imágenes de acuerdo con la Tabla 3.5.

**Tabla 3.5.** Tiempos de obtención de imágenes en experimentos del CRA

Tiempo (min)	Identificador
0	t0
2	t1
4	t2
6	t3
8	t4
10	t5
15	t6
20	t7
25	t8
30	t9
45	t10
60	t11
75	t12
90	t13
105	t14



Para cada tiempo de captura se seleccionaron las imágenes que reunirán las siguientes características: enfoque en toda la imagen, poca reflexión de luz producida por los elementos móviles del canal y nitidez en partículas. Seleccionadas las imágenes, estas se procesaron en el software PTV-SED v2.1, seleccionando el ajuste de filtros que permita la mejor identificación de partículas de acuerdo con las condiciones de las imágenes.

En la Figura 3.12, se muestra el entorno de procesamiento de PTV-SED v2.1. Los parámetros que se ajustaron para conseguir identificaciones óptimas son:

- Relación cm – px: Se refiere a la medición realizada a través de una imagen obtenida de un instrumento graduado de unidades conocidas, antes o después de la ejecución del experimento.
- Umbral Threshold: Es una especie de segmentación de imagen, donde los píxeles se transforman para analizar la imagen de manera más fácil. Una imagen a color o en escala de grises es convertida a valores binarios (blanco o negro) cuando se aplica este filtro. Para las imágenes capturadas en este trabajo, este parámetro se colocan umbrales de entre 45 – 255.
- Noise: Este filtro trabaja como reductor de ruido, lo que implica que al aumentar su valor se reduce el ruido inducido por la luminiscencia y el color, como el provocado por capturar una imagen con luz insuficiente.
- Length: Es la longitud en píxeles, más larga que un objeto dado (diámetro de partícula) (Salinas-Tapia et al., 2006).

Ajustados los filtros de PTV-SED v2.1, se procesaron imágenes monopulsadas, donde los resultados son hojas archivos “.mat”; los resultados incluyen para cada partícula detectada: Posición “x” centroidal, posición “y” centroidal, área y diámetro equivalente.

Los resultados anteriores permitieron calcular granulometrías, y también comprobar los tiempos en que los flóculos tienden a agregarse y los tiempos en que tienden a romperse.

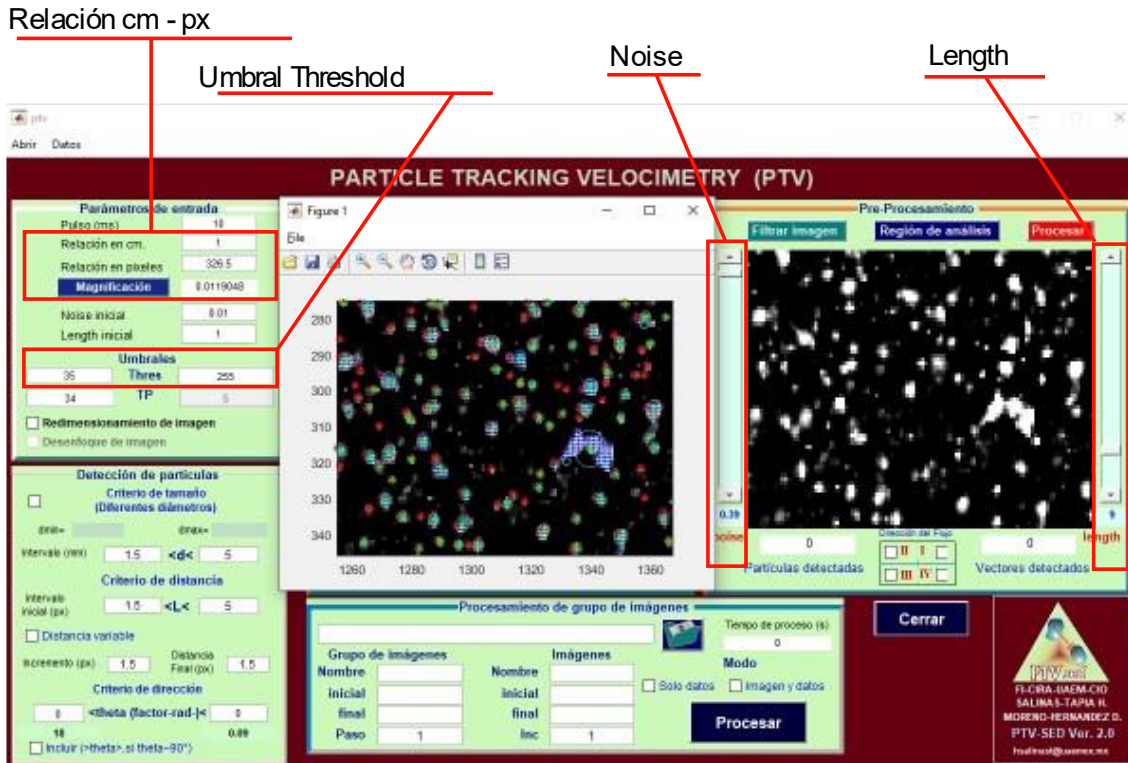


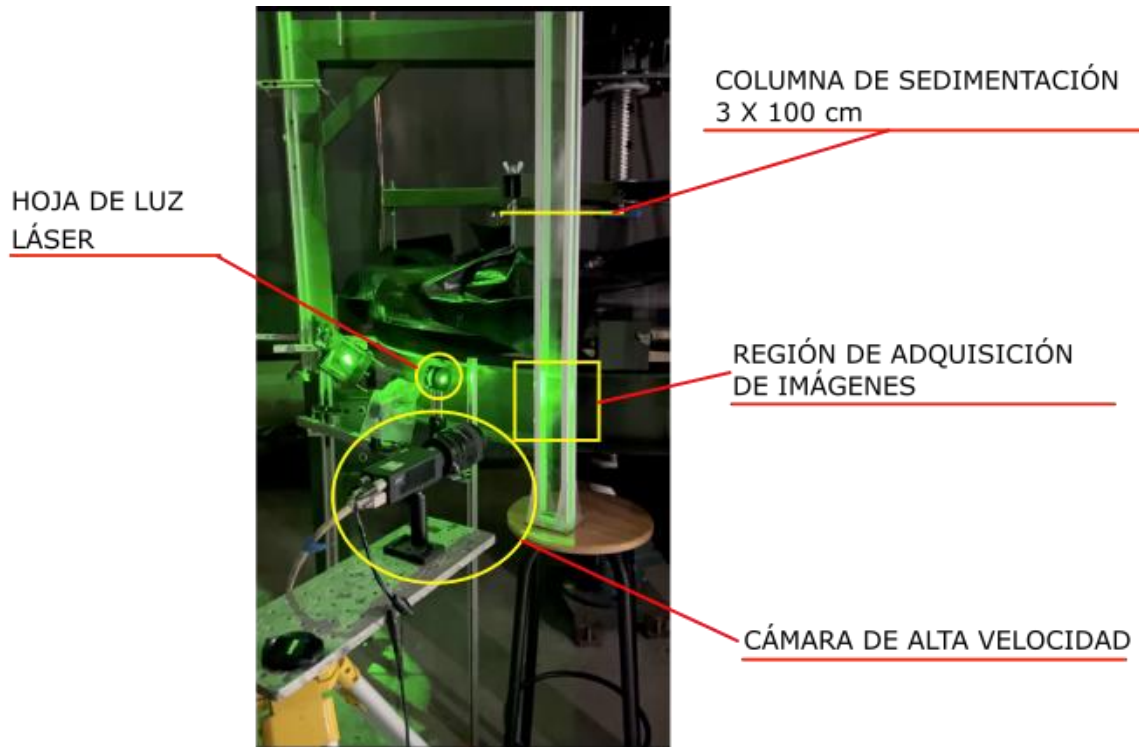
Figura 3.12. Entorno de procesamiento de software PTV-SED v2.1

### 3.5. Cálculo de velocidad de caída en la columna de sedimentación

Para el cálculo de la velocidad de caída se utilizó una columna de sedimentación. La columna de sedimentación en la cual se ejecutó este ensayo es de 90 cm de altura y sección transversal de 6.5 x 3.0 cm y se utilizó la lámina láser y la cámara CCD de alta velocidad (250 fps y resolución de 1600 x 1400 píxeles) (Figura 3.13). Este sistema se utilizó para capturar imágenes de las partículas cayendo y procesarlas con PTV para medir su velocidad e identificar su diámetro.

Se procedió a obtener una muestra de los flóculos con una micropipeta de 5 mL, para ser ingresados en una columna de sedimentación llena con agua destilada, en la cual se aplicó la técnica PTV para medir la velocidad de caída de los sedimentos.

Los flóculos se ingresaron lentamente a la columna para evitar la desagregación de las partículas. La región de análisis se encuentra en el tercio inferior de la columna de sedimentación. Cuando la nube alcanzó ese tercio, se tomaron 50 imágenes monopulsadas consecutivas, y esto se repitió 4 veces dejando intervalos de 2 minutos entre capturas, para obtener las posiciones de las partículas más rápidas y las más lentas.



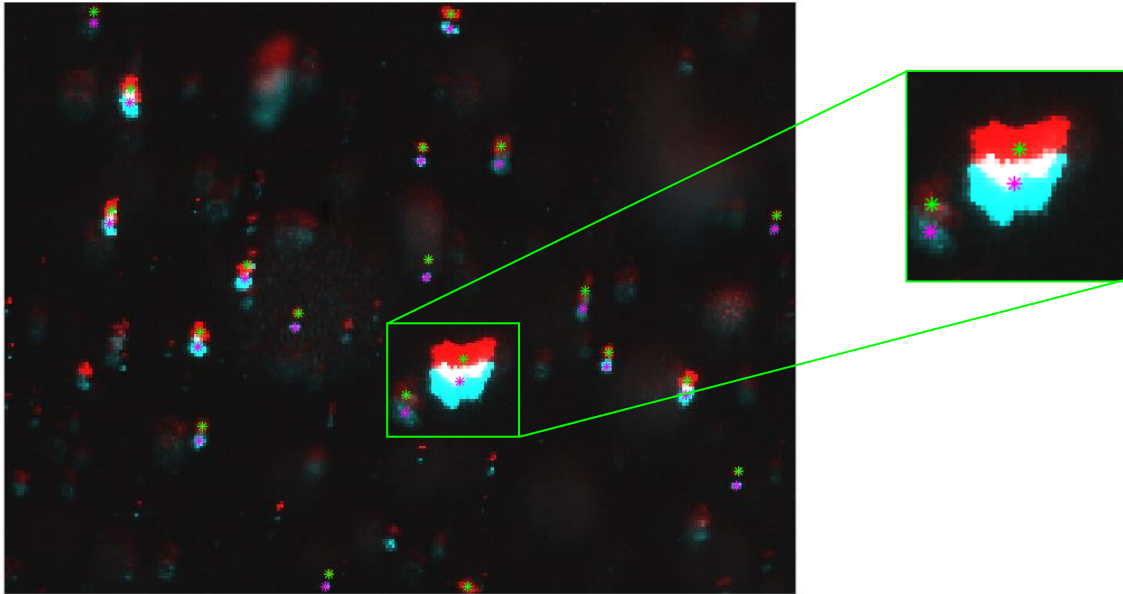
**Figura 3.13.** Adquisición de imágenes de partículas para cálculo de velocidad de caída utilizando una columna de sedimentación de medidas 3 x 5 x 100 cm. Las imágenes son capturadas en el tercio inferior de la columna, cuando estabilizan su trayectoria completamente vertical

El procesamiento de las imágenes se llevó a cabo mediante el software PTV-SED v2.1, de manera análoga a las descritas en el apartado 3.4. Los resultados de los archivos “.mat” para cada imagen incluyen, para cada partícula: Posición x centroidal, posición y centroidal, área y diámetro equivalente. Con los resultados de dos imágenes consecutivas y conociendo el tiempo entre captura, fue posible aplicar la fórmula  $d/t$ , donde  $d$  es distancia y  $t$  es tiempo, para conocer la velocidad de cada partícula

Para asegurar que las partículas se identificaron correctamente en dos imágenes consecutivas, el par válido debía cumplir las siguientes condiciones:

- % de discrepancia entre  $d_{f1}$  y  $d_{f2} = 10\%$
- Desplazamiento vertical: Para velocidades de entre  $\omega_{s1}$  y  $\omega_{s2}$
- Diámetro de entre  $d_{f1}$  y  $d_{f2}$

De manera manual, se superpusieron imágenes en una sola figura de Matlab® (Figura 3.14), lo cual nos permitió seleccionar partículas de manera aleatoria y estimar sus características, y con ellos tener un criterio de  $\omega_{s1}$  y  $\omega_{s2}$ .



**Figura 3.14.** Ejemplo de identificación de centroides de partículas. En el enfoque de la imagen se observa el desplazamiento de la partícula en un lapso

Con los datos obtenidos de la velocidad de caída de los flóculos se obtuvo el comportamiento de los desplazamientos de las partículas en la columna de sedimentación. Una vez que se calculó la velocidad de caída relacionada con el diámetro equivalente de los flóculos, gráficas  $d_f$  vs  $\omega_s$ , se ajustó una línea de tendencia de una ecuación potencial, la cual es de la forma siguiente.

$$y = Ax^B \quad (3.7)$$

En la ecuación anterior  $A$  y  $B$  son coeficientes óptimos que se obtienen de la regresión, los cuales tienen mejor ajuste. En particular  $B$  es la dimensión fractal  $F$  obtenida con el modelo de regresión.

También se transformaron los gráficos de  $d_f$  vs  $\omega_s$  a gráficos de  $d_f$  vs  $\rho_E$  con la ecuación ( 2.8 ), y a estos también se ajustó una línea de tendencia de una ecuación potencial de la forma ( 3.7 ), para comparar las dimensiones fractales de ambos métodos.

Por último, los datos de ambas gráficas se compararon con el modelo de Khelifa & Hill (2006), el cual se ajustó de acuerdo con dos valores de partícula primaria, graficando dos curvas envolventes a las series experimentales, y por tanto una estimación del rango de partícula primaria.

### 3.6. Granulometría

Utilizando la ecuación potencial producida para los datos  $d_f$  vs  $\rho_E$ , se convirtió el volumen equivalente de la esfera de los flóculos en masa, y con ellos se aplicó un análisis granulométrico para determinar los diámetros característicos  $d_{50}$ ,  $d_{75}$  y  $d_{90}$ . La Tabla 3.6 muestra el procedimiento a seguirse para transformar el tamaño de las partículas en masa y con la última columna encontrar los diámetros característicos.

**Tabla 3.6.** Procedimiento de granulometría

$d_{equi} (mm)$	Frecuencia	$v_i (mm^3)$	$\rho_{E_i} (kg/m^3)$	$m_{f_i} (kg)$	$\%m_i$	$\sum_1^i m_i$
$d_{eq1}$	$FR_1$	$v_1$	$\rho_{E_1}$	$m_{f_1}$	$\%m_1$	$\sum_1^1 m_i$
$d_{eq2}$	$FR_2$	$v_2$	$\rho_{E_2}$	$m_{f_2}$	$\%m_2$	$\sum_1^2 m_i$
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
$d_{eqN-1}$	$FR_{N-1}$	$v_{N-1}$	$\rho_{E_{N-1}}$	$m_{f_{N-1}}$	$\%m_{N-1}$	$\sum_1^{N-1} m_i$
$d_{eqN}$	$FR_N$	$v_N$	$\rho_{E_N}$	$m_{f_N}$	$\%m_N$	$\sum_1^N m_i$

### 3.7. Identificación de materia orgánica por medio de microscopia

Se realizaron fotografías en un microscopio modelo ICC50 HD de Leica® con capacidad de aumento de 100X, de las muestras. Las fotografías se tomaron posterior a la formación de flóculos en el canal anular al final de cada experimento que se realizó en él. Se obtuvieron muestras de los flóculos con una micropipeta con una punta a la cual se le recortó un tramo del extremo con el fin de que la punta tuviera un orificio más ancho, así permitió capturar flóculos de todos los tamaños sin romperse.

### 3.8. Ecuación de balance de población (PBE)

En Matlab® se programó el método de solución de la ecuación ( 2.23 ) con el esquema de solución de Furukawa & Watkins (2012) y que se describió en la sección 2.10.5. Se intentó probar que esta ecuación podía reproducir los resultados experimentales con la inclusión del efecto de la MO para condiciones hidrodinámicas del canal anular del IITCA.

Antes de modificar algún parámetro de la ecuación ( 2.23 ), esta se programó de modo que se replicaran los resultados presentados en Furukawa & Watkins (2012). Las líneas de código que se programaron se encuentran en el Anexo de este trabajo

Una vez que se comprobó que los resultados son iguales a los encontrados con Furukawa & Watkins (2012), se modificó el modelo de acuerdo con las condiciones hidrodinámicas con las cuales se experimentaron los sedimentos.

Las condiciones hidrodinámicas en las que se desarrollaron los experimentos en este trabajo son diferentes en comparación con las condiciones en las que Furukawa & Watkins (2012) ejecutaron sus experimentos, por lo que los valores que alimentaron el modelo son distintos. En la Tabla 3.7 se muestran las expresiones que se utilizaron Furukawa & Watkins (2012) y las expresiones que se propusieron para modelar las condiciones de los experimentos realizados en este trabajo.

**Tabla 3.7.** Valores de parámetros para reproducción de resultados de Furukawa & Watkins (2012) y expresiones y valores propuestos para el cálculo en el presente trabajo

<b>Parámetro</b>	<b>Valor para calibración de Furukawa &amp; Watkins (2012)</b>	<b>Valores propuestos para condiciones de este trabajo</b>
<i>Radio hidrodinámico</i> $r_{Hi}$	$r_{Hi} = r_p \left( \frac{i}{k_f} \right)^{\frac{1}{D_f}}$	$r_{Hi} = r_p \left( \frac{i}{k_f} \right)^{\frac{1}{D_f}}$
<i>Radio de partícula primaria</i> $r_p$	$r_p = 100 \text{ nm}$	<i>De acuerdo con resultados de velocidad de caída para cada muestra</i>
<i>Dimensión fractal</i> $D_f$	$D_f = 2.05$	<i>De acuerdo con resultados de velocidad de caída para cada muestra</i>

Continuación de la Tabla 3.7

Prefactor que depende del tamaño de característica seleccionado R	$k_f = 1.81$	$k_f = 1.81$
Número de partículas primarias dentro del flóculo y número de bin $i$	Hasta que $r_{Hi} = 3 \mu m$ $i = N \approx 1\ 100$	Hasta que $r_{Hi} = 500 \mu m$
Eficiencia de colisión $\alpha$	$\alpha = 0.5$	$\alpha = 0.5$
Frecuencia de colisión $\beta$	$\beta_{i,j} = \left(\frac{2kT}{3\mu}\right) \left(\frac{1}{d_i} + \frac{1}{d_j}\right) (d_i + d_j) + \left(\frac{G}{6}\right) (d_i + d_j)^3$	$\beta_{i,j} = \left(\frac{2kT}{3\mu}\right) \left(\frac{1}{d_i} + \frac{1}{d_j}\right) (d_i + d_j) + \left(\frac{1}{6}\right) \left(\frac{\varepsilon}{\nu}\right)^{\frac{1}{2}} (d_i + d_j)^3$
Temperatura absoluta $T$	$T = 29\ 8.15\ K$	$T = 292.15\ K$
Viscosidad dinámica $\mu$	$\mu = 8.90 \times 10^{-4}\ N\ s\ m^{-2}$	$\mu = 1.03 \times 10^{-3}\ N\ s\ m^{-2}$
Viscosidad cinemática $\nu$	N/A	$\nu = 1.03 \times 10^{-6}\ m^2\ s^{-1}$
Tasa de corte $G$	$G = 30\ s^{-1}$	N/A
Tasa de disipación de energía $\varepsilon$	N/A	De acuerdo con resultados de calibración de parámetros hidrodinámicos
Tasa de ruptura $S$	$S_i = EG^{1.5} \left(\frac{r_{Hi} - r_p}{r_p}\right)^{3-D_f} r_p$	$S_i = EG^{1.5} \left(\frac{r_{Hi} - r_p}{r_p}\right)^{3-D_f} r_p$
Parámetro de rompimiento $E$	$E = 5\ s^{0.5}m^{-1}$	$E = 5\ s^{0.5}m^{-1}$
Función de rompimiento $\gamma$	$\gamma_{i,j} = \frac{1}{j-1}$	$\gamma_{i,j} = \frac{1}{j-1}$

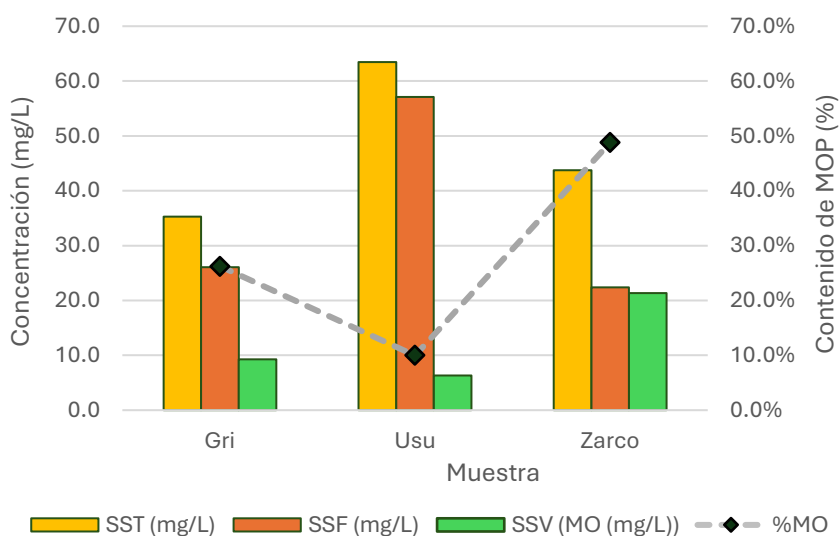
# Capítulo 4.

## Resultados

### 4.1. Medición de diferentes fracciones orgánicas

#### 4.1.1. Medición de materia orgánica (MOP) particulada por medio de método gravimétrico

En la gráfica obtenida de las tres muestras se presenta la concentración y porcentaje de SSV (MOP > 0.45  $\mu\text{m}$ ). En la Figura 4.1 se muestran las concentraciones de los sólidos suspendidos totales (SST), sólidos suspendidos fijos (SSF) y sólidos suspendidos volátiles (SSV), además del porcentaje de materia orgánica relativo SSV/SST.



**Figura 4.1.** Sólidos en las muestras (SST, SSF y SSV) versus concentración en mg/L en el eje vertical primario y, contenido de MOP en % en eje vertical secundario, calculado como SSV/SST.

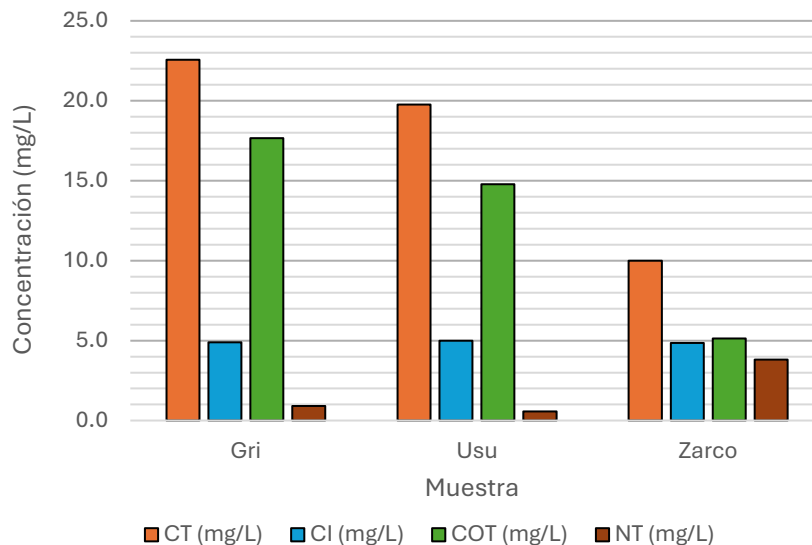


#### 4.1.2. Medición de carbón orgánico disuelto (COD) mediante analizador COT

Los resultados obtenidos por el analizador COT se visualizan en la Figura 4.2 y corresponden a carbono total (CT), carbono inorgánico (CI), carbono orgánico total (COT, referente al COD) y nitrógeno total (NT). El CT corresponde a la suma de CI + COT.

En estos resultados las muestras que tienen más COD son los de los ríos Grijalva y Usumacinta, mientras que, la muestra del centro acuícola el Zarco son lo que tienen mayor contenido de NT.

El CT del río Grijalva y Usumacinta se compone casi en la totalidad de COD, mientras que el Zarco cerca de la mitad es carbono inorgánico y la otra mitad COD.



**Figura 4.2.** Concentración de elementos disueltos CT – Carbono Total, CI – Carbono Inorgánico, COT – Carbono Orgánico Total y NT – Nitrógeno Total

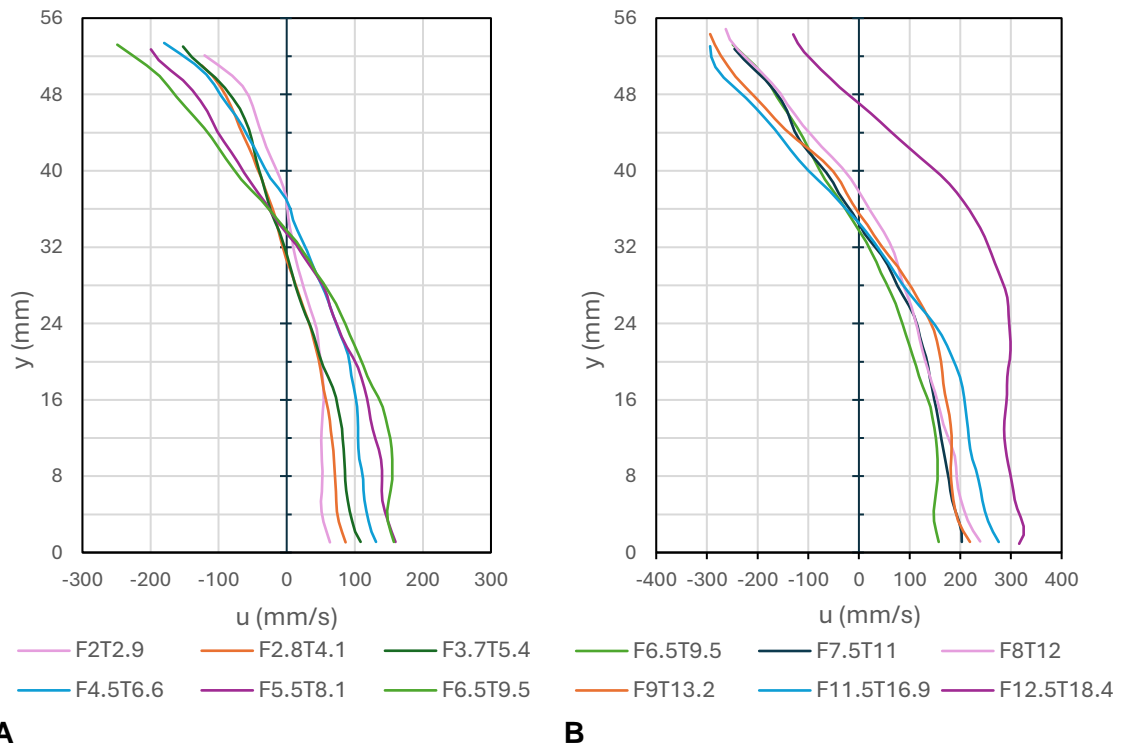
#### 4.2. Velocidad de corte y tasa de corte en el CRA

Los perfiles de velocidad horizontal se muestran en la Figura 4.3, donde las leyendas indican las revoluciones en el fondo del canal (F) y en la tapa (T), por ejemplo, F2F2.9 indica 2 rpm en el canal y 2.9 rpm en la tapa del canal. Estos perfiles de velocidad horizontal muestran una clara tendencia a aumentar la velocidad cerca de los elementos móviles, y también incrementar la magnitud cada vez que la revoluciones son mayores.

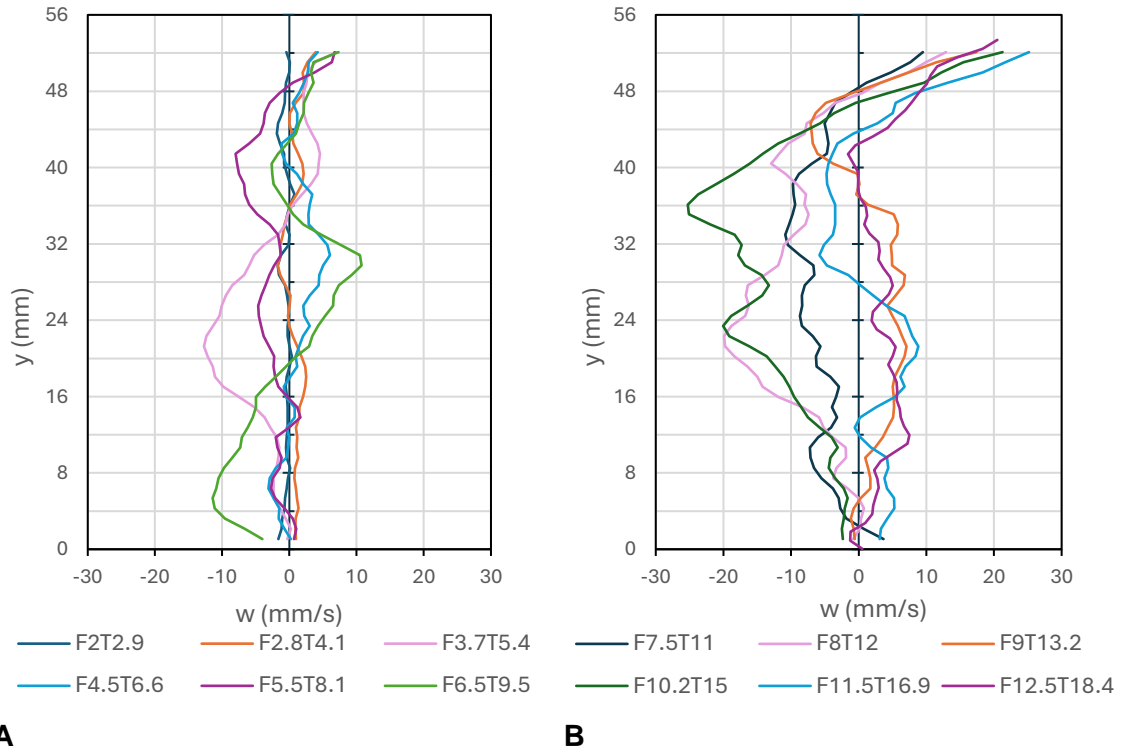
Los promedios de la velocidad vertical se muestran en la Figura 4.4, y teóricamente, para cada combinación, la suma de todos sus valores debe sumar igual con 0.

La velocidad de corte promedio  $u_x$  para cada combinación se observa en la Figura 4.5, y la tasa de corte promedio  $G$  se da en la Figura 4.6, y su método de cálculo se da en el apartado 3.3.

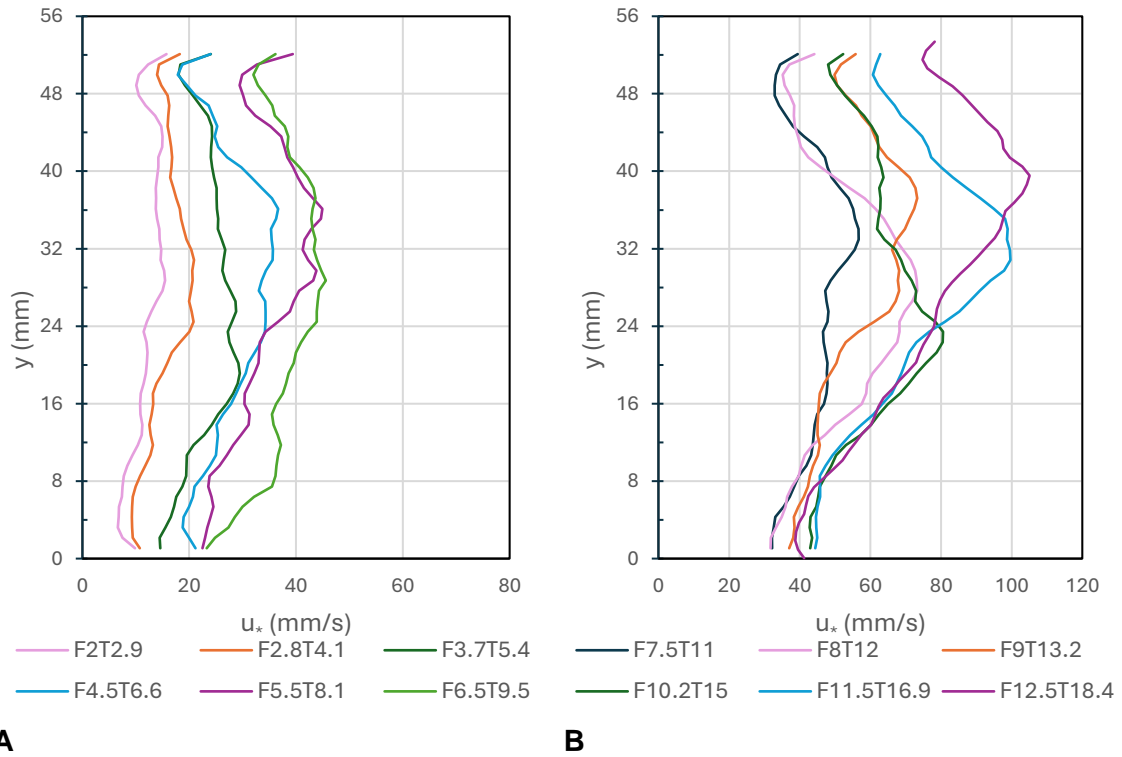
Tanto en las gráficas de velocidad de corte como de tasa de corte es notorio que cada vez que las revoluciones se hicieron mayores, las magnitudes de estos parámetros se hicieron mayores también. También es de destacar que en las posiciones entre 30 – 40 mm, los valores son los máximos para cada combinación, revelando que en esta posición la turbulencia fue más grande en relación con la tapa y el fondo.



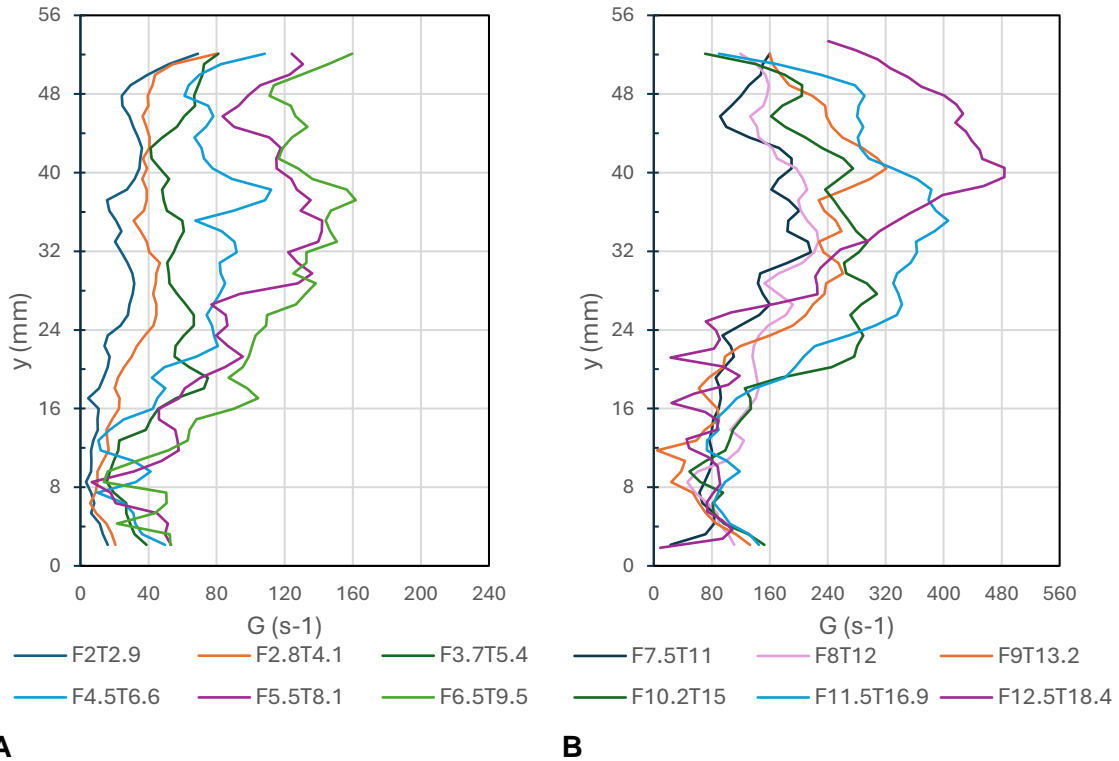
**Figura 4.3.** Perfiles de velocidad horizontal calculados a partir de mediciones PIV en el CRA para obtención de parámetros hidrodinámicos. A) bajas revoluciones. B) altas revoluciones



**Figura 4.4.** Perfiles de velocidad vertical calculados a partir de mediciones PIV en el CRA para obtención de parámetros hidrodinámicos. A) bajas revoluciones. B) altas revoluciones



**Figura 4.5.** Perfiles de velocidad de corte calculados a partir de mediciones PIV en el CRA para calibración de parámetros hidrodinámicos. A) bajas revoluciones. B) altas revoluciones



**Figura 4.6.** Perfiles de tasa de corte calculados a partir de mediciones PIV en el CRA para calibración de parámetros hidrodinámicos. A) bajas revoluciones. B) altas revoluciones

Los resultados de este apartado son comparables con el trabajo de Salinas-Tapia et al. (2014), donde se realizaron simulaciones del canal rotatorio anular del IITCA en ANSYS FLUENT, para determinar las condiciones que proporcionan la hidrodinámica que minimizan las corrientes secundarias (corriente radial).

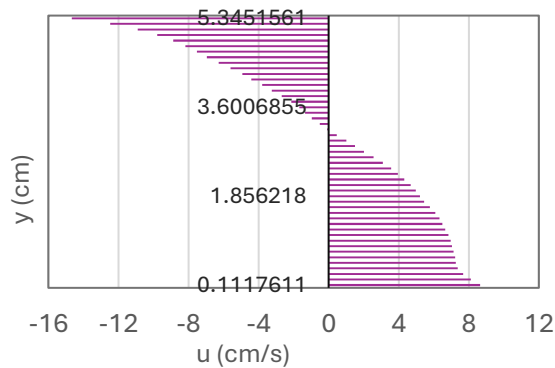
En la Tabla 4.1, se comparan las condiciones geométricas y de operación más similares que se llevaron a cabo en los experimentos de esta investigación y los que se ejecutaron en la simulación que realizó Salinas-Tapia et al. (2014). En cuanto al tirante, en este proyecto se utilizó  $h = 6.0 \text{ cm}$  y en la simulación  $h = 7.5 \text{ cm}$  y, mientras que en las revoluciones en este proyecto se utilizó la combinación 2.8 – 4.1 rpm y en la simulación 3.0 – 4.5 rpm.

Las velocidades obtenidas, en las condiciones experimentales de este trabajo fueron desde -14.6 cm/s hasta 8.1 cm/s en los límites con los elementos móviles (Figura 4.7). Las reportadas en la simulación (Figura 4.8) estuvieron en un rango de [-7,-8] cm/s a 15.2 cm/s, aproximadamente.

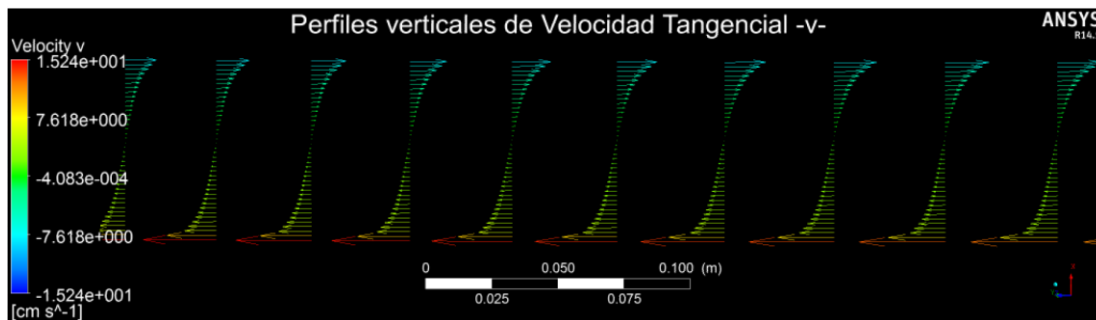
Comparando de acuerdo con la cercanía con los elementos móviles, encontramos que cerca de la tapa las velocidades fueron: en el presente trabajo de 14.6 cm/s y en Salinas-Tapia et al. (2014) de 7 – 8 cm/s; en el fondo, en el presente trabajo de 8.6 cm/s y en Salinas-Tapia et al. (2014) muestra 15.2 cm/s.

**Tabla 4.1.** Condiciones geométricas y mecánicas en los experimentos relacionados con la obtención de los parámetros hidrodinámicos de la presente investigación y condiciones en simulación de ANSYS FLUENT de Salinas-Tapia et al. (2014)

	Presente investigación	Salinas-Tapia et al. (2014)
$b$	15 cm	15 cm
$h$	6 cm	7.5 cm
$\omega_F$	2.8 rpm	3.0 rpm
$\omega_T$	4.1 rpm	4.5 rpm
$\omega_F/\omega_T$	1.46	1.5



**Figura 4.7.** Perfiles de velocidad tangencial de los experimentos de este trabajo  $\omega_F = 2.8$ ,  $\omega_T = 4.1$ ,  $\omega_T/\omega_T = 1.46$



**Figura 4.8.** Perfiles de velocidad tangencial en simulación de ANSYS FLUENT de Salinas-Tapia et al. (2014),  $\omega_F = 3.0$ ,  $\omega_T = 4.5$ ,  $\omega_T/\omega_T = 1.5$

Se observa que las magnitudes entre tapa y fondo tienen magnitudes comparables tanto en el experimento como en la simulación, pero las velocidades están reportadas al revés en cada trabajo. En esta investigación las velocidades máximas se encontraron en la tapa, mientras que en Salinas-Tapia et al. (2014) las velocidades mayores se encuentran en el fondo. Esta diferencia podría deberse a las condiciones experimentales, ya que la lámina laser, es decir, la región de obtención de imágenes se encontraba cerca de las paredes exteriores del CRA, a 2 cm desde la pared exterior, mientras que en las simulaciones los perfiles se extrajeron del eje central del canal, pudiendo ser que las corrientes radiales y de vista en planta modifiquen la trayectoria de la corriente de acuerdo con la posición donde se estudia la velocidad tangencial.

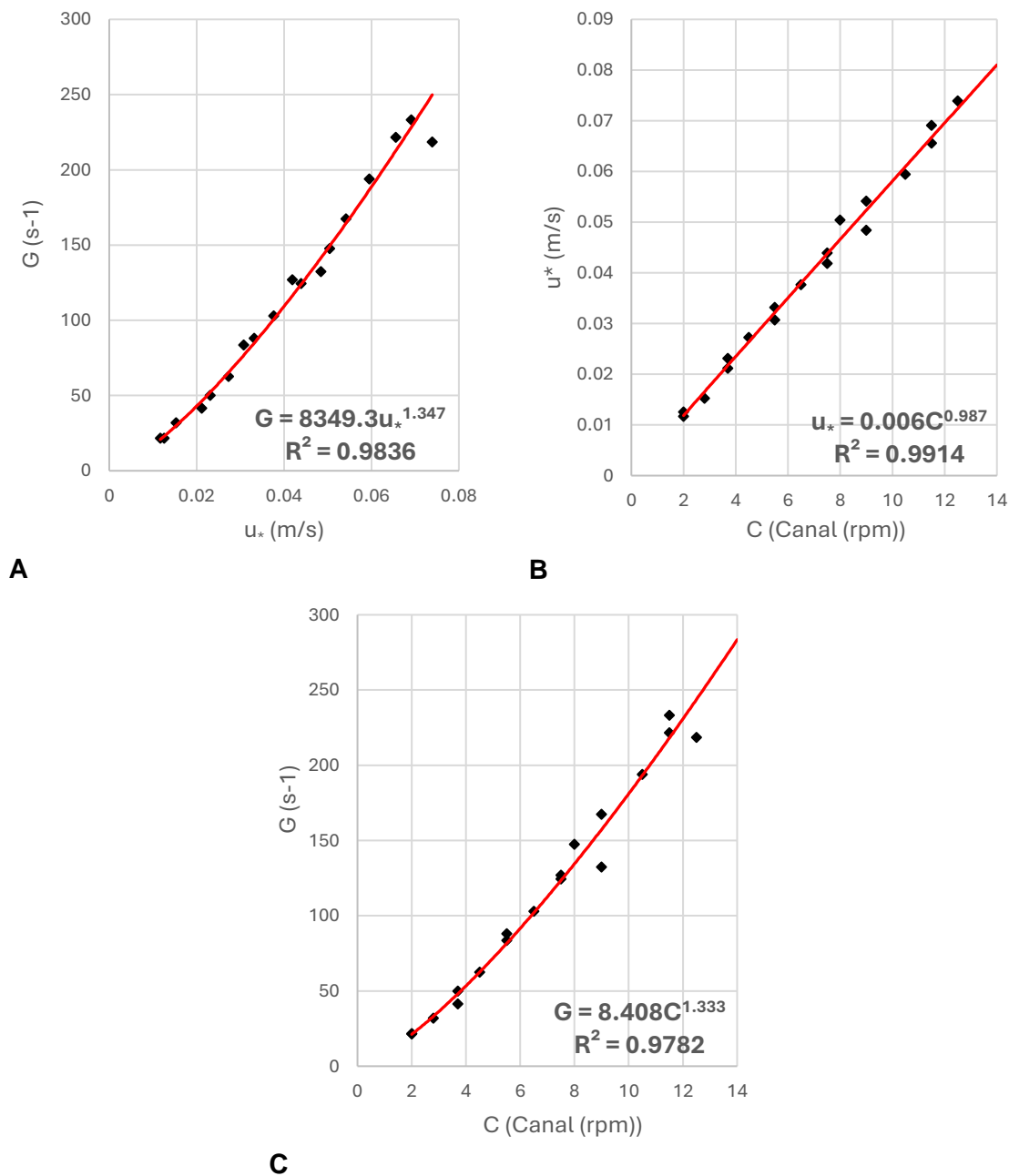
Debido a la similitud en magnitudes de velocidad y relación óptima en condiciones de operación (relación  $\omega_T/\omega_T$ ) entre los resultados de los experimentos de esta investigación y los presentados por Salinas-Tapia et al. (2014), se concluyó que se podía seguir utilizando los resultados obtenidos en los experimentos y generar curvas de calibración de parámetros hidrodinámicos de acuerdo con las condiciones operacionales.

Con los resultados obtenidos en este trabajo, se realizaron promedios en la profundidad para cada combinación en los parámetros de velocidad de corte  $u_*$  y tasa de corte  $G$ . Como se observa en todas las gráficas anteriores presentadas en este apartado, se decidió no tomar en cuenta los valores más cercanos a la tapa y al fondo del canal, ya que estos presentaban valores muy dispersos de la tendencia, debido al brillo que se capturaba en las imágenes cercano a los elementos móviles y como este brillo se procesaba.

La Figura 4.9, muestra como los valores de la velocidad de corte  $u_*$  y la tasa de corte  $G$ , aumentan en relación con el aumento de las revoluciones en el canal y tapa. Los datos experimentales de cada una de las tres gráficas se ajustaron a una ecuación de tipo exponencial. El coeficiente de determinación  $R^2$  resultó cercano a 1 en cada gráfica, lo que indica el buen ajuste que el modelo matemático tiene con los datos reales, y, por tanto, alta correlación entre las variables empleadas.

Las curvas de ajuste de la Figura 4.9, serán usadas para relacionar las revoluciones de operación en los experimentos con las muestras, con las condiciones hidrodinámicas que se aplican. En especial, las ecuaciones obtenidas en la Figura 4.9 A) y Figura 4.9 C) fueron útiles para establecer relaciones entre las condiciones de operación de los experimentos y

las condiciones hidrodinámicas. De manera específica, fueron útiles para conocer la velocidad de corte  $u_*$  y  $G$  a las que se sometieron las muestras en los experimentos.



**Figura 4.9.** Curvas de calibración hidrodinámica para diferentes correlaciones. Los parámetros hidrodinámicos fueron promediados en la altura (60 mm) para cada combinación aplicada en este experimento. A) Velocidad de corte versus tasa de corte. B) RPM de canal vs velocidad de corte. C) RMP de canal vs tasa de corte

De acuerdo con Izquierdo-Ayala et al., (2020), tesis doctoral titulada “Determinación del Perfil de Concentraciones para Sedimentos Cohesivos en Ríos – Validación Grijalva y Usumacinta”, en el río Grijalva las velocidades de corte  $u_*$  oscilan de entre 4.3 – 5.2 cm/s para las temporadas de estiaje y de tormentas invernales, respectivamente; y para el río Usumacinta, las velocidades corte  $u_*$  oscilan de entre 5.1 – 7.4 cm/s para las temporadas de estiaje y tormentas invernales, respectivamente.

Para el río Grijalva la condición hidrodinámica que se considera homóloga a las medidas en campo, de acuerdo con Izquierdo-Ayala (2020), corresponden a  $u_*=4.4$  cm/s y  $u_*=5.2$  cm/s; referente al río Usumacinta la condición hidrodinámica homologa es  $u_*=6.2$  cm/s.

La primera condición hidrodinámica aplicada a las muestras,  $u_*=3.2$  cm/s, se utilizó debido a condiciones prácticas, ya que con esta condición se comprobó visualmente que el sedimento en la muestra se resuspendía y no se mantenía en el lecho del canal.

Con la descripción anterior se determinaron las condiciones hidrodinámicas que se aplicaran en las muestras, mostradas en la Tabla 4.2. Los resultados obtenidos en este apartado fueron favorables para caracterizar la hidrodinámica del CRA, y con ello correlacionar  $u_*$  y  $G$  con el contenido de las FO y con la agregación y ruptura de los flóculos.

**Tabla 4.2.** Descripción de condiciones operacionales e hidrodinámicas que se aplicaron en los experimentos para los distintos sedimentos en el CRA

Sedimento	Revoluciones canal – tapa (RPM)	Velocidad de corte $u_*$ (cm/s)	Tasa de corte $G$ (1/s)
Grijalva	5.5 – 8.1	$u_{*1} = 3.2$	$G_1 = 82$
	7.5 – 11.0	$u_{*1} = 4.4$	$G_2 = 124$
	9.0 – 13.2	$u_{*1} = 5.2$	$G_3 = 158$
Usumacinta	5.5 – 8.1	$u_{*1} = 3.2$	$G_1 = 82$
	7.5 – 11.0	$u_{*1} = 4.4$	$G_2 = 124$
	10.5 – 15.4	$u_{*1} = 6.2$	$G_3 = 194$
Zarco	5.5 – 8.1	$u_{*1} = 3.2$	$G_1 = 82$
	7.5 – 11.0	$u_{*1} = 4.4$	$G_2 = 124$
	9.0 – 13.2	$u_{*1} = 5.2$	$G_3 = 158$



### 4.3. Floculación

#### 4.3.1. Floculación en la muestra del Río Grijalva

Los resultados del procesamiento PTV de las imágenes permiten establecer relaciones temporales entre las condiciones hidrodinámicas y las tasas de agregación y ruptura, para posteriormente relacionar estos con las FO medidas. La velocidad de corte se determinó a partir de la ecuación presentada en la Figura 4.9 B y la tasa de corte se determinó a partir de la ecuación presentada en la Figura 4.9 C.

Antes de iniciar cada experimento se aplicó al sedimento una velocidad y tasa de corte grande,  $u_* = 8.2$  cm/s y  $G = 284.9$  1/s durante 15 minutos, buscando la mayor ruptura de los flóculos y que entonces estos pudieran agregarse nuevamente durante los experimentos.

**Escenario 1 -  $u_{*1} = 3.2$  cm/s,  $G_1 = 82$  s<sup>-1</sup>**

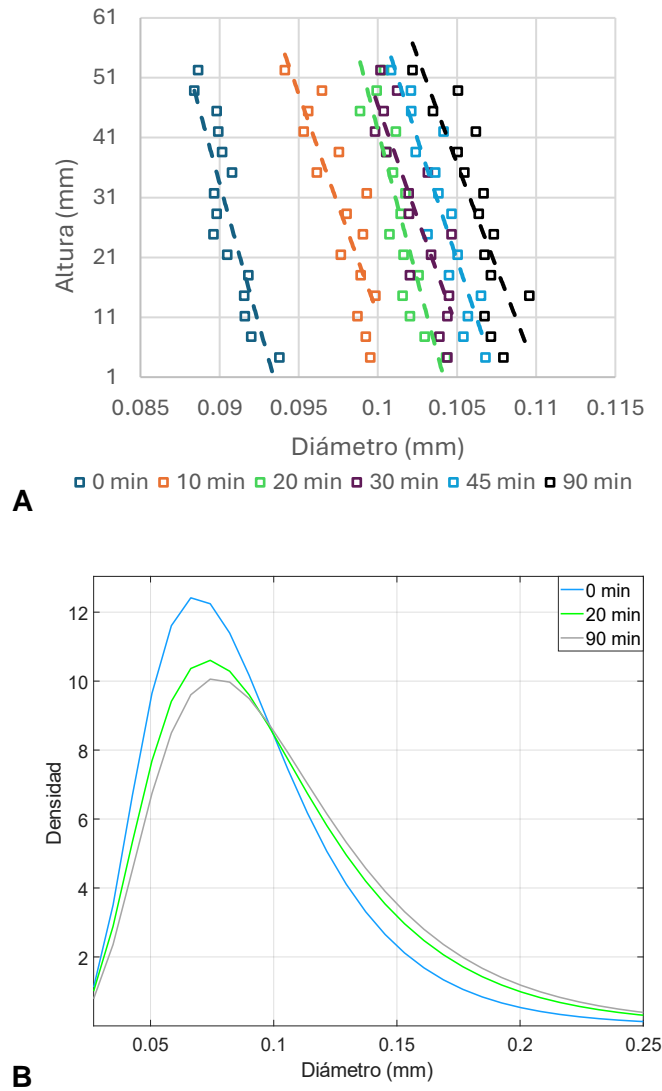
La Tabla 4.3, contiene los resultados de los promedios de los diámetros de los flóculos en todos los tiempos del experimento, en ella podemos observar que el diámetro promedio crece a cada tiempo de captura de imágenes. Los diámetros promedio variaron entre 90.8 – 106.2  $\mu$ m.

**Tabla 4.3.** Diámetro promedio de los flóculos de la muestra del río Grijalva a lo largo del experimento  
 $u_* = 3.2 \frac{cm}{s}$  y  $G = 82 s^{-1}$

Tiempo (min)	Diámetro promedio ( $\mu$ m)
0	90.8
10	97.9
20	101.4
30	102.6
45	104.2
90	106.2

La Figura 4.10A muestra los diámetros promedio en la vertical del área de obtención de imágenes para todos los tiempos. En el tiempo inicial (0 min) los promedios de diámetros de los agregados están entre 87 – 95  $\mu$ m, al final del experimento los valores rondaron entre 103 – 109  $\mu$ m.

La Figura 4.10B muestra los datos ajustados de histogramas de frecuencia de diámetros a curvas log – Normal, en ella se colocaron gráficas que representan la floculación que se dio durante el experimento. Se observa que mientras más tiempo transcurre los floculos de tamaños menores a 0.10 mm disminuyen en frecuencia, mientras que los diámetros mayores a 0.10 mm (100  $\mu\text{m}$ ) aumentan en frecuencia.



**Figura 4.10.** Floculación de la muestra del río Grijalva para condiciones hidrodinámicas  $u_{*1} = 3.2 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$  y  $G_1 = 82 \text{ s}^{-1}$  A) Variación del promedio de los tamaños en la vertical, B) Ajuste de distribuciones de frecuencias de diámetros a curvas log normal

**Escenario 2 -  $u_{*2} = 4.4 \text{ cm/s}$ ,  $G_2 = 124 \text{ s}^{-1}$**

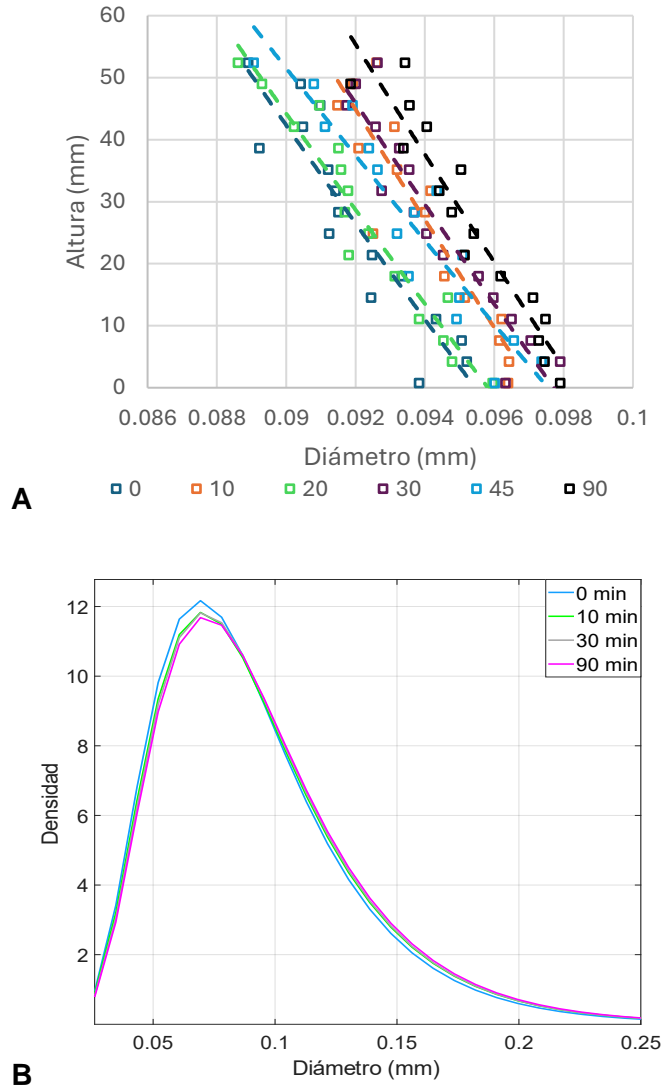
La Tabla 4.4 muestra los promedios de los flóculos durante los tiempos del experimento en el canal anular. El tamaño promedio de los flóculos en el tiempo 0 minutos fue de 90.2  $\mu\text{m}$ , mientras que el tiempo 90 fue de 95.3.

**Tabla 4.4.** Diámetro promedio de los flóculos de la muestra del río Grijalva a lo largo del experimento  $u_* = 4.4 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$  y  $G = 124 \text{ s}^{-1}$

Tiempo (min)	Diámetro promedio ( $\mu\text{m}$ )
0	92.0
10	94.1
20	92.3
30	94.4
45	93.6
90	95.3

La Figura 4.11A muestra los promedios de los diámetros de los flóculos en la vertical del área de obtención de imágenes para los distintos tiempos de los experimentos. Para el tiempo 0, los flóculos varían de tamaño entre 89 – 95  $\mu\text{m}$ , y para el tiempo 90 minutos el tamaño fue de entre 92 – 98  $\mu\text{m}$ . Para los tiempos 10 – 20 minutos y 30 – 45 hubo disminución en el tamaño de los flóculos, mientras que para 0 – 10, 20 – 30 y 45 – 90 minutos los flóculos aumentaron en tamaño.

La Figura 4.11B muestra los datos ajustados de histogramas de frecuencia de diámetros a curvas log-Normal, en ella se colocaron gráficas que representan la floculación durante el experimento. Se observa que hubo poco aumento en la frecuencia a lo largo del tiempo para diámetros mayores de entre 0.09 – 0.10 mm, es decir hubo menor agregación respecto al experimento con las condiciones  $u_* = 3.2 \text{ cm/s}$  y  $G = 82 \text{ s}^{-1}$ .



**Figura 4.11.** Floculación de la muestra del río Grijalva para condiciones hidrodinámicas  $u_* = 4.4 \frac{cm}{s}$  y  $G = 124 s^{-1}$  A) Variación del promedio de los tamaños en la vertical, B) Ajuste de distribuciones de frecuencias de diámetros a curvas log normal

**Escenario 3 -  $u_{*3} = 5.2 \text{ cm/s}$ ,  $G_3 = 158 \text{ s}^{-1}$**

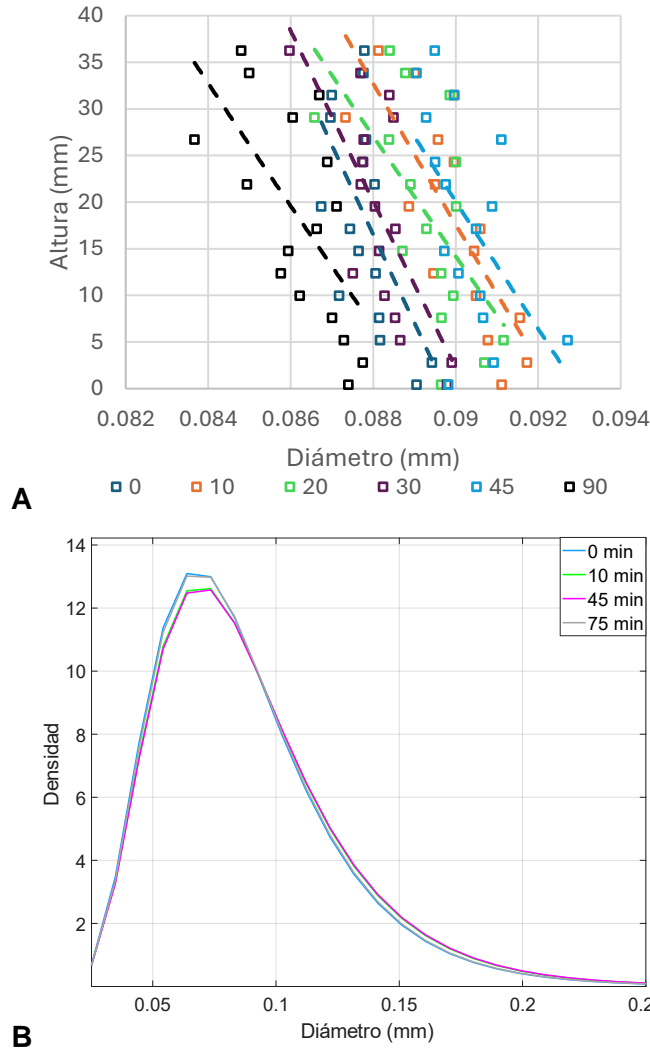
La Tabla 4.5 nos muestra el intervalo en el que se mueven los promedios de los diámetros, los cuales variaron entre 87.9 – 90.3  $\mu\text{m}$ . Estos resultados nos muestran que no se presentaron cambios significativos en el tamaño de los flóculos.

**Tabla 4.5.** Diámetro promedio de los flóculos de la muestra del río Grijalva a lo largo del experimento  $u_* = 5.2 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$  y  $G = 158 \text{ s}^{-1}$

Tiempo (min)	Diámetro promedio ( $\mu\text{m}$ )
0	87.8
10	89.9
20	89.4
30	88.2
45	90.3
90	86.2

La Figura 4.12A es la representación de los tamaños promedio de los flóculos en la vertical del área de obtención de imágenes. Los diámetros de flóculos más bajos se presentaron para el tiempo 90 minutos y variaron entre 84 – 88  $\mu\text{m}$ , mientras que los tamaños más grandes se registraron en el tiempo 45 minutos y fluctuaron entre 89 – 93  $\mu\text{m}$ . Se observa que durante los 90 minutos de duración del experimento hubo lapsos donde los tamaños promedio de los flóculos aumentaron y lapsos en los que los tamaños promedio disminuyeron.

La Figura 4.12B son los datos ajustados de histogramas de frecuencia de diámetros a curvas log-Normal, en ella se colocaron gráficas que representan la floculación durante el experimento. Se observa que hubo tanto agregación como desagregación, y que los tamaños máximos se alcanzaron para el tiempo 45 minutos.



**Figura 4.12.** Floculación de la muestra del río Grijalva para condiciones hidrodinámicas  $u_* = 5.2 \frac{cm}{s}$  y  $G = 158 s^{-1}$  A) Variación del promedio de los tamaños en la vertical, B) Ajuste de distribuciones de frecuencias de diámetros a curvas log normal

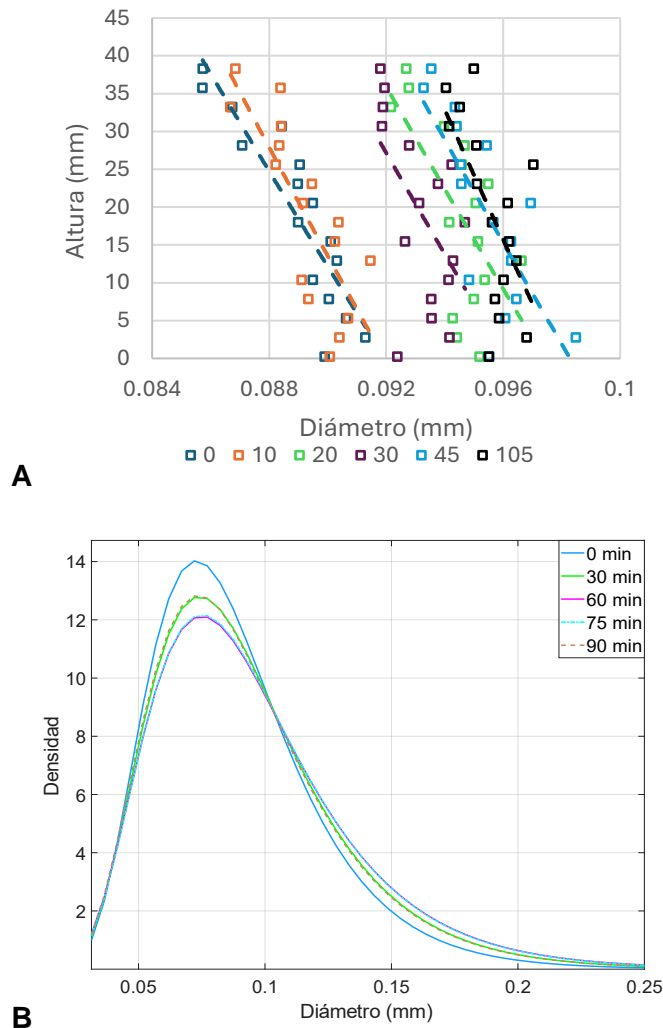
### 4.3.2. Floculación en la muestra del Río Usumacinta

**Escenario 1 -  $u_{*1} = 3.2 \frac{cm}{s}$ ,  $G_1 = 82 s^{-1}$**

La Tabla 4.6 contiene los resultados de los promedios de los diámetros de los flóculos en todos los tiempos del experimento, en ella podemos observar que el diámetro promedio crece a cada tiempo de captura de imágenes. Los diámetros promedio variaron entre 88.9 – 95.4  $\mu m$ .

La Figura 4.13A muestra los diámetros promedio en la vertical del área de obtención de imágenes para todos los tiempos. En el tiempo inicial (0 min) los promedios de diámetros de los agregados variaron entre 86 – 91  $\mu\text{m}$ , al final del experimento los valores rondaron entre 94 – 97  $\mu\text{m}$ .

La Figura 4.13B muestra los datos ajustados de histogramas de frecuencia de diámetros a curvas log - Normal, en ella se colocaron gráficas representativas de la floculación durante el experimento. Se observa que mientras más tiempo transcurre los flóculos de tamaños menores a 0.10 mm disminuyen en frecuencia, mientras que los diámetros mayores a 0.10 mm aumentan en frecuencia.



**Figura 4.13.** Floculación para condiciones hidrodinámicas  $u_* = 3.2 \frac{cm}{s}$  y  $G = 82 s^{-1}$  de la muestra del río Usumacinta A) Variación del promedio de los tamaños en la vertical, B) Ajuste de distribuciones de frecuencias de diámetros a curvas log normal

**Tabla 4.6.** Diámetro promedio de los flóculos de la muestra del río Usumacinta a lo largo del experimento  $u_* = 3.2 \frac{cm}{s}$  y  $G = 82 s^{-1}$

Tiempo (min)	Diámetro promedio ( $\mu m$ )
0	88.9
10	89.2
20	94.5
30	93.2
45	95.4
90	92.9

**Escenario 2 -  $u_{*2} = 4.4 \frac{cm}{s}$ ,  $G_2 = 124 s^{-1}$**

La Tabla 4.7 muestra los promedios de los flóculos durante los tiempos del experimento en el canal anular. El tamaño promedio de los flóculos en el tiempo 0 minutos fue de 89.7  $\mu m$ , mientras que el tiempo 90 fue de 92.3.

**Tabla 4.7.** Diámetro promedio de los flóculos de la muestra del río Usumacinta a lo largo del experimento  $u_* = 4.4 \frac{cm}{s}$  y  $G = 124 s^{-1}$

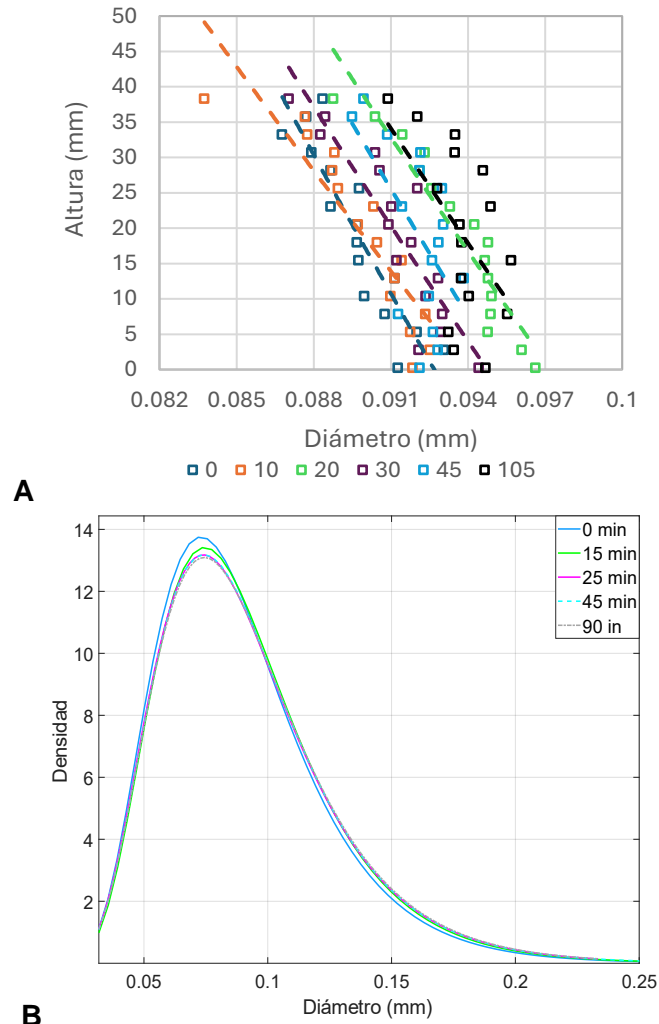
Tiempo (min)	Diámetro promedio ( $\mu m$ )
0	89.7
10	89.9
20	93.5
30	91.2
45	92.0
90	92.3

La Figura 4.14A muestra los diámetros promedio de los flóculos en la vertical del área de obtención de imágenes para los distintos tiempos de los experimentos. Para el tiempo 0, los flóculos variaron de tamaño 87 – 92  $\mu m$ , y para el tiempo 105 minutos el tamaño fue de entre 90 – 95  $\mu m$ . Para los tiempos 10 – 20 minutos y 30 – 45 y 45 – 105 hubo aumento en el tamaño de los flóculos, mientras que para 20 – 30 los flóculos disminuyeron en tamaño.

La Figura 4.14B muestra los datos ajustados de histogramas de frecuencia de diámetros a curvas log-Normal, en ella se colocaron gráficas representativas de la floculación durante



el experimento. Se observa que hubo poco aumento en la frecuencia a lo largo del tiempo para diámetros mayores de entre 0.10 – 0.11 mm, es decir hubo menor agregación respecto al experimento con las condiciones  $u_* = 3.2 \text{ cm/s}$  y  $G = 82 \text{ s}^{-1}$ .



**Figura 4.14.** Flocculación para condiciones hidrodinámicas  $u_* = 4.4 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$  y  $G = 124 \text{ s}^{-1}$  de la muestra del río Usumacinta A) Variación del promedio de los tamaños en la vertical, B) Ajuste de distribuciones de frecuencias de diámetros a curvas log normal

**Escenario 3 -  $u_{*3} = 6.2 \text{ cm/s}$ ,  $G_3 = 194 \text{ s}^{-1}$**

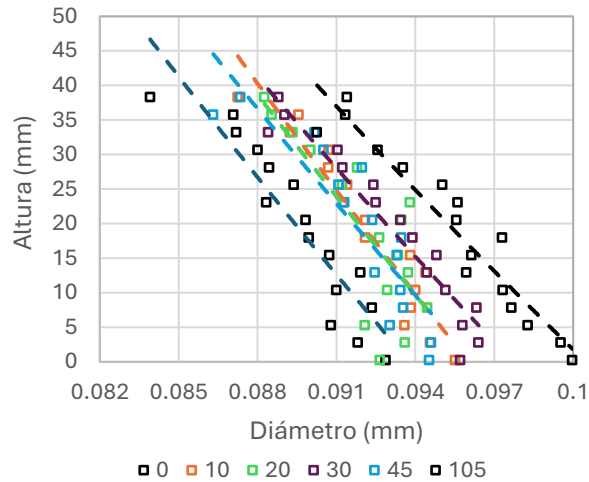
La Tabla 4.8 nos muestra el intervalo en el que se mueven los promedios de los diámetros, los cuales fluctuaron entre 89.1 – 92.1  $\mu\text{m}$ . Estos resultados nos muestran que no se presentaron cambios significativos en el tamaño de los flóculos.

**Tabla 4.8.** Diámetro promedio de los flóculos de la muestra del río Usumacinta a lo largo del experimento  $u_* = 6.2 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$  y  $G = 194 \text{ s}^{-1}$

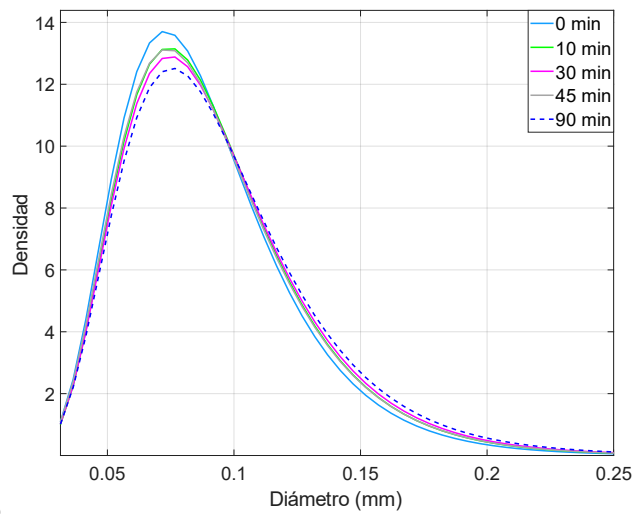
Tiempo (min)	Diámetro promedio ( $\mu\text{m}$ )
0	89.6
10	92.1
20	92.0
30	93.1
45	91.8
90	94.8

La Figura 4.15A es la representación de los tamaños promedio de los flóculos en la vertical del área de obtención de imágenes. Los diámetros de flóculos más bajos se presentaron para el tiempo 0 minutos y oscilaron entre 84 – 92  $\mu\text{m}$ , mientras que los tamaños más grandes se registraron en el tiempo 105 minutos y variaron entre 91 – 10  $\mu\text{m}$ . Se observa que durante los 105 minutos de duración del experimento hubo lapsos donde los tamaños promedio de los flóculos aumentaron y lapsos en los que los tamaños promedio disminuyeron.

La Figura 4.15B son los datos ajustados de histogramas de frecuencia de diámetros a curvas log-Normal, en ella se colocaron gráficas representativas de la floculación durante el experimento. Se observa que hubo tanto agregación como desagregación, y que el aumento en frecuencia para diámetros mayores a 0.10 mm fue poco respecto a los 2 experimentos anteriores, los tamaños máximos se alcanzaron para el tiempo 90 minutos.



**A**



**B**

**Figura 4.15.** Floculación para condiciones hidrodinámicas  $u_* = 6.2 \frac{cm}{s}$  y  $G = 194 s^{-1}$  de la muestra del río Usumacinta A) Variación del promedio de los tamaños en la vertical, B) Ajuste de distribuciones de frecuencias de diámetros a curvas log normal

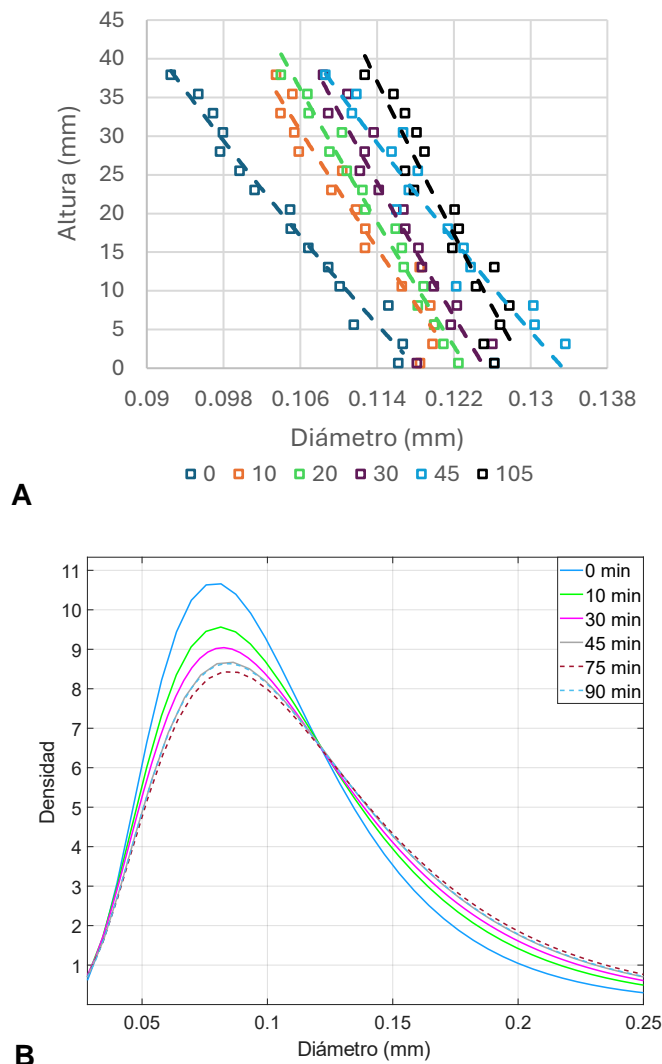
### 4.3.3. Floculación en los sedimentos del centro acuícola el Zarco

**Escenario 1 -  $u_{*1} = 3.2 \frac{cm}{s}$ ,  $G_1 = 82 s^{-1}$**

La Tabla 4.9 contiene los resultados de los promedios de los diámetros de los floculos en todos los tiempos del experimento, en ella podemos observar que el diámetro promedio crece a cada tiempo de captura de imágenes. Los diámetros promedio estuvieron entre 104.8 – 122.27  $\mu m$ .

La Figura 4.16A muestra los diámetros promedio en la vertical del área de obtención de imágenes para todos los tiempos. En el tiempo inicial (0 min) los promedios de diámetros de los agregados están entre 92 – 116  $\mu\text{m}$ , para el tiempo 105 del experimento los valores rondaron entre 112 – 126  $\mu\text{m}$ .

La Figura 4.16B muestra los datos ajustados de histogramas de frecuencia de diámetros a curvas log – Normal, en ella se colocaron gráficas representativas de la floculación durante el experimento. Se observa que mientras más tiempo transcurre los flóculos de tamaños menores a 0.12 mm disminuyen en frecuencia, mientras que los diámetros mayores a 0.12 mm aumentan en frecuencia.



**Figura 4.16.** Floculación para condiciones hidrodinámicas  $u_* = 3.2 \frac{cm}{s}$  y  $G = 82 s^{-1}$  de la muestra del Zarco A) Variación del promedio de los tamaños en la vertical, B) Ajuste de distribuciones de frecuencias de diámetros a curvas log normal

**Tabla 4.9.** Diámetro promedio de los flóculos de la muestra del Zarco a lo largo del experimento  
 $u_* = 3.2 \frac{cm}{s}$  y  $G_2 = 82 s^{-1}$

Tiempo (min)	Diámetro promedio ( $\mu m$ )
0	104.8
10	112.1
20	114.0
30	116.3
45	120.4
60	118.8
75	122.27
90	120.8

**Escenario 2 -  $u_{*2} = 4.4 \frac{cm}{s}$ ,  $G_2 = 124 s^{-1}$**

La Tabla 4.10 muestra los promedios de los flóculos durante los tiempos del experimento en el canal anular. El tamaño promedio de los flóculos en el tiempo 0 minutos fue de 100.2  $\mu m$ , mientras que el tamaño máximo se alcanzó en el minuto 60 y fue de 106.1  $\mu m$ .

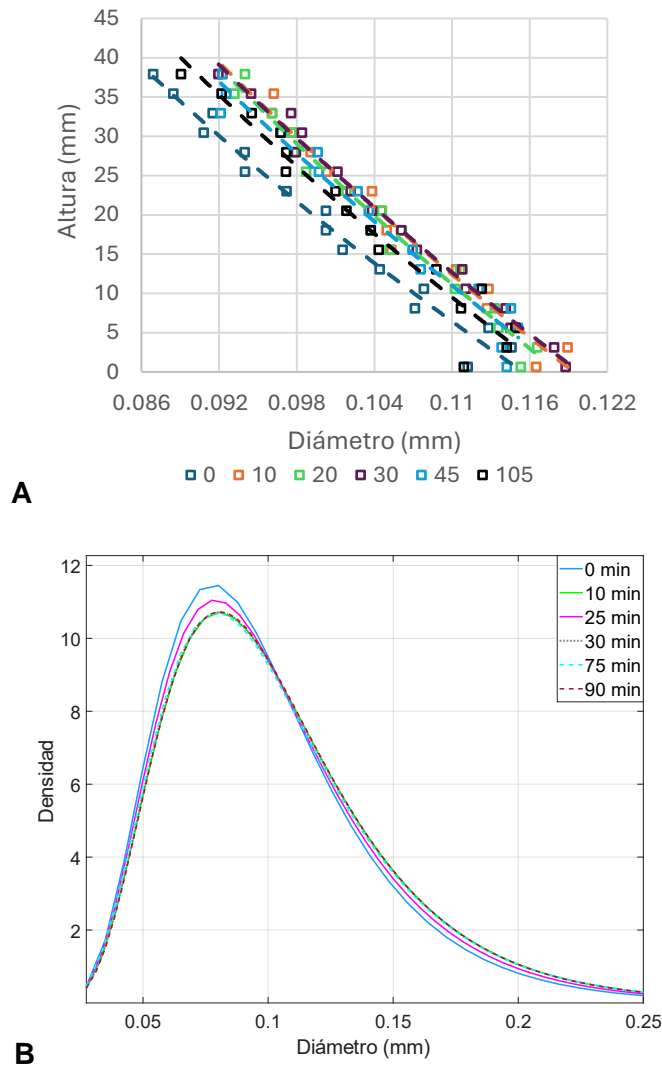
**Tabla 4.10.** Diámetro promedio de los flóculos de la muestra del Zarco a lo largo del experimento  
 $u_* = 4.4 \frac{cm}{s}$  y  $G_2 = 124 s^{-1}$

Tiempo (min)	Diámetro promedio ( $\mu m$ )
0	100.2
6	100.0
10	105.4
20	104.7
30	105.5
45	104.2
60	106.1
90	105.4

La Figura 4.17A muestra los promedios de los diámetros de los flóculos en la vertical del área de obtención de imágenes para los distintos tiempos de los experimentos. Para el tiempo 0, los flóculos fueron de tamaño 87 – 113  $\mu m$ , y para el tiempo 10 el tamaño fue de

entre 96 – 119  $\mu\text{m}$ . Para los tiempos 0 – 10 minutos hubo aumento en el tamaño de los flóculos, mientras que para los demás tiempos los cambios fueron poco considerables.

La Figura 4.17B muestra los datos ajustados de histogramas de frecuencia de diámetros a curvas log-Normal, en ella se colocaron gráficas representativas de la floculación durante el experimento. Se observa que hubo poco aumento en la frecuencia a lo largo del tiempo para diámetros mayores de entre 0.11 – 0.13 mm, es decir hubo menor agregación respecto al experimento con las condiciones  $u_* = 3.2 \text{ cm/s}$  y  $G = 82 \text{ s}^{-1}$ .



**Figura 4.17.** Floculación para condiciones hidrodinámicas  $u_* = 4.4 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$  y  $G = 124 \text{ s}^{-1}$  de la muestra del Zarco A) Variación del promedio de los tamaños en la vertical, B) Ajuste de distribuciones de frecuencias de diámetros a curvas log normal

**Escenario 3 -  $u_{*3} = 5.2 \text{ cm/s}$ ,  $G_3 = 158 \text{ s}^{-1}$**

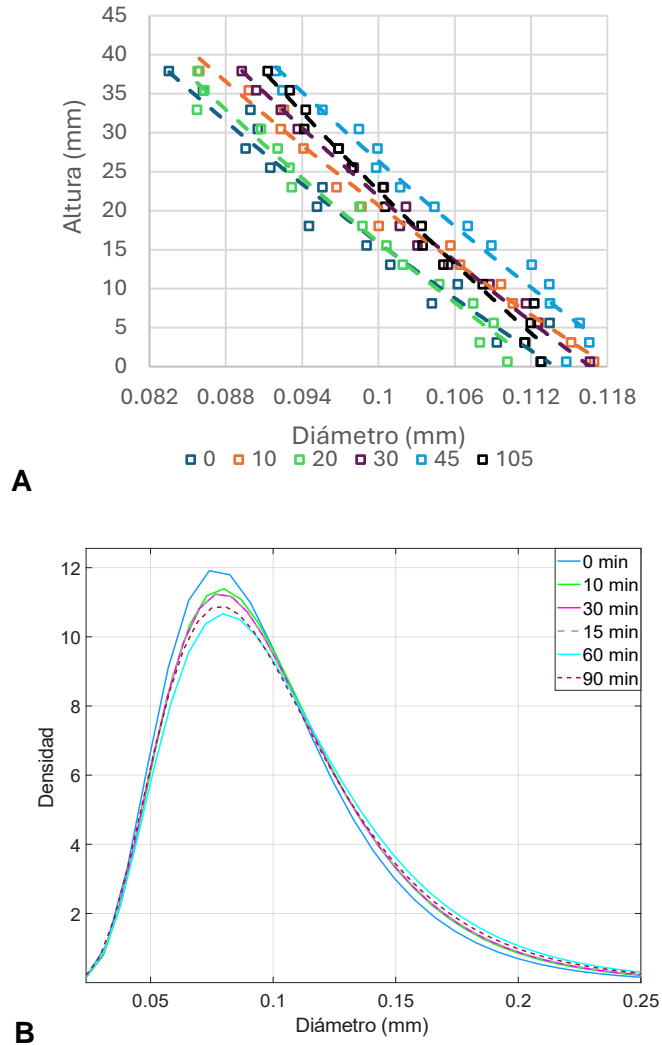
La Tabla 4.11 nos muestra el intervalo en el que se mueven los promedios de los diámetros, los cuales fluctuaron entre 97.7 – 105.8  $\mu\text{m}$ . Estos resultados nos muestran que sí se presentaron cambios significativos en el tamaño de los flóculos, pero hubo agregación y ruptura a lo largo del tiempo.

**Tabla 4.11.** Diámetro promedio de los flóculos de la muestra del río Usumacinta a lo largo del experimento  $u_* = 5.2 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$  y  $G = 158 \text{ s}^{-1}$

Tiempo (min)	Diámetro promedio ( $\mu\text{m}$ )
0	97.7
2	99.9
10	101.6
20	97.9
30	102.2
45	105.4
60	105.8
90	103.5

La Figura 4.18A es la representación de los tamaños promedio de los flóculos en la vertical del área de obtención de imágenes. Los diámetros de flóculos más pequeños se presentaron para el tiempo 0 minutos y fueron de entre 83 – 113  $\mu\text{m}$ , mientras que los tamaños más grandes se registraron en el tiempo 45 minutos y variaron entre 92 – 116  $\mu\text{m}$ . Se observa que durante los 105 minutos de duración del experimento hubo lapsos donde los tamaños promedio de los flóculos aumentaron y lapsos en los que los tamaños promedio disminuyeron.

La Figura 4.18B son los datos ajustados de histogramas de frecuencia de diámetros a curvas log-Normal, en ella se colocaron gráficas representativas de la floculación durante el experimento. Se observa que hubo tanto agregación como desagregación, y que el aumento en frecuencia para diámetros mayores a 0.11 – 0.13 mm fue poco respecto a los 2 experimentos anteriores.



**Figura 4.18.** Flocculación para condiciones hidrodinámicas  $u_* = 5.2 \frac{cm}{s}$  y  $G = 158 s^{-1}$  de la muestra del Zarco A) Variación del promedio de los tamaños en la vertical, B) Ajuste de curvas log normal a distribuciones de frecuencias de diámetros

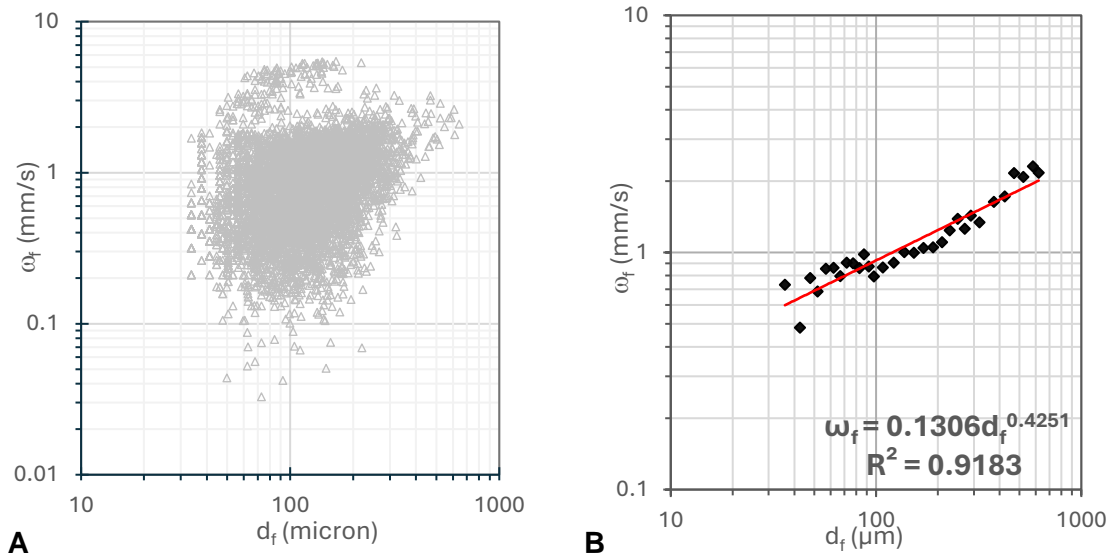
#### 4.4. Velocidad de caída y densidad

##### 4.4.1. Velocidad de caída de los sedimentos del Río Grijalva

En la Figura 4.19A se presenta la nube de puntos de las velocidades de caída calculadas a partir de los experimentos PTV. La regresión potencial de la Figura 4.19B se propuso para los promedios de velocidad de caída de la nube de puntos de la Figura 4.19A, agrupada en 51 intervalos de tamaños de flóculos. Con esta agrupación se encontró una dimensión fractal  $F = 1.43$ , con un coeficiente de ajuste  $R^2 = 0.92$ .



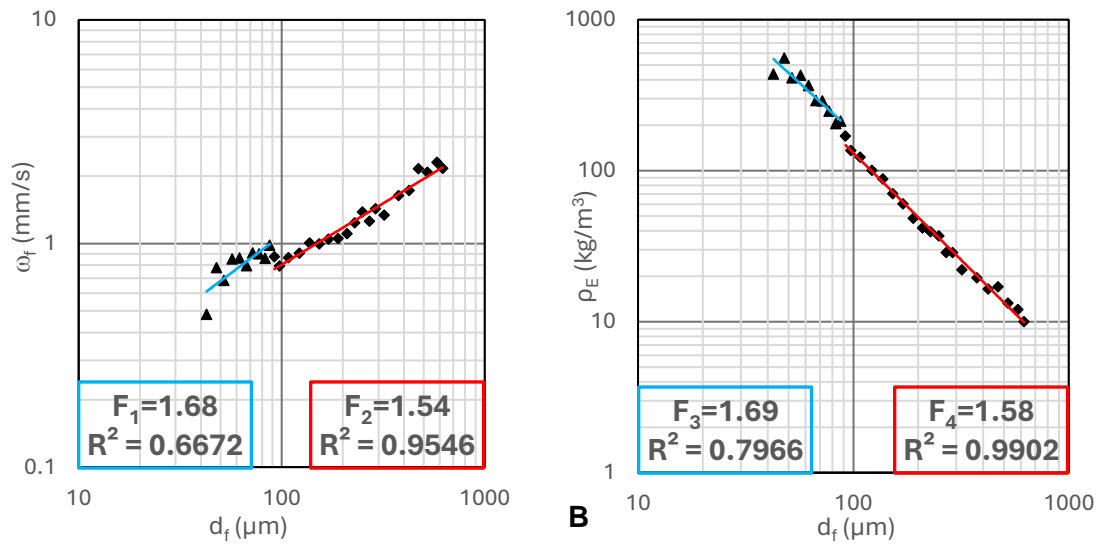
La Figura 4.19A indica que el rango de tamaños de los flóculos que se encontraron fue de entre 33 – 619  $\mu\text{m}$  y las velocidades se encontraron entre 0.03 y 5.3 mm/s; mientras que el ajuste de 32 intervalos de la Figura 4.19B obtuvo rangos de diámetros de 35 – 619  $\mu\text{m}$  y velocidades de entre 0.48 – 2.3 mm/s.



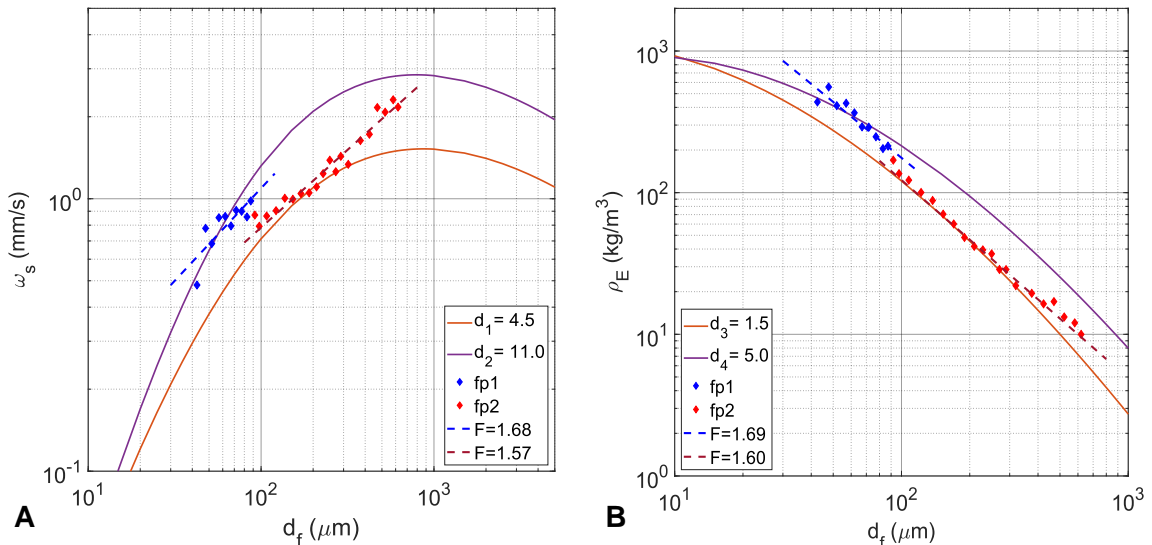
**Figura 4.19.** Velocidad de caída del río Grijalva. A) Datos de velocidad de caída de y B) Velocidad de caída promedio para 51 intervalos de tamaño de partícula y dimensión fractal  $F = 1.43$

En la Figura 4.20A y Figura 4.20B los datos se clasificaron en dos grupos, de acuerdo con la serie presentada en la Figura 4.19B y considerando lo presentado en la sección 2.10.2, suponiendo que los flóculos podrían tener comportamiento viscoso e inercial en su velocidad de caída. Los datos de la Figura 4.20A son los datos de  $d_f$  contra  $\omega_f$  y la Figura 4.20B son los datos de  $d_f$  versus  $\rho_E$ . En cada uno ellos se muestra el mejor ajuste empírico de la dimensión fractal para los dos grupos de flóculos representado con líneas punteadas, teniendo que las dimensiones fractales  $F$  para el ajuste de la Figura 4.20A son  $F_1 = 1.68$  y  $F = 1.54$  y Figura 4.20B son  $F_3 = 1.60$  y  $F_4 = 1.70$ .

La Figura 4.21A y Figura 4.21B se presentan las envolventes calculadas con la teoría de velocidad de caída de Khelifa & Hill (2006). De acuerdo con lo anterior, los tamaños de partícula primaria para la Figura 4.21A son  $d_{f1} = 4.5 \mu\text{m}$  y  $d_{f2} = 11.0 \mu\text{m}$  de entre, y para la Figura 4.21B son  $d_{f3} = 1.5 \mu\text{m}$  y  $d_{f4} = 15.0 \mu\text{m}$ .



**Figura 4.20.** Dimensión fractal empírica de muestra del río Grijalva para serie de datos de  $d_f$  dividida en dos grupos. A)  $d_f$  versus  $\omega_f$  y B)  $d_f$  versus  $\Delta\rho$

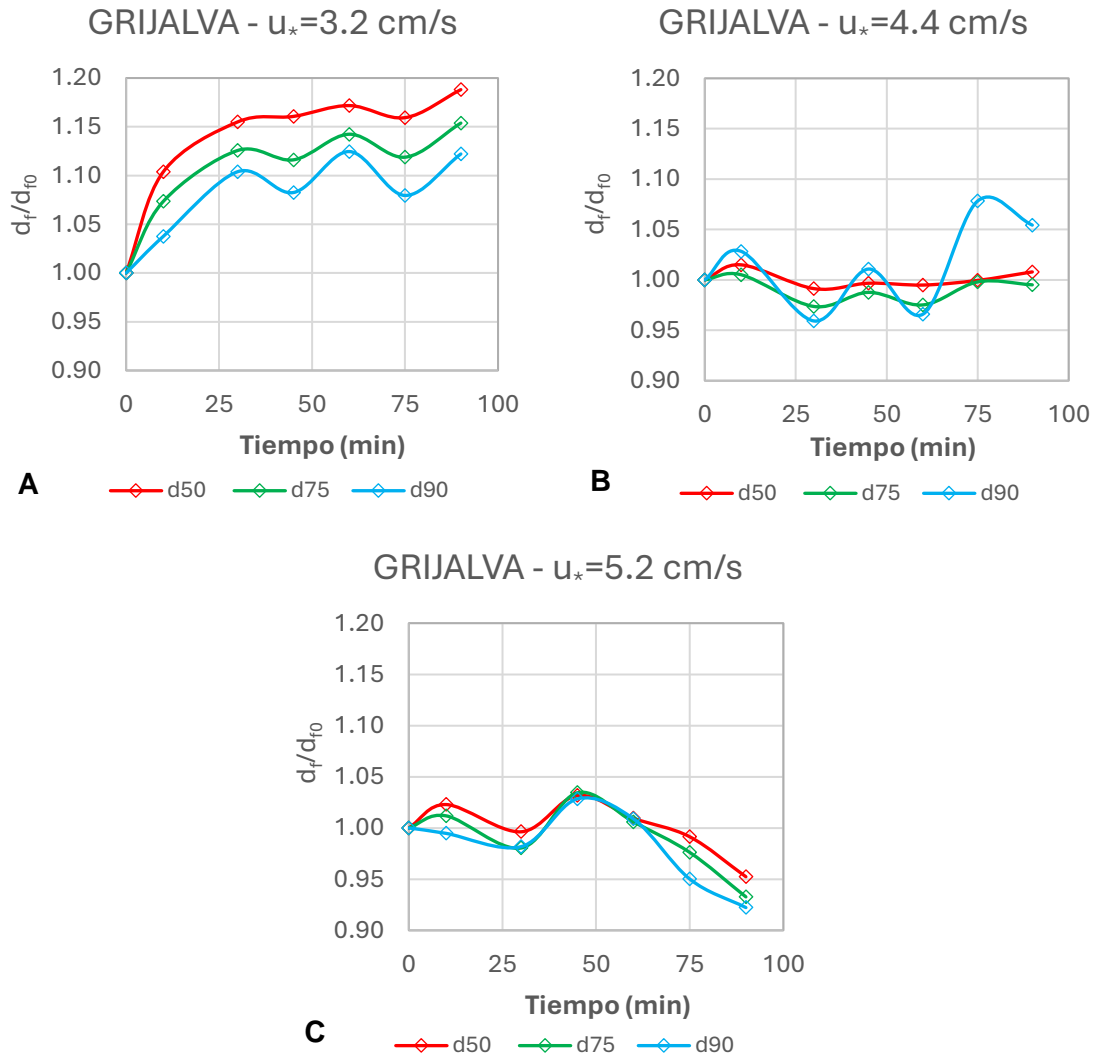


**Figura 4.21.** Dimensión fractal empírica de datos experimentales y tamaño de partícula primaria de acuerdo con modelo de Khelifa & Hill (2006) de muestra del río Grijalva. A) De acuerdo con datos de velocidad de caída y B) De acuerdo con datos de densidad efectiva

Con las regresiones presentadas en la Figura 4.21B se convirtieron los volúmenes de todos los tamaños de flóculos a materia, y con ello se realizaron las granulometrías de los experimentos que se dan en la Figura 4.22

Para la primera condición aplicada a los sedimentos ( $u_* = 3.2 \text{ cm/s}$ ) la agregación se da a lo largo del tiempo con claras tendencias al aumentar el tamaño durante todo el experimento; es notorio que para los primeros 10 minutos la tasa de agregación fue mayor

que en el resto del experimento; contrario al comportamiento anterior las condiciones  $u_* = 4.4 \text{ cm/s}$  y  $u_* = 5.2 \text{ cm/s}$  demuestran que la agregación se dio lentamente e incluso existe rompimiento en varios lapsos.

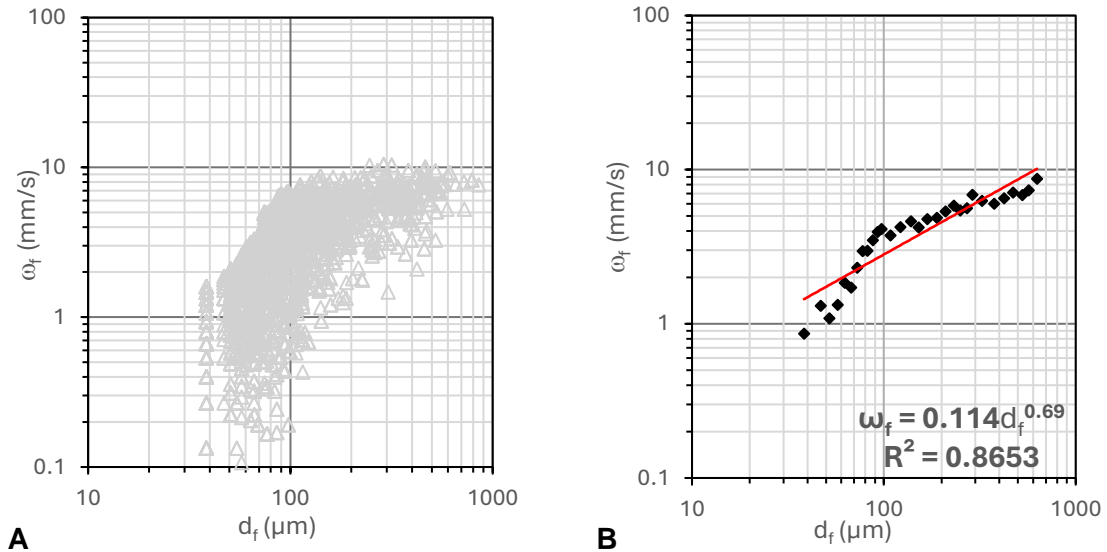


**Figura 4.22.** Análisis de diámetros característicos en los experimentos de floculación del río Grijalva A)  $d_{50}$ , B)  $d_{75}$  y C)  $d_{90}$

#### 4.4.2. Velocidad de caída de los sedimentos del Río Usumacinta

En la Figura 4.23A se presenta la nube de puntos de las velocidades de caída calculadas a partir de los experimentos PTV. La regresión potencial de la Figura 4.23B se propuso para los promedios de velocidad de caída de la nube de puntos de la Figura 4.23A, agrupada en 33 intervalos de tamaños de flóculos. Con esta agrupación se encontró una dimensión fractal  $F = 1.69$ , con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.86$ .

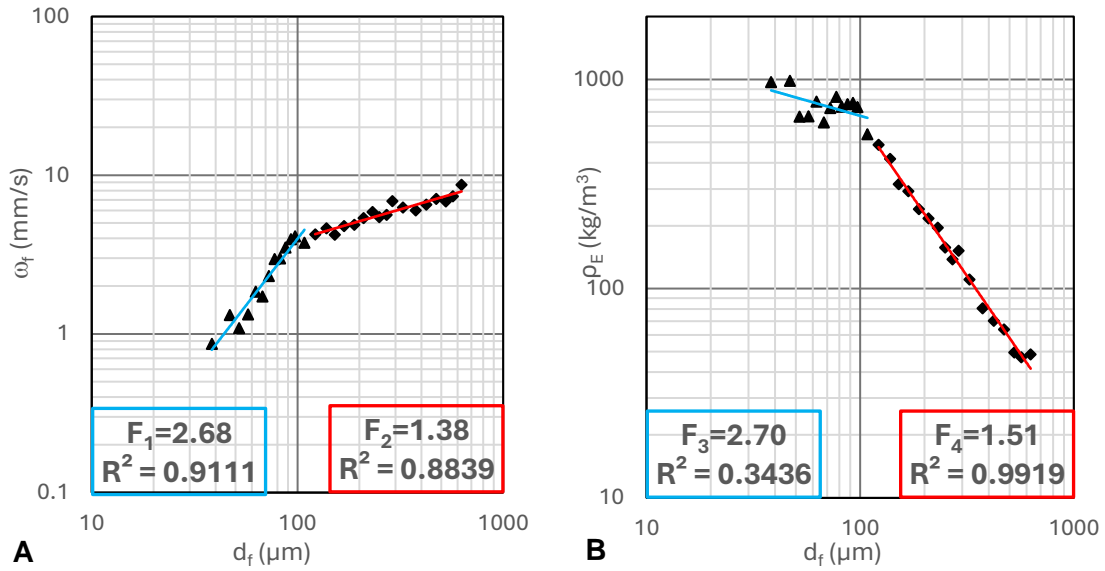
La Figura 4.23A indica que el rango de tamaños que se encontraron fue de entre 38 – 853  $\mu\text{m}$  y las velocidades se encontraron entre 0.10 – 10.34 mm/s; mientras que el ajuste por intervalos de la Figura 4.23B obtuvo rangos de diámetros de 38 – 627  $\mu\text{m}$  y velocidades de entre 0.86 – 7.3 mm/s.



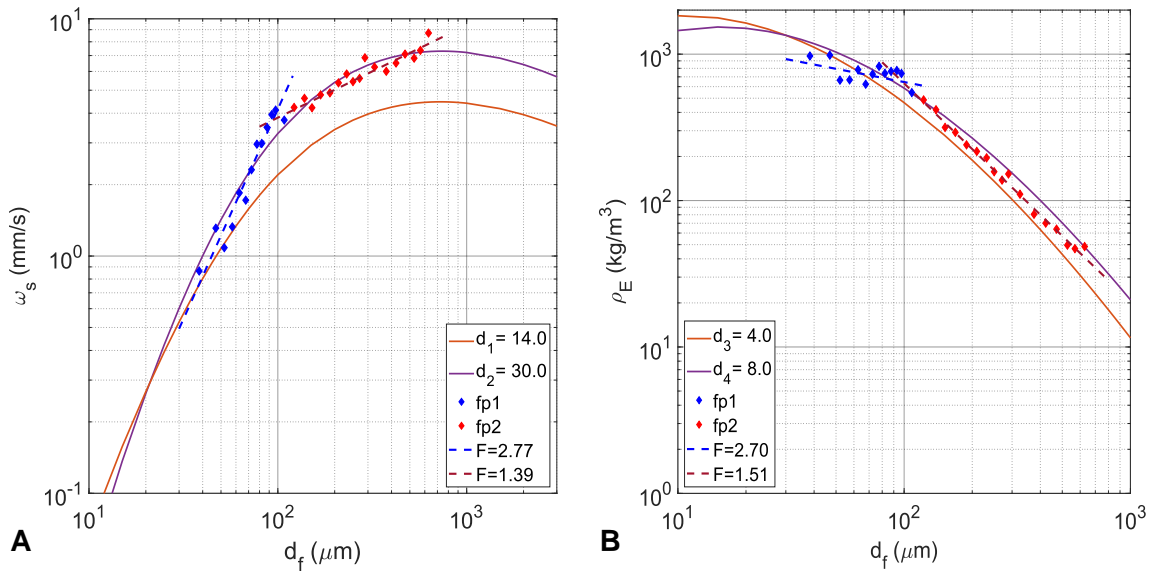
**Figura 4.23.** Velocidad de caída del río Usumacinta. A) Datos de velocidad de caída de y B) Velocidad de caída promedio para 33 intervalos de tamaño de partícula y dimensión fractal  $F = 1.69$

En la Figura 4.24A y Figura 4.24B se muestran los datos clasificados en dos grupos, suponiendo el comportamiento viscoso e inercial de los flóculos en la velocidad de caída. Los datos de la Figura 4.20A son los datos de  $d_f$  contra  $\omega_f$  y la Figura 4.20B son los datos de  $d_f$  versus  $\rho_E$ . En cada uno ellos se muestra el mejor ajuste potencial empírico de la dimensión fractal para los dos grupos de flóculos representado con líneas punteadas, teniendo que las dimensiones fractales  $F$  para el ajuste de la Figura 4.24A son  $F_1 = 2.68$  y  $F = 1.38$  y Figura 4.24B son  $F_3 = 2.70$  y  $F_4 = 1.51$ .

La Figura 4.25A y Figura 4.25B se presentan las envolventes calculadas con la teoría de velocidad de caída de Khelifa & Hill (2006). De acuerdo con lo anterior, los tamaños de partícula primaria para la Figura 4.25A son  $d_{f1} = 14.0 \mu\text{m}$  y  $d_{f2} = 30.0 \mu\text{m}$  de entre, y para la Figura 4.25B son  $d_{f3} = 4.0 \mu\text{m}$  y  $d_{f4} = 8.0 \mu\text{m}$ .

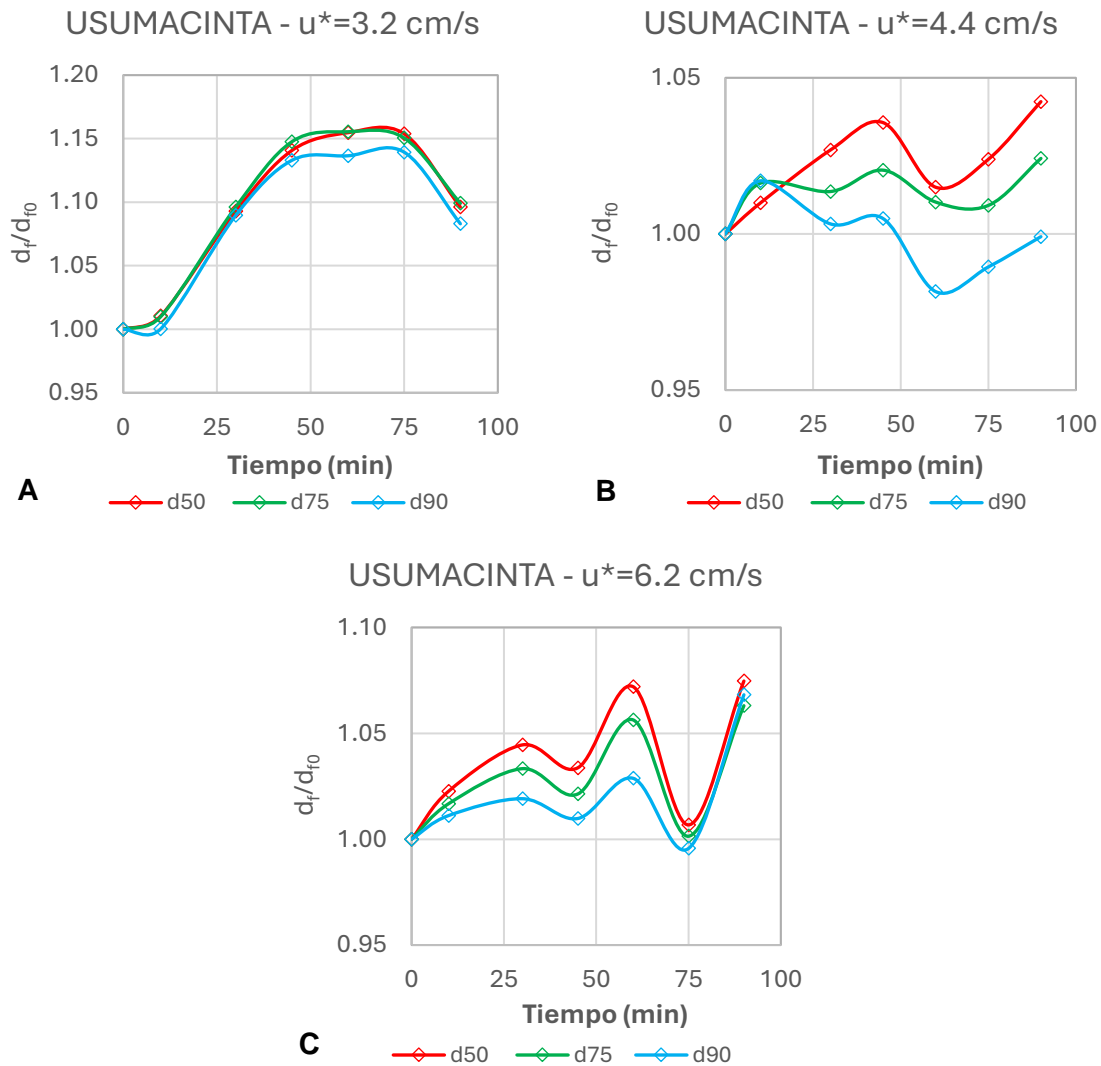


**Figura 4.24.** Dimensión fractal empírica de muestra del río Usumacinta para serie de datos de  $d_f$  dividida en dos grupos. A)  $d_f$  versus  $\omega_f$  y B)  $d_f$  versus  $\Delta\rho$



**Figura 4.25.** Dimensión fractal empírica de datos experimentales y tamaño de partícula primaria de acuerdo con modelo de Khelifa & Hill (2006) de muestra del río Usumacinta. A) De acuerdo con datos de velocidad de caída y B) De acuerdo con datos de densidad efectiva

Con las regresiones presentadas en la Figura 4.24 se convirtieron los volúmenes de todos los tamaños de flóculos a materia, y con ello se realizaron las granulometrías de los experimentos que se dan en la Figura 4.26.



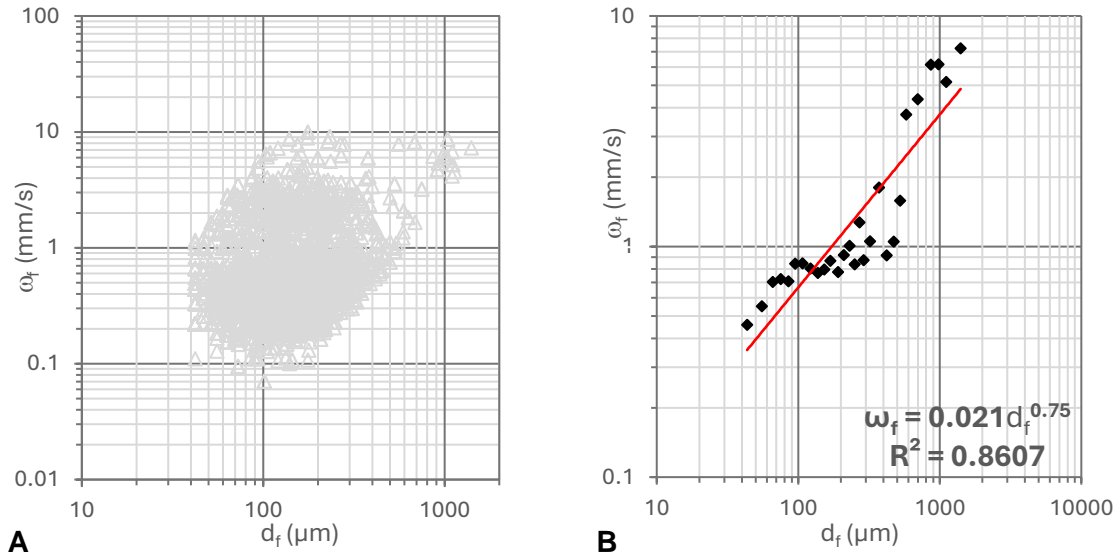
**Figura 4.26.** Análisis de diámetros característicos en los experimentos de floculación del río Usumacinta. A)  $d_{50}$ , B)  $d_{75}$  y C)  $d_{90}$

En el experimento  $u_* = 3.2$  cm/s, los diámetros característicos tuvieron tasa de agregación lenta en los primeros 10 minutos del experimento, mientras que entre 10 – 60 min la tasa de agregación es notablemente más rápida. Para el caso  $u_* = 4.4$  cm/s las condiciones en los diámetros característicos se mantienen entre ellos con una diferencia menor de 5%; en la condición final  $u_* = 6.2$  cm/s, los diámetros característicos crecen desde 0 minutos hasta 60 minutos.

### 4.4.3. Velocidad de caída de los sedimentos del Zarco

En la Figura 4.27A se presenta la nube de puntos de las velocidades de caída calculadas a partir de los experimentos PTV. La dimensión fractal  $F = 1.75$  es el resultado del exponente de la regresión potencial presentada en la Figura 4.27B. La regresión potencial de la Figura 4.27B se propuso para los promedios de velocidad de caída de la nube de puntos de la Figura 4.27A, agrupada en 28 intervalos de tamaños de flóculos. Con esta agrupación se encontró un coeficiente de ajuste  $R^2 = 0.86$ .

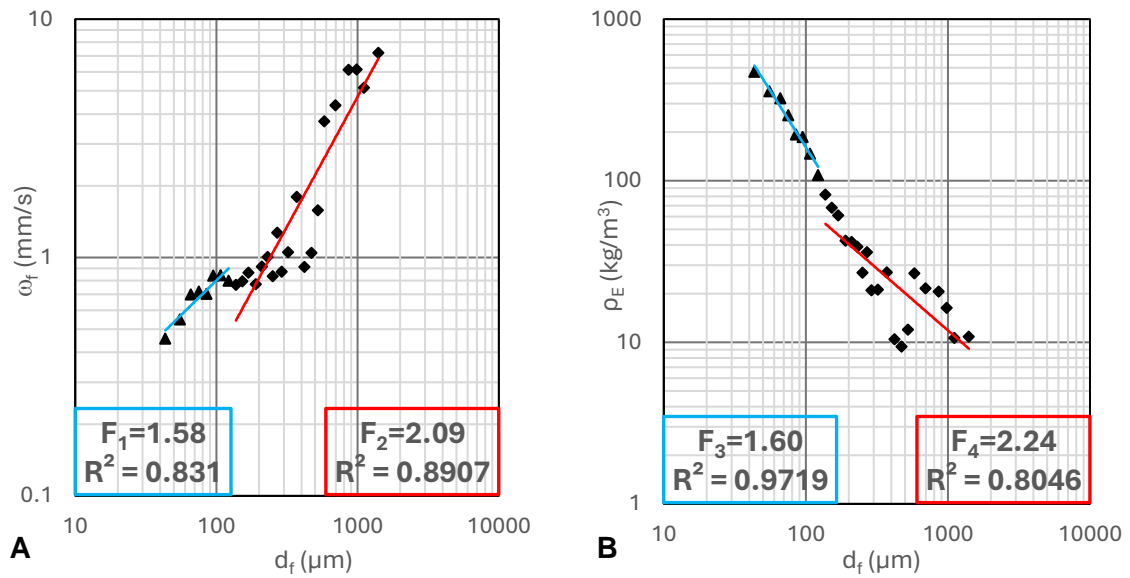
En la Figura 4.27A indica que el rango de tamaños que se encontraron fue de entre  $42 - 1404 \mu\text{m}$  y las velocidades se encontraron entre  $0.07 - 8.86 \text{ mm/s}$ ; mientras que el ajuste por intervalos de la Figura 4.27B obtuvo rangos de diámetros de  $55 - 1404 \mu\text{m}$  y velocidades de entre  $0.55 - 7.23 \text{ mm/s}$ .



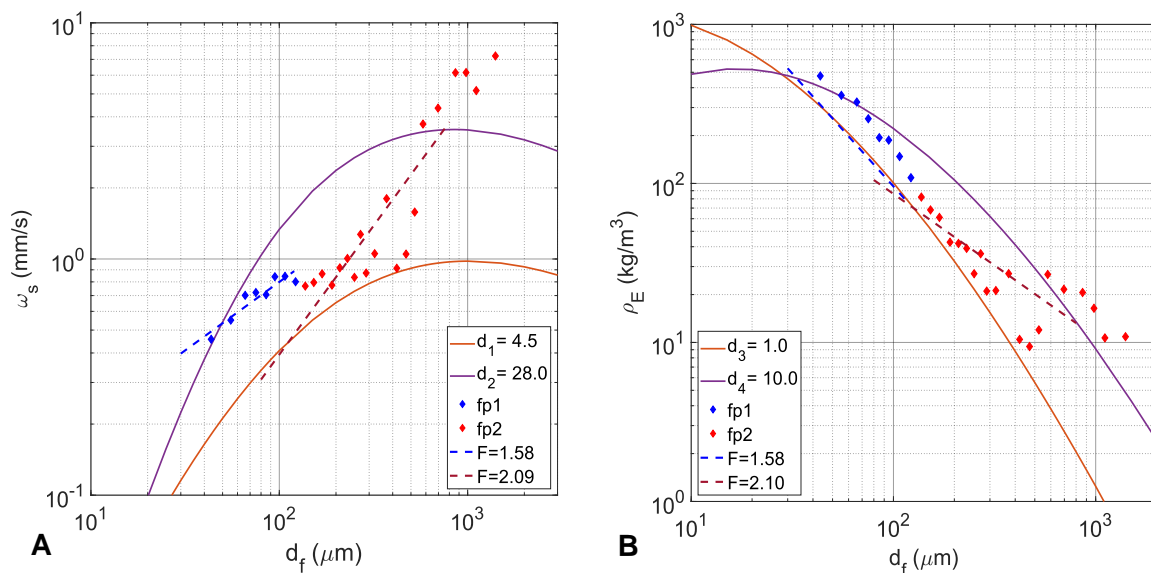
**Figura 4.27.** Velocidad de caída del Zarco. A) Datos de velocidad de caída de y B) Velocidad de caída promedio para 28 intervalos de tamaño de partícula y dimensión fractal  $F = 1.75$

La Figura 4.29 muestra la misma la agrupación de partículas que se presenta en la Figura 4.27. La Figura 4.29A es la relación entre tamaño de flóculo y velocidad de caída y, la Figura 4.29B es la relación entre diámetro de flóculos y exceso de densidad del flóculo. En cada uno ellos se muestra el mejor ajuste empírico de la dimensión fractal para dos grupos de flóculos representadas con líneas punteadas, también se presentan los mejores ajustes para dos tamaños de partículas primarias de acuerdo con (Khelifa & Hill, 2006).

La Figura 4.29A y Figura 4.29B nos proporciona la siguiente información: posible rango de dimensión fractal  $F$  de entre [1.39 – 2.77] y [1.51 – 2.70], y posibles tamaños de partícula primaria  $d_f$  de entre [14.0 – 30.0] $\mu\text{m}$  y [4.0 – 8.0] $\mu\text{m}$ .



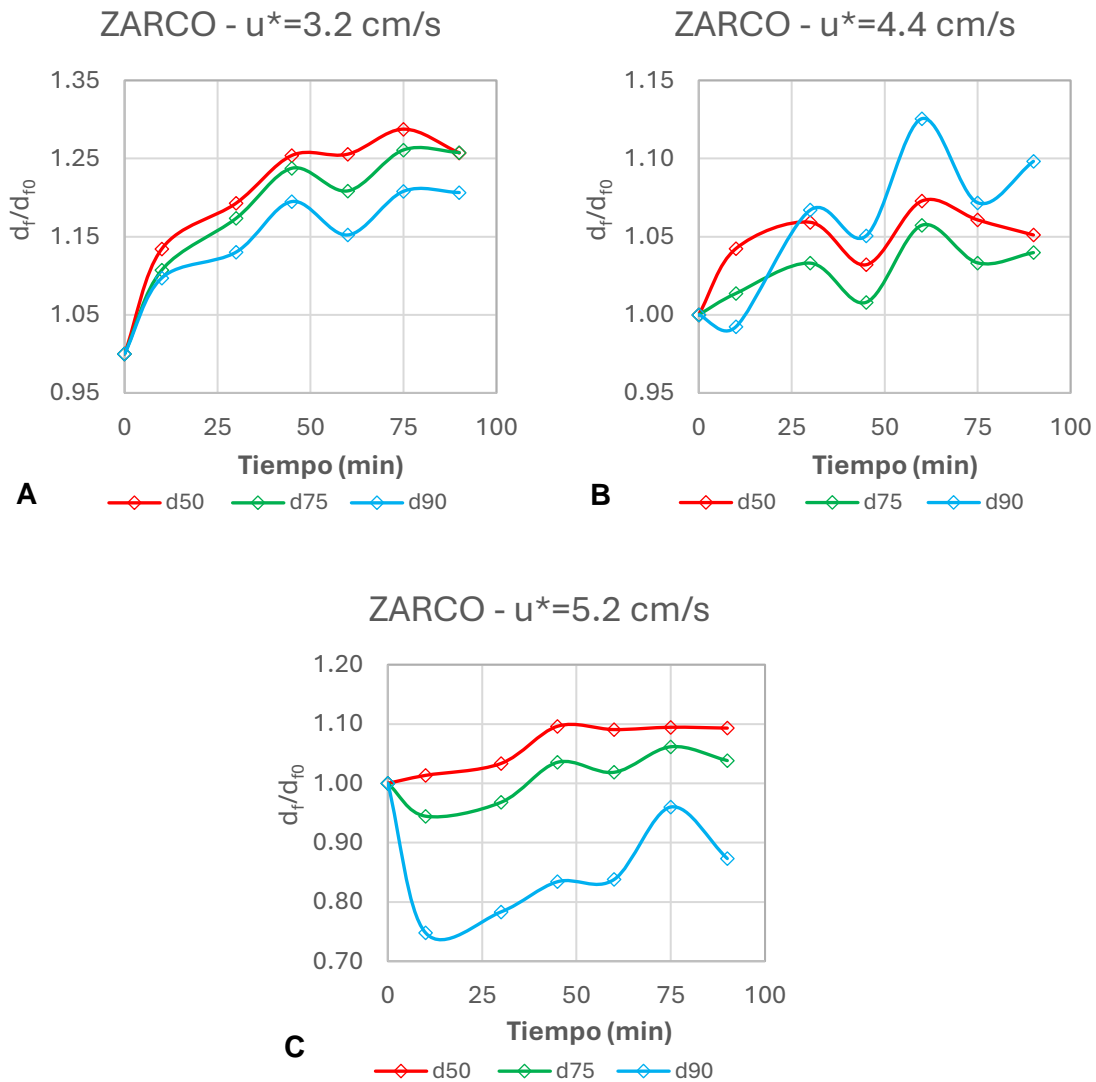
**Figura 4.28.** Dimensión fractal empírica de muestra del Zarco para serie de datos de  $d_f$  dividida en dos grupos. A)  $d_f$  versus  $\omega_f$  y B)  $d_f$  versus  $\Delta\rho$



**Figura 4.29.** Dimensión fractal empírica de datos experimentales y tamaño de partícula primaria de acuerdo con modelo de Khelifa & Hill (2006) de muestra del Zarco. A) De acuerdo con datos de velocidad de caída y B) De acuerdo con datos de densidad efectiva



Con las regresiones presentadas en la Figura 4.28 se convirtieron los volúmenes de todos los tamaños de flóculos a materia, y con ello se realizaron las granulometrías de los experimentos que se dan en la Figura 4.30.



**Figura 4.30.** Análisis de diámetros característicos en los experimentos de floculación del Zarco. A)  $d_{50}$ , B)  $d_{75}$  y C)  $d_{90}$

Durante el experimento  $u_* = 3.2$  cm/s, los diámetros característicos tuvieron tasa de agregación lenta en los primeros 10 minutos del experimento, mientras que entre 10 – 60 min la tasa de agregación es notablemente más rápida. Para el caso  $u_* = 4.4$  cm/s las condiciones en los diámetros característicos se mantienen entre ellos con una diferencia menor de 5%; en la condición final  $u_* = 6.2$  cm/s, los diámetros característicos crecen

desde 0 minutos hasta 60 minutos. En todos los casos el máximo  $d_{90}$  fue de 209  $\mu\text{m}$  a los 75 minutos para  $u_* = 3.2 \text{ cm/s}$ .

En la Tabla 4.12 se resumen las características de los flóculos que se obtuvieron en los experimentos de velocidad de caída.

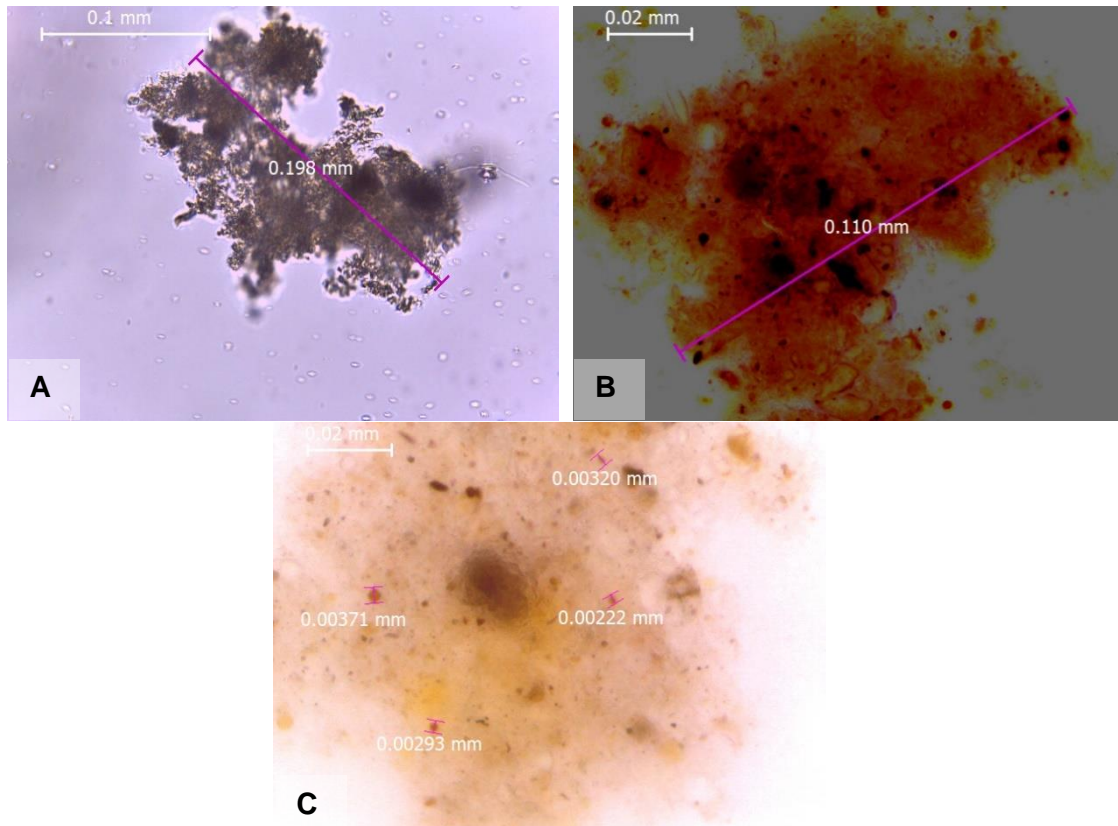
**Tabla 4.12.** Resumen de dimensión fractal  $F$  y tamaño de partícula primaria  $d_p$  de los sedimentos del río Grijalva, Usumacinta y centro acuícola el Zarco

Sedimento	$F$	$d_{fc}$ $\mu\text{m}$	Dimensión fractal - $\omega_f$		Dimensión fractal - $\rho_E$		Partícula primaria - $\omega_f$		Partícula primaria - $\rho_E$	
			$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$d_{p1}$	$d_{p2}$	$d_{p3}$	$d_{p4}$
			Grijalva	1.43	87.2	1.68	1.54	1.69	1.58	4.5
Usumacinta	1.69	108.1	2.68	1.38	2.70	1.51	14.0	30.0	4.0	8.0
Zarco	1.75	137.4	1.58	2.09	1.60	2.24	4.5	28.0	1.0	10.0

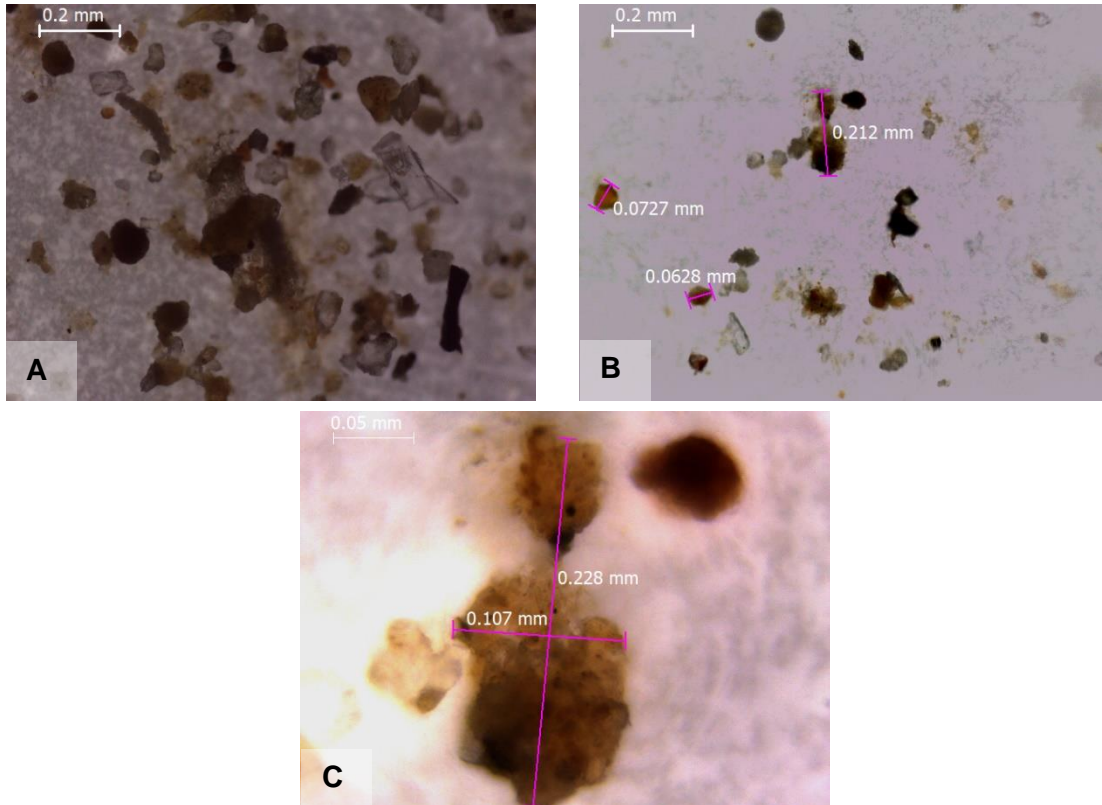
$d_{fc}$  es el tamaño de flóculo límite entre el comportamiento viscoso e inercial

#### 4.5. Identificación de materia orgánica por medio de microscopía

Debido al equipo óptico con el que se realizó el proyecto, las fotografías tomadas a las muestras del río Grijalva (Figura 4.31) y del río Usumacinta (Figura 4.32) no muestran con facilidad los elementos de su composición, por lo que no es posible identificar MO o componentes inorgánicos por este método. Solo es posible distinguir diversos componentes debido a cambios de color en su composición.



**Figura 4.31.** Sedimentos del río Grijalva. A) Capturadas con objetivo 40x, B) Tamaños de flóculos capturadas con objetivo 100x, C) Tamaño de pequeñas partículas en flóculo capturadas con objetivo 100x

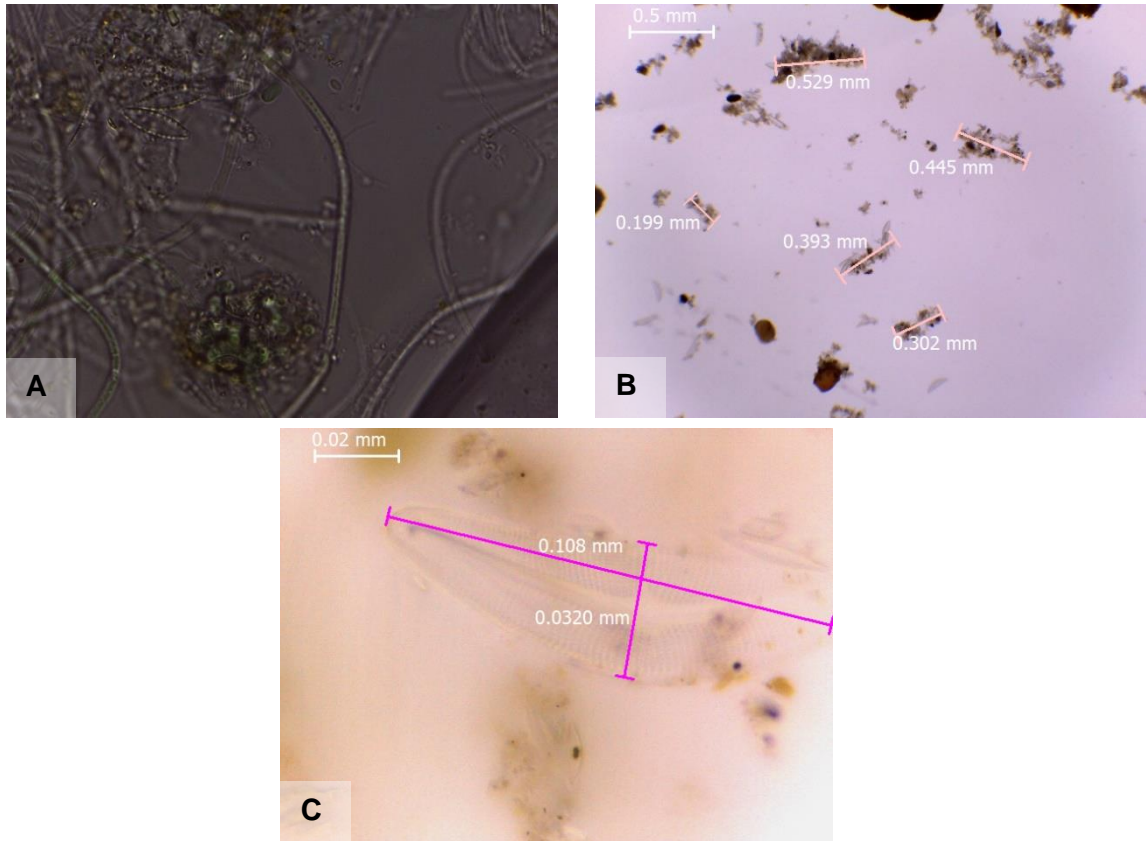


**Figura 4.32.** Sedimentos del río Usumacinta. A) Capturadas con objetivo 40x, B) Capturadas con objetivo 40x y, C) Capturadas con objetivo 100x

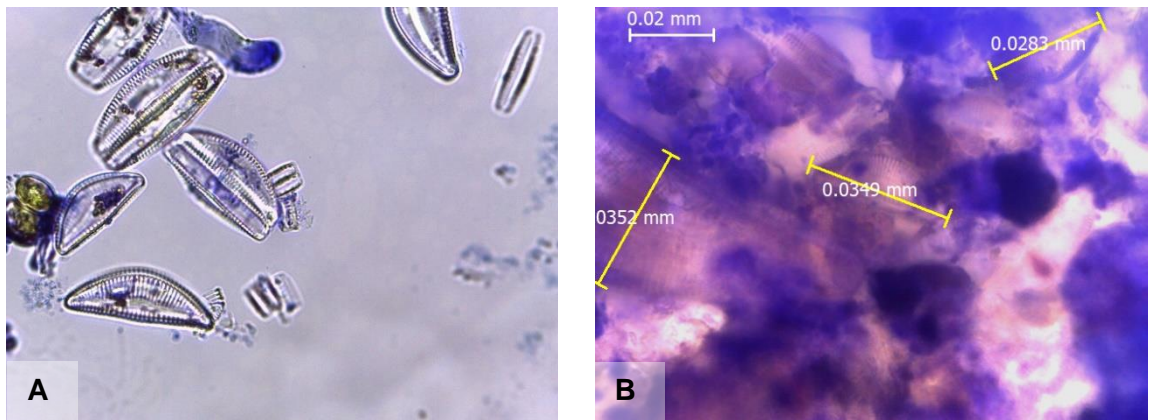
Múltiples fotos fueron tomadas de las muestras provenientes del centro acuícola el Zarco. En ellas se observan diatomeas probablemente de la clase Bacillariophyceae, genero *Cymbella* y *Amphora*, entre otros, microalgas, agregados inorgánicos como arcillas.

En la Figura 4.33, se muestran fotografías de diatomeas sin el apoyo de ninguna tinción. La Figura 4.33A, es el resultado de la aplicación de una gota de muestra directamente sobre un portaobjetos y cubierta con un cubreobjetos; la Figura 4.34B y Figura 4.34C son fotografías de 10 ml de muestra filtrados en un filtro de nylon tamaño de poro 0.45  $\mu\text{m}$ .

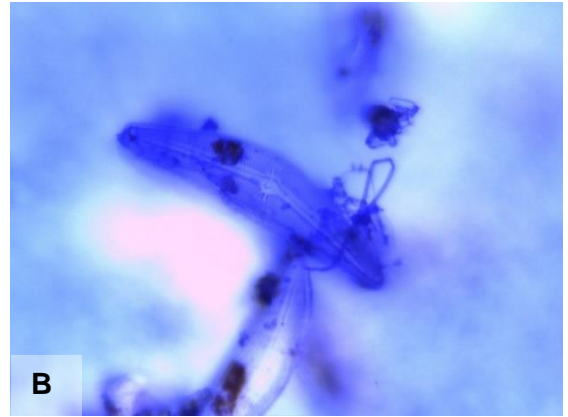
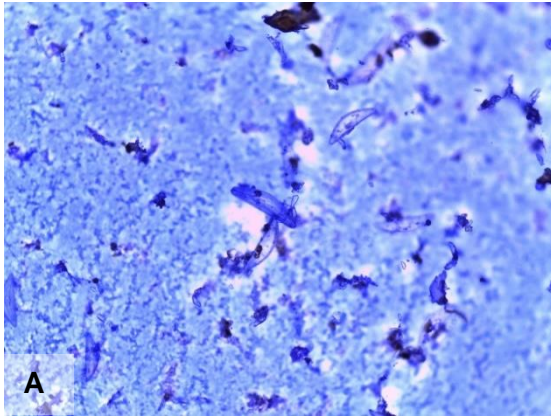
En las Figura 4.34, Figura 4.35, Figura 4.36, Figura 4.37 y Figura 4.38, se ilustran poblaciones de diatomeas teñidas con azul alcían, además de exponerse cuerpos de SPE libres, siendo estas últimas observadas gracias a la tinción.



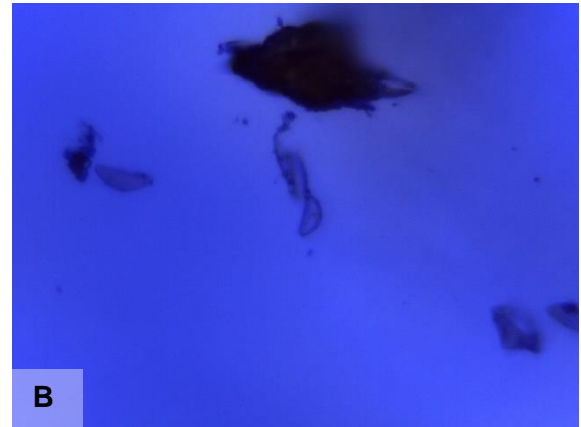
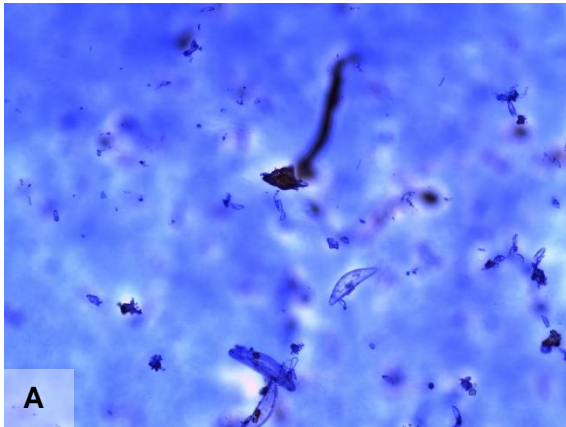
**Figura 4.33.** Fotografías de diatomeas. A) Muestra de agua “El Zarco” capturadas con objetivo 10x, B) Filtro con tamaño de poro 0.45  $\mu\text{m}$  capturadas con objetivo 10x y, C) Enfoque de una diatomea capturadas con objetivo 100x



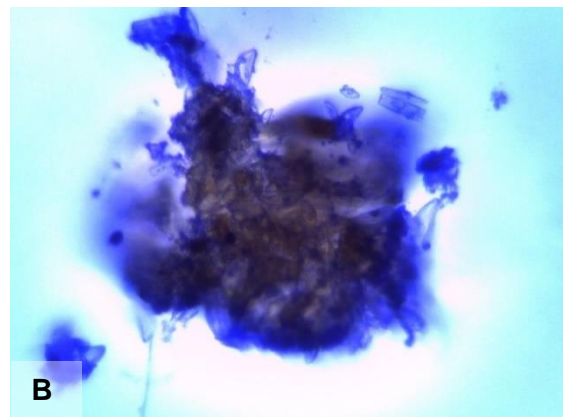
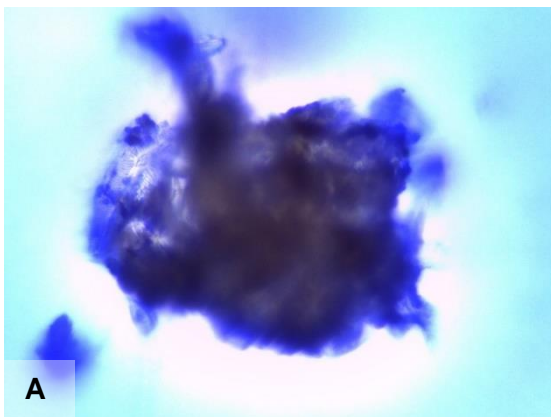
**Figura 4.34.** Diatomeas en muestra de agua el Zarco. A) Distintos géneros de diatomeas (posiblemente Amphora y Cymbella) capturadas con objetivo 40x y, B) Agregado de diatomeas capturadas con objetivo 100x



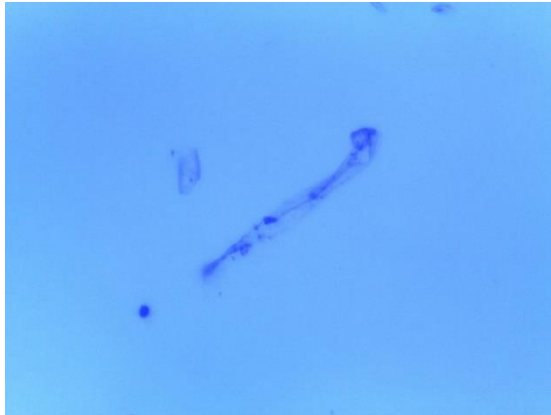
**Figura 4.35.** Enfoque de diatomea con residuos a su alrededor, posiblemente SPE. A) Identificación de diatomea capturadas con objetivo 10x, B) Enfoque de diatomea capturadas con objetivo 100x



**Figura 4.36.** Sustancia polimérica extracelular A) observada en el microscopio capturadas con objetivo 10x. B) Capturadas con objetivo 40x

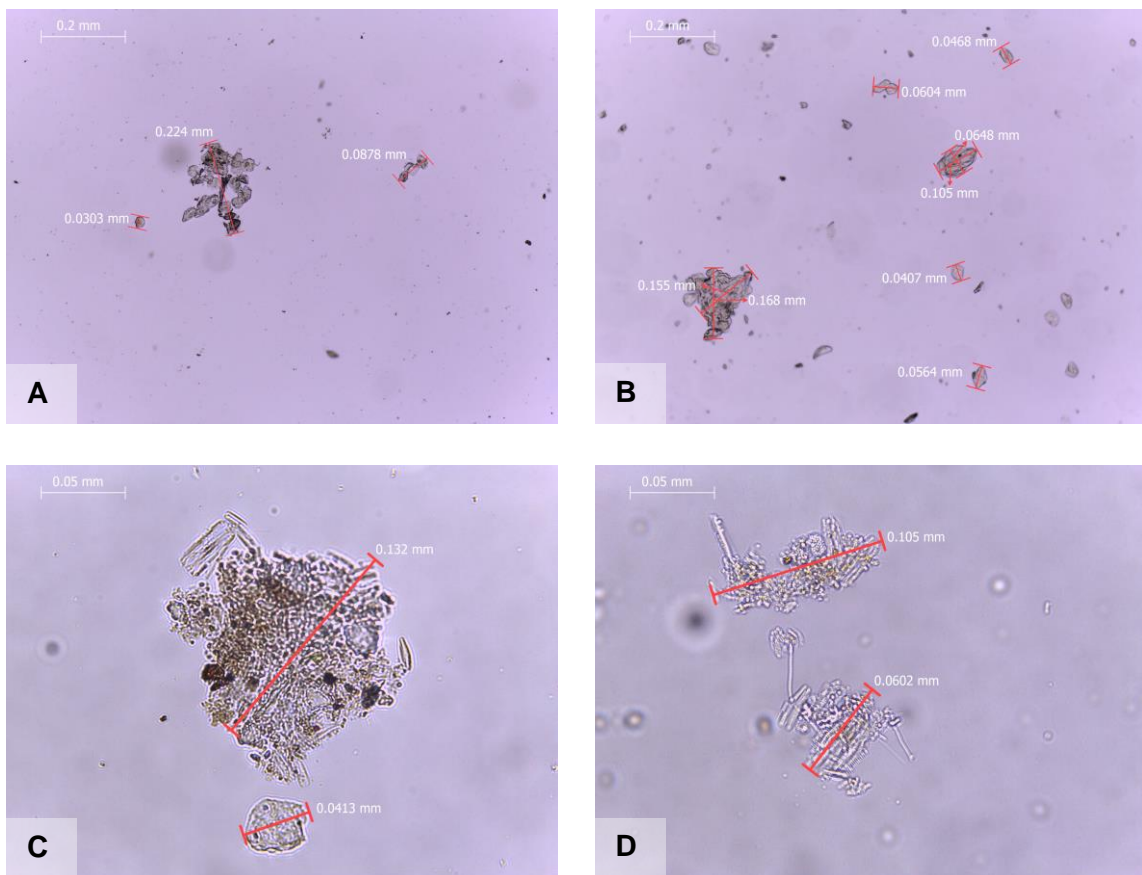


**Figura 4.37.** Diferentes enfoques de un agregado observada en el microscopio capturadas con objetivo 40x



**Figura 4.38.** Sustancias poliméricas extracelulares teñida con tinción azul alcian capturadas con objetivo 100x

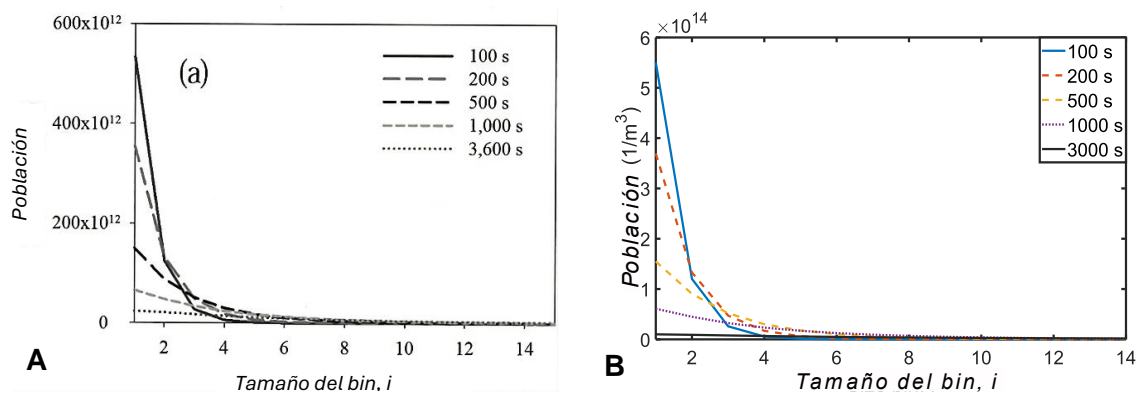
Finalmente, la fotografías A, B, C y D de la Figura 4.39, se realizaron con el fin de medir los diámetros de distintos flóculos, además de poder visualizar las distintas formas que pueden tomar estos agregados. Se puede apreciar en la Figura 4.39 D) que hay flóculos de formas irregulares alargadas y con pequeñas extremidades a su alrededor.



**Figura 4.39.** Flóculos de la muestra del zarco. A), B) Medición de diámetros característicos a partir de fotografía capturadas con objetivo 40x. C), D) Medición de diámetros característicos capturadas con objetivo 100x

#### 4.6. Ecuación de balance de población

Efectuada la parte experimental del proyecto, se intentó validar el proceso de floculación observado en el CRA para las muestras en la PBE (ecuación ( 2.27 )). Para realizar la validación matemática de acuerdo con el método de solución que presenta Furukawa & Watkins (2012), primero se programó el método de solución en Matlab, integrándose los datos del experimento que el artículo refiere, para verificar que los resultados presentados en su investigación fueran iguales a los obtenidos en nuestra programación. La Figura 4.40A muestra los resultados expuestos por Furukawa & Watkins (2012) y la Figura 4.40B los resultados que se reprodujeron utilizando el código desarrollado en este trabajo. En esta figura se visualiza que los resultados que se obtuvieron de la programación propia son iguales a los reportados en el artículo y que por tanto es susceptible de cambios para reproducir las condiciones de nuestros experimentos.



**Figura 4.40.** Evolución temporal de la distribución de población de flóculos A) Resultados presentados por Furukawa & Watkins (2012) y, B) Resultados del algoritmo desarrollado en este proyecto

La relación entre el radio de la partícula y el número de partículas primarias que conforman el flóculo está dada por la ecuación ( 2.24 ). Esta ecuación es fundamental para el cálculo de los coeficientes de la ecuación de balance de población y el número de bins que conformaran la ecuación, por lo tanto, causa efectos grandes en los resultados.

Se realizó un análisis de sensibilidad de la ecuación ( 2.24 ) con datos arbitrarios, con la intención de concluir cuales variables son las que más repercuten en el resultado (Figura 4.41). Se calculó  $r_h$  de acuerdo con el número de bin y variando la dimensión fractal, el coeficiente  $k_f$  y el radio de partícula primaria  $r_p$ . Los valores base (arbitrarios) del análisis son  $r_p = 3 \mu m$ ,  $k_f = 1.81$  y  $F = 1.43$ .



Se concluyó que la variable que más afecta la ecuación ( 2.24 ), es la dimensión fractal  $F$ , pues ésta es concluyente en el número de partículas que conforman un flóculo, es decir, que tan porosos son los flóculos, y, por tanto, sí para una dimensión fractal  $F_1$  se necesitan  $n_1$  número de bins para alcanzar un diámetro  $d_f$ , para una dimensión fractal  $F_2 > F_1$ , se necesitaran  $n_2 > n_1$  para alcanzar el mismo diámetro  $d_f$ .

La dimensión fractal  $F$  y el tamaño de partícula primaria  $d_p$  que utilizó Furukawa & Watkins (2012) fueron de  $F = 2.05$  y  $d_p = 100 \text{ nm}$ , mientras que las dimensiones fractales y tamaños de partícula primaria que se utilizarían en este proyecto se encuentran en la Tabla 4.12.

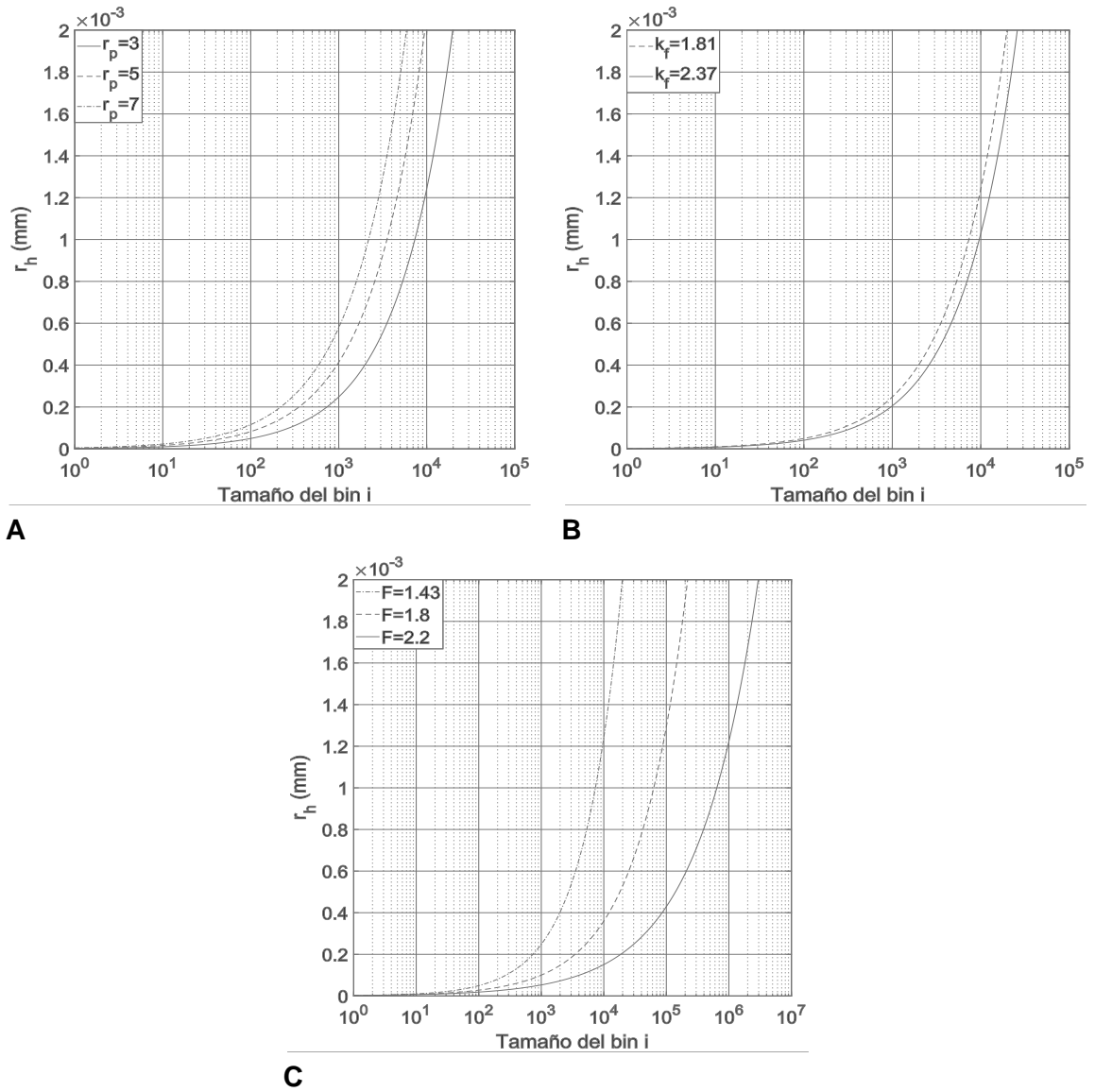
Después de modificar la ecuación ( 2.27 ) con las expresiones propuestas en la Tabla 3.7 y valores de la Tabla 4.12, se calculó el número de partículas primarias iniciales para cada muestra con la expresión ( 4.1 ).

$$n_1 = \frac{SST}{\rho_{SST} * V_{d_p}} \quad (4.1)$$

donde  $V_{d_p}$  = volumen de una partícula primaria

Con todas las condiciones iniciales medidas y calculadas para implementar la PBE se ejecutó el algoritmo, esperando en primera instancia encontrar resultados iguales a las primeras observaciones experimentales reportadas en las gráficas Figura 4.10B, Figura 4.13B y Figura 4.16B.

Lo anterior vio entorpecido por el número de bins que debían resolverse de acuerdo con los diámetros de partícula primaria, la dimensión fractal y el tamaño mínimo de partícula que permite obtener la resolución de la cámara con la que se obtienen las imágenes de las partículas (30  $\mu\text{m}$  aproximadamente). El tiempo de procesamiento para hacer tal número de cálculos (40 min aproximadamente) resultó impráctico para poder dar seguimiento y adecuar el código a nuestra investigación y por tanto se descartó seguir trabajando con el modelo.



**Figura 4.41.** Análisis de sensibilidad de variables de la ecuación (3.8). A) Radio de partícula primaria variable B) Coeficiente  $k_f$  variable y C) Dimensión fractal variable

# Capítulo 5. Análisis

## de resultados

### 5.1. Fracciones orgánicas

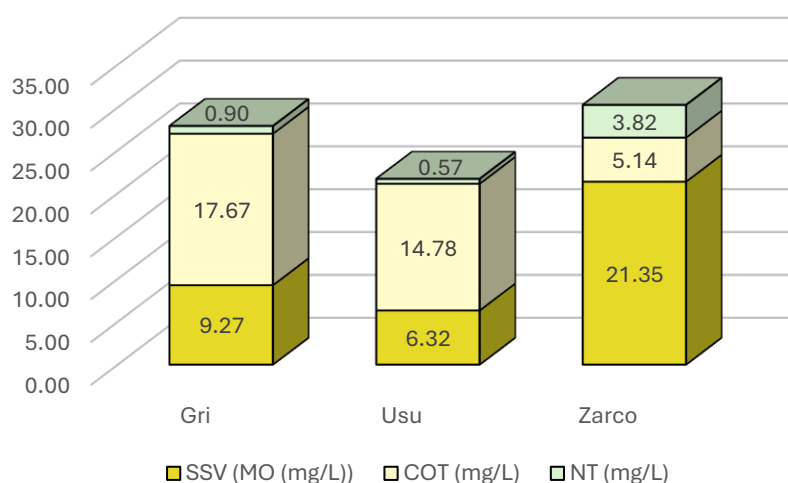
En la Figura 5.1 se presenta el contenido de las FO que se midieron en cada prueba que se realizaron a las muestras. La leyenda SSV (MOP (mg/L)), se refiere al contenido de MOP, cuyos resultados se presentan en la sección 4.1.1. La muestra que tiene mayor contenido de MOP fue el del Zarco con 21.34 mg/L, seguida del río Grijalva con 9.26 mg/L y Usumacinta con 6.32 mg/L. Esta condición se atribuye al origen de los sedimentos, en el caso del Zarco es una combinación entre truchas sus residuos, sus secreciones, residuos del alimento, mientras que los correspondiente a los ríos Usumacinta y Grijalva contienen menos MOP, posiblemente porque el origen de su MO sea erosión de los suelos y desechos de agua municipales, pero el volumen donde se diluyen estos componentes es mucho mayor.

La Figura 5.1 muestra también el COT y NT disueltos, parámetros que fueron medidos por el analizador COT (4.1.2). La muestra con mayor contenido de COT fue el Grijalva con 17.67 mg/L, seguido del río Usumacinta con 14.78 mg/L; el sedimento con menos COT fue el Zarco con 5.14 mg/L; acerca del NT, el que contuvo más fue el Zarco 3.82 mg/L, seguido del río Grijalva con 0.90 mg/L y por el Usumacinta con 0.57 mg/L. El Zarco contiene 4.2 más veces nitrógeno que el Grijalva, y 6.7 veces más que el río Usumacinta debido al ambiente acuático con contenido de secreciones de los peces que promueve la formación de algas.

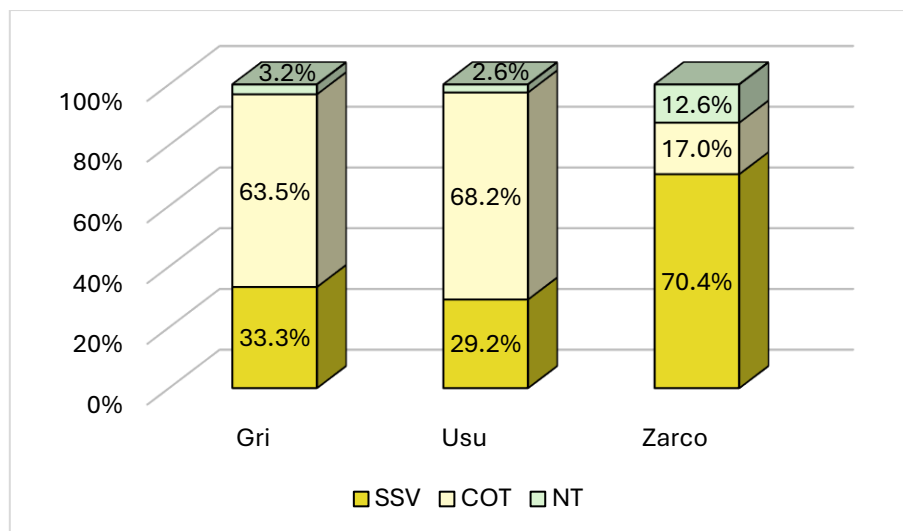
En cuanto a las mediciones de COD, Valero-Camargo & Torres-Cruz (1999), menciona que, del carbono orgánico natural en aguas superficiales, solo un máximo de 10% corresponde a COP; sumado a esto Ho et al. (2022) y Valero-Camargo & Torres-Cruz (1999) exponen que en los ríos las sustancias húmicas son el componente mayoritario del COD, componen entre el 50% - 80% del total del COD. Aunque nuestras muestras se contienen más de 10 % de MOP, como mostrado en Figura 5.2, donde para el río Grijalva el MOP es 28.3%, y para el río Usumacinta es de 23.7%, debe considerarse que en la actualidad en estos ríos se vierten residuos producto de actividad antropogénica.

La medición de MOP del Zarco, que en términos relativos es 70.4%, se relaciona con las imágenes obtenidas en la sección 4.5, donde se visualiza que las diatomeas y microalgas están presentes en todas partes, siendo estas constituyentes importantes del carbono orgánico particulado.

En resumen, las relaciones porcentuales que se presentan en la Figura 5.2, en los ríos Grijalva y Usumacinta no corresponden fielmente con lo que nos dicta la literatura, pero se deben tener varias consideraciones cuando se revisan estos datos: el variado origen de los sedimentos que se transportan en el río debido a actividades antropogénicas y, que la medición de MOP no incluye solo carbono orgánico, sino que también incluye nitrógeno, fósforo, potasio, entre otros.



**Figura 5.1.** Contenido de sólidos suspendidos volátiles (MOP) carbono orgánico total disuelto y nitrógeno total disuelto



**Figura 5.2.** Contenido porcentual de sólidos suspendidos volátiles (materia orgánica particulada), carbono orgánico total (disuelto) y nitrógeno total (disuelto)

Adicionalmente a lo ya comentado, también se debe tener en consideración los resultados expuestos en la Figura 4.1, donde el río Grijalva tiene mayor fracción de MOP respecto al contenido de SST (26.25%) que el río Usumacinta, que fue la muestra que tuvo menor fracción de MOP respecto a los SST (9.97%) (Kahl et al., 2008), y la muestra del Zarco tiene una composición de MOP siendo casi la mitad del total de los SST (48.79%).

No fue posible diferenciar elementos orgánicos o inorgánicos en las muestras de los ríos Grijalva y Usumacinta con las fotografías tomadas en el microscopio óptico. Sin embargo, la enorme diferencia en la MOP entre ambas puede atribuirse a alteraciones antropogénicas en los cauces. Las muestras del río Grijalva fueron tomadas aguas abajo de la construcción de 4 presas hidroeléctricas, entre ellas, las dos más grandes de México, La Angostura y Malpaso, además de que el río cruza a través de las ciudades de Villahermosa, Tabasco, y de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, pudiendo ser un cuerpo receptor de aguas residuales y de aguas de uso agropecuario; mientras que, en el cauce del río Usumacinta hay menos asentamientos humanos importantes, y por lo tanto, menor alteración antrópica.

## 5.2. Floculación, densidad y velocidad de caída de las muestras

El análisis siguiente tiene como base la granulometría elaborada con los resultados del apartado 4.4. Se elaboraron gráficas de  $d_c/d_{ci}$  donde  $d_c$  = diámetro característico y  $d_{ci}$  = diámetro característico inicial, para observar la agregación o ruptura relativa. Los valores de los diámetros característicos se encuentran en el Anexo 2: Diámetros

característicos  $d_{50}$ ,  $d_{75}$  y  $d_{90}$  de los flóculos de los ríos Grijalva y Usumacinta y del Centro Acuícola El Zarco.

**Escenario 1 -  $u_{*1} = 3.2 \text{ cm/s}$ ,  $G_1 = 82 \text{ s}^{-1}$**

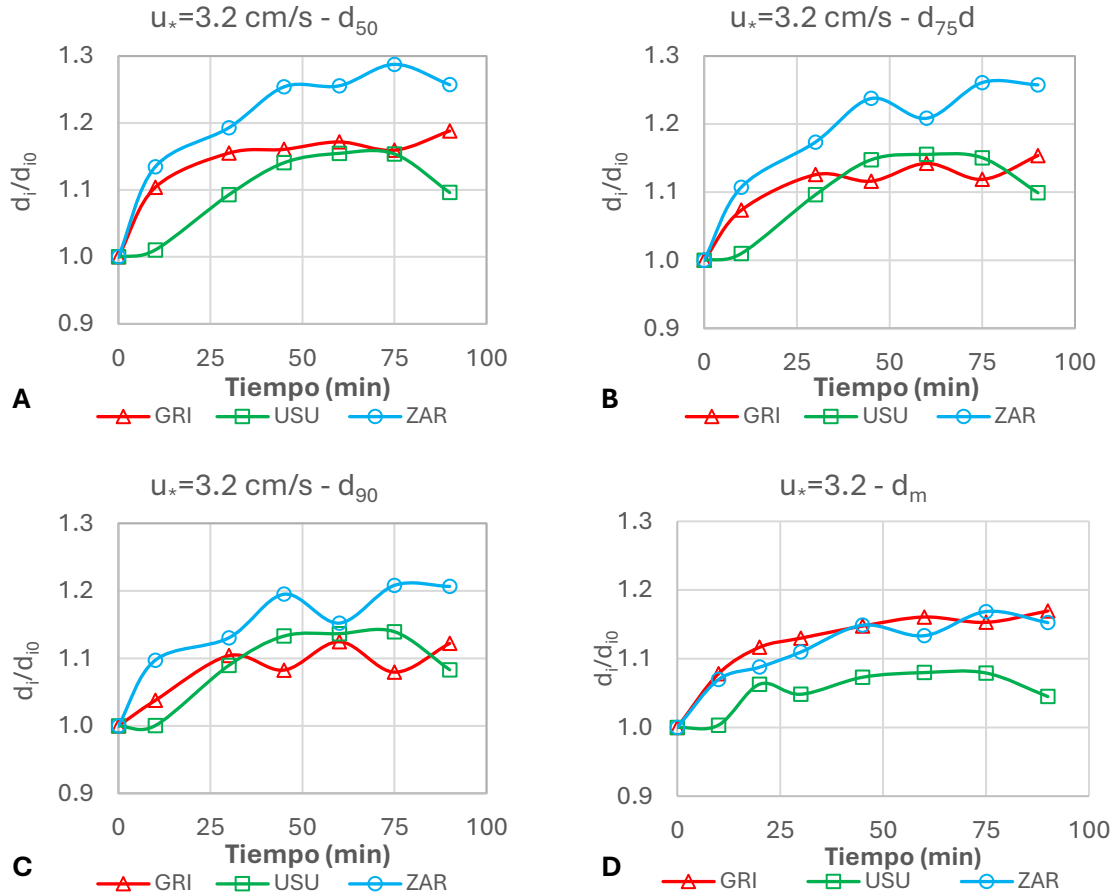
Esta condición hidrodinámica promueve la agregación de las 3 muestras (Figura 5.3), así lo revelan sus comportamientos para los diámetros característicos  $d_{50}$ ,  $d_{75}$  y  $d_{90}$  y diámetro medio  $d_m$ .

Los sedimentos del Zarco son los que tuvieron cambios más grandes; para el diámetro característico  $d_{50}$  la agregación se mantiene constante hasta los 60 minutos, mientras que para  $d_{75}$  y  $d_{90}$  la agregación es más rápida para los primeros 30 minutos, y más lenta la agregación hasta el minuto 60. A diferencia del análisis de diámetros característicos, el análisis con diámetros medio demuestra incrementos menos notorios, pero tendencia similar a  $d_{75}$  y  $d_{90}$ .

Al igual que en los sedimentos del Zarco, los sedimentos del río Grijalva y Usumacinta, presentan agregación la mayor parte del tiempo, sin embargo, deben analizarse por separado ya que presentaron comportamientos distintos en sus mecanismos de agregación y de ruptura.

En el caso del Grijalva para sus diámetros característicos mantienen una tendencia a la agregación durante los primeros 30 minutos, después varía en menor medida, también se demuestra como para diámetros pequeños  $d_{50}$  los tamaños cambian en un máximo de 18% y a partir del minuto 30 por lo menos 15%; para  $d_{75}$  el máximo cambio de tamaño es de 15% y a partir del minuto 30 por lo menos 11%; para  $d_{90}$  a partir del minuto 30 los cambios en tamaño son solo de entre 10 y 11%.

En el río Usumacinta la relación entre tamaños iniciales y máximos tamaños prevalece en los 3 diámetros característicos y es alrededor de 15%; a diferencia de este comportamiento cuando se analizó por diámetros promedio para el tiempo 20 minutos el dato es discordante, ya que la tendencia es parecida a la de diámetros característicos, con la diferencia de que la máxima relación  $d_i/d_{i0}$  es 8%.



**Figura 5.3.** Diámetros característicos de las 3 muestras para condición hidrodinámica  $u_* = 3.2$  cm/s. A)  $d_i = d_{50}$ , B)  $d_i = d_{75}$ , C)  $d_i = d_{90}$  y D)  $d_i = d_m$ . Muestra del río Grijalva MOP=26.25% y COD=17.67mg/L; muestra del río Usumacinta MOP=9.97 y COD=14.78 mg/L; y muestra del Zarco MOP=48.79% y COD=5.14 mg/L.

Los flóculos del Zarco contienen mayor  $MOP = SSV/SST = 48.79\%$  respecto a los ríos, por lo que mostraron la mayor agregación. Con la evidencia anterior, es claro que la relación entre MOP y la agregación de partículas es fuerte en este experimento, y que la fuerza hidrodinámica no fue determinante para romper los flóculos. Probablemente las SPE son las responsables de la alta eficiencia de adhesión para formar flóculos biominerales; esto puede ser resultado de que las diatomeas exudan al exterior y alrededor de su cuerpo sustancias aglutinantes, como las PET (Engel, 2000; Passow, 2002).

Por otro lado, los flóculos del río Grijalva presentaron más agregación que los del río Usumacinta. Se puede relacionar la mayor agregación de las muestras del río Grijalva con su mayor contenido de MOP. Por otra parte, también parece que aunque el contenido de COD es similar en ambos ríos, es probable que debido al mayor desarrollo humano en torno con el río Grijalva (desarrollo agropecuario, paso a través de la ciudad e Villahermosa y

Tuxtla Gutiérrez y presas construidas en su cauce y), el COD de la muestra del río Grijalva podría contener mayor cantidad de ácidos fúlvicos acuagénicos, los cuales son producidos por microorganismos desarrollados debido a mayores tiempos de retención generado por el represamiento de los cauces, y podrían mejorar la agregación de partículas (Huber et al., 2011; Lee et al., 2017).

**Escenario 2 -  $u_{*2} = 4.4 \text{ cm/s}$ ,  $G_2 = 124 \text{ s}^{-1}$**

La condición hidrodinámica  $u_* = 4.2 \text{ cm/s}$  aplicada a las muestras revela desempeños diferentes para cada sedimento con respecto a la condición  $u_* = 3.2 \text{ cm/s}$  (Figura 5.4). El análisis de diámetros característicos  $d_{50}$ ,  $d_{75}$ ,  $d_{90}$  y  $d_m$ , permite establecer la interacción de la MO con la agregación cuando se aplica mayor turbulencia.

Los flóculos del Grijalva presentaron menor tasa de agregación que los del río Usumacinta, condición contrario con la condición  $u = 3.2 \text{ cm/s}$ , este comportamiento podría deberse a su alta porosidad, demostrado con los resultados de dimensión fractal  $F = 1.43$ , mientras para el Usumacinta  $F = 1.69$ ; también, es evidente que está condición de porosidad se debió principalmente al contenido de MOP, que resulto en flóculos más laxos.

La muestra del río Grijalva  $d_{50}$  se desagregan a partir del minuto 10 mientras y recuperan poco tamaño en el tiempo restante en un proceso que parece más de estabilización, para el diámetro  $d_{75}$  también se presenta ruptura a partir del minuto 10 y de igual manera parece variar alrededor de un tamaño estable, por último,  $d_{90}$  se caracterizó por mostrar mucha variabilidad, tanto en aumento de tamaño como en disminución.

El desempeño del río Usumacinta es muy estable en los casos  $d_{50}$ ,  $d_{75}$  y  $d_{90}$ , obteniendo menos de 5% de diferencia en tamaño inicial. Las partículas que más se agregaron son las  $d_{50}$  y las que tendieron a desagregarse en mayor medida son las  $d_{90}$ .

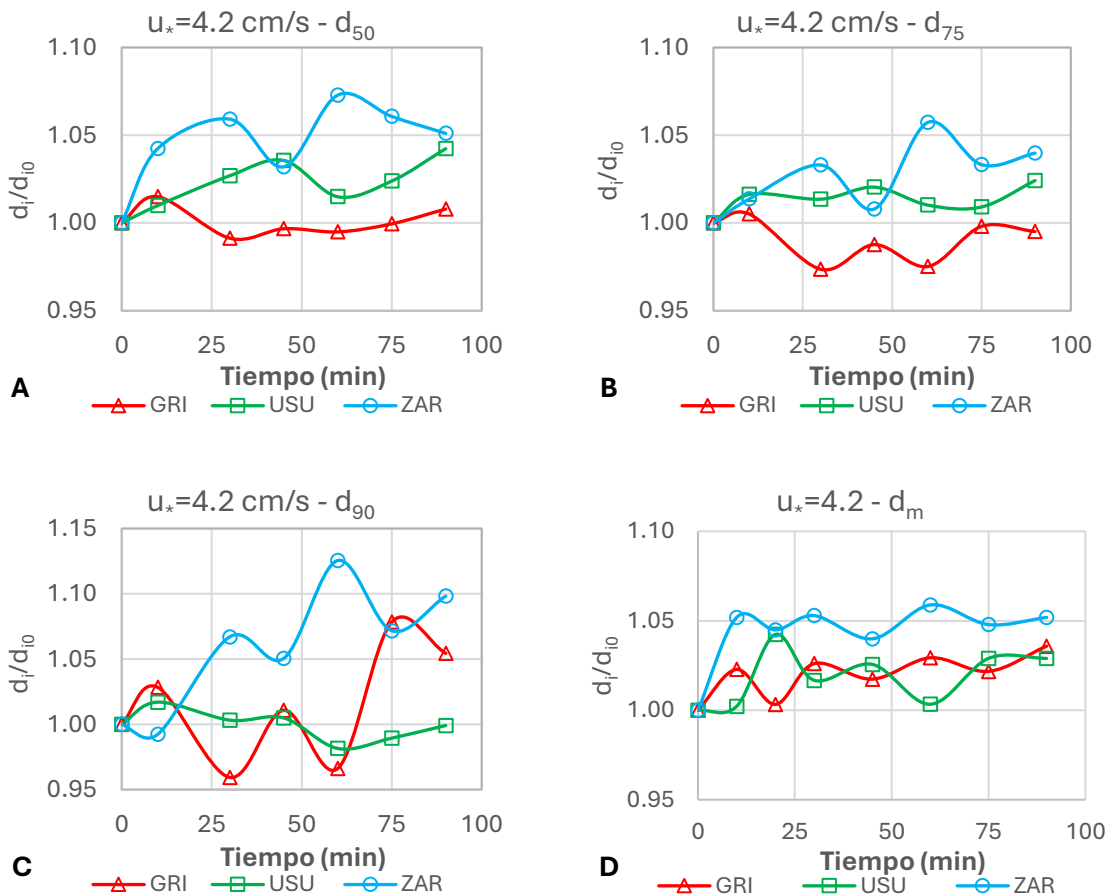
Al igual que en la condición  $u_* = 3.2 \text{ cm/s}$ , los sedimentos del Zarco muestran mejor desempeño para aumentar su tamaño, seguido por los sedimentos del río Usumacinta y del Grijalva. Bajo esta condición hidrodinámica es claro que el comportamiento de la agregación de las muestras de los ríos cambio con respecto a la combinación  $u_* = 3.2 \text{ cm/s}$  y  $G = 84 \text{ s}^{-1}$ .

Fettweis et al. (2022), sugieren que la MOP tiene relación con la disposición de PET (SPE), y que su presencia o ausencia limita el tamaño máximo de los flóculos, lo cual puede



explicar la mayor agregación de los flóculos del Zarco por sobre los del Grijalva y también los del Usumacinta.

Por otro lado, comparando la agregación mostrada bajo  $u_* = 3.2 \text{ cm/s}$ , es claro que en este experimento las condiciones hidrodinámicas influenciaron en mayor medida el tamaño de los agregados de las tres muestras. Por ejemplo, los flóculos del río Grijalva vieron afectada su capacidad de agregación con la condición hidrodinámica  $u_* = 4.4 \text{ cm/s}$  y sus diámetros característicos se distinguieron por haber decrecido la mayor parte del tiempo; los flóculos del Zarco siguieron mostrando tendencia a la agregación, pero en menor medida respecto a  $u_* = 3.2 \text{ cm/s}$ , donde su máxima capacidad de agregación había sido 28%, y su máxima capacidad de agregación bajo esta condición fue de 12%, es decir, la capacidad de agregación disminuye a medida que la turbulencia aumenta (Tang & Maggi, 2016).

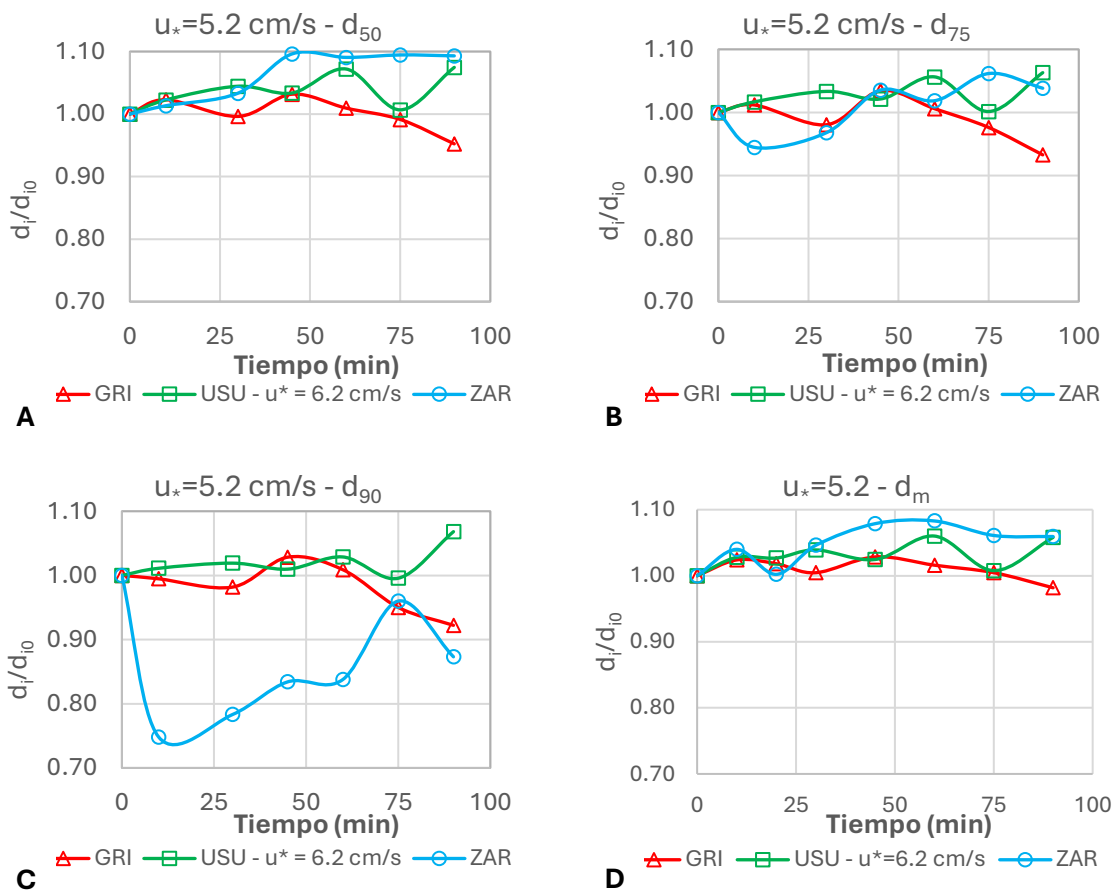


**Figura 5.4.** Diámetros característicos de las 3 muestras para condición hidrodinámica  $u_* = 4.2 \text{ cm/s}$ . A)  $d_i = d_{50}$ , B)  $d_i = d_{75}$ , C)  $d_i = d_{90}$  y D)  $d_i = d_m$ . Muestra del río Grijalva MOP=26.25% y COD=17.67mg/L; muestra del río Usumacinta MOP=9.97 y COD=14.78 mg/L; y muestra del Zarco MOP=48.79% y COD=5.14 mg/L.

**Escenario 3 -  $u_{*3} = 5.2 - 6.2 \text{ cm/s}$ ,  $G_3 = 158 - 194 \text{ s}^{-1}$**

La Figura 5.5 muestra la gran influencia que tuvieron las condiciones hidrodinámicas en el proceso de floculación más allá del contenido de MOP. Para el caso de  $d_{50}$  los sedimentos del río Usumacinta y del centro acuícola el Zarco muestran una mayor tendencia a la agregación, mientras que el comportamiento de los sedimentos del río Grijalva muestra desagregación a partir del minuto 85.

La muestra del río Grijalva presenta tendencia similar a  $d_{50}$  y rompieron a partir del minuto 45 después de una mínima agregación de menos del 5%. Para el caso de  $d_{75}$  se puede apreciar que la muestra del río Usumacinta presenta una conducta similar a  $d_{50}$  con propensión a agregación; los sedimentos del Zarco rompieron durante los primeros 10 minutos y después estabilizaron su comportamiento con tendencia a la agregación.



**Figura 5.5.** Diámetros característicos de las 3 muestras para condición hidrodinámica  $u_* = 5.2 \text{ cm/s}$ . A)  $d_i = d_{50}$ , B)  $d_i = d_{75}$ , C)  $d_i = d_{90}$  y D)  $d_i = d_m$ . Muestra del río Grijalva FO=26.25% y COD=17.67mg/L; muestra del río Usumacinta MOP=9.9% y COD=14.78 mg/L; y muestra del Zarco FO=48.79% y COD=5.14 mg/L.

Los diámetros característicos  $d_{90}$  del río Usumacinta se mantuvieron muy estables en casi todo el experimento con agregación no mayor al 3% y en el minuto 90 una agregación un poco mayor de 7%; los sedimentos del Zarco rompieron más del 25% durante los primeros 10 minutos y después tendieron agregarse hasta el minuto 75 para volver a romperse en los últimos minutos del experimento; finalmente los flóculos del río Grijalva se comportaron igual que sus diámetros  $d_{50}$  y  $d_{75}$ , agregándose menos del 3% durante 45 minutos y después rompiendo durante el resto del tiempo

Al igual que ocurrió en Lee et al. (2017), en estos experimentos cuando la fuerza hidrodinámica más pequeña ( $u_* = 3.2 \text{ cm/s}$  y  $G = 124 \text{ s}^{-1}$ ) actuó sobre las muestras, la relación entre los SST y la MOP jugó el papel más importante en la floculación de sedimentos. Los flóculos del Zarco se agregaron más que los sedimentos de los ríos Grijalva y Usumacinta, revelando que su contenido de MOP, y enorme presencia de diatomeas vistas con el microscopio óptico, así como secreciones de SPE, siendo estas últimas macromoléculas de cadena larga que crean puentes poliméricos entre partículas (Deng et al., 2022).

Por otro lado Lee et al. (2019), encontraron que las sustancias húmicas, como agente de la MO, jugaba el papel más importante en la estabilización, es decir, este actúa más bien como desinhibidor de agregación. Así como en sus estudios, el río Usumacinta, que fue la muestra con mayor COD, presenta el mismo comportamiento en nuestro análisis, ya que para  $d_{50}$ ,  $d_{75}$  y  $d_{90}$  estabilizó los diámetros de los sedimentos. Este fenómeno es explicado por Lee et al. (2017), mostrando que los polímeros de cadena corta se adhieren con mayor facilidad a la superficie de las partículas minerales y dificultan la adherencia de las sustancias poliméricas extracelulares.

Cuando la tasa de corte aumenta en el escenario 2, los tamaños del río Usumacinta rompieron y se agregaron menos el 5% durante todo el experimento, indicando una mayor relación entre el tamaño de los flóculos y la turbulencia. Lo cual resalta en estos resultados es la estabilización en tamaño mucho mayor que el desempeño mostrado por el río Grijalva y el Zarco. Los sedimentos del Zarco muestran los efectos de las sustancias poliméricas y crecen en tamaño, mientras que los sedimentos del río Grijalva (con mayor % de MOP) se rompen en mayor medida que los del río Usumacinta a pesar de su composición similar en MOP y COD.

Cuando se aplicó  $u_* = 5.2 \text{ cm/s}$  y  $G = 158 \text{ s}^{-1}$  a la muestra del Zarco, los tamaños  $d_{90}$  y  $d_{75}$  pierden tamaño rápidamente, mientras que los flóculos  $d_{50}$  y  $d_{75}$  (a partir del minuto 10) aumentan en tamaño, en particular los flóculos  $d_{50}$  aumentan significativamente el tamaño. Chassagne & Safar (2020) y Adachi et al. (2012) determinaron que las cadenas de SPE pueden cambiar de forma debido al cambio en las fuerzas hidrodinámicas, explicando que estas cadenas pueden adsorberse uniformemente en las partículas minerales y por lo tanto formar flóculos más pequeños y densos, dicho mecanismo podría explicar el comportamiento de la muestra del Zarco.

Como ha sido discutido durante esta sección, las dimensiones fractales de la muestra del río Grijalva considerando una población dentro del comportamiento viscoso e inercial fueron  $F = 1.68$  y  $F = 1.54$ , respectivamente. Estas son similares a las reportadas por Izquierdo-Ayala et al. (2023), para el río Grijalva, para los cuales se obtuvo  $F = 1.86$  y  $F = 1.35$ , noviembre de 2016 (flujos altos) y abril de 2017 (época de estiaje), respectivamente. Téngase en cuenta que las muestras analizadas en los experimentos de esta investigación provienen de una temporada hidrológica distinta a las anteriores (flujos ascendentes – temporada de lluvias).

Un resultado interesante de esta investigación es que se comprueba que los flóculos formados en el Grijalva durante 3 distintas temporadas hidrológicas exhiben consistentemente una dimensión fractal menor a 2, contrario al supuesto general cuando se modela el transporte de sedimentos cohesivos. Para nuestro estudio, el análisis del río Grijalva siempre indicó una dimensión fractal menor a 2, tanto en nuestro análisis tomando en cuenta una sola población, como cuando separamos la población en dos partes.

Un estudio exhaustivo de los componentes de inorgánicos y biológicos de los flóculos del río Grijalva debe ser llevado a cabo para comprender la dinámica de los sedimentos de este cauce.

En lo que refiere al río Usumacinta, si el ajuste de los datos  $d_f$  vs  $\omega_f$  se realiza para todos los tamaños, se obtiene  $F = 1.69$ . Sin embargo, de acuerdo con Strom & Keyvani (2011) y Fall et al. (2021), una población de flóculos puede suponerse partida en 2 subpoblaciones de acuerdo con la respuesta mecánica, estas son comportamiento viscoso y comportamiento inercial. Se espera que los flóculos de comportamiento viscoso se ubiquen dentro del rango de microflóculos a flóculos (tamaños de menor dimensión dentro de la

población), mientras que los flóculos de comportamiento inercial normalmente corresponderían a macroflóculos ( $d_f = 160 \mu m$ ).

La hipótesis del párrafo anterior es consistente con los resultados del Usumacinta cuando se considera a la población de flóculos partida en dos distintos comportamientos, obteniéndose  $F = 2.68$  y  $F = 1.38$ , viscosos e inerciales, respectivamente. En este caso el límite entre los comportamientos viscoso e inercial parece ocurrir para un tamaño de flóculo  $d_f = 108 \mu m$  (Figura 4.24). En este caso, el resultado  $F = 1.69$  corresponde a la temporada de flujos ascendentes. Izquierdo-Ayala et al. (2023) encontró  $F = 2.43$  y  $F = 2.16$ , correspondientes a las temporadas de flujos altos (diciembre de 2016) y época de estiaje (abril 2017), respectivamente. Para el Usumacinta,  $F$  varía considerablemente respecto a la temporada hidrológica. Esto es contrario al caso del Grijalva. Esto puede explicarse por el hecho de que el Usumacinta es un río que fluye libremente hacia la desembocadura, exhibiendo una mayor estacionalidad en términos de los flóculos que se forman en la columna de agua.

En el caso del Zarco, aplicando las hipótesis de Strom & Keyvani (2011), se obtuvo  $F = 1.58$  y  $F = 2.09$ , para los flóculos de comportamiento viscoso e inercial, respectivamente. En este caso el límite entre el comportamiento viscoso e inercial se obtiene para  $d_f = 137 \mu m$ . Desde luego, esto sugiere que los macroflóculos son más densos que los microflóculos contrario con al comportamiento esperado en una población de flóculos (Kranenburg, 1994). Un resultado similar al de este trabajo, realizado con sedimentos de tanques de acuicultura de cría de salmón encontraron dimensiones fractales de hasta  $F = 2.7$  y densidad de  $\rho_f = 1060 kg/m^3$  (Law et al., 2014). Estos autores explican que este alto valor de  $F = 2.7$  (alto) podría ser resultado de heces fecales del salmón más densas de lo normal, o de una compresión más alta del alimento en el proceso de producción. Otra hipótesis de Law et al. (2014) fue atribuir esta condición a ciclos de deposición y resuspensión, haciendo que el material fecal y residuos de alimento se consolidaran.

# Capítulo 6.

## Conclusiones

Esta investigación permitió identificar mecanismos distintos de floculación en muestras con diferentes tipos y concentraciones de materia orgánica (MO). Los experimentos revelaron cómo la naturaleza de la MO influye en la agregación y estabilización de partículas en sedimentos cohesivos. Las principales conclusiones derivadas de esta investigación son las siguientes:

- La floculación de los sedimentos del río Grijalva mostró una correlación significativa con la presencia de materia orgánica particulada (MOP), la estimación de la dimensión fractal y las condiciones hidrodinámicas. Cuando se aplicó una baja velocidad de corte a la muestra, los flóculos alcanzaron un aumento de tamaño de hasta un 18%; sin embargo, fueron más susceptibles a la ruptura bajo condiciones de velocidad de corte media y alta. Este comportamiento se atribuye a la alta porosidad de los flóculos y a la baja fuerza de adhesión, debido a la insuficiente cantidad de MOP presente.
- Los mecanismos de floculación en el río Usumacinta están estrechamente relacionados con el contenido de carbono orgánico disuelto (COD) y el estado compacto de los flóculos. Estos flóculos mostraron una tendencia limitada hacia la agregación, predominando la estabilización bajo todas las condiciones de turbulencia, lo cual se atribuye al contenido de COD, compuesto en su mayoría por sustancias húmicas. Las fuerzas hidrodinámicas  $u_* = 3.2 \text{ cm/s}$  y  $G = 82 \text{ s}^{-1}$ , permiten que el tamaño de los flóculos aumente hasta un máximo del 15%. Bajo

condiciones de fuerzas hidrodinámicas media y alta, los flóculos experimentan cambios de tamaño (agregación y ruptura) con una variación máxima del 7%.

- La floculación de los sedimentos del centro acuícola El Zarco está estrechamente relacionada con la materia orgánica particulada (MOP), la presencia de diatomeas y las condiciones hidrodinámicas. Bajo condiciones de  $u_* = 3.2 \text{ cm/s}$  y  $G = 82 \text{ s}^{-1}$ , el tamaño de los flóculos aumentó hasta un 28%, atribuible a su alto contenido de MOP, especialmente conformado de diatomeas. En condiciones hidrodinámicas  $u_* = 4.2$  -  $G = 124 \text{ s}^{-1}$  predominó el efecto de agregación, aunque en menor medida que bajo la turbulencia más baja. Al aplicar condiciones de  $u_* = 5.2 \text{ cm/s}$  -  $G = 158 \text{ s}^{-1}$ , el comportamiento cambio en comparación con la tendencia que se mostraba bajo las primeras condiciones hidrodinámicas, presentando en este caso, un estado complejo de agregación y ruptura. Esto resultó en una disminución del diámetro característico  $d_{90}$  durante los primeros minutos, y un aumento de  $d_{50}$  durante toda la duración del experimento, mostrando así la susceptibilidad de los flóculos a las fuerzas hidrodinámicas.
- Los experimentos de velocidad de caída revelaron que los flóculos del río Grijalva son los más porosos; en el caso de los flóculos del río Usumacinta, se identificaron dos grupos: uno de flóculos compactos y otro de flóculos porosos, lo que concuerda con las hipótesis planteadas por Strom & Keyvani (2011) y Fall et al. (2021). Los flóculos provenientes del centro acuícola El Zarco, por su parte, también mostraron dos comportamientos bien definidos, con un grupo altamente poroso y otro de mayor compactación; sin embargo, su distribución no coincide con las teorías de densidad - fractalidad ni con las hipótesis de Strom & Keyvani (2011) y Fall et al. (2021), lo que sugiere que estos dos grupos de flóculos son diferentes e independientes entre sí.

# Capítulo 7.

## Recomendaciones

Realizar mediciones detalladas de las fracciones orgánicas en las tres muestras para identificar componentes específicos como el carbono orgánico particulado (COP), el carbono orgánico total (COT) y las sustancias poliméricas extracelulares (SPE). También es recomendable identificar diferentes biopolímeros según la longitud de sus cadenas, con el fin de caracterizar de manera integral los componentes biológicos de las muestras.

Llevar a cabo experimentos de floculación aplicando un mayor número de fuerzas hidrodinámicas, con el objetivo de identificar las condiciones bajo las cuales los flóculos comienzan a presentar ruptura o fluctuaciones entre estados de agregación y desintegración.

Obtener imágenes de los flóculos mediante microscopía electrónica de barrido u otras técnicas avanzadas de microscopía, con el propósito de analizar la configuración fractal de los flóculos y estudiar cómo la materia orgánica contribuye como agente aglutinante. Esta obtención de imágenes también permitirá realizar comparaciones con la dimensión fractal y facilitará una estimación de la densidad de los flóculos.

Realizar mediciones de velocidad de caída empleando holografía digital en una amplia muestra de flóculos, con el objetivo de comprender mejor su estructura fractal.



# REFERENCIAS

- Adachi, Y., Kobayashi, A., & Kobayashi, M. (2012). Structure of colloidal flocs in relation to the dynamic properties of unstable suspension. *International Journal of Polymer Science*, 2012(1), 574878.
- Adrian, R. J. (1986). Multi-point optical measurements of simultaneous vectors in unsteady flow—a review. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 7(2), 127–145.
- Adrian, R. J. (1991). Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 23(1), 261–304.
- Adrian, R. J. (1997). Dynamic ranges of velocity and spatial resolution of particle image velocimetry. *Measurement Science and Technology*, 8(12), 1393.
- Allan, J. D., & Castillo, M. M. (2007). *Stream Ecology: Structure and function of running waters*. Springer Netherlands. <https://books.google.com.mx/books?id=4tDNEFcQh7IC>
- Booij, R. (1994). *Measurements of the Flow Field in a Rotating Annular Flume*. Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Hydraulic and Geotechnical Engineering Division. <https://books.google.com.mx/books?id=R9prGwAACAAJ>
- Bungartz, H., Krüger, A., & Engelhardt, C. (2006). Fluvial suspended sediment dynamics: Implications for particulate organic carbon transport modeling. *Water Resources Research*, 42(10).
- Burd, A. B., & Jackson, G. A. (2009). Particle aggregation. *Annual Review of Marine Science*, 1, 65–90.
- Cai, Y., Guo, L., Wang, X., & Aiken, G. (2015). Abundance, stable isotopic composition, and export fluxes of DOC, POC, and DIC from the Lower Mississippi River during 2006–2008. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 120(11), 2273–2288.
- Chao, X., & Jia, Y. (2011). Three-dimensional numerical simulation of cohesive sediment transport in natural lakes. In *Sediment Transport*. IntechOpen.
- Chassagne, C., & Safar, Z. (2020). Modelling flocculation: Towards an integration in large-scale sediment transport models. *Marine Geology*, 430, 106361.
- de Juan Herrero, J. (1999). *¿De qué están hechos los organismos?: el nacimiento de la mirada histológica*. Publicaciones de la Universidad de Alicante.
- Deng, Z., Huang, D., He, Q., & Chassagne, C. (2022). Review of the action of organic matter on mineral sediment flocculation. *Frontiers in Earth Science*, 10, 965919.
- Díaz-Palomarez, V. J. (2015). *Observaciones experimentales para flujo bifásico en canales circulares de sedimentos cohesivos: Aplicaciones en acuicultura [Tesis de doctorado, IITCA]*. IITCA, UAEMéx.
- Drever, J. I. (1988). *The geochemistry of natural waters* (Vol. 437). Prentice hall Englewood Cliffs.
- Droppo, I. G. (2001). Rethinking what constitutes suspended sediment. *Hydrological Processes*, 15(9), 1551–1564.

- Droppo, I. G., & Ongley, E. D. (1994). Flocculation of suspended sediment in rivers of southeastern Canada. *Water Research*, 28(8), 1799–1809.
- Engel, A. (2000). The role of transparent exopolymer particles (TEP) in the increase in apparent particle stickiness ( $\alpha$ ) during the decline of a diatom bloom. *Journal of Plankton Research*, 22(3), 485–497.
- Fall, K. A., Friedrichs, C. T., Massey, G. M., Bowers, D. G., & Smith, S. J. (2021). The importance of organic content to fractal floc properties in estuarine surface waters: Insights from video, LISST, and pump sampling. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126(1), e2020JC016787.
- Fettweis, M., Schartau, M., Desmit, X., Lee, B. J., Terseleer, N., Van der Zande, D., Parmentier, K., & Riethmüller, R. (2022). Organic matter composition of biomineral flocs and its influence on suspended particulate matter dynamics along a nearshore to offshore transect. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 127(1), e2021JG006332.
- Furukawa, Y., & Watkins, J. L. (2012). Effect of organic matter on the flocculation of colloidal montmorillonite: a modeling approach. *Journal of Coastal Research*, 28(3), 726–737.
- Furukawa, Y., Watkins, J. L., Kim, J., Curry, K. J., & Bennett, R. H. (2009). Aggregation of montmorillonite and organic matter in aqueous media containing artificial seawater. *Geochemical Transactions*, 10, 1–11.
- García-Aragon, J. A., Salinas-Tapia, H., Moreno-Guevara, J., Diaz-Palomarez, V., & Tejeda-Vega, S. (2014). A model for the settling velocity of flocs; application to an aquaculture recirculation tank. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*, 2(3), 313–322.
- García-Galvis, J., & Ballesteros-González, M. I. (2005). Evaluación de parámetros de calidad para la determinación de carbono orgánico en suelos. *Revista Colombiana de Química*, 34(2), 201–209.
- Ghanem, A., Young, J., & Edwards, F. (2013). Settling velocity models applied to ballasted flocs-a review. *Saber*, 25(3), 247–253.
- Gharabaghi, B., Inkratas, C., Krishnappan, B. G., & Rudra, R. P. (2007). Flow characteristics in a rotating circular flume. *The Open Civil Engineering Journal*, 1(1).
- Gregory, J., & Barany, S. (2011). Adsorption and flocculation by polymers and polymer mixtures. *Advances in Colloid and Interface Science*, 169(1), 1–12.
- Gregory, R., Zabel, T. F., & Edzwald, J. K. (1999). Sedimentation and flotation. *Water Quality and Treatment*, 7, 1–87.
- Guo, C., Manning, A. J., Bass, S., Guo, L., & He, Q. (2021). A quantitative lab examination of floc fractal property considering influences of turbulence, salinity and sediment concentration. *Journal of Hydrology*, 601, 126574.
- Han, M., & Lawler, D. F. (1992). The (relative) insignificance of G in flocculation. *Journal-American Water Works Association*, 84(10), 79–91.
- Ho, Q. N., Fettweis, M., Spencer, K. L., & Lee, B. J. (2022). Flocculation with heterogeneous composition in water environments: a review. *Water Research*, 213, 118147.

- Huber, S. A., Balz, A., Abert, M., & Pronk, W. (2011). Characterisation of aquatic humic and non-humic matter with size-exclusion chromatography–organic carbon detection–organic nitrogen detection (LC-OCD-OND). *Water Research*, 45(2), 879–885.
- Izquierdo-Ayala, K. (2020). Determinación experimental de la rugosidad equivalente e inicio de movimiento para fondo uniforme/Experimental determination of equivalent roughness and motion initiation for uniform bed. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 11(2), 105–157.
- Izquierdo-Ayala, K., García-Aragón, J. A., Castillo-Uzcanga, M. M., Díaz-Delgado, C., Carrillo, L., & Salinas-Tapia, H. (2023). Flocculation Patterns Related to Intra-Annual Hydrodynamics Variability in the Lower Grijalva-Usumacinta System. *Water*, 15(2), 292.
- Kahl, L. A., Vardi, A., & Schofield, O. (2008). Effects of phytoplankton physiology on export flux. *Marine Ecology Progress Series*, 354, 3–19.
- Khelifa, A., & Hill, P. S. (2006). Models for effective density and settling velocity of flocs. *Journal of Hydraulic Research*, 44(3), 390–401.
- Kranenburg, C. (1994). The fractal structure of cohesive sediment aggregates. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 39(5), 451–460.
- Krishnappan, B. G. (1993). Rotating circular flume. *Journal of Hydraulic Engineering*, 119(6), 758–767.
- Larsen, L. G., Harvey, J. W., & Crimaldi, J. P. (2009). Morphologic and transport properties of natural organic floc. *Water Resources Research*, 45(1).
- Lau, Y. L., & Krishnappan, B. G. (1994). *Comparison of particle size measurements made with a water elutriation apparatus and a Malvern particle size analyzer*. Aquatic Ecosystem Protection Branch, National Water Research Institute.
- Law, B. A., Hill, P. S., Maier, I., Milligan, T. G., & Page, F. (2014). Size, settling velocity and density of small suspended particles at an active salmon aquaculture site. *Aquaculture Environment Interactions*, 6(1), 29–42.
- Lee, B. J., Hur, J., & Toorman, E. A. (2017). Seasonal variation in flocculation potential of river water: Roles of the organic matter pool. *Water*, 9(5), 335.
- Lee, B. J., Kim, J., Hur, J., Choi, I. H., Toorman, E. A., Fettweis, M., & Choi, J. W. (2019). Seasonal dynamics of organic matter composition and its effects on suspended sediment flocculation in river water. *Water Resources Research*, 55(8), 6968–6985.
- Livsey, D. N., Crosswell, J. R., Turner, R. D. R., Steven, A. D. L., & Grace, P. R. (2022). Flocculation of Riverine Sediment Draining to the Great Barrier Reef, Implications for Monitoring and Modeling of Sediment Dispersal Across Continental Shelves. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 127(7), e2021JC017988.
- López-Rebollar, B. M. (2019). *Optimización de parámetros hidrodinámicos en el diseño de estanques de acuicultura, aplicando dinámica de fluidos computacional*. UAEMéx, IITCA.
- López-Rebollar, B. M., García-Pulido, D., Diaz-Delgado, C., Gallego-Alarcón, I., García-Aragón, J. A., & Salinas-Tapia, H. (2023). Sedimentation efficiency evaluation of an aquaculture tank through experimental floc characterization and CFD simulation. *Aquacultural Engineering*, 102, 102343.

- Lorenzo-Acosta, Y. (2006). Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación. *ICIDCA. Sobre Los Derivados de La Caña de Azúcar*, 40(2), 10–17.
- Maas, H. G., Gruen, A., & Papantoniou, D. (1993). Particle tracking velocimetry in three-dimensional flows: Part 1. Photogrammetric determination of particle coordinates. *Experiments in Fluids*, 15(2), 133–146.
- Martínez, E., Fuentes, J. P., & Acevedo, E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de La Ciencia Del Suelo y Nutrición Vegetal*, 8(1), 68–96.
- Mietta, F., Chassagne, C., Manning, A. J., & Winterwerp, J. C. (2009). Influence of shear rate, organic matter content, pH and salinity on mud flocculation. *Ocean Dynamics*, 59, 751–763.
- Nghiem, J. A., Fischer, W. W., Li, G. K., & Lamb, M. P. (2022). A mechanistic model for mud flocculation in freshwater rivers. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 127(5), e2021JF006392.
- Osborn, R., Dillon, B., Tran, D., Abolfazli, E., Dunne, K. B. J., Nittrouer, J. A., & Strom, K. (2021). FlocARAZI: An in-situ, image-based profiling instrument for sizing solid and flocculated suspended sediment. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 126(11), e2021JF006210.
- Partheniades, E., & Kennedy, J. F. (1967). Depositional behavior of fine sediment in a turbulent fluid motion. In *Coastal Engineering 1966* (pp. 707–729).
- Passow, U. (2002). Transparent exopolymer particles (TEP) in aquatic environments. *Progress in Oceanography*, 55(3–4), 287–333.
- Salinas-Tapia, H. (2007). *Determinación de parámetros para flujo bifásico, sólido-líquido, aplicando técnicas ópticas [Tesis de doctorado, IITCA]*. CIRA-Fac. Ing.-Universidad Autónoma del Estado de México-México.
- Salinas-Tapia, H., & Garcia-Aragón, J. A. (2015). *DETERMINACIÓN POR TÉCNICAS ÓPTICAS PIV Y PTV DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDRODINÁMICAS DE FLOCS EN SISTEMAS CANALES CIRCULARES ROTATORIOS*. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Salinas-Tapia, H., Garcia-Aragon, J. A., Moreno-Hernandez, D., & Barrientos-Garcia, B. (2006). Particle tracking velocimetry (PTV) algorithm for non-uniform and non-spherical particles. *Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA'06)*, 2, 325–330.
- Salinas-Tapia, H., López-Rebollar, B. M., Mondragón-Alcántara, D., Flores-Gutiérrez, L. M., Duran-García, M. D., & García-Aragón, J. A. (2014). Simulación mediante CFD del flujo de un canal anular, utilizado para transporte de sedimentos finos. *V Seminario Internacional Uso Racional Del Agua "USRA."*
- Smellie Jr, R. H., & La Mer, V. K. (1958). Flocculation, subsidence and filtration of phosphate slimes: VI. A quantitative theory of filtration of flocculated suspensions. *Journal of Colloid Science*, 13(6), 589–599.
- Spencer, K. L., Wheatland, J. A. T., Bushby, A. J., Carr, S. J., Droppo, I. G., & Manning, A. J. (2021). A structure–function based approach to floc hierarchy and evidence for the non-fractal nature of natural sediment flocs. *Scientific Reports*, 11(1), 14012.

- Spencer, R. G. M., Hernes, P. J., Dinga, B., Wabakanghanzi, J. N., Drake, T. W., & Six, J. (2016). Origins, seasonality, and fluxes of organic matter in the Congo River. *Global Biogeochemical Cycles*, 30(7), 1105–1121.
- Stone, M., Krishnappan, B. G., Silins, U., Emelko, M. B., Williams, C. H. S., Collins, A. L., & Spencer, S. A. (2021). A new framework for modelling fine sediment transport in rivers includes flocculation to inform reservoir management in wildfire impacted watersheds. *Water*, 13(17), 2319.
- Strom, K., & Keyvani, A. (2011). An explicit full-range settling velocity equation for mud flocs. *Journal of Sedimentary Research*, 81(12), 921–934.
- Suopajärvi, T. (2015). *Functionalized nanocelluloses in wastewater treatment applications*.
- Tang, F. H. M., & Maggi, F. (2016). A mesocosm experiment of suspended particulate matter dynamics in nutrient-and biomass-affected waters. *Water Research*, 89, 76–86.
- Thomas, D. N., Judd, S. J., & Fawcett, N. (1999). Flocculation modelling: a review. *Water Research*, 33(7), 1579–1592.
- Thornton, D. C. O. (2018). Coomassie stainable particles (CSP): protein containing exopolymer particles in the ocean. *Frontiers in Marine Science*, 5, 206.
- Urbansky, E. T. (2001). Total organic carbon analyzers as tools for measuring carbonaceous matter in natural waters This is the work of a United States government employee engaged in his official duties. As such it is in the public domain and exempt from copyright. © US government. *Journal of Environmental Monitoring*, 3(1), 102–112.
- Valero-Camargo, M. A., & Torres-Cruz, L. E. C. (1999). Sustancias húmicas en aguas para abastecimiento. *Ingeniería e Investigación*, 44, 63–72.
- Verney, R., Lafite, R., & Brun-Cottan, J.-C. (2009). Flocculation potential of estuarine particles: The importance of environmental factors and of the spatial and seasonal variability of suspended particulate matter. *Estuaries and Coasts*, 32, 678–693.
- Wickramasinghe, S. R., Han, B., Akeprathumchai, S., Jaganjac, A., & Qian, X. (2005). Modeling flocculation of biological cells. *Powder Technology*, 156(2–3), 146–153.
- Winterwerp, J. C. (1998). A simple model for turbulence induced flocculation of cohesive sediment. *Journal of Hydraulic Research*, 36(3), 309–326.
- Winterwerp, J. C. (2002). On the flocculation and settling velocity of estuarine mud. *Continental Shelf Research*, 22(9), 1339–1360.
- Winterwerp, J. C., Manning, A. J., Martens, C., De Mulder, T., & Vanlede, J. (2006). A heuristic formula for turbulence-induced flocculation of cohesive sediment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 68(1–2), 195–207.
- Wotton, R. S. (2007). Do benthic biologists pay enough attention to aggregates formed in the water column of streams and rivers? *Journal of the North American Benthological Society*, 26(1), 1–11.
- Zeichner, S. S., Nghiem, J., Lamb, M. P., Takashima, N., de Leeuw, J., Ganti, V., & Fischer, W. W. (2021). Early plant organics increased global terrestrial mud deposition through enhanced flocculation. *Science*, 371(6528), 526–529.

Zepeda-Mondragon, H., Garcia-Aragon, J. A., Salinas-Tapia, H., & Krishnappan, B. G. (2022). Estimation of Fractal Dimension of Suspended Sediments from Two Mexican Rivers. *Water*, 14(18), 2774.

# ANEXOS

## *Anexo 1: Código de solución de ecuación de balance de población de acuerdo con (Furukawa & Watkins, 2012).*

%%%% MODELO DE FLOCULACIÓN - REPRODUCCIÓN DE RESULTADOS DE FURUKAWA (2012) %%%%

```
% dat1=xlsread(st2,'t0');

rp=0.1;      %radio de partícula primaria en [mc] (d=1-15 mc en ambientes naturales)
rp=rp/1000/1000;  %radio de partícula primaria en [m]
kf=1.81;
Df=1.43;     %Dimensión fractal
ii=0;
rhh=0;
while rhh<0.000003
    ii=ii+1;
    rhh=rp*((ii/kf)^(1/Df));
    rh(ii,1)=rhh;
    i(ii,1)=ii;
end
rh(1,1)=0.1/1000/1000;

    %%%tamaños y frecuencias%%%
N=length(rh);  %Número de bins%%
e=3600;      %Tiempo [s]
p=10;       %Número de pasos de tiempo
q=e/p;
kb=1.3807*10^(-23); %Constante de Boltzman [J/K]
TT=293.15;   %Temperatura absoluta [K]
mu=8.90*10^(-4); %Viscosidad dinamica a temperatura T [N s m^-2]
rp=0.0000001; %Radio de partícula primaria en m
Df=2.05;     %Dimensión fractal
E=5;        %Parametro de rompimiento
G=30;       %Tasa de corte (s-1)
al=0.5;     %Eficiencia de colisión
```

```

for i=1:1:N;
    j=1;
    s(i,j)=E*G^(1.5)*rp*(((rh(i)-rp)/rp).^3-Df));
    for j=1:1:N;
        BB(i,j)= 2/3*kb*TT/mu*((rh(i)+ri(j))^2)/(rh(i)*ri(j))+4/3*G*(rh(i)+rh(j))^3;
        gama(i,j)=1/(j-1);
    end
end

C(:,1)=Ci;

for p=2:1:p;    %%p es pasos de tiempo
    CC(i,p)=0;
    for i=1:1:N;
        CC(i,p)=s(i)*C(i,p-1);
        if i==1
            A(i,p)=0;
        else
            A(i,p)=0;
        end
        for j=1:1:i-1;
            A(i,p)=BB(i-j,j)*C(i-j,p-1)*C(j,p-1)+A(i,p);
        end
        end
        B(i,p)=0;
        for k=1:1:N;
            B(i,p)=al.*BB(i,k)*C(k,p-1)+B(i,p);
        end
        end
        B(i,p)=C(i,p-1)*B(i,p);
        D(i,p)=0;
        for m=i+1:1:N;
            D(i,p)=gama(i,m)*s(m)*C(m,p-1)+D(i,p);

        end
        C(i,p)=C(i,p-1)+q*(1/2*al*A(i,p)-B(i,p)-CC(i,p)+D(i,p));
    end
end
end

```



*Anexo 2: Diámetros característicos  $d_{50}$ ,  $d_{75}$  y  $d_{90}$  de los flóculos de los ríos Grijalva y Usumacinta y del Centro Acuícola El Zarco*

Grijalva -  $u_* = 3.2 \text{ cm/s}$  y  $G = 82 \text{ s}^{-1}$

Tiempo (min)	0	10	30	45	60	75	90
$d_{50} (\mu\text{m})$	159.122	175.645	183.788	184.686	186.45184	184.48056	189.05412
$d_{75} (\mu\text{m})$	224.799	241.323	253.063	250.904	256.80230	251.51223	259.37226
$d_{90} (\mu\text{m})$	304.317	315.757	335.944	329.447	342.22799	328.52933	341.48659

Grijalva -  $u_* = 4.4 \text{ cm/s}$  y  $G = 124 \text{ s}^{-1}$

Tiempo (min)	0	10	30	45	60	75	90
$d_{50} (\mu\text{m})$	161.718	164.142	160.320	161.191	160.898	161.642	163.005
$d_{75} (\mu\text{m})$	225.716	226.875	219.767	222.934	220.120	225.278	224.618
$d_{90} (\mu\text{m})$	299.052	307.538	286.876	302.283	288.929	322.484	315.317

Grijalva -  $u_* = 5.2 \text{ cm/s}$  y  $G = 158 \text{ s}^{-1}$

Tiempo (min)	0	10	30	45	60	75	90
$d_{50} (\mu\text{m})$	147.743	151.119	147.192	152.437	149.147	146.475	140.706
$d_{75} (\mu\text{m})$	209.012	211.480	204.928	216.203	210.240	204.024	194.945
$d_{90} (\mu\text{m})$	287.754	286.230	282.505	295.931	290.304	273.408	265.379

Usumacinta -  $u_* = 3.2 \text{ cm/s}$  y  $G = 82 \text{ s}^{-1}$

Tiempo (min)	0	10	30	45	60	75	90
$d_{50} (\mu\text{m})$	120.065	121.322	131.209	136.953	138.642	138.531	131.606
$d_{75} (\mu\text{m})$	150.723	152.208	165.212	172.964	174.150	173.407	165.658
$d_{90} (\mu\text{m})$	183.517	183.568	199.945	207.915	208.571	209.089	198.752

Usumacinta -  $u_* = 4.4 \text{ cm/s}$  y  $G = 124 \text{ s}^{-1}$

Tiempo (min)	0	10	30	45	60	75	90
$d_{50} (\mu\text{m})$	122.273	123.488	125.564	126.632	124.101	125.194	127.454
$d_{75} (\mu\text{m})$	154.009	156.517	156.101	157.154	155.580	155.416	157.735
$d_{90} (\mu\text{m})$	189.549	192.773	190.157	190.478	186.047	187.546	189.384

Usumacinta -  $u_* = 6.2 \text{ cm/s}$  y  $G = 194 \text{ s}^{-1}$

Tiempo (min)	0	10	30	45	60	75	90
$d_{50} (\mu\text{m})$	123.587	126.384	129.090	127.751	132.488	124.421	132.817
$d_{75} (\mu\text{m})$	156.621	159.242	161.838	159.962	165.443	156.840	166.493
$d_{90} (\mu\text{m})$	191.071	193.201	194.724	192.938	196.563	190.234	204.102

Zarco -  $u_* = 3.2 \text{ cm/s}$  y  $G = 82 \text{ s}^{-1}$

Tiempo (min)	0	10	30	45	60	75	90
$d_{50} (\mu\text{m})$	169.089	191.819	201.710	212.043	212.306	217.725	212.569
$d_{75} (\mu\text{m})$	227.220	251.592	266.658	281.216	274.614	286.532	285.770
$d_{90} (\mu\text{m})$	301.423	330.700	340.707	360.188	347.291	364.143	363.664

Zarco -  $u_* = 4.4 \text{ cm/s}$  y  $G = 124 \text{ s}^{-1}$

Tiempo (min)	0	10	30	45	60	75	90
$d_{50} (\mu\text{m})$	154.891	161.453	164.062	159.850	166.175	164.295	162.801
$d_{75} (\mu\text{m})$	208.245	211.091	215.128	209.904	220.184	215.164	216.533
$d_{90} (\mu\text{m})$	273.423	271.334	291.755	287.236	307.743	293.031	300.281

Zarco -  $u_* = 5.2 \text{ cm/s}$  y  $G = 158 \text{ s}^{-1}$

Tiempo (min)	0	10	30	45	60	75	90
$d_{50} (\mu\text{m})$	151.044	153.063	156.093	165.580	164.735	165.326	165.106
$d_{75} (\mu\text{m})$	213.490	201.659	206.644	221.063	217.456	226.650	221.679
$d_{90} (\mu\text{m})$	348.474	260.676	272.917	290.671	291.976	334.548	304.282