



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO



DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de
Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga (*Colocasia
esculenta*) como Agentes Floculantes

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTA

ANA LAURA ACOSTA BASTAR

DIRECTOR

DR. JOSÉ ROBERTO HERNÁNDEZ BARAJAS

Villahermosa, Tabasco

Mayo de 2021



Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga (*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN**

MAYO 04 DE 2021

**C. ANA LAURA ACOSTA BASTAR
PAS. DE LA LIC. EN ING. AMBIENTAL
PRESENTE**

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 80 al 85 del Cap. III del Reglamento de titulación de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se le autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Tesis denominado: **"ANÁLISIS DE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL DEL PROCESO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN EMPLEANDO ALMIDONES DE MALANGA (*Colocasia esculenta*) COMO AGENTES FLOCULANTES"**, asesorado por el Dr. José Roberto Hernández Barajas sobre el cual sustentará su Examen Profesional, cuyo jurado está integrado por el Dr. José Ramón Laines Canepa, MISA. Elizabeth Magaña Villegas, MIPA. Rocío López Vidal, MIA. Jesús Manuel Carrera Velueta y M. en C. Carlos Alberto Torres Balcázar.

**ATENTAMENTE
ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE**


**DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR**

C.c.p.- Expediente del Alumno.
Archivo.

**U.J.A.T.
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN**



Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga (*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes



CARTA AUTORIZACIÓN

El que suscribe, autoriza por medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice tanto física como digitalmente el Trabajo Recepcional en la modalidad de Tesis de Licenciatura denominado: **"ANÁLISIS DE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL DEL PROCESO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN EMPLEANDO ALMIDONES DE MALANGA (*Colocasia esculenta*) COMO AGENTES FLOCULANTES"**, de la cual soy autor y titular de los Derechos de Autor.

La finalidad del uso por parte de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco el Trabajo Recepcional antes mencionada, será única y exclusivamente para difusión, educación y sin fines de lucro; autorización que se hace de manera enunciativa más no limitativa para subirla a la Red Abierta de Bibliotecas Digitales (RABID) y a cualquier otra red académica con las que la Universidad tenga relación institucional.

Por lo antes manifestado, libero a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de cualquier reclamación legal que pudiera ejercer respecto al uso y manipulación de la tesis mencionada y para los fines estipulados en este documento.

Se firma la presente autorización en la ciudad de Villahermosa, Tabasco el Día 04 de Mayo de Dos Mil Veintiuno.

AUTORIZO

ANA LAURA ACOSTA BASTAR



RESUMEN

La coagulación-floculación es uno de los procesos más empleados en la potabilización de agua. En este proceso se emplean agentes químicos que promueven la desestabilización coloidal y la formación de aglomerados que puedan sedimentar por efecto de la gravedad. En la práctica, los agentes coagulantes más empleados contienen cationes metálicos por lo que se ha optado por emplear agentes naturales que permitan reducir la dosis de agentes metálicos y que mejoren la eficiencia del proceso. En este estudio se evaluó el desempeño del almidón nativo de malanga (*Colocasia esculenta*) como agente floculante en la remoción de turbiedad y color del agua tratada empleando la prueba de jarras. Durante el experimento se aplicó una técnica de análisis de imagen para determinar el efecto del floculante en la distribución del tamaño de partículas. Entonces, se propuso un modelo de dinámica de fluidos computacional (CFD) que incluyó un submodelo de balance de población en la descripción del tamaño de floculos para comparar el efecto del floculante en la distribución del tamaño y en las variables hidrodinámicas más relevantes. Con respecto a los experimentos en prueba de jarras, la dosis óptima de sulfato de aluminio fue de 24 mg/L en el tratamiento de muestras con turbiedad inicial de 200 UTN obteniendo eficiencias de remoción de 93.1% y 94.7% de turbiedad y de color, respectivamente. Al realizar experimentos con la ayuda del floculante, la dosis óptima de sulfato se redujo a 12 mg/L empleando 0.5 mg/L de almidón alcanzando eficiencias de remoción muy similares. Por su parte, el análisis de imagen permitió demostrar que la proporción de partículas más grandes incrementa cuando se emplea el floculante. Finalmente, la renderización CFD permitió observar la sedimentación durante la floculación, mostrando que sedimentan mayor cantidad de partículas usando floculante. Como resultado de este estudio, se ha demostrado que la Dinámica de Fluidos Computacional tiene un amplio rango de aplicación en el proceso de coagulación-floculación para el tratamiento de agua.

Palabras clave: Coagulación, floculación, CFD, almidón, malanga.



**Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de
Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga
(*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes**



DEDICATORIA

A mis padres,

Con su esfuerzo logramos esta meta profesional.

A mis amigos,

Por brindarme su alegría y apoyo incondicional.

A Roberto,

Por compartir su felicidad con la mía. Un paso más juntos.



ÍNDICES

CONTENIDO

RESUMEN.....	i
DEDICATORIA.....	ii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Las partículas y sus tamaños.....	3
2.2. Partículas coloidales.....	3
2.3. Coagulación-floculación.....	6
2.4. Prueba de jarras.....	7
2.5. Agentes coagulantes.....	8
2.6. Sulfato de aluminio.....	9
2.7. Coagulantes naturales.....	11
2.8. Malanga (<i>Colocasia esculenta</i>).....	11
2.9. Almidón de malanga.....	12
2.10. Análisis de imagen.....	13
2.11. Dinámica de Fluidos Computacional.....	14
2.12. ANSYS FLUENT.....	16
3. ANTECEDENTES.....	22
3.1. Sulfato de aluminio como coagulante.....	22
3.2. Uso de almidón como floculante.....	22
3.3. Distribución del tamaño de partículas.....	23
3.4. CFD en modelos de floculación.....	24



**Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de
Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga
(*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes**



4. JUSTIFICACIÓN.....	26
5. OBJETIVOS.....	27
5.1. Objetivo general.....	27
5.2. Objetivos específicos.....	27
6. MATERIALES Y MÉTODOS.....	28
6.1. Síntesis de almidón nativo.....	28
6.2. Preparación de la muestra.....	28
6.3. Determinación de la dosis óptima del agente coagulante.....	29
6.4. Determinación de la dosis óptima del floculante.....	30
6.5. Distribución del tamaño de los floculos.....	31
6.6. Dinámica de Fluidos Computacional.....	34
6.7. Potencia y mezclado.....	38
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	39
7.1. Rendimiento de la malanga.....	39
7.2. Dosis óptima de sulfato de aluminio.....	40
7.3. Dosis óptima de floculante.....	41
7.4. Procesamiento de imagen.....	43
7.5. Parámetros hidráulicos.....	46
7.6. Comportamiento hidrodinámico.....	46
7.7. Distribución de los coloides.....	49
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	52
9. REFERENCIAS.....	54



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de coloides y ejemplos.	4
Tabla 2. Ecuaciones conservativas de un fluido Newtoniano compresible.	15
Tabla 3. Descripción de los componentes en la ecuación de Balance de Población.	21
Tabla 4. Uso del sulfato de aluminio como coagulante.	22
Tabla 5. Estudios sobre almidón como floculante natural.	23
Tabla 6. Tamaño de flóculos registrados por diversos autores utilizando análisis de imagen.	24
Tabla 7. Diseño experimental para obtención de dosis óptima de sulfato de aluminio. ...	30
Tabla 8. Diseño experimental para obtención de dosis óptima de floculante.	31
Tabla 9. Parámetros seleccionados para el modelo de Balance de Población.	37
Tabla 10. Valores de inicialización.	37
Tabla 11. Estrategia de simulación para aseguramiento de la convergencia.	38
Tabla 12. Parámetros calculados para validación.	38
Tabla 13. Parámetros hidráulicos de la prueba de jarras para validación.	46
Tabla 14. Contornos de magnitud de velocidad del fluido.	47
Tabla 15. Gradientes de velocidad (s^{-1}) calculados en FLUENT.	49
Tabla 16. Valores mínimos y máximos de las variables del modelo turbulento.	49
Tabla 17. Contornos de la energía cinética turbulenta (k) axial y radial.	50
Tabla 18. Comparación del comportamiento de los flóculos en las pruebas con y sin floculante.	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Rango de tamaño según el tipo de partículas. Basado en Bratby (2016).	3
Figura 2. Configuración de la doble capa de Stern-Gouy. Basado en Henze <i>et al.</i> (1997), Sincero y Sincero (2003) y Eckenfelder <i>et al.</i> (2008).	5



**Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de
Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga
(*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes**



Figura 3. Mecanismos de coagulación. Elaboración propia basada en Sincero y Sincero (2003).....	7
Figura 4. Etapas de la prueba de jarras.....	8
Figura 5. Clasificación de agentes coagulantes. Elaboración propia basada en Kemmer (1988), Bolto y Gregory (2007) y Celaya López (2013).	9
Figura 6. Turbiedad residual y mecanismos de coagulación predominantes en pruebas de jarras según la concentración de partículas y la dosis de sales de aluminio a pH constante. Basado en Crittenden <i>et al.</i> (2012).	10
Figura 7. Espécimen de malanga, hoja y cormo (<i>Colocasia esculenta</i>).....	12
Figura 8. Polímeros de glucosa que componen el almidón (Basado en Nelson y Cox, 2015). a) Fragmento de amilosa, un polímero lineal conformado por moléculas de glucosa. b) Un punto de ramificación de la amilopectina, su estructura es similar a la amilopectina, pero con ramificaciones.....	13
Figura 9. Estructura del proceso de CFD. Fuente: Xamán y Gijón-Rivera (2015).	15
Figura 10. Ejemplo ofrecido por ANSYS que consiste en el análisis del coeficiente de arrastre del aire alrededor de un automóvil. a) Geometría del sistema. b) Malla del sistema. Fuente: ANSYS (2020).	17
Figura 11. Procedimiento para el análisis de imagen.	32
Figura 12. Procesamiento de imágenes empleando el software ImageJ.....	33
Figura 13. Dimensiones de la jarra.....	34
Figura 14. Geometría en <i>DesignModeler</i>	35
Figura 15. Malla con y sin estructura.	36
Figura 16. Almidón extraído de malanga.....	39
Figura 17. a) Remoción de color y turbiedad con el uso de sulfato de aluminio como coagulante. La turbiedad inicial fue de 200 UTN. b) Efecto de la dosis de sulfato de aluminio sobre el pH del agua.....	40
Figura 18. Remoción de color y turbiedad con el uso de floculante de almidón. La dosis de sulfato de aluminio fue de 12 mg/L. La turbiedad inicial fue de 200 UTN.....	42



**Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de
Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga
(*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes**



Figura 19. Diferencia apreciable del tamaño de los flóculos en una jarra sin y con floculante.....	42
Figura 20. Análisis del área de las partículas usando ImageJ. El número rojo es el número de la partícula en la base de datos. Esta captura corresponde a la fotografía en el minuto 15 de la prueba sin floculante.....	43
Figura 21. Comparación del tamaño de flóculos obtenidos en el análisis fotográfico con y sin floculante.....	44
Figura 22. Distribución de tamaño de partícula experimental (Prueba de jarras y análisis de imagen) y teórica (Distribución Beta) sin y con agente floculante (almidón).....	45
Figura 23. Vectores de velocidad del fluido en un corte axial.....	48
Figura 24. Comparación de la sedimentación entre la experimentación y la simulación CFD con floculante (60 s).....	50



1. INTRODUCCIÓN

La lluvia, las aguas superficiales y las aguas subterráneas son las principales fuentes de agua que abastecen a una población, pero por las características de su ambiente pueden contener material no apto para consumo humano y en estas condiciones se requiere el uso de procesos para su potabilización. La coagulación-floculación es uno de estos procesos, en el que se promueve la aglomeración de partículas coloidales que, por su tamaño tan pequeño, permanecerían suspendidas en el agua. Durante la floculación, al incrementar su tamaño incrementa también su peso y sedimentan por efecto de la gravedad. El proceso se logra con la aplicación de agentes químicos conocidos como coagulantes, que por su composición química reaccionan con grupos funcionales polares situados sobre la superficie de las partículas. Para reducir el uso de agentes que contienen cationes metálicos se ha optado por emplear agentes naturales, como los polímeros derivados de especies vegetales, tal es el caso de almidón extraído de la malanga (*Colocasia esculenta*). Los agentes basados en almidón suelen emplearse por su capacidad para mejorar la formación de flóculos lo que permite obtener partículas con tamaño más grande que aquél que se obtendría con la dosificación única de coagulante. Para conocer la dosificación adecuada de coagulante y floculante en el proceso se lleva a cabo una técnica experimental comúnmente conocida como prueba de jarras, que consiste en un conjunto de jarras con el agua a tratar en la que se adicionan diferentes dosis de coagulante y floculante y la dosis óptima es la que obtenga la mejor calidad del agua, expresada en términos de parámetros de caracterización como, por ejemplo, la turbiedad, el color y la demanda química de oxígeno (DQO). El método para estudiar el comportamiento del agua y las partículas en la jarra consiste en utilizar la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés). Es un campo de la Mecánica que, a través de métodos numéricos, simula fenómenos de transporte relacionados al flujo de fluidos. Las simulaciones CFD requieren del empleo de diversos programas de cómputo que se integran para resolver problemas de interés ingenieril.



Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga (*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes



Esta investigación aborda el estudio experimental y numérico del proceso de coagulación-floculación sin y con la aplicación de agente floculante. El modelado de este proceso de potabilización permite el estudio de condiciones hidrodinámicas y la predicción del comportamiento de las partículas en el agua. El interés viene dado en explorar el potencial del uso de CFD en el diseño y diagnóstico de procesos de potabilización.

El documento está compuesto por ocho capítulos incluyendo el actual. En el segundo capítulo se describen los principios sobre los cuales se sustenta la investigación de este trabajo, a través de planteamientos teóricos que incluyen los conceptos de partículas coloidales, coagulación-floculación, la descripción de los agentes coagulantes sintéticos y naturales, así como la teoría del análisis de imagen y la Dinámica de Fluidos Computacional. El tercer capítulo recopila trabajos de investigación que preceden al aquí presentado, relacionados con la capacidad del sulfato de aluminio como coagulante, el almidón como floculante, la técnica del análisis de imagen para obtener una distribución de tamaño de partículas y el empleo de CFD en modelos de floculación. El cuarto capítulo justifica la importancia de este trabajo desde un punto de vista regional. En el Capítulo 5 se presentan los objetivos de esta investigación. El Capítulo 6 describe el procedimiento y los materiales empleados para realizar la experimentación y el análisis computacional. El Capítulo 7 presenta los datos obtenidos en la experimentación, así como la interpretación argumentada con base en estudios previos. Por último, el Capítulo 8 contiene las conclusiones de este trabajo, así como las recomendaciones para estudios posteriores bajo esta temática.



2. MARCO TEÓRICO

2.1. Las partículas y sus tamaños

El material proveniente de la erosión del suelo, los minerales disueltos, la descomposición de la vegetación y las descargas de aguas residuales son los principales componentes de las partículas en un cuerpo de agua. Este material varía en tamaño, tipo y composición, y es clasificado como sólidos suspendidos o disueltos (Figura 1). Los sólidos suspendidos son los de mayor tamaño y dependen de la velocidad del fluido, mientras que los sólidos disueltos son compuestos inorgánicos (como las sales disueltas) que suelen tener un tamaño tan pequeño que no pueden separarse por métodos de sedimentación (Spellman, 2014; Bratby, 2016).

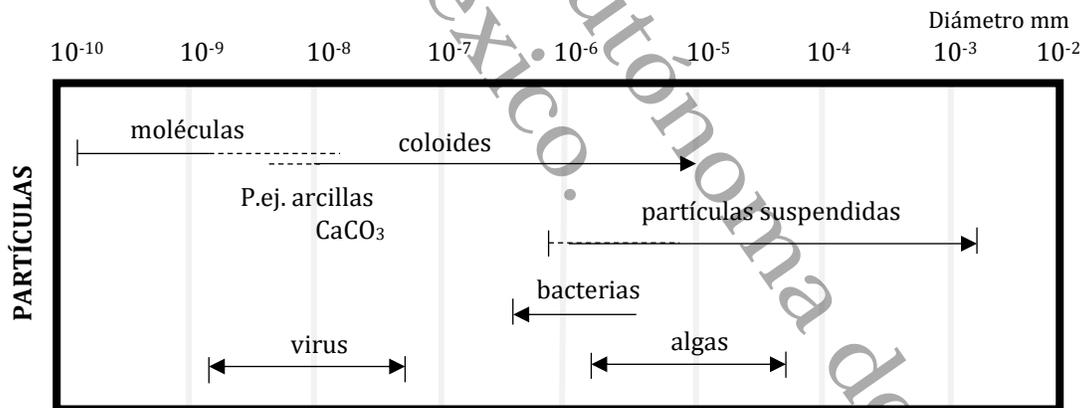


Figura 1. Rango de tamaño según el tipo de partículas. Basado en Bratby (2016).

2.2. Partículas coloidales

Los coloides son partículas que se encuentran en el rango de 10^{-5} a 10^{-10} mm (Figura 1) y según Eckenfelder *et al.* (2008) pueden ser orgánicos o inorgánicos. En la Tabla 1 se enlistan algunos ejemplos. Por su tamaño no son apreciables a simple vista, no obstante, los fenómenos físicos que ocasionan se perciben con facilidad, por ejemplo, las algas



Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga (*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes



(coloides orgánicos) confieren una tonalidad verde al agua y las arcillas (coloides inorgánicos) provocan turbiedad. Por esta razón es de especial interés en el tratamiento del agua entender el comportamiento y las propiedades de las partículas.

Tabla 1. Tipos de coloides y ejemplos.

Categoría	Ejemplos
Inorgánicos (Hidrófobos)	
Arcillas	Aluminosilicatos (montmorillonita, caolinita)
Carbonatos	CaCO ₃ precipitado (calcita)
Orgánicos (Hidrófilos)	
Microorganismos	Patógenos, algas y bacterias
Materia orgánica natural	Restos de plantas, animales y materia orgánica coloidal

Fuente: basado en Edzwald (2011).

Los coloides orgánicos son hidrófilos por la carga negativa en su superficie ocasionada por los grupos funcionales amino (-NH₂), hidroxilo (-OH) y carboxilo (-COOH) con capacidad de ligar las moléculas de agua a la partícula a través de puentes de hidrógeno. Por otra parte, los coloides inorgánicos son hidrófobos por la carga positiva en su superficie (Kemmer, 1988; Eckenfelder *et al.*, 2008; Guzmán *et al.*, 2013).

En solución acuosa los coloides sufren un proceso de estabilización de cargas. Por las fuerzas eléctricas repulsivas en su superficie no pueden colisionar con otras partículas y, en consecuencia, no se pueden aglomerar (Henze *et al.*, 1997). El modelo de la doble capa de Stern-Gouy explica este proceso (Figura 2). La presencia de cargas en el coloide produce fuerzas eléctricas. Estas fuerzas detonan un alto potencial electrostático que decrece según la distancia desde el núcleo, a esto se le conoce como potencial de Nernst (ψ_0). Las cargas primarias en la superficie del coloide atraen iones de carga contraria, conocidos como contraiones. Estos forman una capa alrededor del coloide llamada capa de Stern, al límite de esta capa se le conoce como potencial de Stern (ψ_ϕ). Por su parte, los contraiones atraen sus propios contraiones formando otra capa llamada capa de Gouy, también conocida como capa difusa, al tener una mayor distancia de la superficie existe menor atracción y el comportamiento de los iones tiende a ser difuso. El potencial electrostático



Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga (*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes



sufre una caída potencial de comportamiento lineal desde la superficie del coloide hasta un punto entre la región de la capa de Stern y de Gouy. Este punto, llamado plano de corte, es el intermedio entre la proporción del líquido que se mueve con la partícula (el agua ligada) y la otra parte del líquido (agua libre). Al potencial en el plano de corte se le conoce como potencial zeta (ψ_ζ). En la Figura 2b se observa que después de la adición de contraiones resulta una doble capa comprimida, esta desestabilización es la neutralización de las cargas primarias que reduce la repulsión entre las partículas, pero no es aún el proceso de coagulación.

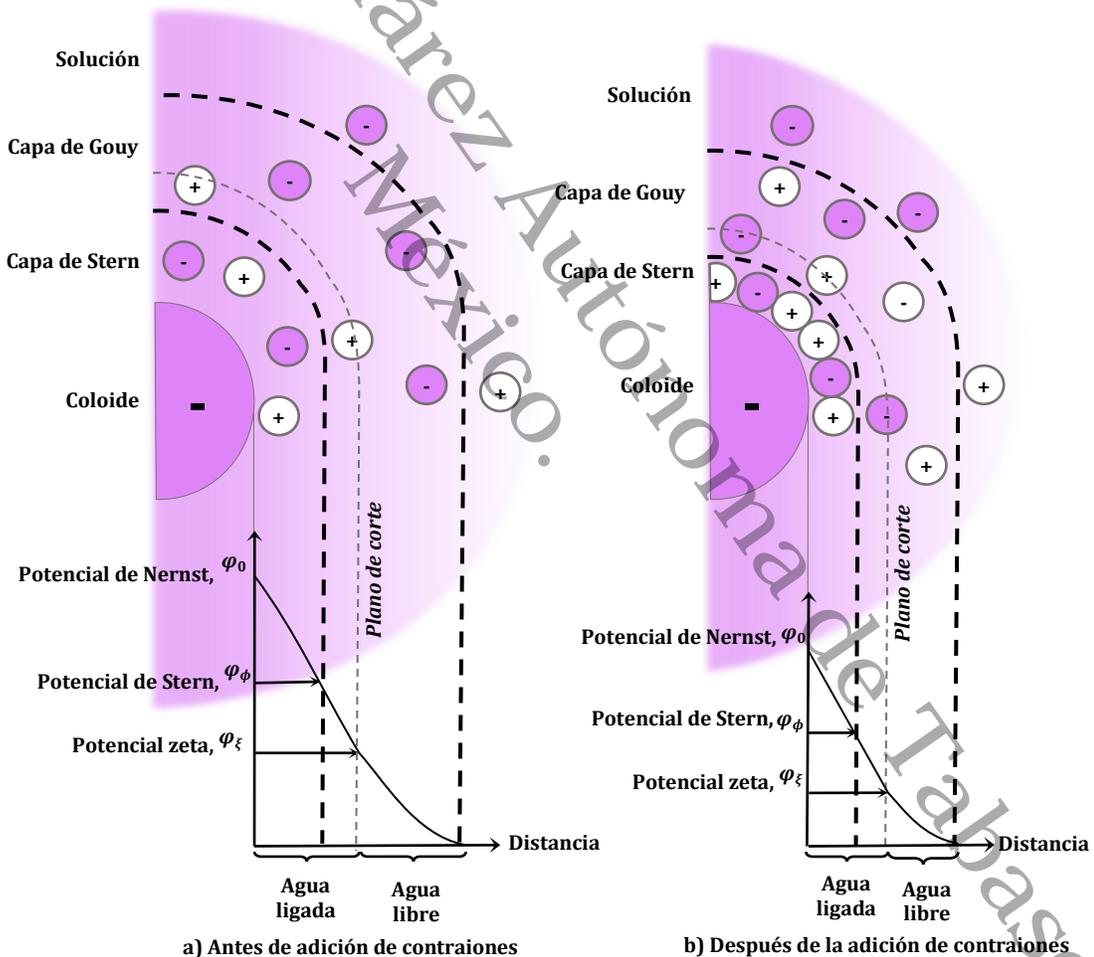


Figura 2. Configuración de la doble capa de Stern-Gouy. Basado en Henze *et al.* (1997), Sincero y Sincero (2003) y Eckenfelder *et al.* (2008).



2.3. Coagulación-floculación

Las partículas de tamaño similar a la arena gruesa se remueven del agua por efecto de la gravedad, su tiempo de sedimentación es corto por su alta densidad y diámetro. Este fenómeno es más lento o nulo en coloides, de manera que se utiliza el proceso de coagulación-floculación para su tratamiento (Kemmer, 1988; Spellman, 2014).

El proceso de coagulación es la adición de químicos al agua a través de una agitación rápida para reducir las fuerzas repulsivas entre las partículas e inducir su aglomeración. La desestabilización se efectúa por diversos mecanismos (ver Figura 3) que dependen de la composición de los coloides y el pH del agua (Henze *et al.*, 1997; Alley, 2007; Eckenfelder *et al.*, 2008).

Por su parte, la floculación ocurre cuando los pequeños aglomerados se agrupan y forman flóculos inducidos por una agitación lenta. A menudo, los aglomerados no se agrupan lo suficiente para provocar una sedimentación rápida y se utilizan agentes conocidos como floculantes cuyo propósito es incrementar el tamaño de los flóculos (Bratby, 2016).

Las condiciones fisicoquímicas e hidrodinámicas tienen gran influencia en la eficiencia de la coagulación y floculación. Las primeras están relacionadas al tipo de coagulante, dosis, temperatura y pH. Las segundas dependen de la geometría del tanque, la velocidad de agitación y el tipo de paletas (Bouyer *et al.*, 2005).



Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga (*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes

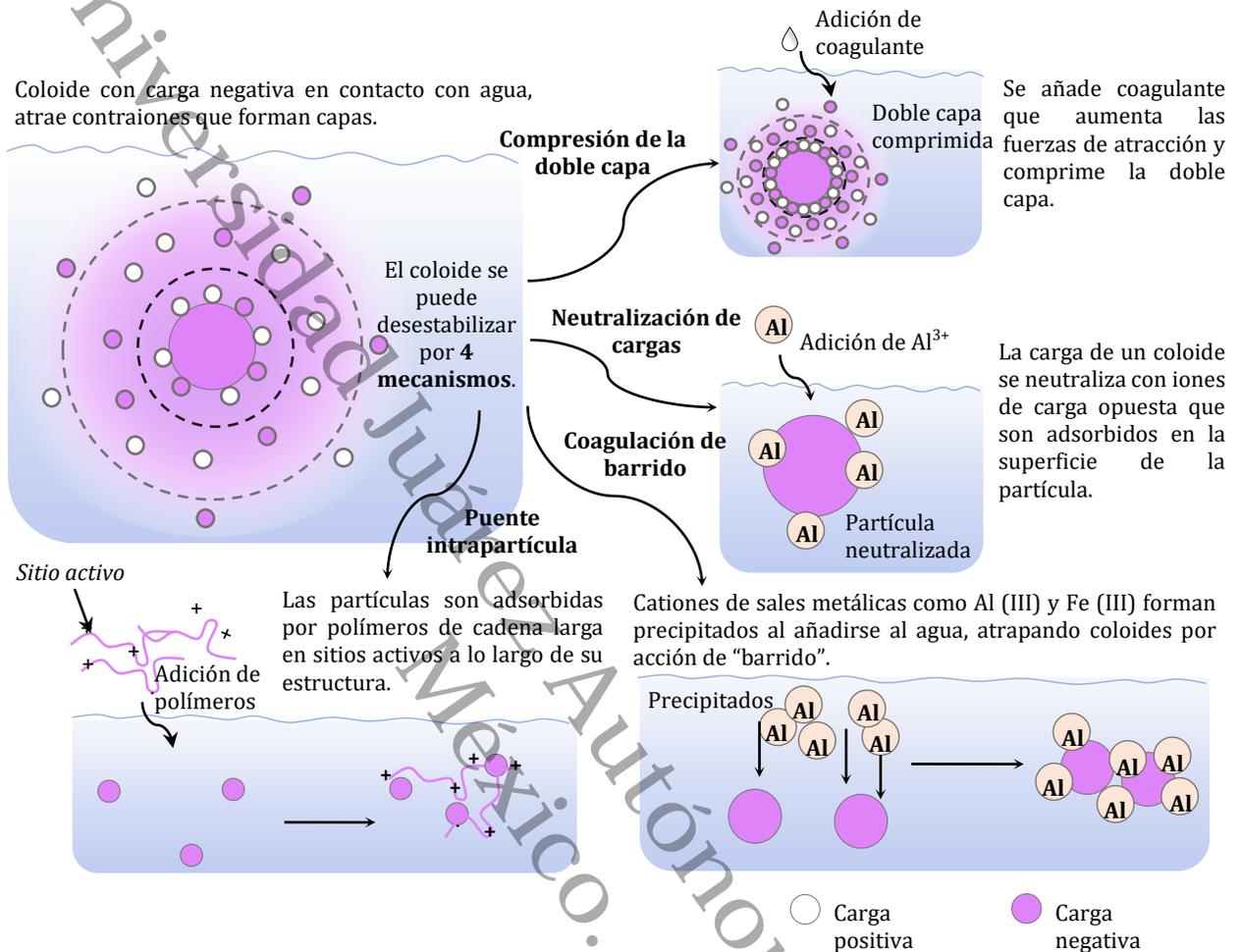


Figura 3. Mecanismos de coagulación. Elaboración propia basada en Sincero y Sincero (2003).

2.4. Prueba de jarras

La técnica experimental que se utiliza para la coagulación-floculación se conoce como prueba de jarras. Representa las características hidráulicas en las etapas de una planta de tratamiento: mezclado rápido, mezclado lento y sedimentación y entre sus funciones más comunes están determinar las dosificaciones óptimas de coagulantes o coadyuvantes y evaluar los rangos de tiempos e intensidad de mezclado (American Water Works Association, 2011). Al ser una prueba basada en la agitación hidráulica, la norma D2035 de la *American Society for Testing and Materials* (2013) recomienda un agitador con



Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga (*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes



paletas que disponga una variación de velocidad de 20 a 150 rpm. Las jarras deben ser del mismo tamaño y material con un volumen mínimo de 1 L. Aunque pueden ser circulares o rectangulares, según Ebeling *et al.* (2003) las jarras rectangulares tienen ventajas sobre las jarras circulares ya que permiten reducir errores en el mezclado por su volumen más grande y hacen innecesario el empleo de deflectores ya que las paredes rectangulares reducen la rotación del agua.

En la Figura 4 se indican las etapas de la coagulación-floculación con la agitación mecánica correspondiente. Es importante mencionar que el mezclado rápido se realiza en periodos de tiempo muy cortos porque la solubilidad de los coagulantes suele ser muy alta y el tiempo de reacción muy corto. En el mezclado lento sucede lo contrario, una agitación muy intensa puede romper la formación de los aglomerados.

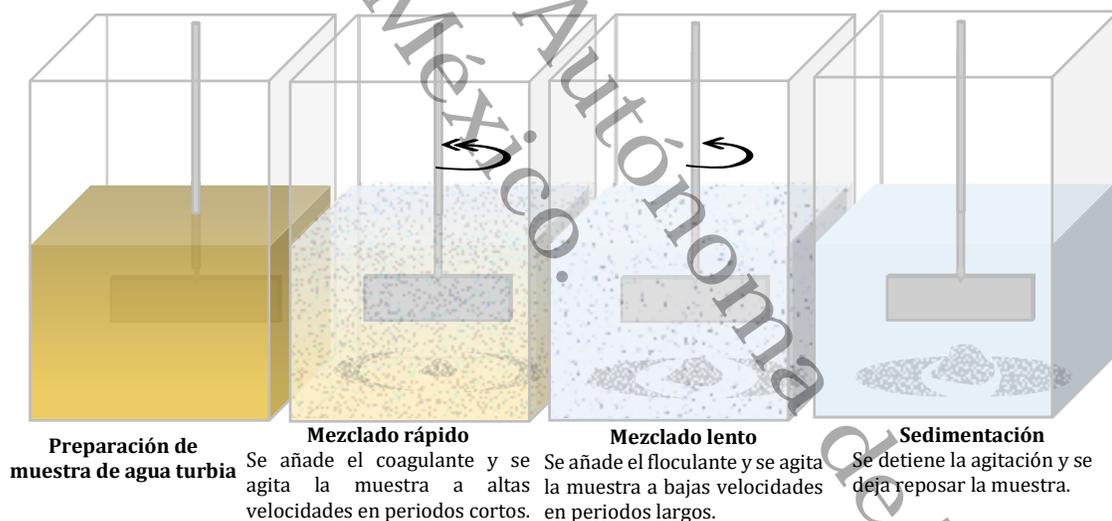


Figura 4. Etapas de la prueba de jarras.

2.5. Agentes coagulantes

Los agentes coagulantes son las sustancias químicas empleadas en el proceso de coagulación. Existen dos tipos de agentes coagulantes: los orgánicos y los inorgánicos (Figura 5). Los coagulantes inorgánicos son los más utilizados y pueden estar basados en



aluminio o en hierro. Los coagulantes orgánicos son polímeros de alto peso molecular que se caracterizan por su naturaleza iónica: catiónicos, aniónicos o neutros. Los polímeros iónicos se denominan polielectrolitos (Bolto y Gregory, 2007; Celaya López, 2013). También pueden clasificarse como naturales o sintéticos. Los naturales se clasifican según su origen: plantas o animales (Hemamalini y Giri, 2018).

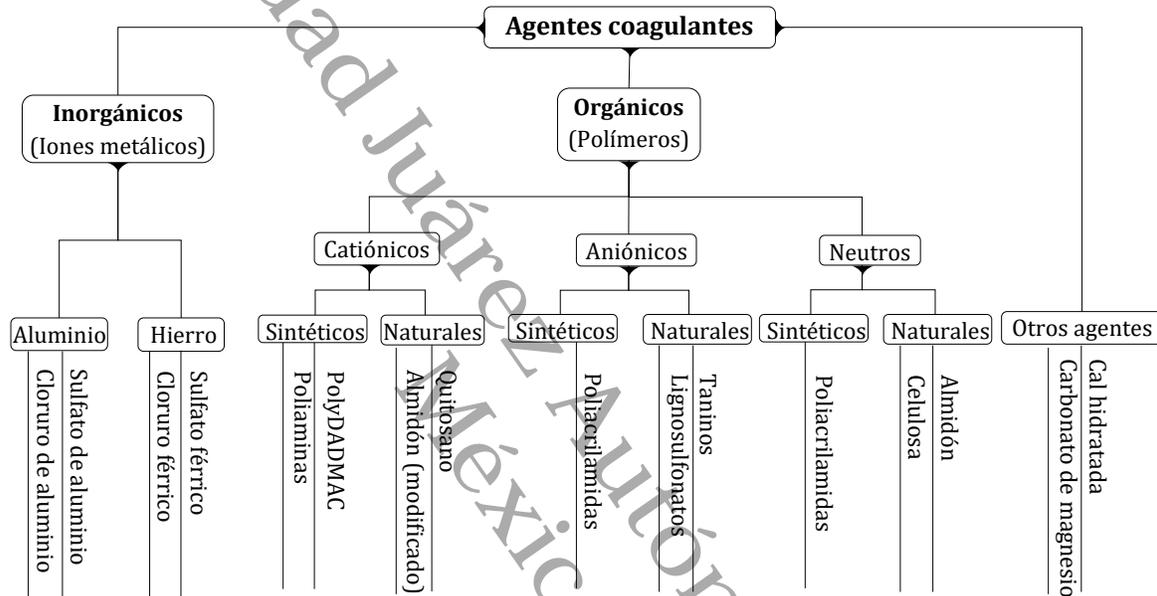


Figura 5. Clasificación de agentes coagulantes. Elaboración propia basada en Kemmer (1988), Bolto y Gregory (2007) y Celaya López (2013).

2.6. Sulfato de aluminio

En las plantas de potabilización de agua, el sulfato de aluminio multihidratado como el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ (en su presentación comercial puede encontrarse con 14 a 18 moléculas de agua) es el coagulante más utilizado porque es barato, de fácil acceso y manejo. Cuando es disuelto en agua se disocia en los iones Al^{+3} y SO_4^{-2} . Los iones de aluminio neutralizan las cargas negativas en las partículas coloidales. Las sales metálicas también forman hidróxidos metálicos insolubles que son gelatinosos y barren con las partículas neutralizadas. El comportamiento del agente coagulante y su efectividad dependen de las características del agua (Cheremisinoff, 2002; Spellman, 2014).



Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga (*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes



Crittenden *et al.* (2012) afirman que existen diferencias en la eficiencia de remoción y los mecanismos de coagulación predominantes según la concentración de coloides en el agua (baja, moderada, alta o muy alta) y la dosis de coagulante (Figura 6). De modo que se debe seleccionar un rango de dosificación que permita observar su comportamiento según la turbiedad inicial del agua. El mecanismo de puente intrapartícula no ocurre cuando el coagulante es una sal de aluminio debido a que ese mecanismo está relacionado con agentes poliméricos por lo que no se aprecia en la Figura 6.

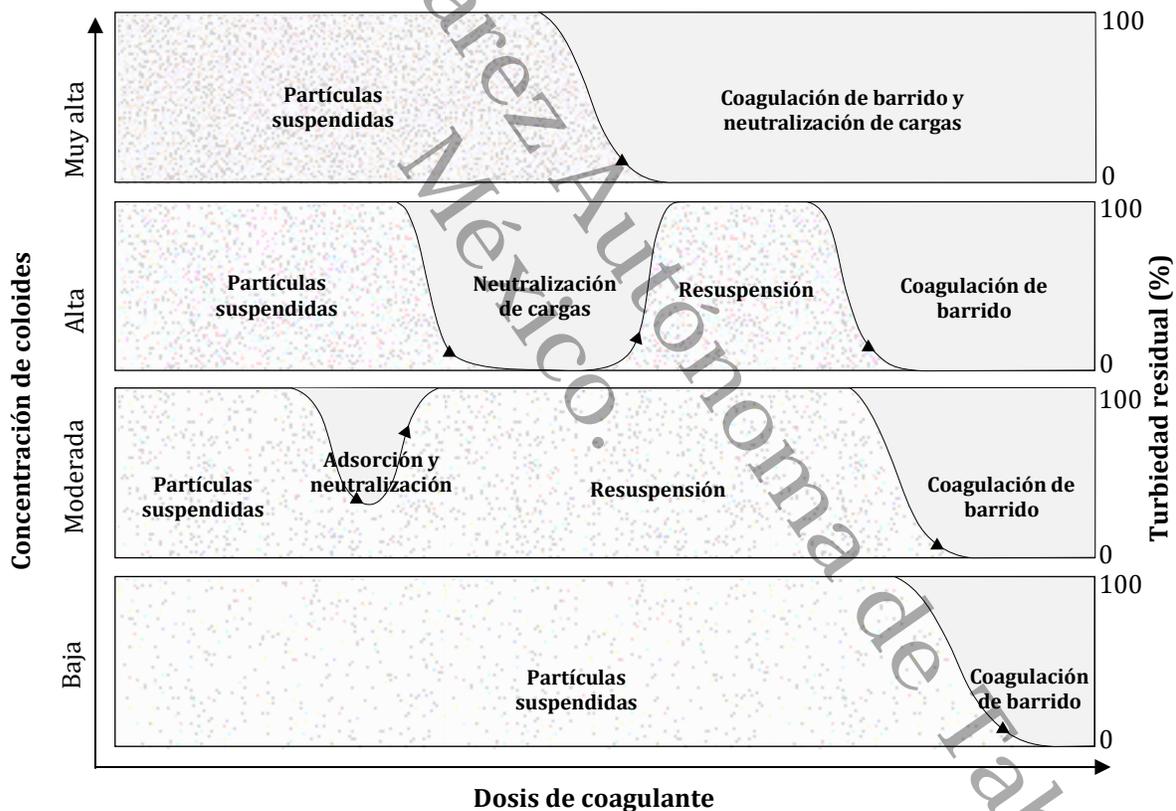


Figura 6. Turbiedad residual y mecanismos de coagulación predominantes en pruebas de jarras según la concentración de partículas y la dosis de sales de aluminio a pH constante. Basado en Crittenden *et al.* (2012).



2.7. Coagulantes naturales

A menudo existen complicaciones en la coagulación provocadas por las limitaciones de los coagulantes, por ejemplo, las sales metálicas son sensibles al pH y la alcalinidad, y su empleo en rangos inadecuados provocan flóculos frágiles o una lenta sedimentación, así que se ha optado por el uso de coagulantes de origen natural, también utilizados como coadyuvantes o floculantes. Su origen puede ser animal o vegetal, como el quitosano obtenido de crustáceos y el almidón extraído de papa, yuca y malanga (Renault *et al.*, 2009; Ramírez Arcila y Jaramillo Peralta, 2015). Otros que ha sido estudiados son las semillas de nirmali (*Strychnos potatorum*), el extracto de moringa (*Moringa oleifera*), los taninos y algunas especies de cactus (Yin, 2010). Al utilizarse como coadyuvantes o floculantes, disminuyen la cantidad de coagulante necesaria, la diferencia entre ambos radica en que los coadyuvantes se aplican en la coagulación en conjunto con el agente coagulante, el floculante se añade en la floculación, después de la coagulación (Kemmer, 1988; Spellman, 2018). El mecanismo por el que actúan depende del tipo de agente que se utilice (catiónico, aniónico o neutro).

Algunos coagulantes naturales actúan desestabilizando los coloides en suspensión, formando micro y macro flóculos por neutralización de cargas y puente intrapartícula. En coadyuvantes como el almidón, el mecanismo principal es el barrido; por su composición de amilosa y amilopectina, cuenta con alto peso molecular y alto número de segmentos en sus cadenas. A medida que se forma el precipitado, las partículas son atrapadas y barridas del agua con el flóculo estabilizante (Saleem y Bachmann, 2019; Buenaño *et al.*, 2019).

2.8. Malanga (*Colocasia esculenta*)

La malanga (*Colocasia esculenta*) conocida en otros idiomas como taro o *dashen* es una planta herbácea que alcanza alturas de 1 a 2 m sin tallo aéreo (Figura 7). Sus partes



Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga (*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes



comestibles se llaman cormos y son de forma redonda con corteza marrón (Torres *et al.*, 2013; Espinosa Díaz, 2017). Su cultivo es óptimo en lugares con clima cálido y húmedo con mucha radiación solar; en las regiones tropicales y subtropicales. En México se cultiva en la zona tropical de Oaxaca, Veracruz y Tabasco (Lu *et al.*, 2008; López López *et al.*, 2017).



Figura 7. Especimen de malanga, hoja y cormo (*Colocasia esculenta*).

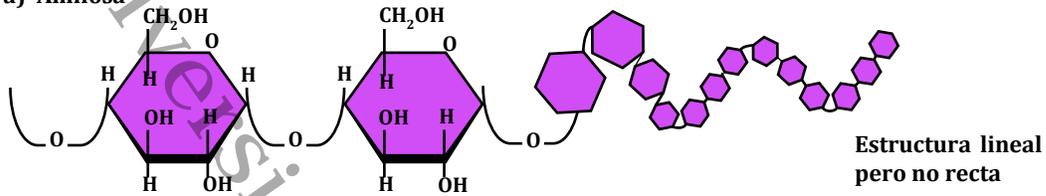
2.9. Almidón de malanga

La malanga utiliza el almidón como principal reserva alimenticia, almacenándolo en forma de gránulos en sus tubérculos. Estos gránulos tienen forma esférica con tamaño uniforme y su composición de almidón varía de 73 a 76% (Allinger, 1988; Jane *et al.*, 1992).

El almidón es un polisacárido formado por dos tipos de polímero de glucosa: la amilosa y la amilopectina (Figura 8). La amilosa representa del 20 a 25% del almidón, está compuesta de unas 250 a 300 moléculas de glucosas enlazadas. La amilopectina es una molécula mucho más grande, contiene más de mil unidades de glucosa en una estructura ramificada, representando hasta el 80% del almidón (Allinger, 1988; Acuña Pinto, 2012).



a) Amilosa



b) Amilopectina

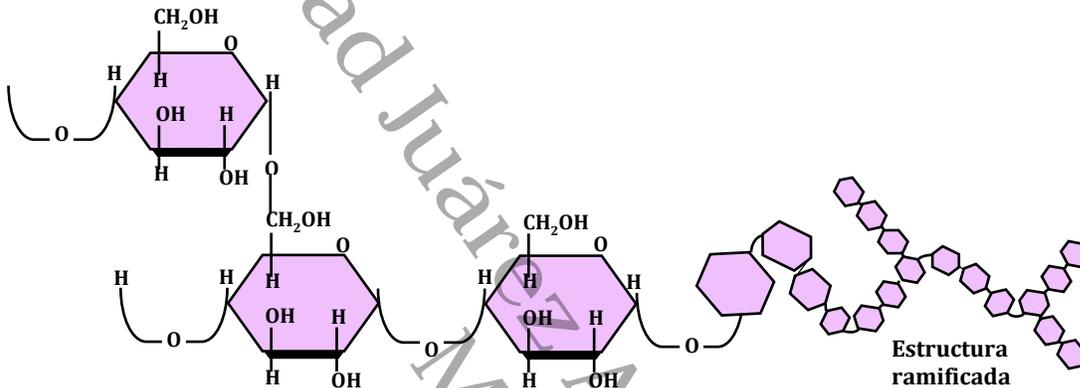


Figura 8. Polímeros de glucosa que componen el almidón (Basado en Nelson y Cox, 2015). a) Fragmento de amilosa, un polímero lineal conformado por moléculas de glucosa. b) Un punto de ramificación de la amilopectina, su estructura es similar a la amilosa, pero con ramificaciones.

2.10. Análisis de imagen

La medición del tamaño de un flóculo resulta compleja por la irregularidad de su estructura y delicada naturaleza y porosidad. Por lo que es importante asegurar que la técnica escogida para la medición no rompa la formación de los aglomerados en el proceso de floculación. Algunos de los métodos enlistados como no destructivos son la microscopía, la dispersión de luz y el análisis de imagen (Jarvis *et al.*, 2005). Este último consiste en tomar fotografías de los flóculos en suspensión para obtener una distribución de su tamaño. Su mayor ventaja es que no se manipula un equipo de medición que pueda alterar la suspensión (Leentvaar y Rebhun, 1983). Las fotografías se suelen analizar con programas como ImageJ®, MATLAB®, CellProfiler® o ICY®. Para abordar un problema utilizando este método, es necesario elegir algunos de los algoritmos ofrecidos por los



programas, ajustar sus parámetros funcionales y ensamblarlos en un orden significativo (Miura y Sladoje, 2020).

2.11. Dinámica de Fluidos Computacional

La necesidad de entender el comportamiento de los fluidos ha permitido realizar formulaciones matemáticas para su estudio, mismas que se resuelven con métodos numéricos apropiados. En esta categoría se encuentran los Métodos de Diferencias Finitas (MDF), de Volumen Finito (MVF) y de Elemento Finito (MEF) que resuelven las ecuaciones de conservación de masa, momentum, energía y especies químicas (transporte de masa). El MVF representa el corazón de cuatro de los cinco códigos principales para la simulación de la dinámica de fluidos: PHOENICS, FLUENT, FLOW3D y STAR-CD (Xamán y Gijón-Rivera, 2015).

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés) es el campo del conocimiento que, a través del MVF, simula el desempeño de los flujos de fluidos, la transferencia de calor y masa, las reacciones químicas y fenómenos relacionados, para obtener información sobre la distribución de presión, velocidad, temperatura, fuerza de arrastre, distribución de fases (gas-líquido, gas-sólido) entre otras propiedades de los fluidos (Kayode Coker, 2001).

Según Xamán y Gijón-Rivera, en los problemas de CFD están involucradas las tres componentes de velocidad y presión, los modelos matemáticos correspondientes para estas variables son las ecuaciones de conservación de masa (continuidad) y momentum (Tabla 2), mismas que se pueden resolver por diferentes métodos de acople basados en la familia del algoritmo SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*).



Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga (*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes



Tabla 2. Ecuaciones conservativas de un fluido Newtoniano compresible.

Ecuación conservativa	Modelo Matemático
Masa	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0$
Momentum-x	$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x_j} \right) + F_x + S_x$
Momentum-y	$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j v)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x_j} \right) + F_y + S_y$
Momentum-z	$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j w)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial x_j} \right) + F_z + S_z$
Ecuación general conservativa de convección-difusión.	$\underbrace{\frac{\partial(\rho \Phi)}{\partial t}}_{\text{temporal}} + \underbrace{\frac{\partial(\rho u_j \Phi)}{\partial x_j}}_{\text{convectivo}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} \right)}_{\text{difusivo}} + \underbrace{S}_{\text{fuente}}$

Fuente: Xamán y Gijón-Rivera (2015).

Para la solución de un problema de CFD, el usuario debe seguir la secuencia de 3 partes fundamentales presentadas en la Figura 9.

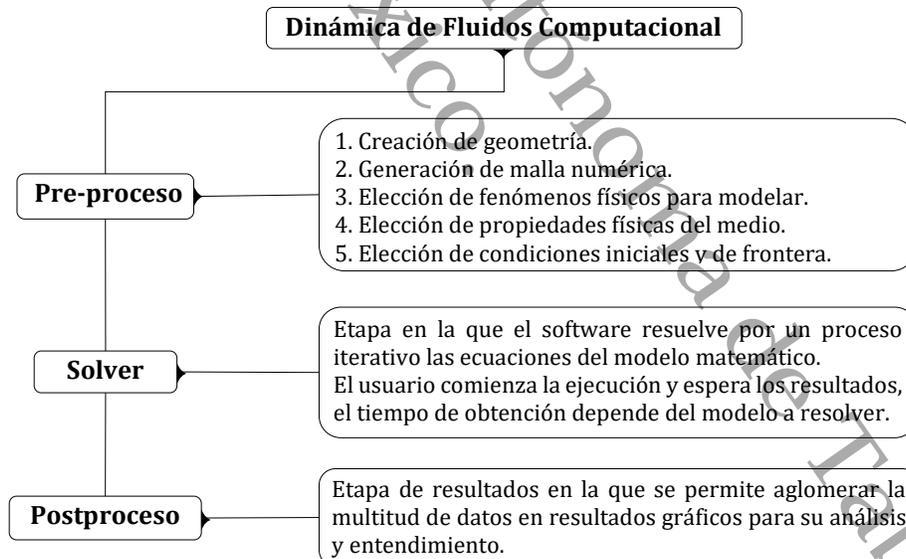


Figura 9. Estructura del proceso de CFD. Fuente: Xamán y Gijón-Rivera (2015).



2.12. ANSYS FLUENT

ANSYS es una empresa fundada en 1970 y entre sus productos ofrece el software de análisis de flujo de fluidos conocido como FLUENT el cual cuenta con una amplia capacidad de modelado, entre ellos modelos turbulentos, flujos multifásicos, intercambiadores de calor y combustión. FLUENT funciona a través de una interfaz gráfica que permite seguir la estructura general del proceso de CFD (ANSYS, 2020).

2.12.1. Geometría

La geometría consiste en un diseño asistido por computadora (CAD) del sistema a modelar; es decir, el dimensionamiento de su estructura y la zona del fluido. Puede usarse un modelo 2D o 3D según las preferencias del usuario. La herramienta principal ofrecida por ANSYS para esta función se denomina *DesignModeler* (ANSYS, 2012). Un ejemplo de geometría presentado por ANSYS se observa en la Figura 10a, el interés de este modelo se basa en el dominio del fluido (aire) y no en la estructura material del mismo, por lo que solo se modelaron los bordes que tienen contacto con el fluido y no el automóvil completo.

2.12.2. Malla

De acuerdo con Xamán y Gijón-Rivera, la solución numérica de ecuaciones diferenciales parciales requiere de la discretización espacial de las ecuaciones sobre un dominio denominado malla numérica. Una malla es un conjunto de puntos distribuidos sobre un campo de cálculo, en cada uno de estos puntos se reemplazan las ecuaciones diferenciales continuas con un sistema simultáneo de ecuaciones algebraicas discretas (Figura 10b).

Los puntos se deben distribuir de acuerdo con las características del análisis, concentrando más puntos de malla en la región donde puede haber altos gradientes de la variable en análisis (en el caso de la Figura 9b, hay más puntos alrededor del automóvil), el refinamiento es importante cuando hay cambios fuertes en los gradientes de la solución



de las ecuaciones. La herramienta donde se crea la malla es conocido como *Mesh*, en este se puede seleccionar una amplia variedad de criterios y opciones de mallado.

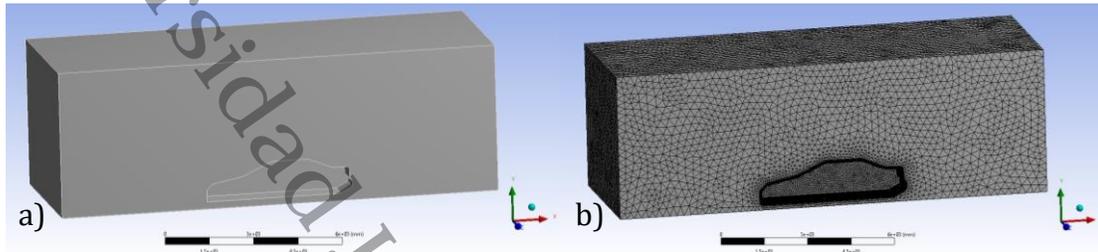


Figura 10. Ejemplo ofrecido por ANSYS que consiste en el análisis del coeficiente de arrastre del aire alrededor de un automóvil. a) Geometría del sistema. b) Malla del sistema. Fuente: ANSYS (2020).

2.12.3. FLUENT

Para realizar la simulación se utiliza el componente FLUENT, que permite seleccionar los criterios del modelado en el siguiente orden:

1. Determinar si el modelo estará basado en la presión o en la densidad, y si será estacionario o transitorio. La diferencia entre estos últimos radica en que en estado estacionario se desprecian los términos de acumulación en los balances de materia, energía y momentum, mientras que en estado transitorio sí son considerados por lo que es posible conocer el comportamiento dinámico de las variables de estado.
2. Determinar los modelos de simulación que apliquen en el sistema (multifásico, viscoso, radiación).
3. Seleccionar los materiales del sistema (agua, aire u otras sustancias químicas).
4. Determinar el desempeño que tendrá el fluido, como la velocidad de entrada o de salida, si el fluido rota o se traslada.
5. Definir las condiciones de frontera en las paredes del modelo, por ejemplo, si una pared presenta deslizamiento o no.
6. Seleccionar el método de solución, como el método SIMPLE mencionado anteriormente.
7. Establecer los factores de relajación, estos aumentan la estabilidad de la solución relajando el cálculo iterativo.



Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga (*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes



8. Determinar las condiciones iniciales del modelo (inicialización).
9. Iniciar el cálculo.

El cálculo en FLUENT en estado transitorio se realiza de acuerdo con tres parámetros:

1. *Time step size* (Tamaño de paso para la variable tiempo),
2. Número máximo de iteraciones por tamaño de paso, y
3. Número de pasos.

Un tamaño de paso en el tiempo (TP) es el tiempo que avanza la simulación del modelo. Por cada TP son necesarias cierto número de iteraciones para que el cálculo sea convergente (que los valores residuales de las ecuaciones tiendan a cero). El número de pasos son las veces que se repetirá el cálculo. Por ejemplo, para una simulación de un proceso que dure 10 s, se puede establecer un TP de 0.001 s que contará con 100 iteraciones, para lograr los 10 s se necesitarían 10,000 TP. El tiempo que tarda la simulación depende de varios factores: el número de nodos y elementos en la malla, el número de iteraciones y, principalmente, la capacidad del equipo de cómputo.

2.12.4. Modelos turbulentos

El modelo ideal para la simulación depende del régimen de flujo del proceso de tratamiento. Los flujos pueden ser clasificados como laminares, en transición o turbulentos según su Número de Reynolds, aunque en la mayoría de los procesos el régimen suele ser turbulento (Bridgeman *et al.*, 2009; ANSYS, 2020).

En el enfoque computacional, existen tres métodos que pueden utilizarse para calcular un flujo turbulento: *Direct Numerical Simulation* (DNS), *Large Eddy Simulation* (LES) y *Reynolds-Averaged Navier-Stokes Simulation* (RANS) (ANSYS, 2020). De acuerdo con Bridgeman *et al.* los modelos turbulentos RANS se componen de dos ecuaciones donde las escalas de velocidad y longitud turbulentas se determinan mediante la solución de dos ecuaciones de transporte separadas; una para la energía cinética turbulenta, k , y otra para



Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga (*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes



la escala de longitud de turbulencia o un parámetro equivalente (ε , la disipación de la energía cinética de la turbulencia por unidad de tiempo, o ω , la velocidad a la que se disipa la energía turbulenta), los modelos turbulentos con mejor crítica por estos autores son el *Renormalized Groups k- ε* (RNG) y el modelo *Realizable k- ε* siendo este último también recomendado por ANSYS (Ecuaciones 1 y 2). Además, en el caso de la coagulación-floculación, recomiendan el uso de un modelo multifásico euleriano que comprenda la interacción de dos fases: líquida (agua) y sólida (coloides).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_3 G_b + S_\varepsilon \quad (2)$$

donde C_2 es una constante. σ_k y σ_ε son los números turbulentos Prandtl para k y ε , respectivamente. S_k y S_ε son términos definidos por el usuario. Los valores de las constantes del modelo empírico son generalmente aceptados como $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right]$, $C_2 = 1.9$, $\sigma_k = 1.9$ y $\sigma_\varepsilon = 1.2$.

2.12.5. Modelo de Balance de Población

Los modelos multifásicos que incorporan una distribución de tamaño de partículas (DTP), como en el proceso de coagulación-floculación, requieren un Modelo de Balance de Población (MBP), que permite modelar sistemas con una fase secundaria. Este proceso puede ser una combinación de fenómenos como nucleación, crecimiento, dispersión, disolución, acumulación y rompimiento. Uno de los métodos de solución es el discreto: requiere que la población de partículas sea discretizada en un número finito de intervalos (del inglés, *bins*) y está basado en la representación de la DTP en términos de estos *bins*. Este método cuenta con la ventaja de que la DTP es calculada directamente; sin embargo, los *bins* deben ser definidos por el usuario (Bridgeman *et al.*, 2009; ANSYS, 2013).



Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga (*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes



Según Quezada *et al.* (2020) las ecuaciones del MBP están basadas en la discretización del tamaño de las partículas que siguen una progresión geométrica para el volumen de partícula $V_{i+1} = 2V_i$. La ecuación principal está dada por:

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} = \sum_{j=1}^{i-2} 2^{j-(i-1)} Q_{i-1,j} N_{i-1} N_j + \frac{1}{2} Q_{i-1,j} N_{i-1} N_{i-1} - \sum_{j=1}^{i-1} 2^{j-(i-1)} Q_{i,j} N_i N_j - \sum_{j=1}^{imax1} Q_{i,j} N_i N_j - S_i N_i + \sum_{j=1}^{imax2} \Gamma_{i,j} S_j N_j \quad (3)$$

donde N_i es la concentración de aglomerados en el *bin* i , es decir N_1 es el número concentración de partículas primarias en el *bin* 1. $imax_1$ y $imax_2$ representan el máximo número de intervalos usados para describir el espectro completo del tamaño de aglomeraciones, respectivamente, por tasa de aglomeración y fragmentación. Q , S y Γ son funciones que representan la tasa de aglomeración, fragmentación y la función de distribución del sistema particulado. Cada término a la derecha de la ecuación representa un proceso físico, descritos en la Tabla 3.

El MBP que ANSYS FLUENT utiliza está basado en trabajos como el de Hounslow *et al.* (1988), Kumar y Ramkrishna (1996) y Luo y Svendsen (1996). A pesar de que cada uno de estos autores (incluidos Quezada *et al.*) desarrolla su propia teoría sobre el modelo, la esencia de los términos alberga los mismos principios: crecimiento por aglomerados, colisión, fragmentación y rompimiento (Tabla 3).



Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga (*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes



Tabla 3. Descripción de los componentes en la ecuación de Balance de Población.

Proceso	Descripción	Componente
El primer y segundo término describen la formación de aglomerados por colisión con partículas más pequeñas.		$\sum_{j=1}^{i-2} 2^{j-(i-1)} Q_{i-1,j} N_{i-1} N_j$ $+ \frac{1}{2} Q_{i-1,j} N_{i-1} N_{i-1}$
El tercer y cuarto término representan la colisión de micro y macro flóculos convirtiéndose en partículas más grandes.		$- \sum_{j=1}^{i-1} 2^{j-(i-1)} Q_{i,j} N_i N_j - \sum_{j=1}^{imax1} Q_{i,j} N_i N_j$
El quinto término representa la pérdida de aglomerados en el <i>i-ésimo bin</i> por fragmentación.		$- S_i N_i$
El sexto término denota el rompimiento de flóculos más grandes.		$+ \sum_{j=1}^{imax2} \Gamma_{i,j} S_j N_j$

Fuente: basado en Lee *et al.* (2011) y Quezada *et al.* (2020).



3. ANTECEDENTES

3.1. Sulfato de aluminio como coagulante

Al ser el coagulante metálico más utilizado en plantas potabilizadoras, el sulfato de aluminio también es el coagulante más común en estudios sobre coagulación-floculación. En la Tabla 4 se observa una comparación de estudios en los que se preparó agua sintética con diferentes valores de turbiedad inicial, que van desde 75 hasta 400 UTN. La eficiencia de remoción de este coagulante metálico es muy alta en todos los casos, siendo el porcentaje más bajo de 93.3% y el más alto de 99.7%.

Tabla 4. Uso del sulfato de aluminio como coagulante.

Tipo de muestra	pH	Dosis óptima mg/L	Turbiedad inicial UTN	Remoción %	Velocidad de agitación		Sedimentación (min)	Referencia
					Coagulación ω en rpm (t en s)	Floculación ω en rpm (t en min)		
Bentonita	-	25	400	99.7	300 (5)	40 (20)	10	[1]
Caolín	6	15	200	99.3	100 (120)	30 (20)	30	[2]
Arena y arcilla	7	31	100	94.4	70 (60)	30 (15)	20	[3]
		54	180	93.3				
		56	260	95.8				
Bentonita	7	10	75	97	300 (60)	40 (20)	10	[4]
		20	150	97				
		60	300	99				

[1] Valeriano-Mamani y Matos-Chamorro (2019), [2] Martínez-Morris *et al.* (2017), [3] León-Luque *et al.* (2016), [4] Al-Sameraiy, (2012).

3.2. Uso de almidón como floculante

El almidón es un polímero natural que se ha utilizado como floculante en diversas investigaciones como las expuestas en la Tabla 5. Las dosis empleadas por los autores varían según el porcentaje de concentración de la solución de referencia. Una concentración alta en las soluciones de referencia podría causar una dosificación excesiva



Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga (*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes



que provoque un aumento indeseable en la DQO o en el carbono orgánico total (COT) aunque los niveles de remoción de turbiedad o color sean altos, además, el efecto de altas concentraciones de almidón resulta en una eficiencia de remoción muy baja, como el caso de Abd Rahim *et al.* (2019), la dosis óptima de floculante que obtuvieron fue de 60 mg/L, pero en una de sus pruebas utilizaron e120 mg/L, obteniendo una eficiencia de 30%.

Tabla 5. Estudios sobre almidón como floculante natural.

Coagulante	%*	Dosis óptima (mg/L)	Tipo de almidón (Nombre científico)	%*	Dosis óptima (mg/L)	Turbiedad inicial (UTN)	% Remoción	Referencia
Sulfato de aluminio	1	25	Plátano (<i>Musa acuminata</i>)	1	25	75	98.5	[1]
	1	10.5	Cáscara de yuca (<i>Manihot esculenta</i>)	0.1	60	100	92.1	[2]
	1	27.5	Papa (<i>Solanum tuberosum</i>)	10	15	40	95.7	[3]
	0.1	6	Ñame (<i>Dioscorea alata</i>)	0.1	1.5	100	86.1	[4]
	-	5	Maíz (<i>Zea mays</i>)	-	0.7	250	96	[5]
	0.1	12	Malanga (<i>Colocasia esculenta</i>)	0.05	1	100	75.3	[6]
Cloruro férrico	-	10	Comercial	-	0.2	100	92.4	[7]

*Es el porcentaje de concentración de la solución de referencia.

[1] Chavez Melgarejo *et al.* (2019), [2] Abd Rahim *et al.* (2019), [3] Tito Surco (2018), [4] Olan Villatoro (2014), [5] Mosleh *et al.* (2014), [6] Celaya López (2013), [7] Shahriari *et al.* (2011).

3.3. Distribución del tamaño de partículas

En la Tabla 6 se enlistan algunas investigaciones en las que se utilizó la técnica de análisis de imagen para obtener la distribución del tamaño de los flóculos. Según los valores se distingue que al emplear floculante en el proceso de coagulación-floculación, el tamaño de los flóculos incrementa: los diámetros mínimos y máximos obtenidos haciendo uso de coagulantes como policloruro de aluminio y sulfato de aluminio son de 0.1 a 1.2 mm, por otro lado, con el uso de floculantes se obtienen tamaño de flóculos entre 0.88 a 2.72 mm para el caso de estos autores.



Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga (*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes



Tabla 6. Tamaño de flóculos registrados por diversos autores utilizando análisis de imagen.

Programa	Coagulante	Floculante	Diámetro promedio sin floculante (mm)	Diámetro promedio con floculante (mm)	Referencia
MATLAB	Nitrato de potasio	<i>Tecoma stans</i>	-	0.88	[1]
Fmans 10	Policloruro de aluminio	-	0.1 - 0.25	-	[2]
GSA Image Analyser	Sulfato de aluminio	-	0.15 - 1.7	-	[3]
LabVIEW	Policloruro de aluminio	-	0.12	-	[4]
-	Policloruro de aluminio	-	0.869	-	[5]
TURBISCAN LABexpert	-	Sokoflok 56A	-	1.442	[6]
VISILOG 5	Sulfato de aluminio	-	1.2	-	[7]
Quantimet 720	Cloruro férrico	Polímero superfloc A 100	0.442	2.72	[8]

[1] Dwari y Mishra (2019), [2] He *et al.* (2018), [3] Zapata del Ángel (2017), [4] Sun *et al.* (2016), [5] Hongling *et al.* (2015), [6] Šulc y Svačina (2010), [7] Bouyer *et al.* (2005), [8] Leentvaar y Rebhun (1983).

3.4. CFD en modelos de floculación

Diversos autores han utilizado ANSYS FLUENT como herramienta de CFD en estudios relacionados al proceso de coagulación o para visualizar la hidrodinámica del fluido en tanques de agitación. Bridgeman *et al.* (2010) realizaron una simulación en la que compararon un tanque de agitación circular con uno de estructura rectangular, se observó una tasa de disipación de turbulencia más alta en el tanque rectangular que en el circular, pero una mejor distribución en el tanque circular.

Pengfei y Jun (2015) probaron el impacto de diferentes tipos de agitador en el tamaño de los flóculos mediante CFD y métodos experimentales. Sus resultados mostraron que los agitadores de flujo radial generan gran esfuerzo cortante en el fluido, lo que mejora la estructura y tamaño de los flóculos, en contraste, los agitadores de flujo axial generan una circulación en el fluido que acelera el crecimiento de los flóculos a una etapa inicial de la



Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga (*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes



floculación, pero que al final pueden provocar una rápida ruptura con flóculos pequeños. Por su parte, He *et al.* (2018) examinaron el efecto que la profundidad de los tanques de agitación tiene sobre el crecimiento de los flóculos, probaron simulaciones de tanques con diferente profundidad y gradiente de velocidad, concluyendo que el efecto del crecimiento está relacionado con el mecanismo predominante (a mayor gradiente con mayor altura predomina el rompimiento de flóculos). Recientemente, Shi *et al.* (2019) aplicaron un MBP para simular la floculación y sedimentación de partículas y concluyeron que el MBP es un modelo óptimo que puede simular simultáneamente los procesos de aglomeración y rompimiento entre micro y macro flóculos con forma irregular.



4. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, se han reportado diversos estudios acerca de floculantes naturales; sin embargo, la mayoría de las especies utilizadas no son comunes en el estado de Tabasco o ya forman parte de la dieta del tabasqueño. No es el caso de la malanga (*Colocasia esculenta*) ya que es prescindible en la dieta y de fácil adquisición. Además, el aprovechamiento de su contenido de almidón permite evitar pérdidas de producción provocadas por la susceptibilidad de sus tubérculos a la putrefacción. Por lo anterior, se propone el empleo de esta especie como materia prima para la obtención de su almidón como agente floculante.

El propósito es obtener información experimental que permita simular el proceso de coagulación-floculación con y sin floculante mediante un análisis de dinámica de fluidos computacional (CFD) y un modelo de balance de población de flóculos permitiendo obtener datos del comportamiento de los coloides y el fluido. CFD es una herramienta que simula por computadora sistemas o condiciones experimentales, permitiendo el ahorro de recursos. Al validar la simulación con las pruebas experimentales se abre la posibilidad de realizar con facilidad otras pruebas numéricas, que podrán utilizar como base los parámetros iniciales obtenidos en este trabajo.



5. OBJETIVOS

5.1. Objetivo general

Simular el desempeño del proceso de coagulación-floculación a partir de un análisis de dinámica de fluidos computacional y un modelo de balance de población mediante información experimental empleando un agente floculante basado en almidón.

5.2. Objetivos específicos

- Sintetizar almidón nativo a partir de tubérculos de malanga (*Colocasia esculenta*).
- Determinar la dosis óptima del agente coagulante (sulfato de aluminio) según su eficiencia de remoción de turbiedad.
- Determinar la dosis óptima del almidón nativo de malanga (*Colocasia esculenta*) como agente floculante.
- Estimar la distribución del tamaño de flóculo mediante fotografía y análisis de imagen.
- Realizar simulaciones CFD para analizar el efecto de la hidrodinámica del agua y el comportamiento de los flóculos con y sin agente floculante en el proceso.



6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. Síntesis de almidón nativo

El método de obtención del almidón se basó en las técnicas de los siguientes autores: Rodríguez Reyes (2006), Martínez Ortiz (2007), Celaya López (2013) y Olan Villatoro (2014). Se inició con el lavado del tubérculo para la eliminación de impurezas, se procedió al pesado, pelado y picado en cubos. Se remojó en agua fría para su posterior molienda en licuadora. La pasta obtenida se filtró, el líquido cernido se conservó en un recipiente, mientras que la pulpa se centrifugó para extraer la mayor cantidad de líquido posible. La solución se dejó en reposo por 3 horas para separar el sedimento del sobrenadante por decantación, obteniendo una pasta blanca que se conservó en refrigeración por 24 horas. Se repitió el procedimiento desde la filtración y la pasta obtenida se secó en un deshidratador de alimentos Hamilton Beach a 40°C. Se molió, trituro y tamizó en un tamiz No. 270 escala ASTM. Para finalizar, el almidón obtenido se guardó en bolsas de plástico herméticas.

6.2. Preparación de la muestra

El suelo seleccionado fue tipo vertisol, es predominante en la región y característico por su alto contenido en arcilla. La muestra fue colectada en las coordenadas 17°56'39.16"N, 93° 1'0.21"O a una profundidad de 30 cm de la superficie para evitar raíces de plantas. El pretratamiento consistió en el secado en horno para la disminución de humedad a una temperatura de 35°C. La muestra seca se trituro, se tamizó y se almacenó en bolsas de plástico herméticas.



Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga (*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes



Con el suelo tratado, se prepararon las muestras de agua sintética para las pruebas de jarras. Se disolvió aproximadamente 0.75 g de suelo en 1 L de agua contenidos en cada una de las seis jarras. Para garantizar la homogeneización de la muestra, se agitó a 250 rpm por 5 min, se disminuyó la velocidad a 100 rpm por 20 min y se ajustó el pH a un valor de 7 utilizando una solución de HCl o NaOH, según fue requerido. Después, se dejó sedimentar por 15 min y se midieron valores de pH, temperatura, conductividad eléctrica y sólidos disueltos con un medidor HANNA HI98130, color y turbiedad con un colorímetro marca HACH DR900 y DQO en un reactor HACH DRB200.

6.3. Determinación de la dosis óptima del agente coagulante

La metodología para determinar la dosis óptima del coagulante se basó en la norma estadounidense ASTM D2035-13, que sugiere una concentración de la solución de referencia de sulfato de aluminio de 10 ± 0.1 g/L, en los que cada mililitro de esta solución añadido a un litro de agua equivale a 10 mg de coagulante. Sin embargo, para disminuir el uso de reactivos, se optó por una concentración de 1 g/L, lo que equivale a 1 mg/L de coagulante por mililitro. Por lo anterior, se disolvió 1 g de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ (Pureza mínima del 98%, marca CIVEQ) en 1 L de agua destilada.

Se prepararon las seis jarras del equipo con la muestra de agua sintética previamente homogenizada, se encendió el equipo a una velocidad de agitación de 120 rpm y se adicionó la dosificación establecida de coagulante de manera simultánea permitiendo agitar por 1 min. Posteriormente se redujo la velocidad a 30 rpm por 20 min. Se detuvo la agitación y se dejó sedimentar la muestra por 15 min. Al finalizar, se midieron los parámetros de pH, temperatura, conductividad eléctrica, turbiedad, color y sólidos disueltos en cada una de las muestras tratadas. La Tabla 7 muestra el diseño experimental.



Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga (*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes



Tabla 7. Diseño experimental para obtención de dosis óptima de sulfato de aluminio.

	Jarra	1	2	3	4	5	6
Dosis de Prueba 1		0	14	16	20	24	26
Al₂(SO₄)₃ Prueba 2		0	$D_{aprox} - 4$	$D_{aprox} - 2$	D_{aprox}	$D_{aprox} + 2$	$D_{aprox} + 4$

D_{aprox} = Dosis determinada en la prueba 1.

La Prueba 1 tuvo el propósito de realizar una prueba exploratoria que permitió encontrar la dosis aproximada de agente coagulante (D_{aprox}). Como se mencionó en el Apartado 3.1. la dosis óptima de sulfato de aluminio en pruebas realizadas por distintos autores oscila en un rango de 10 a 60 mg/L, este último resulta en una dosificación muy alta para 200 UTN, por lo que se tomó la mitad y se seleccionaron valores entre 10 a 30 mg/L. En la Prueba 2 se establecieron dosificaciones en un rango más cercano a la dosis óptima aproximada obtenida en la Prueba 1, esto con el fin de encontrar la dosis óptima precisa de coagulante ($D_{op,c}$). Tanto las Pruebas 1 y 2 fueron repetidas tres veces (3 réplicas) para realizar un análisis estadístico.

6.4. Determinación de la dosis óptima del floculante

La suspensión se realizó pesando 0.025 g de almidón en 250 mL de agua, equivalente a una concentración de 0.1 g/L. Esta preparación es adecuada para evitar el desperdicio de almidón entre pruebas, además, el nivel de la alícuota permite un error de medición menor en la toma de muestra. Se seleccionaron dos valores de dosificaciones según los autores de la Tabla 5 en el Apartado 3.2, la primera de 0.5 mg/L y la segunda de 0.2 mg/L, para conocer el volumen necesario de suspensión para cada una de las dosificaciones se utilizó la fórmula de la dilución:

$$C_1V_1 = C_2V_2 \tag{4}$$



Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga (*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes



donde C_1 es la concentración inicial de la suspensión madre (100 mg/L), V_1 es el volumen de suspensión necesario (L), C_2 es la concentración deseada (0.5 o 0.2 mg/L) y V_2 es el volumen de agua en la jarra (1 L).

Para la determinación de la dosis óptima del floculante ($D_{op,f}$) se realizó una prueba de jarras por triplicado, con la mitad de la dosis óptima precisa de coagulante en todas las jarras, pero en tres de ellas una concentración de floculante de 0.5 mg/L y en las restantes, 0.2 mg/L. El procedimiento consistió en que, al finalizar el tiempo de coagulación se añadió el volumen correspondiente de floculante según la prueba (5 y 2 mL para 0.5 y 0.2 mg/L, respectivamente). Al finalizar la sedimentación se midieron los parámetros de pH, temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos, turbiedad, color, y DQO. La Tabla 8 resume el diseño experimental.

Tabla 8. Diseño experimental para obtención de dosis óptima de floculante.

Jarra	1	2	3	4	5	6
Coagulante + floculante (mg/L)	$\frac{D_{op,c}}{2} + 0.2$	$\frac{D_{op,c}}{2} + 0.2$	$\frac{D_{op,c}}{2} + 0.2$	$\frac{D_{op,c}}{2} + 0.5$	$\frac{D_{op,c}}{2} + 0.5$	$\frac{D_{op,c}}{2} + 0.5$

$D_{op,c}$ = Dosis óptima determinada en la Prueba 2.

6.5. Distribución del tamaño de los flóculos

La técnica consistió en el procesamiento de imágenes de los flóculos formados en dos de las pruebas de jarras mencionadas en el apartado anterior: la primera, la jarra con la dosis óptima de sulfato de aluminio ($D_{op,c}$) y la segunda, la jarra con la mejor dosis de floculante ($D_{op,f}$) con la intención de comparar el tamaño de los flóculos existentes en ambas pruebas. El procedimiento se ilustra en la Figura 11.



Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga (*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes

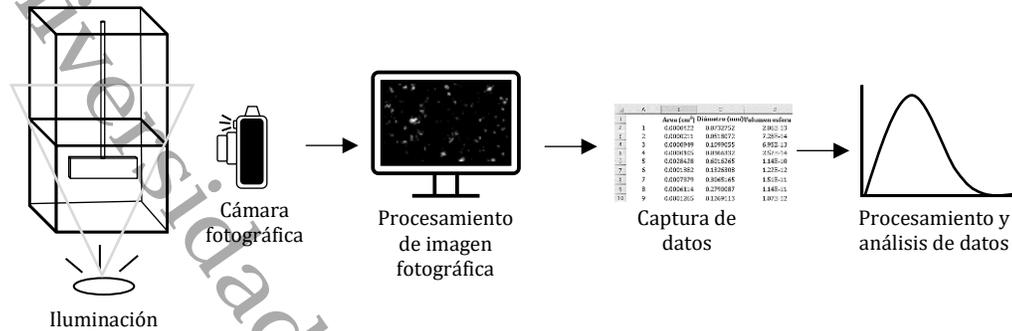


Figura 11. Procedimiento para el análisis de imagen.

En una habitación oscura y con iluminación en la pared inferior de la jarra correspondiente a la prueba, se tomaron fotografías en ráfaga desde la floculación y se utilizó un área representativa de las obtenidas a los 5, 10 y 15 minutos para procesarse en el programa *ImageJ* (Figura 12). Se estableció la escala según una medición de referencia y se utilizaron las herramientas *Bandpass filter*, que aplica un filtro en la imagen que permite resaltar detalles; *Threshold*, que posteriza la imagen en tonos continuos; y, por último, *Analyze Particles*, que cuenta el tamaño de las partículas. Antes del procesamiento se utilizó el software *Adobe Photoshop* para ajustar los parámetros de color, brillo, contraste y nitidez y se eliminaron los objetos indeseables. El resultado fue una base de datos que enlista el número de partícula con su área correspondiente.

Para obtener el diámetro de las partículas respecto al área obtenida, se utilizó la siguiente fórmula:

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (5)$$



Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga (*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes



Figura 12. Procesamiento de imágenes empleando el software ImageJ.

donde D es el diámetro de la partícula (mm) y A es el área de la partícula (mm^2). Se aplicó una distribución Beta estándar a los datos obtenidos en las fotografías (5, 10 y 15 min) de ambos experimentos, se restó el diámetro mínimo y máximo de cada prueba para obtener un rango, este rango se dividió entre una selección de 20 intervalos (para un histograma más preciso) con esto se obtuvieron los límites inferiores y superiores para cada intervalo. Según Krishnamoorthy (2006) la función de distribución de probabilidad es la siguiente:

$$f(x) = \frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1} \quad (6)$$

donde $0 < x < 1$ es la variable distribuida (en este estudio, el diámetro de los floculos), α y β son parámetros de la distribución Beta y Γ es la función gamma, definida como:

$$\Gamma(c) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{c-1} dt \quad (7)$$

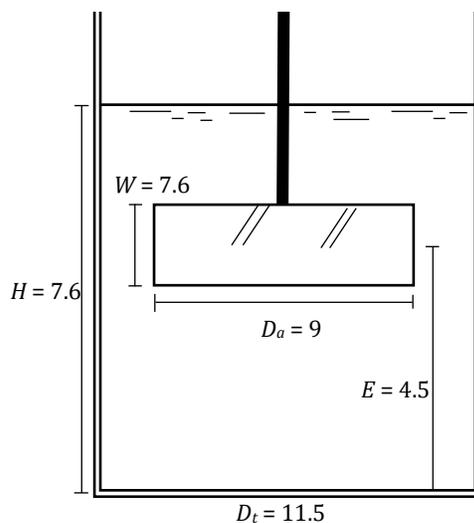


donde c es un número real y t es una variable de integración de la función gamma. De acuerdo con Sanlúcar (2015) la función de probabilidad puede escribirse en término de los límites superior e inferior para la variable de distribución:

$$\begin{aligned} f(x; \alpha, \beta, x_{min}, x_{max}) &= \frac{1}{x_{max} - x_{min}} \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \right)^{\alpha-1} \left(\frac{x_{max} - x}{x_{max} - x_{min}} \right)^{\beta-1} \\ &= \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \frac{(x - x_{min})^{\alpha-1} (x_{max} - x)^{\beta-1}}{(x_{max} - x_{min})^{\alpha+\beta-1}} \end{aligned} \quad (8)$$

6.6. Dinámica de Fluidos Computacional

El modelado se realizó en ANSYS FLUENT versión 2019 R3, siguiendo la estructura general del proceso de CFD, se inició diseñando la geometría, para esto, se necesitó un dimensionamiento de la jarra, que permitió precisión en el modelado CAD (Figura 13).



donde D_a es el diámetro de la paleta, E es la altura de la mitad de la paleta desde el fondo del tanque, D_t es el diámetro de la jarra, H es la profundidad del fluido en el tanque y W es el alto de la paleta. Los valores están dados en cm.

Figura 13. Dimensiones de la jarra.



Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga (*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes



Respetando las medidas, se dibujó la geometría en FLUENT utilizando *DesignModeler*. Uno de los puntos más importantes en esta herramienta es procurar dibujar solo los cuerpos necesarios para llevar a cabo la simulación, por lo que se prescindió del eje que sostiene la paleta, un cuerpo innecesario consumiría más elementos de mallado y, por lo tanto, más tiempo de simulación. El cuerpo cilíndrico alrededor de la paleta corresponde al dominio de fluido, en el que se establece la velocidad de rotación de la paleta (Figura 14).

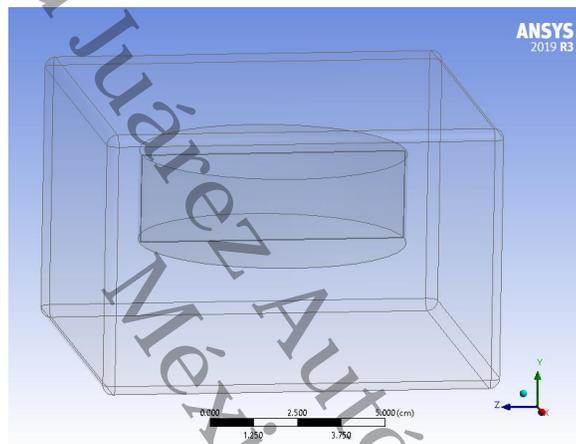


Figura 14. Geometría en *DesignModeler*.

Para el mallado se estableció una región de contacto entre el dominio de fluido alrededor de la paleta y el fluido de la jarra, con esto se crea una continuidad entre ambos y permite que la rotación de la paleta influya en el volumen total del fluido. Después, se crearon los *Named Selections*, que es una función para designar nombres; para ello se seleccionaron caras y cuerpos y se nombraron según la función que cumplen en el modelo. La malla tuvo un total de 683,811 nodos y 473,794 elementos (Figura 15).

Por último, se utilizó FLUENT para seleccionar los parámetros de la simulación. La simulación se estableció basada en la presión y en tiempo transitorio.

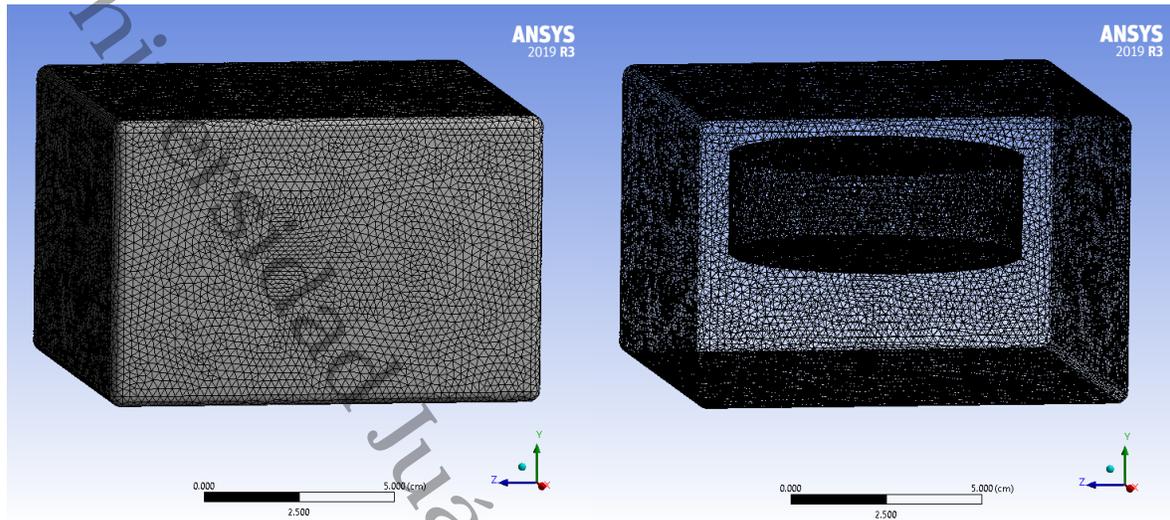


Figura 15. Malla con y sin estructura.

6.6.1. Materiales

Los materiales utilizados fueron agua ($\rho_w = 995.88 \text{ kg/m}^3$, $\mu_w = 0.000805 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ a 29.5°C , la temperatura promedio del agua durante los experimentos) y suelo ($\rho_s = 1400 \text{ kg/m}^3$). La densidad y viscosidad del agua se obtuvieron por una relación empírica relacionada con la temperatura aplicada por Zapata del Ángel (2017):

$$\rho_w = -0.005166 \cdot T^2 + 0.00982 \cdot T + 1000.086 \quad (9)$$

$$\mu_w = 0.00002414 \cdot 10^{\left(\frac{247.8}{T+273.156-140}\right)} \quad (10)$$

donde T es la temperatura del agua, en $^\circ\text{C}$. Cabe mencionar que estas correlaciones tienen un rango de aplicación de 0 a 50°C . La densidad del suelo se obtuvo a partir de la diferencia de peso al llenar una probeta de 25 mL con la muestra de suelo.

6.6.2. Modelos

Los modelos utilizados fueron:

- De fases: Multifásico euleriano con dos fases: agua y suelo.



Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga (*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes



- Turbulento: Viscoso $k-\varepsilon$ realizable
- Floculación: Balance de Población

Las especificaciones para el modelo de Balance de Población se resumen en la Tabla 9, donde el diámetro mínimo y máximo corresponden a los obtenidos en el análisis de imagen, con la diferencia de que para el máximo se considera el diámetro promedio, ya que un tamaño de partícula tan grande no sería representativo en la simulación.

Tabla 9. Parámetros seleccionados para el modelo de Balance de Población.

	Fase	Bins	Diámetro min (m)	Diámetro Max (m)
Sin floculante			0.0001	0.00035
Con floculante	Arcilla	4	0.0002	0.00075

6.6.3. Inicialización

Los valores de inicialización utilizados se presentan en la Tabla 10. La energía cinética turbulenta y la tasa de disipación de energía son valores de referencia obtenidos por Celaya López (2017). Para la fracción volumen se tomó el doble de lo reportado por Zapata del Ángel (2015) quien utilizó un valor de 0.000125 g/L para una turbiedad de 100 UTN. La fracción de los *bins* se determinó considerando que, al inicio de la simulación, existen más partículas pequeñas que grandes. El bin-3 tiene el tamaño de partículas más pequeño (73%) y el bin-0 el más grande (0.1%), la suma de las fracciones de todos los *bins* es 1.

Tabla 10. Valores de inicialización.

Propiedad	Valor
Energía cinética turbulenta (m^2/s^2)	0.001
Tasa de disipación de energía (m^2/s^3)	0.001
Fracción volumen del suelo (m^3/m^3)	0.00025
Fracción de suelo del bin-0	0.001
Fracción de suelo del bin-1	0.027
Fracción de suelo del bin-2	0.243
Fracción de suelo del bin-3	0.729
Velocidad rotacional (rpm)	30



Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga (*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes



6.6.4. Solución

Los parámetros para iniciar el cálculo se detallan en la Tabla 11. El TP para ambas simulaciones inició con un valor de 0.0005 s hasta llegar a los 3 s de simulación, los valores siguientes se detallan en la tabla.

Tabla 11. Estrategia de simulación para aseguramiento de la convergencia.

Etapa de incremento de TP	Valor	Tiempo de simulación	Tiempo real aproximado* por cada 100 TP**
Etapa 1	0.0005	0 – 3 s	60 min
Etapa 2	0.001	3 – 6 s	90 min
Etapa 3	0.005	6 – 17 s	130 min
Etapa 4	0.008	17 – 50 s	210 min
Iteraciones por Tamaño de Paso	200		

* Con 4 procesadores, considerando autoguardado cada 50 TP y ejecución de comandos cada 10 TP.

** Por ejemplo, para la Etapa 1, el tiempo de cómputo para realizar 100 TP ($0.0005 \text{ s} \times 100 = 0.05 \text{ s}$ de tiempo de simulación) fue 60 min. Para realizar 3 s de tiempo de simulación se requirió de 6,000 TP, equivalente a 3,600 min de tiempo de cómputo)

Para el análisis y la comparación de los resultados se utilizó el componente de Post Procesamiento ofrecido por ANSYS.

6.7. Potencia y mezclado

Para la validación de la velocidad rotacional y el número de Reynolds computarizados por FLUENT, se realizaron los cálculos de potencia y mezclado establecidos por Sincero y Sincero (2003). Las fórmulas se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Parámetros calculados para validación.

Parámetro	Fórmula	Nota
Potencia (W)	$P = K_T N^3 D_a^5 \rho_w$	K_T es el coeficiente de poder, N es la velocidad rotacional, D_a es el diámetro del agitador y ρ_w es la densidad del fluido.
Gradiente de Velocidad (s ⁻¹)	$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}}$	P es la potencia, μ_w es la viscosidad dinámica del fluido y V es el volumen del tanque.
Velocidad rotacional (m/s)	$v = rN$	r es el radio del agitador.



7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Rendimiento de la malanga

El contenido de almidón extraído de la malanga se calculó dividiendo el peso del almidón tamizado (Figura 16) entre el peso de la malanga sin cáscara. El resultado fue un rendimiento de 24.4%, este rendimiento coincide con el obtenido por de los Ángeles Rosales (2016) quien obtuvo un rendimiento de 22.6% de almidón de malanga, Espinosa Díaz (2017) obtuvo un valor menor de 13.8% para esta misma especie. En contraste con otro tubérculo, Chalco Flores (2016) obtuvo un rendimiento de 20.6% para almidón extraído de papa (*Solanum tuberosum*), del mismo modo Melian Subiabre (2010) obtuvo un rango de 15.6% y 17.8% para el contenido de almidón en diferentes especies de papa. El rendimiento obtenido depende del cuidado al realizar el proceso de extracción, donde se pueden obtener pérdidas significativas.



Figura 16. Almidón extraído de malanga.



7.2. Dosis óptima de sulfato de aluminio

Los resultados obtenidos en las pruebas realizadas con sulfato de aluminio como coagulante determinaron que la dosis óptima precisa fue de 24 mg/L, obteniendo una eficiencia de remoción de turbiedad del $93.1 \pm 0.6\%$ y de color del $94.7 \pm 0.5\%$ (Figura 17). Cabe mencionar que la normatividad mexicana (NOM-127-SSA1-1994) establece que el límite máximo permisible en agua potable debe ser de 5 UTN y el valor promedio obtenido en las pruebas experimentales con la dosis óptima fue de 14 ± 1.1 UTN, un caso similar sucedió con el color, el límite máximo permisible según la normativa es de 20 Pt-Co y el valor promedio obtenido en la dosis óptima fue de 76.2 ± 5.8 Pt-Co. Sin embargo, en un sistema integral de potabilización, el proceso de coagulación-floculación suele ser la etapa previa a la filtración, la cual tiene el propósito de remover la turbiedad remanente.

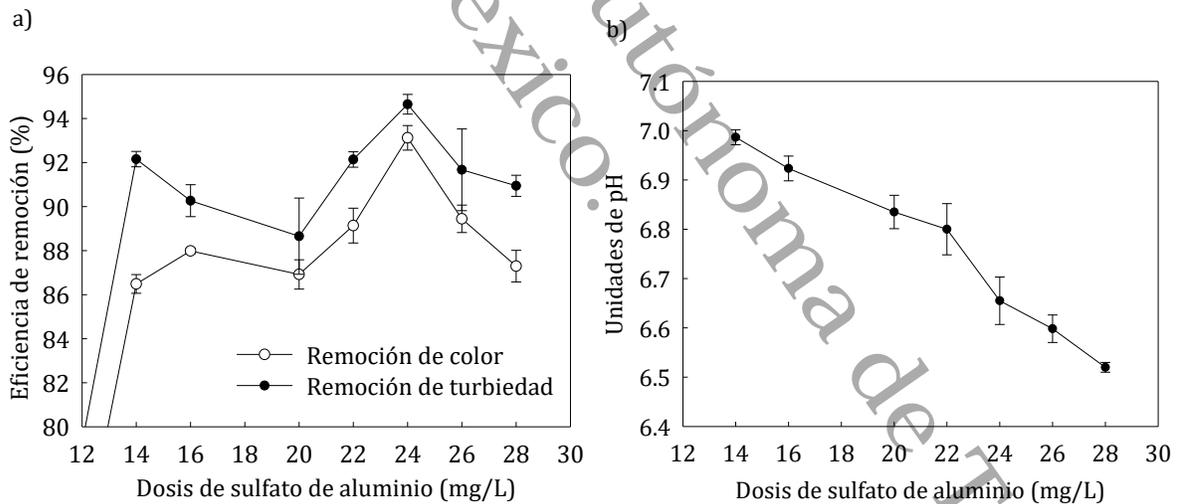


Figura 17. a) Remoción de color y turbiedad con el uso de sulfato de aluminio como coagulante. La turbiedad inicial fue de 200 UTN. b) Efecto de la dosis de sulfato de aluminio sobre el pH del agua.

El rol del pH es significativo porque determina la carga eléctrica de los coloides orgánicos e inorgánicos y es un factor importante en la hidrólisis de las sales de aluminio, el rango óptimo del agua debe ser de 6.5-7.5 (Bratby, 2016) en las pruebas se obtuvo un rango de



Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga (*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes



pH de 6.4 a 7.1. Al tratarse de una sal ácida, el efecto del sulfato de aluminio sobre el pH del agua consiste en una acidificación que incrementa con la dosificación, como se muestra en la Figura 17.

El efecto del pH y la dosis óptima de coagulante coinciden con los presentados por Al-Sameraiy, (2012), León-Luque *et al.* (2016), Martínez-Morris *et al.* (2017) y Valeriano-Mamani y Matos-Chamorro (2019), que obtuvieron porcentajes de remoción de 93.3 a 99.7%. En el caso del pH, Valeriano-Mamani y Matos-Chamorro (2019) presentaron acidificación en el tratamiento con sulfato de aluminio, obteniendo un pH de hasta 5.9.

7.3. Dosis óptima de floculante

Las distintas concentraciones de floculante no presentaron diferencias significativas en la eficiencia de remoción de turbiedad del agua. Se obtuvieron eficiencias de remoción de 93.7 ± 0.9 y $94 \pm 0.3\%$ para 0.2 y 0.5 mg/L, respectivamente. Los resultados muestran porcentajes de remoción más eficientes que los obtenidos sin floculante considerando que es la mitad de la dosis de coagulante, demostrando el potencial del almidón en este proceso. Los porcentajes obtenidos coinciden con los de autores como Celaya López (2013), Mosleh *et al.* (2014), Olan Villatoro (2014), Ttito Surco (2018), Abd Rahim *et al.* (2019) y Chavez Melgarejo *et al.* (2019), que utilizaron sulfato de aluminio y almidón de distintas especies obteniendo porcentajes de remoción de 75.3 a 98.5%. Un punto importante para resaltar es que los valores obtenidos de pH (7.02 ± 0.01 y 7.00 ± 0.01 para 0.2 y 0.5 mg/L, respectivamente) no presentaron acidificación en esta prueba en comparación con la que no tuvo floculante, ya que la suspensión de referencia de almidón tuvo un pH de 6.6, neutralizando la acidificación provocada por la solución de referencia del sulfato de aluminio, que tuvo un pH de 3.7.



Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga (*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes



La medición de DQO para la muestra sin tratamiento fue de 4 mg/L, para las muestras con floculante fue menor a 3 mg/L, lo que implica que la concentración seleccionada para la suspensión de almidón fue adecuada para una eficiencia de remoción óptima que no eleva indeseablemente los niveles de DQO.

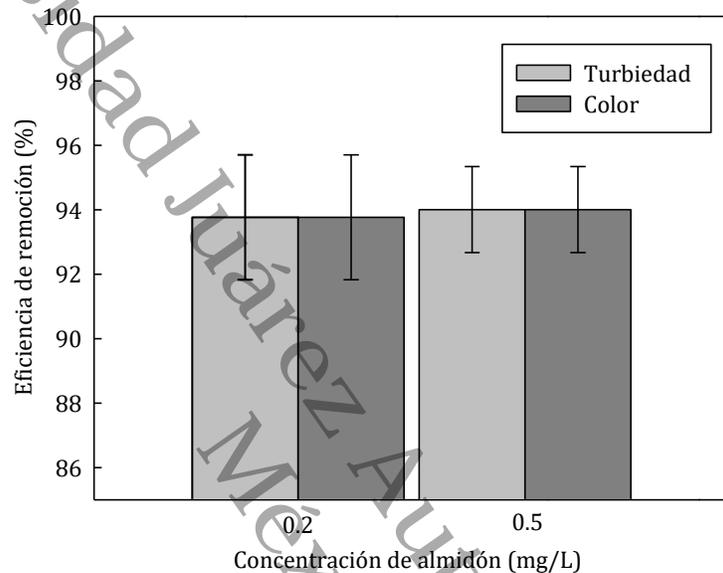


Figura 18. Remoción de color y turbiedad con el uso de floculante de almidón. La dosis de sulfato de aluminio fue de 12 mg/L. La turbiedad inicial fue de 200 UTN.

La Figura 19 muestra que la diferencia entre el agua tratada con y sin floculante es claramente visible, los flóculos adquieren mayor tamaño empleando almidón, también se presenta mayor cantidad de precipitado al centro de la jarra.

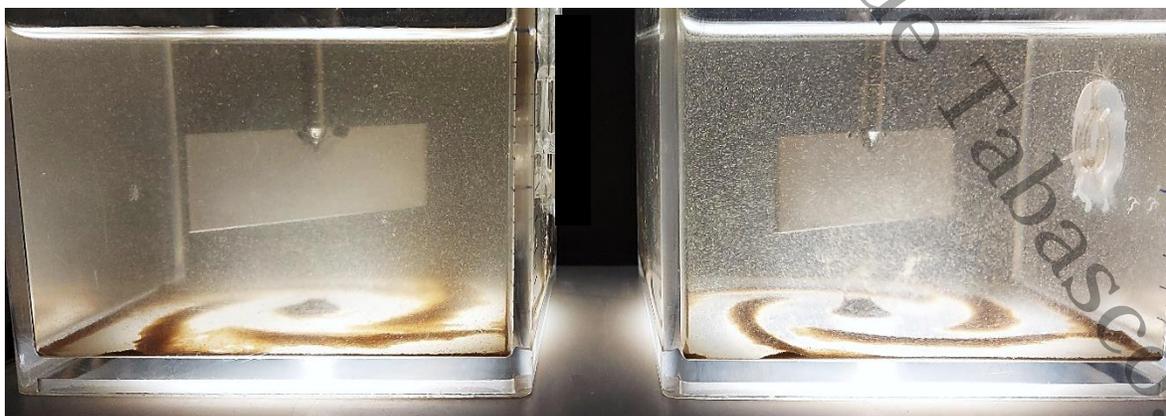


Figura 19. Diferencia apreciable del tamaño de los flóculos en una jarra sin y con floculante.



7.4. Procesamiento de imagen

El procesamiento de imagen desplegó una base de datos por cada fotografía, en las que se midió el área de la partícula como se muestra en la Figura 20.

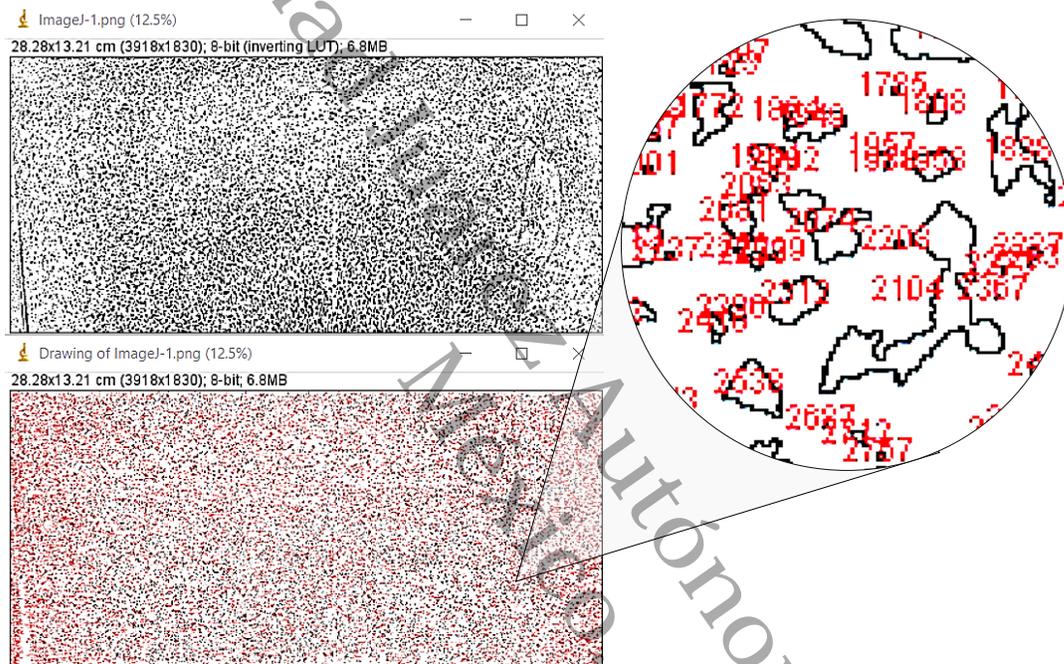


Figura 20. Análisis del área de las partículas usando ImageJ. El número rojo es el número de la partícula en la base de datos. Esta captura corresponde a la fotografía en el minuto 15 de la prueba sin floculante.

Los valores mínimos y máximos obtenidos en cada análisis fotográfico se muestran en la Figura 21 con las imágenes antes del procesamiento en el programa ImageJ. Para la distribución de tamaño sin floculante, el tamaño mínimo de flóculo fue de 0.036 mm y el máximo de 1.922 mm. Por su parte, para las imágenes de flóculos empleando con floculante se obtuvieron valores más grandes de 0.046 y 1.55 mm, también se nota una mejora en la definición y la distribución de los flóculos. Cabe destacar que el tamaño mínimo medido es afectado por la calidad de la imagen. En este estudio, el tamaño de flóculo mínimo detectado (36 μm) es mucho mayor al tamaño típico de los coloides lo que



Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga (*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes



evidencia el límite de detección de la cámara fotográfica empleada para la adquisición de imágenes.

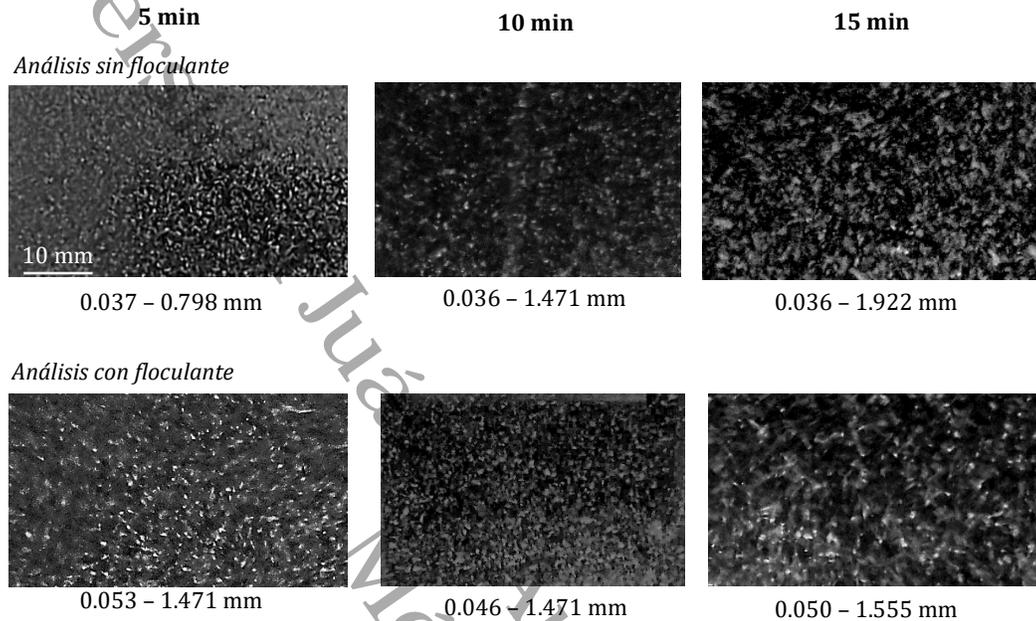


Figura 21. Comparación del tamaño de floculos obtenidos en el análisis fotográfico con y sin floculante.

El comportamiento de la distribución del tamaño de los floculos con y sin floculante se observa en la Figura 22. En la prueba sin floculante, a los 5 minutos se encontró una proporción muy alta en las partículas con tamaño de 0.28 mm. A los 10 minutos se obtuvo una mayor distribución en los floculos con tamaño de 0.08 mm, debido a que la fotografía capturada a los 10 minutos cuenta con menor turbiedad y mayor claridad en el contorno de los floculos, por lo tanto, el procesamiento de imagen capturó mayor cantidad de partículas. También se aprecia el crecimiento en la proporción de los floculos con tamaño mayor a 0.48 mm. A los 15 minutos las partículas ya han pasado por los fenómenos de aglomeración y rompimiento, predominando la aglomeración y su posterior sedimentación, por lo tanto, existe menor cantidad de partículas en suspensión. La distribución Beta permitió validar los datos y observar con mayor claridad la tendencia del crecimiento de los floculos, en los minutos 10 y 15 la proporción volumen se mantiene por encima de los 5 min, indicando un claro crecimiento en el tamaño de las partículas.



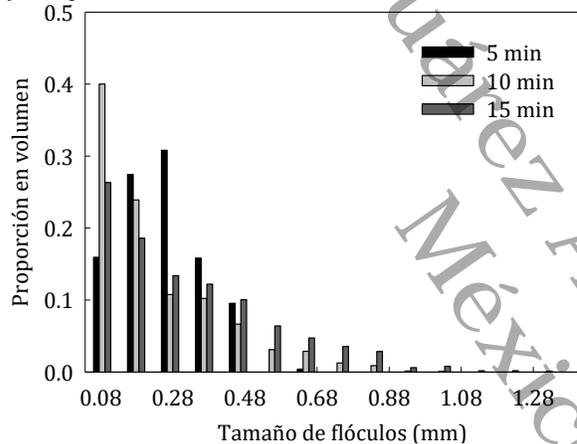
Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga (*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes



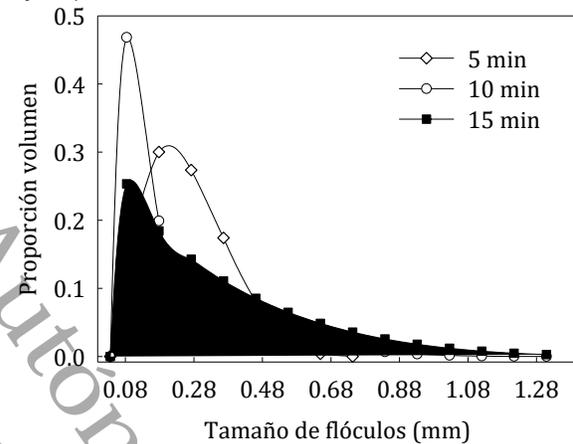
En la distribución con floculante se observó un incremento en la distribución de partículas, concentrándose la proporción en valores de 0.28, 0.48 y 0.68 mm desde el minuto 5, también se observa un pequeño crecimiento en las partículas con tamaños mayores a 0.68 mm. A los 15 minutos la mayor proporción se encontró en las partículas con tamaño de 0.48 mm. La distribución Beta muestra que la tendencia a los 15 minutos es mayor que en los otros casos.

Sin floculante

a) Experimental

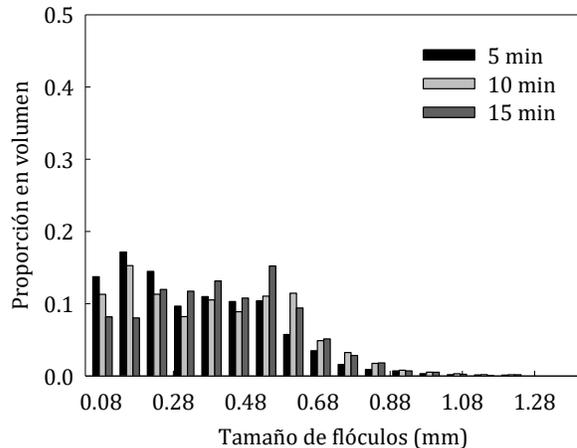


b) Ajuste con distribución Beta



Con floculante

c) Experimental



d) Ajuste con distribución Beta

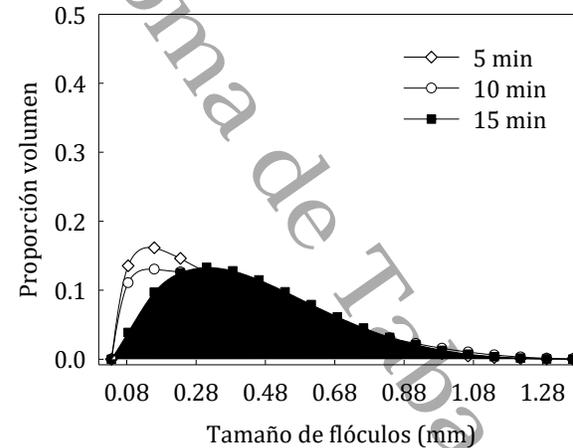


Figura 22. Distribución de tamaño de partícula experimental (Prueba de jarras y análisis de imagen) y teórica (Distribución Beta) sin y con agente floculante (almidón).



7.5. Parámetros hidráulicos

Los resultados de potencia, gradiente de velocidad, número de Reynolds y velocidad rotacional se presentan en la Tabla 13. Estos datos permitieron validar los datos de velocidad lineal máxima y gradiente de velocidad desplegados en FLUENT, bajo el principio del uso de un agitador tipo paleta en una jarra de 1 L.

Tabla 13. Parámetros hidráulicos de la prueba de jarras para validación.

Parámetro	Valor
Potencia (W)	1.094E-03
Gradiente de Velocidad (s ⁻¹)	
Número de Reynolds	31,451
Velocidad lineal máxima (m/s)	0.141

Los valores para el cálculo fueron: $V = 0.0001 \text{ m}^3$, $\mu_w = 0.000805 \text{ kg/ms}$, $\rho_w = 995.88 \text{ kg/m}^3$, $K_T = 0.006$, $N = 3.1214 \text{ rad/s}$, $D_a = 0.09 \text{ m}$, $r = 0.045 \text{ m}$.

7.6. Comportamiento hidrodinámico

El perfil de velocidad hidráulico, el gradiente de velocidad, la energía cinética turbulenta y la tasa de disipación de energía fueron las medidas obtenidas en FLUENT para analizar el comportamiento hidrodinámico del fluido en la jarra.

7.6.1. Perfil de velocidad hidráulico

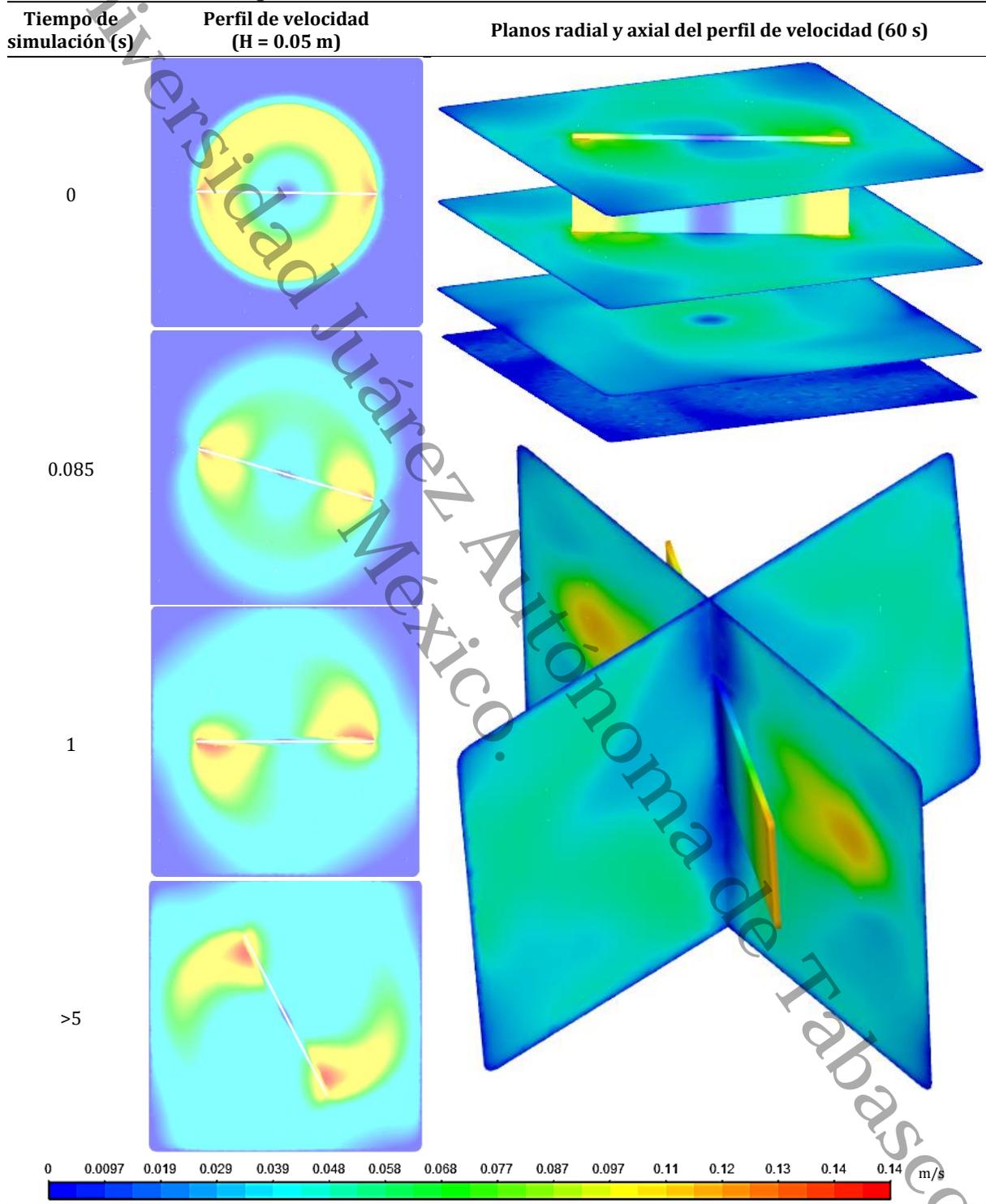
El perfil de velocidad se obtuvo por contornos procedentes de planos proyectados a diferentes profundidades y tiempos de simulación (Tabla 14) para ambas simulaciones, con y sin floculante, se obtuvieron los mismos resultados. El perfil de velocidad máximo en todos los planos se encontró en los extremos de la paleta, con un valor de 0.14 m/s, este cálculo coincide con el cálculo teórico. A partir de 2.1 s, el perfil se mantiene constante y solo presenta pequeños cambios en las esquinas, que dependen de la posición del agitador.



Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga (*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes



Tabla 14. Contornos de magnitud de velocidad del fluido.





Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga (*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes



Es importante mencionar que los bordes de la jarra podrán suponerse como zonas muertas, pero cumplen su función como deflectores frenando la velocidad del fluido y permitiendo una trayectoria más uniforme que promueve un mejor mezclado con los sólidos. Sobre el eje de agitación de la paleta, su ausencia no alteró la simulación, pues en la misma se observa que la magnitud de velocidad en el centro de la jarra es de 0 m/s.

El comportamiento de la trayectoria del fluido depende del tipo de agitador, para paletas como la utilizada en este estudio, el fluido es tipo radial. La Figura 23 muestra el vector de velocidad de una sección axial de la jarra, se observa una doble circulación, provocada por la gran magnitud de velocidad en los bordes del agitador, esto provoca que las líneas de corriente del fluido se bifurquen al colisionar con la pared de la jarra; esto es, una región del fluido se mueve circularmente hacia arriba y otra hacia debajo de la paleta. Este comportamiento es característico de los mezcladores tipo paleta, cuyo flujo es predominantemente radial.

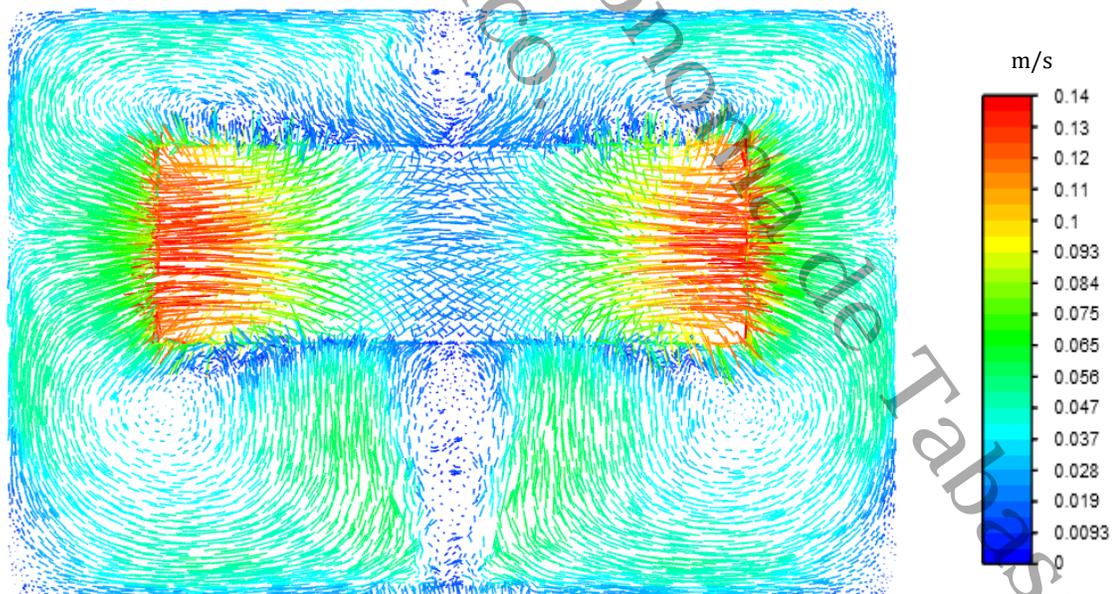


Figura 23. Vectores de velocidad del fluido en un corte axial.



Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga (*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes



Los valores del gradiente de velocidad calculados en FLUENT se determinaron en dirección radial (x, z) y axial (y). Los valores máximos se ubican en los extremos de la paleta, obteniendo un rango de 41.0 a 98.3 s⁻¹. El valor teórico previamente calculado de 36.84 s⁻¹ se encuentra dentro del rango y es cercano al valor de 32.1 s⁻¹ obtenido para el eje axial (paralelo al eje del agitador).

Tabla 15. Gradientes de velocidad (s⁻¹) calculados en FLUENT.

Dirección	Mínimo	Promedio	Máximo
x	0.13	3.58	98.25
y	0.11	2.88	32.09
z	0.47	4.37	40.99

7.6.2. Variables del modelo turbulento

Los valores obtenidos para la tasa de disipación de energía y la energía cinética turbulenta para la mezcla agua-sólido se presentan en la Tabla 16. Ambos parámetros concentraron su valor máximo en los bordes del agitador, en el caso de la energía cinética, forma una región de alta turbulencia al paso del movimiento de la paleta, cuenta con una región turbulenta con un valor alto en dirección radial, pero bajo en dirección axial (Tabla 17).

Tabla 16. Valores mínimos y máximos de las variables del modelo turbulento.

Parámetro (m ² /s ²)	Valor mínimo	Valor máximo
Tasa de disipación de energía, ϵ	2.520E-05	0.49612
Energía cinética turbulenta, k	7.598E-06	0.00123

7.7. Distribución de los coloides

La renderización de la fracción volumen de las partículas permitió visualizar su aglomeración al fondo de la jarra. El Modelo del Balance de Población precisó que las partículas con el tamaño más pequeño sobresalieran al inicio de la simulación, conforme su avance, las partículas incrementaron su tamaño, predominando el fenómeno de aglomeración y no el rompimiento, permitiendo su remoción por sedimentación. En la Figura 24 se comparan las partículas sedimentadas al final del proceso experimental de la



Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga (*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes



floculación y a los 60 s de la simulación CFD con floculante, se observó la misma tendencia en la trayectoria de las partículas, que se aglomeran siguiendo un patrón característico. En la Tabla 18 se resume la evolución de la renderización de las simulaciones con y sin floculante, los resultados coinciden con la distribución de partículas de ambas pruebas, presentándose partículas más grandes desde el inicio en la prueba con floculante, así como mayor cantidad de sedimento por los flocúlos con mayor diámetro.

Tabla 17. Contornos de la energía cinética turbulenta (k) axial y radial.

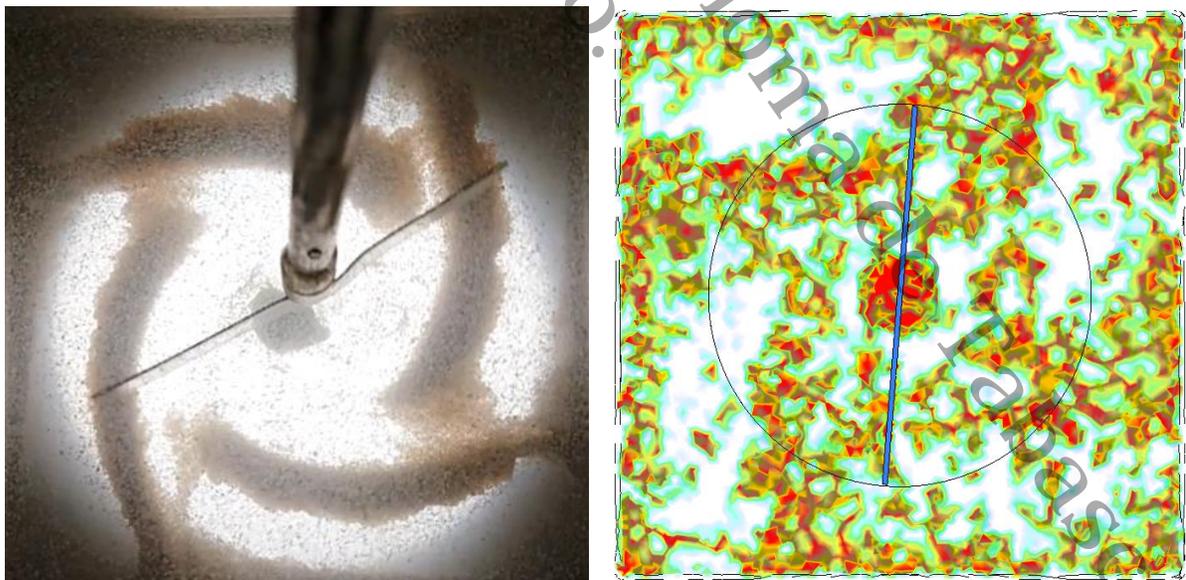
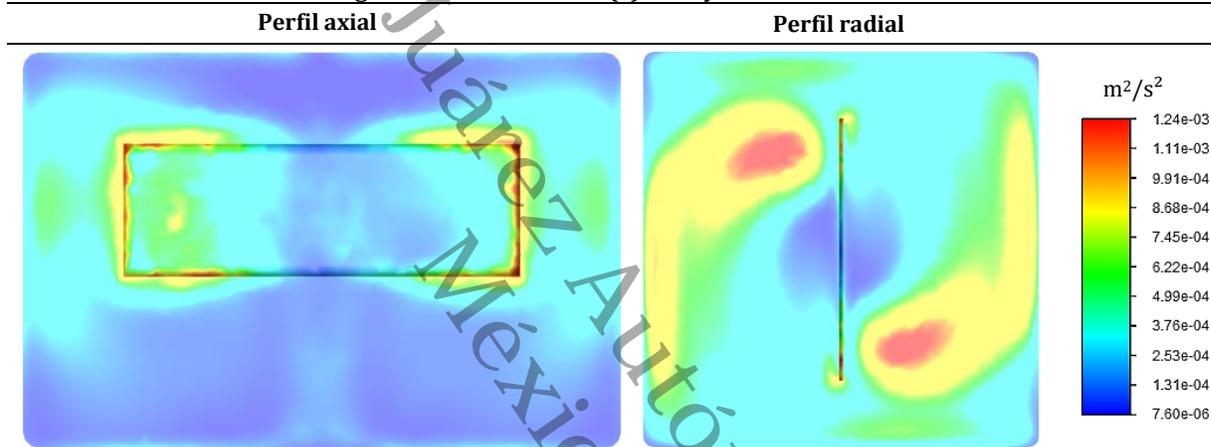


Figura 24. Comparación de la sedimentación entre la experimentación y la simulación CFD con floculante (60 s).



Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga (*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes



Tabla 18. Comparación del comportamiento de los flocúlos en las pruebas con y sin floculante.

Tiempo de simulación (s)	Sin floculante	Con floculante
9		
20		
65		



8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

La malanga (*Colocasia esculenta*) tuvo un excelente desempeño como floculante natural y su alto contenido de almidón permitió obtener un alto rendimiento. Por su parte, el sulfato de aluminio tuvo un óptimo desempeño como agente coagulante, teniendo eficiencia ligeramente mayor en la remoción de color que en la remoción de turbiedad.

Las concentraciones del almidón como agente floculante no presentaron diferencias significativas en la remoción de turbiedad y de color y ambas concentraciones obtuvieron un excelente desempeño en el crecimiento de los flóculos. Con respecto a la interacción de agente coagulante metálico con el agente floculante natural, se demostró una sinergia resultante en la disminución de la dosis óptima de agente coagulante, obteniéndose incluso una mayor eficiencia de remoción que la obtenida con el uso exclusivo de sulfato de aluminio.

Por su parte, el análisis de imagen permitió observar el crecimiento de las partículas durante el proceso de floculación, demostrando que, con almidón como floculante, la proporción de partículas más grandes incrementa en comparación a los experimentos sin agente floculante.

Finalmente, la simulación CFD resultó capaz de representar las características hidrodinámicas típicas de mezcladores rotacionales de flujo radial. Los valores de velocidad rotacional y gradiente de velocidad calculados con el análisis CFD fueron validados con los cálculos teóricos basados en el diámetro de la paleta. La renderización CFD permitió visualizar la sedimentación de las partículas en función del tiempo de simulación, mostrando que, con floculante, sedimentan mayor cantidad de partículas.



Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga (*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes



Como resultado de este estudio, se ha demostrado que la Dinámica de Fluidos Computacional tiene un amplio rango de aplicación en el proceso de floculación para el tratamiento de agua.

Recomendaciones

Durante la realización de esta investigación se presentaron algunas dificultades que podrían minimizarse tomando en cuenta las recomendaciones siguientes:

- Realizar cuidadosamente la extracción del almidón para evitar pérdidas y lograr un rendimiento aún mayor.
- Utilizar bajas concentraciones en la suspensión de almidón porque las concentraciones altas podrían aumentar la turbiedad del agua y, en consecuencia, provocar bajas eficiencias de remoción.
- Los valores obtenidos en la tasa de disipación de energía y la energía cinética turbulenta son datos útiles para la inicialización de futuras simulaciones.
- El diseño de la geometría y el mallado en la simulación CFD es fundamental para evitar que la simulación tienda a la divergencia, por lo que se recomienda optimizarlas y asegurar el diseño correcto antes de iniciar la etapa de selección de modelos.
- Se recomienda iniciar las primeras pruebas de simulación con los modelos turbulentos y cuando se asegure convergencia, proceder al uso del modelo del Balance de Población.



9. REFERENCIAS

- Abd Rahim NS, Othman N, Nur Fahirah S, Asharuddin SM, Abdul Malek M. 2019. Turbidity, COD and Total Suspended Solid Removal: Application of Nature Coagulant Cassava Peel Starch. *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 8(4):2277- 3878.
- Acuña Pinto HM. 2012. Extracción, caracterización y aplicación de almidón de ñame variedad blanco (*Dioscorea trifida*) originario de la región amazónica colombiana para la elaboración de productos horneados. Bogotá (DC): Universidad Nacional de Colombia.
- Alley ER. 2007. *Water quality control handbook*. McGraw-Hill Education.
- Allinger NL. 1988. *Química orgánica*. Reverte.
- Al-Sameraiy M. 2012. A Novel Water Pretreatment Approach for Turbidity Removal Using Date Sees and Pollen Sheath. *Journal of Water Resource and Protection* 2012(4):79-92.
- American Society for Testing and Materials. 2013. *Standard Practice for Coagulation-Flocculation Jar Test of Water (D2035-13)*.
- American Water Works Association. 2011. *Operational Control of Coagulation and Filtration Processes: AWWA MANUAL M37*. Denver (CO): American Water Works Association.
- ANSYS. 2012. *DesingModeler User Guide*. Canonsburg (PA): ANSYS, Inc.
- ANSYS. 2013. *Fluent Population Balance Module Manual*. Canonsburg (PA): ANSYS, Inc.
- ANSYS. 2016. *Fluent Meshing User's Guide*. Canonsburg (PA): ANSYS, Inc.
- ANSYS. 2020. *Fluent Tutorial Guide*. Canonsburg (PA): ANSYS, Inc.
- Bolto B, Gregory J. 2007. Organic polyelectrolytes in water treatment. *Water research* 41(2007):2301-2324.



Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga (*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes



- Bouyer D, Coufort C, Liné A, Do-Quang Z. 2005. Experimental analysis of floc size distributions in a 1-L jar under different hydrodynamics and physicochemical conditions. *Journal of Colloid and Interface Science*. 292(2005):413-428.
- Bratby J. 2016. *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment*. London (UK): IWA Publishing.
- Bridgeman J, Jefferson B, Parsons SA. 2009. Computational fluid dynamics modelling of flocculation in water treatment: a review. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics* 3(2):220-241.
- Bridgeman J, Jefferson B, Parsons SA. 2010. The development and application of CFD models for water treatment flocculators. *Advances in Engineering Software* 41(2010):99-109.
- Buenaño B, Vera E, Aldás MB. 2019. Study of coagulating/flocculating characteristics of organic polymers extracted from biowaste for water treatment. *Ingeniería e investigación* 39(1):24-35.
- Celaya López OA. 2013. Evaluación De Almidones de Malanga (*Colocasia esculenta*) como Coadyuvantes en la Remoción de Turbiedad y Color durante el Proceso de Coagulación-Floculación en el Tratamiento de Aguas [Tesis de licenciatura]. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Celaya López OA. 2017. Diagnóstico de Operación para un Clarificador-Floculador de una Planta Potabilizadora de Tabasco a partir del Análisis de Dinámica de Fluidos por Computadora [Tesis de maestría]. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Chalco Flores MH. 2016. Determinación de la eficiencia del almidón de papa (*Solanum tuberosum*) como auxiliar de coagulación del sulfato de aluminio en la remoción de turbidez del agua del río Caplina [Tesis de licenciatura]. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann Tacna.
- Chavez Melgarejo JE, Cunaique Huancas IJ, Pinco Mendo JE. 2019. Proceso de obtención y evaluación de la eficiencia del almidón del plátano de seda (*Musa acuminata* AAA)



Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga (*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes



- para la coagulación-floculación de las aguas superficiales del río Puchca – Ancash a nivel de laboratorio [Tesis de licenciatura]. Universidad Nacional del Callao.
- Cheremisinoff NP. 2002. Handbook of Water and Wastewater Treatment Technologies. Woburn (MA): Butterworth-Heinemann.
- Crittenden JC, Trussell RR, Hand DW, Howe KJ, Tchobanoglous G. 2012. Water treatment principles and design. Hoboken (New Jersey): John Wiley & Sons, Inc.
- De los Ángeles Rosales A. 2016. Obtención de biopolímero plástico a partir del almidón de malanga (*Colocasia esculenta*), por el método de polimerización por condensación en el laboratorio 110 de la UNAN-Managua [Tesis de licenciatura]. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua.
- Dwari RK, Mishra BK. 2019. Evaluation of flocculation characteristics of kaolinite dispersion system using guar gum: a green flocculant. International Journal of Mining Science and Technology 29(2019):745-755.
- Ebeling JM, Sibrell PL, Ogden SR, Summerfelt ST. 2003. Evaluation of chemical coagulation-flocculation aids for the removal of suspended solids and phosphorus from intensive recirculating aquaculture effluent discharge. Aquacultural Engineering 29(2003):23-42.
- Eckenfelder WW, Ford DL, Engle AJ. 2008. Industrial Water Quality. McGraw-Hill Education.
- Edzwald JK. 2011. Water Quality & Treatment: a Handbook on Drinking Water. McGraw-Hill Education.
- Espinosa Díaz ME. 2017. Obtención de bioetanol a partir de malanga por medio de hidrólisis y fermentación de azúcares [Tesis de licenciatura]. Universidad Central del Ecuador.
- Guzmán L, Villabona Á, Tejada C, García R. 2013. Reducción de la turbidez del agua usando coagulantes naturales: una revisión. Rev. U.D.C.A. Act. & Div. Cient. 16(1):253-262.



**Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de
Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga
(*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes**



- He W, Xue L, Gorczyca B, Nan J, Shi Z. 2018. Comparative analysis on flocculation performance in unbaffled square stirred tanks with different height-to-width ratios: Experimental and CFD investigations. *Chemical Engineering Research and Design* 132(2018):518-535
- He W, Zhao Z, Nan J, Xie Z, Lu W. 2018. The role of mixing hydrodynamics on floc growth in unbaffled square stirred-tank reactors for flocculation. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 6(2018):3041-3053.
- Henze M, Harremoës P, Jansen JC, Arvin E. 1997. *Wastewater treatment: biological and chemical processes*. Springer.
- Hongling D, Zumin Q, Fengping H, Huanhuan L. 2015. The experiment research on flocs based on the micro eddy flocculation technology. *International Forum on Energy, Environmental Science and Materials (IFEESM 2015)*.
- Hounslow MJ, Ryall RL, Marshall VR. 1988. A Discretized Population Balance for Nucleation, Growth, and Aggregation. *AIChE Journal* 34(11):1821-1832.
- Jane J, Shen L, Chen J, Lim S, Kasemsuwan T, Nip K. 1992. Physical and Chemical Studies of Taro Starches and Flours. *Cereal Chem.* 69(5):528 – 535.
- Jarvis P, Jefferson B, Gregory J, Parsons SA. 2005. A review of floc strength and breakage. *Water Research* 39(2005):3121-3137.
- Kayode Coker A. 2001. *Modeling of chemical kinetics and reactor design*. Gulf Professional Publishing.
- Kemmer FN. 1988. *The NALCO water handbook*. McGraw-Hill Education.
- Krishnamoorthy K. 2006. *Handbook of statistical distributions with applications*. Boca Raton (FL): Chapman & Hall/CRC.
- Kumar S, Ramkrishna D. 1996. On the solution of population balance equations by discretization-I. A fixed pivot technique. *Chemical Engineering Science* 51(8):1311-1332.



Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga (*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes



- Lee BJ, Toorman E, Molz FJ, Wang J. 2011. A two-class population balance equation yielding bimodal flocculation of marine or estuarine sediments. *Water Research* 45(2011):2131-2145.
- Leentvaar J, Rebhun M. 1983. Strength of ferric hydroxide flocs. *Water Research* 17(8):895-902.
- León-Luque AJ, Barajas CL, Peña-Guzmán CA. 2016. Determination of the Optimal Dosage of Aluminum Sulfate in the Coagulation-Flocculation Process Using an Artificial Neural Network. *International Journal of Environmental Science and Development* 7(5):346-350.
- López López R, Ramírez Guillermo MA, Inzunza Ibarra MA. 2017. Productividad del agua en el cultivo de malanga (*Colocasia esculenta* L. Schott) con riego por aspersión en Tabasco, México. III Congreso Nacional de Riego y Drenaje COMEII 2017.
- Lu T-J, Lin J-H, Chen J-C, Chang Y-H. 2008. Characteristics of Taro (*Colocasia esculenta*) Starches Planted in Different Seasons and Their Relations to the Molecular Structure of Starch. *J. Agric. Food. Chem.* 56: 2208-2215.
- Luo H, Svendsen HF. 1996. Theoretical Model for Drop and Bubble Breakup in Turbulent Dispersions. *AIChE Journal* 42(5):1225-1233.
- Martínez Ortiz L. 2007. Obtención y caracterización de almidones de malanga, arroz y maíz ceroso modificados por extrusión termoplástica para su uso como encapsulantes de aceite esencial de naranja [Tesis de licenciatura]. Universidad Veracruzana.
- Martínez-Morris UT, Marquina-Gelvez CE, Carrasquero-Ferrer S, Martínez-Soto ME, Rodríguez-Monroy C, Morris-Díaz AT. 2017. El Extracto de Semillas de Mango (*Mangifera indica* L) como Coagulante Natural en la Potabilización de Aguas. 15th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Global Partnerships for Development and Engineering Education".
- Melian Subiabre DE. 2010. Ensayo Comparativo de Dos Metodologías de Extracción de Almidón de Papa usando Muestras de Diez Variedades Nativas de Chiloé y dos Variedades Comerciales [Tesis de licenciatura]. Universidad Austral de Chile.



Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga (*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes



- Miura K, Sladoje N. 2020. Bioimage data analysis workflows. Springer.
- Mosleh L, Hashemi SH, Fard RD, Khoshbakht K, Shahbazi A. 2014. Comparison of the performance of corn starch coagulant aid accompany with alum, polyaluminum chloride and ferric chloride coagulants in turbidity removal from water. *Journal of Environmental Health Engineering* 1(4):248-258.
- Nelson DL, Cox MM. 2015. *Lehninger: principios de bioquímica*. Ediciones Omega.
- Olan Villatoro M. 2014. Evaluación de Almidones de Ñame (*Dioscorea Alata*) como Agente Coadyuvante en la Remoción de Turbiedad y Color durante el Proceso de Coagulación-Floculación en la Potabilización de Agua [Tesis de licenciatura]. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Pengfei R y Jun N. 2015. CFD and experimental studies on the impact of impeller type on flow field and floc size evolution in a stirred tank. *International Conference on Advances in Energy and Environmental Science (ICAEES 2015)*.
- Quezada GR, Jeldres M, Robles P, Toro N, Torres D, Jeldres RI. 2020. Improving the Flocculation Performance of Clay-Based Tailings in Seawater: A Population Balance Modelling Approach. *Minerals* 10(782).
- Ramírez Arcila H, Jaramillo Peralta J. 2015. Agentes naturales como alternativa para el tratamiento del agua. *Revista Facultad de Ciencias Básicas* 11(2):136-153.
- Renault F, Sancey B, Badot PM, Crini G. 2009. Chitosan for coagulation/flocculation processes – An eco-friendly approach. *European Polymer Journal* 45(2009):1337-1348.
- Rodríguez Reyes MY. 2006. Obtención y caracterización de almidones modificados de malanga (*Colocasia esculenta*) y trigo (*Triticum sativum*), y su aplicación en la fabricación de yogurt [Tesis de licenciatura]. Universidad Veracruzana.
- Saleem M, Bachmann RT. 2019. A contemporary review on plant-based coagulants for applications in water treatment. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 72(2019):281-297.



Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga (*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes



- Sanlúcar Estrada J. 2015. Modelo matemático del comportamiento dinámico del área foliar de especies vegetales a partir de la distribución de probabilidad Beta [Tesis de posgrado]. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Shahriari T, Bidhendi NG, Shahriari S. 2012. Evaluating The Efficiency of Plantago Ovata and Starch in Water Turbidity removal. Int. J. Environ. Res. 6(1):259-264.
- Shi Z, Zhang G, Zhang Y, He T, Pei G. 2019. Modeling of Flocculation and Sedimentation Using Population Balance Equation. Journal of Chemistry 2019.
- Sincero AP, Sincero GA. 2003. Physical-chemical treatment of water and wastewater. London (UK): IWA Publishing.
- Spellman FR. 2014. Handbook of water and wastewater treatment plant operations. Boca Raton (FL): CRC Press.
- Spellman FR. 2018. The drinking water handbook. Boca Raton (FL): CRC Press.
- Šulc R y Svačina O. 2010. Flock growth kinetics for flocculation in an agitated tank. Acta Polytechnica 50(2):22-29.
- Sun S, Weber-Shirk M, Lion LW. 2016. Characterization of Flocs and Flocc Size Distributions Using Image Analysis. Environmental Engineering Science 33(1):25 -33.
- Torres A, Durán M, Montero P. 2013. Evaluación de las propiedades funcionales del almidón obtenido a partir de malanga (*Colocasia esculenta*). Revista Ciencias e Ingeniería al Día 8(2):29-38.
- Ttito Surco RM. 2018. Evaluación de la eficacia del almidón de tres variedades de papa (*Solanum tuberosum*) como auxiliar del sulfato de aluminio en el tratamiento de agua para consumo humano en condiciones altoandinas [Tesis de licenciatura]. Universidad Peruana Unión.
- Valeriano-Mamani JJ y Matos-Chamorro RA. 2019. Influencia de la Goma de Tara (*Caesalpinia spinosa*) como Ayudante en el Proceso de Coagulación-Floculación para la Remoción de Turbidez de una Suspensión Artificial de Bentonita. Información Tecnológica 30(5):299-308.



Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga (*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes



- Xamán J, Gijón-Rivera M. 2015. Dinámica de Fluidos Computacional para ingenieros. Bloomington (IN): Palibrio.
- Yin C-Y. 2010. Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment. *Process Biochemistry* 45(2010):1437-1444.
- Zapata del Ángel M. 2017. Evaluación experimental y análisis de Dinámica de Fluidos Computacional de la Coagulación-Floculación en tratamiento de agua [Tesis de licenciatura]. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.