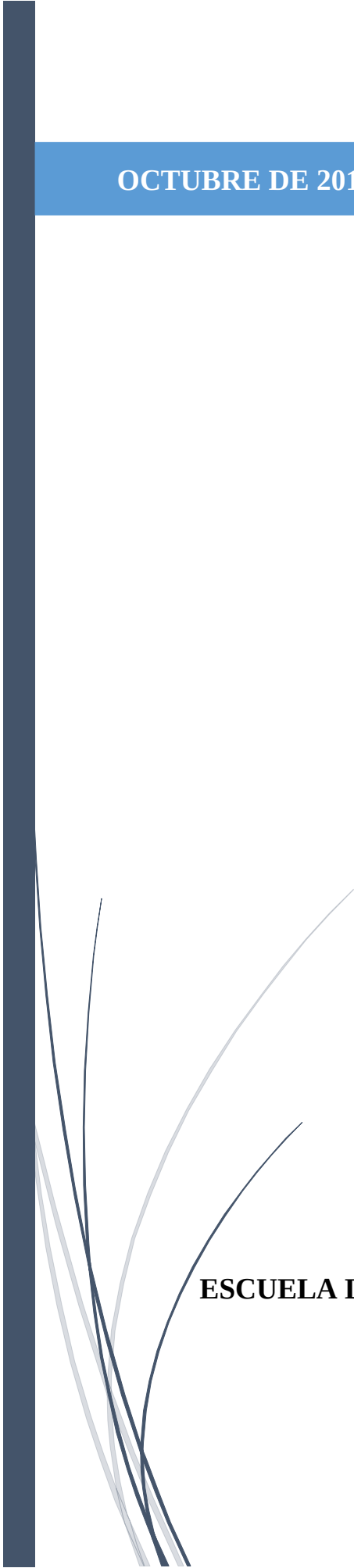


A thick dark blue vertical bar is positioned on the left side of the page. To its right, several thin, light blue curved lines sweep upwards and outwards, creating an abstract, organic shape.

OCTUBRE DE 2019

**MODELO CFD PARA CARACTERIZAR LA
HIDRODINÁMICA DE UN FLOCULADOR
HIDRÁULICO TIPO ALABAMA EN LA PTAP
“EL ARROYO” LOCALIZADA EN
SANTANDER DE QUILICHAO**

ALEXANDER GONZALÍAS MANJARRÉS

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE LOS RECURSOS NATURALES Y DEL
AMBIENTE
SANTIAGO DE CALI**

**MODELO CFD PARA CARACTERIZAR LA HIDRODINÁMICA DE UN
FLOCULADOR HIDRÁULICO TIPO ALABAMA EN LA PTAP “EL ARROYO”
LOCALIZADA EN SANTANDER DE QUILICHAO**

ALEXANDER GONZALÍAS MANJARRÉS

Tesis de investigación como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Sanitario y
Ambiental

Director:

Ing. ANDRES MAURICIO ZAPATA RIVERA Ph.D.

Codirector:

Ing. JOSÉ RAMÓN GRUESO VANEGAS.

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE LOS RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE
SANTIAGO DE CALI
OCTUBRE DE 2019

Notas de aceptación

Firma presidente del jurado

Firma jurado 1

Firma jurado 2

Santiago de Cali, octubre de 2019

DEDICATORIA

A Dios, a mis padres, a mi esposa Claudia Montes y a mis hijas.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

Dios, por su misericordia, su admirable consejo, su magnífica sabiduría, por sostenerme con su mano derecha y fortalecerme como pedernal.

A mi esposa, por su fe, por su amor, por su apoyo incondicional, por su lealtad, por darme aliento y valor.

A mis amigos que nacieron como hermanos en el tiempo de la angustia.

A la Universidad del Valle y al instituto CINARA y su proyecto AQUARISC a Emquilichao por la disposición, el apoyo y permitir la realización de las actividades en la planta.

A la Ing., Inés Restrepo Tarquino por permitirme participar en el proyecto AQUARISC.

Al Ing., Andrés Mauricio Zapata Rivera por los conocimientos impartidos, apoyo y su disponibilidad.

A la Ing., Liseth Enríquez Castillo por los conocimientos impartidos.

Al Ing., José Ramón Grueso Vanegas por su gestión, disposición y conocimientos impartidos.

Al profesor, Luis Fernando Marmolejo por su apoyo y consejos en momentos decisivos.

Al personal administrativo del Plan de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. FORMULACION DEL PROBLEMA.....	4
3. JUSTIFICACIÓN	5
4. OBJETIVOS	6
4.1. GENERAL	6
4.2. ESPECIFICOS	6
5. MARCO REFERENCIAL	7
5.1. Tipos de Floculación	8
5.1.1 Floculación Pericinética o browniana.....	8
5.1.2 Floculación Ortocinética o gradiente de velocidad	8
5.2. Parámetros característicos de la floculación	8
5.3. Tipos de Floculadores y criterios de diseño	9
5.4. Caracterización hidrodinámica de floculadores hidráulicos	13
5.4.1 Factores hidrodinámicos.....	13
5.4.2 Ensayos de trazadores.....	15
5.4.1.2. Trazadores.....	16
5.4.3 Modelos hidrodinámicos	17
5.4.1.3. Modelo matemático	17
5.4.2.3. Modelos CFD.....	18

5.4.3.3. Modelación del comportamiento hidrodinámico unidades de tratamiento de agua	18
6. METODOLOGÍA	19
6.1. Localización y descripción del floculador caracterizado	19
6.2. Ensayos de trazadores	20
6.3. Geometría del floculador dos	21
6.4. Descripción de la malla	22
6.5. Configuración del modelo CFD	25
6.5.1 Configuración del solucionador (Solver)	26
6.5.2 Configuración de los modelos	27
6.5.3 Incorporación de los materiales	28
6.5.4 Condiciones de frontera	29
6.5.5 Métodos de solución	31
6.5.6 Ecuaciones gobernantes	32
6.5.1.6. Ecuación de continuidad	32
6.5.2.6. Ecuación de momento	33
6.5.3.6. Ecuación de la conservación de la energía hidráulica	34
6.5.4.6. Modelo de turbulencia	35
7. RESULTADOS DEL MODELO CFD	36
7.1. Estudio de trazadores y validación del campo hidrodinámico	36

7.2. Prueba de independencia de malla	40
7.3. Resultados del modelo del floculador	41
8. RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES	48
8.1. Recomendaciones.....	48
8.2. Conclusiones	49
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	52
10. ANEXO.....	55
10.1. Anexo. Ensayos de trazadores.....	55

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de Floculadores. Fuente: Adaptada de (López, 2015).....	9
Figura 2. Floculador tipo Cox y Alabama. Fuente: Adaptada de (CEPIS, 2005).....	12
Figura 3. Aplicación de trazadores en un reactor. Fuente:(Marín y Zapata, 2018)	15
Figura 4. Localización del sitio de estudio	19
Figura 5. Esquema del floculador dos (a) planta y (b) perfil	20
Figura 6. Floculadores de la PTAP El Arroyo (a) y Recamara de orientación de flujo (b).....	20
Figura 7. Vista 3D de la geometría del floculador dos	22
Figura 8. Mallas utilizadas y distribución de sus elementos.....	24
Figura 9. Componentes para la configuración.	25
Figura 10. Opciones de la sección General.....	26
Figura 11. Modelo viscoso.....	28
Figura 12. Modelo de turbulencia.....	28
Figura 13. Materiales y propiedades.....	29
Figura 14. Métodos de solución.....	32
Figura 15. Tensiones dentro del volumen de control. Fuente: (Versteeg y Malalasekera, 2007) 33	
Figura 16. Componentes de los vectores de flujo. Fuente: (Versteeg y Malalasekera, 2007).....	34
Figura 17. Distribución del tiempo de residencia. Estudios de trazadores para los tres caudales36	
Figura 18. Esquema conceptual de los tiempos de residencia. Fuente: (Marín y Zapata, 2018). 37	
Figura 19. Comportamiento los residuales para los tres caudales en un periodo de una hora	42
Figura 20. Líneas de corrientes predominantes en el floculador	43
Figura 21. Vista superior y corte transversal del floculador para ver cortos circuitos y zonas de recirculación.....	44

Figura 22. vectores velocidad en las diferentes zonas del floculador.....	45
Figura 23. Vista superior y corte transversal del floculador para ver las líneas de corrientes predominantes obtenidas después de suprimir las ventanas de limpieza.....	47

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de floculadores de potencia hidráulica y criterios de diseño.	10
Tabla 2. Características de los elementos en el análisis de independencia de la malla	23
Tabla 3. Valores de las condiciones de frontera empleadas	29
Tabla 4. Datos de los estudios de trazadores para los tres caudales a la salida del floculador dos	37
Tabla 5. Parámetros de estudio de trazador para los tres caudales en el floculador dos.....	38
Tabla 6. Comportamiento hidráulico del floculador dos para los tres caudales	39
Tabla 7. Características hidráulicas de la unidad de floculación	40
Tabla 8. valores simulados para velocidad a la salida en las mallas evaluadas para el análisis de independencia de malla.....	40
Tabla 9. Desviación obtenida en el análisis de independencia de malla.....	41
Tabla 10. Características y valores de las velocidades en las ventanas de limpieza.....	45
Tabla 11. Características y valores de las velocidades en los pasamuros.....	46
Tabla 12. Ensayos de trazadores para los tres caudales unitarios	55

LISTADO DE ECUACIONES

Ecuación 1. Tiempo de Floculación.....	14
Ecuación 2. Gradiente de Velocidad.....	14
Ecuación 3. Velocidad de entrada.....	30
Ecuación 4. Numero de Reynolds.....	30
Ecuación 5. Relación entre k e I	31
Ecuación 6. Intensidad de turbulencia	31
Ecuación 7. Tasa de disipación de energía	31
Ecuación 8. Continuidad.....	32
Ecuación 9. Ecuaciones de momento (Navier-Stokes)	33
Ecuación 10. Conservación de la energía hidráulica	34
Ecuación 11. Ecuación de Bernoulli	34
Ecuación 12. k	35
Ecuación 13. ε	35

GLOSARIO

CFD	Dinámica de fluidos computacional.
Fluent	Programa computacional, propiedad de Ansys Inc., contiene las amplias capacidades de modelado físico necesarias para modelar flujo.
Mesh	Modo de mallado del Fluent que genera mallas, estas pueden ser tetraédricas, hexaédricas, prismáticas o piramidales.
Euleriana	Forma de mirar el movimiento del fluido en la que se emplea una malla fija.
Zonas muertas	Zonas internas del floculador en que el movimiento del agua es bajo.
Cortos circuitos	Volumen del agua que atraviesa el floculador con rapidez

RESUMEN

En el presente trabajo, se llevó acabo la caracterización hidrodinámica del floculador dos de la PTAP EL Arroyo del municipio de Santander de Quilichao – Cauca, se realizó la evaluación experimental mediante un ensayo de trazadores y la simulación CFD en tres dimensiones (3D) utilizando un enfoque Euleriano junto con un modelo “Viscous – estándar k- ϵ ” modelo de turbulencia. Con el fin de ver ¿cuál es la relación entre la hidrodinámica del fluido y la eficiencia del floculador hidráulico?

Inicialmente se realizaron las mediciones de la estructura para obtener información de primera mano, posteriormente se evaluó experimentalmente el floculador mediante un ensayo de trazadores para tres caudales de operación de la planta de 180, 230, 250 l.s⁻¹. Luego se simularon los tres escenarios operativos a través de la Dinámica Computacional de Fluidos. Los modelos se desarrollaron usando el software Ansys Inc. Fluent® (V.16.1) en una estación de trabajo Dell Precision TX3500. Se obtuvieron 20795 elementos hexaédricos usando el software Ansys Inc® modo meshing software (V.16.0).

Los resultados permitieron establecer que el floculador dos opera en condiciones que afectan su desempeño desde el punto de vista hidrodinámico, funciona como un reactor no ideal presentando un flujo mezclado con tendencia a flujo pistón, además, existen cortos circuitos y zonas muertas. Los resultados de la simulación evidenciaron las condiciones de la prueba experimental ya mencionadas, añadiendo que la modelación permitió ver las zonas donde se encontraban las condiciones adversas y conocer más a fondo datos hidráulicos de la unidad en su interior.

De acuerdo con lo encontrado en este estudio se deben tomar medidas a corto, mediano y largo plazo, como el cierre de las ventanas de limpieza durante la operación, evitar los cambios bruscos de caudal debido a la sensibilidad en la unidad, la instalación de codos de dirección del flujo, que tengan en el extremo una platina de orificio que pueda ser cambiado a voluntad con el fin de modificar el gradiente y, hacer un análisis más exhaustivo del modelo CFD para esta unidad con el objeto de evaluar las mejoras y obtener una mejor aproximación del comportamiento del floculador.

1. INTRODUCCIÓN

La floculación es uno de los procesos prioritarios en la potabilización de agua, se lleva a cabo después de coagulación, consiste en la agitación lenta de la masa de agua para la aglomeración de partículas llamados flocs, en ella es esencial la forma de producir la agitación, el gradiente de velocidad y el tiempo de retención (Carreño y Castiblanco, 2016).

Las unidades de floculación conocidas como floculadores, se clasifican según la potencia utilizada para producir la agitación en: mecánicos e hidráulicos. Los floculadores hidráulicos se clasifican según el sentido del flujo en: horizontales o verticales (López, 2015).

El floculador tipo Alabama, es una variante de los floculadores hidráulicos verticales, en ellos se direcciona el flujo de agua hacia arriba retomándola por el fondo. Son una solución recomendable en plantas con capacidad superior 50 l.s^{-1} , tienen menor área que los floculadores horizontales, ayudando a que se diseñen sistemas más compactos. Por otra parte, estos floculadores son unidades vulnerables a las variaciones de caudal y fácilmente se pueden generar cortos circuitos y zonas muertas (Lidia de Vargas, 2004), por consiguiente, la operación de estas unidades es básica para la obtención del tratamiento deseado.

La hidrodinámica de los floculadores tipo Alabama es un aspecto importante, esta puede alterar su desempeño. Asimismo, la hidrodinámica se puede ver afectada por patrones de recirculación del fluido, zonas muertas y cortos circuitos. Por estas razones, el diseño y la operación de un floculador tipo Alabama, exigen un detallado conocimiento de estos fenómenos, pues los criterios de diseño no tienen una base experimental o soporte científico acreditado (Arboleda, 2000; Lidia de Vargas, 2004), haciendo indispensable la aplicación de nuevas herramientas para su conocimiento. En este sentido, una de las herramientas más poderosa, eficiente, eficaz y que

ha venido perfeccionándose en los últimos 20 años, son los modelos computacionales, especialmente, aquellos que utilizan técnicas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés).

La CFD es una herramienta de modelación que ha ayudado a comprender los fenómenos hidrodinámicos relacionados con los flujos de agua en las unidades de tratamiento, con el uso de modelos se han simulado flujos en procesos de almacenamiento de agua potable (Montoya, 2012), mezcla rápida (Aponte, 2017), clarificación (Enríquez, 2018) y depuración (Zapata, 2017) de agua residual, en los cuales se han resaltado los beneficios que se obtienen del uso de la CFD. De la misma forma, en este caso en particular, se aprovecha esta herramienta para conocer el comportamiento hidrodinámico de un floculador hidráulico tipo Alabama en la PTAP “El Arroyo”.

Por las razones expuestas, el modelo CFD se desarrolló usando el software Ansys Inc. Fluent® (V.16.1) en una estación de trabajo Dell Precision TX3500 procesador Intel Xeon X3470 (8MB Caché, 2.93GHz, Turbo, HT). Se empleó el método de volúmenes finitos dividiendo el dominio computacional en 20722 hexaedros, usando el software Ansys

Inc® meshing software (V.16.1). Se resolvieron las ecuaciones de masa, momento, movimiento y energía hidráulica.

El modelo CFD tuvo un buen ajuste al comparar los datos experimentales con los simulados, los datos mostraron la existencia, causa y zona donde ocurrían las zonas muertas y los cortos circuitos. A pesar de que el análisis de trazadores por ser un estudio de “caja negra” no mostró la presencia de cortos circuitos.

Como el diseño, modificaciones y operación de los floculadores hidráulicos tipo Alabama se encuentran fundamentados en criterios habituales que no han cambiado en el tiempo, se han generado limitaciones que afectan la eficiencia de estas unidades, motivo por el cual la CFD puede ser usada para cuantificar en menor tiempo y menor costo, el impacto de algunos factores en la eficiencia de los floculadores o la evaluación de las alternativas de modificación, de operación o rediseño.

Con el modelo se obtuvo información detallada al interior de la unidad, con ella se esclareció que las ventanas de limpieza deben estar selladas en el momento de operación del floculador, para evitar la afectación de su comportamiento hidrodinámico, además queda claro que los caudales de 180, 230, y 250 l.s⁻¹ sobrecargan la unidad incrementando las velocidades del agua, especialmente en los pasamuros, provocando el rompimiento de los flocs y afectando la eficiencia del floculador.

2. FORMULACION DEL PROBLEMA

La potabilización del agua para consumo humano, puede hacerse a través de un conjunto de operaciones unitarias que involucran procesos de tipo físico, químico y biológico los cuales remueven impurezas o transforman algunas de las características inapropiadas del agua haciéndola apta para su consumo. El éxito del proceso de potabilización requiere una infraestructura adecuada y una óptima operación y mantenimiento de esta. En las plantas de tratamiento de agua potable convencionales el proceso de floculación es uno de los más importantes, debido a que este es un proceso de agregación de sólidos, que da lugar a la formación de flocs en un proceso llamado mezcla lenta, con esto se logra que las partículas contenidas en el agua se junten con estos flocs y así obtengan el peso y tamaño suficiente para lograr su sedimentación.

Los floculadores hidráulicos tipo Alabama, como los existentes en la PTAP de Santander de Quilichao, son unidades que pueden ver afectado su funcionamiento y eficiencia por factores como la carga hidráulica superficial, el tiempo de retención hidráulico, la geometría y la hidrodinámica del fluido, el desconocimiento de estos factores bajo condiciones rutinarias y condiciones límites, son algunas de las razones por las cuales no hay una eficiencia adecuada en el proceso de floculación. Por lo anterior el problema que se busca resolver con este trabajo de investigación es: ¿Cuál es la relación entre la hidrodinámica del fluido y la eficiencia del floculador hidráulico tipo Alabama localizado en la PTAP de Santander de Quilichao?

Con el desarrollo de la metodología propuesta en este estudio se espera disponer de la información suficiente que permitan dar respuesta a esta pregunta y además proponer mejoras para optimizar el proceso de floculación de la PTAP de Santander de Quilichao.

3. JUSTIFICACIÓN

En Santander de Quilichao la calidad del agua a la salida de la planta de potabilización cumple con los requerimientos de ley, sin embargo, debido al mal funcionamiento de los floculadores. la planta presenta dificultades técnicas como el lavado repetitivo de los filtros, altos consumos de cloro, que llevan al deterioro de tuberías y redes de distribución, y un incremento en los costos para el tratamiento del agua. Aunque la planta presenta dificultades técnicas en otras áreas, se ha considerado como prioridad el proceso de floculación, esto se debe a que, al optimizar este proceso se mejorará de forma considerable la eficiencia en operaciones como la sedimentación y la filtración, se disminuirán las pérdidas de agua por el lavado repetitivo de los filtros y las cantidades de cloro usado para la desinfección.

La operación de los floculadores hidráulicos es fuertemente afectada por la hidrodinámica del fluido, siendo fenómenos como los cortos circuitos hidráulicos, las zonas de recirculación y zonas muertas las de mayor impacto en su funcionamiento. Tradicionalmente, para su estudio se ha recurrido a herramientas de tipo experimental como los ensayos de trazadores, que a pesar de requerir un arduo trabajo de campo han sido una de las herramientas más utilizadas para conocer la hidrodinámica de estas unidades. Los ensayos de trazadores son considerados como ensayos de caja negra, debido a que no brindan información detallada al interior de la unidad. Por lo anterior, en las últimas décadas se ha recurrido a herramientas computacionales como la dinámica de fluidos computacional (CFD) que, gracias al avance en el desarrollo de equipos de cómputo más de mayor capacidad brindan un mejor detalle del comportamiento del fluido dentro de la unidad. Estas razones motivaron esta investigación, y se espera, con el uso del modelo CFD profundizar en el conocimiento de la unidad de floculación de la PTAP “El Arroyo” y proponer mejoras que al implementarse optimicen el proceso.

4. OBJETIVOS

4.1. GENERAL

Construir un modelo CFD para representar la hidrodinámica del fluido de un floculador hidráulico tipo Alabama en la PTAP “El Arroyo” localizada en Santander de Quilichao Cauca.

4.2. ESPECIFICOS

- Usar el modelo CFD para evaluar la hidrodinámica del fluido usando tres caudales: mínimo de 180 l.s^{-1} , máximo de 250 l.s^{-1} y medio de 230 l.s^{-1} , de acuerdo con las condiciones de operación de la PTAP.
- Validar el modelo comparando tres ensayos de trazadores realizados para cada caudal ($180, 230, 250 \text{ l.s}^{-1}$) con las especificaciones de diseño del floculador hidráulico tipo Alabama.
- Proponer mínimo tres opciones de mejora para el floculador desde el punto de vista hidrodinámico.

5. MARCO REFERENCIAL

Una de las mayores preocupaciones en la historia de la humanidad ha sido esforzarse en obtener agua lo más limpia y pura posible para garantizar la supervivencia de la especie humana. En el pasado, este esfuerzo se enfocaba en mejorar las cualidades estéticas mediante el tratamiento del agua, hoy en día, las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) realizan la potabilización del agua mediante un conjunto de operaciones unitarias cuyo fin es la eliminación o la disminución de la contaminación del agua natural procedente de los embalses y otras captaciones transformándola en agua apta para el consumo humano, dentro de este conjunto de operaciones unitarias se encuentra la floculación como tratamiento previo esencial para muchos sistemas de purificación de agua.

El proceso de floculación consiste en la agitación lenta de la masa de agua coagulada para permitir la unión de las partículas por sucesivas colisiones que forman flóculos o grumos, estos crecen en el tiempo aumentando de tamaño y peso, la mezcla debe ser lenta para crear diferencias de velocidad del agua dentro del floculador no muy intensas, de tal manera que se evite el rompimiento del floculo (Cárdenas Y., 2000). Posteriormente, se debe facilitar su separación por tratamientos posteriores de sedimentación (o flotación) o filtración; este es el proceso más usado en la remoción de color y turbiedad del agua. La formación de los flóculos depende del tiempo de retención hidráulico y de la cantidad de energía aplicada (gradiente de velocidad) en las unidades de floculación, esta potencia puede ser aplicada de forma hidráulica, mecánica o neumática. Para el proceso de floculación se prefieren emplear floculadores de energía hidráulica (Arboleda, 2000).

5.1. Tipos de Floculación

5.1.1 Floculación Pericínética o browniana

Se debe a la energía térmica del fluido, este movimiento está producido por el movimiento natural de las moléculas del agua y es conocido como el movimiento browniano (Arboleda, 2000; Lidia de Vargas, 2004).

5.1.2 Floculación Ortocinética o gradiente de velocidad

Se produce en la masa del fluido en movimiento, conlleva a las colisiones de las partículas debido al movimiento del agua, este gradiente de velocidad puede ser estimulado por una energía de origen mecánico o hidráulico, primero ocurre la floculación pericínética luego la ortocinética (Arboleda, 2000; Lidia de Vargas, 2004).

5.2. Parámetros característicos de la floculación

Los parámetros que influyen de forma directa en la floculación son el tiempo de residencia, la potencia para producir la agitación y el gradiente de velocidad.

- Potencia para producir la agitación (hidráulica, mecánica, hidromecánica y neumática).
- Gradiente de velocidad es la energía necesaria para producir la mezcla.
- Tiempo de retención es el tiempo que permanece el agua en la unidad de floculación.

El tiempo de retención y el gradiente de velocidad son significativos al aumentar la posibilidad de que las partículas se adhieran (Arboleda, 2000), estos dos son los parámetros más usados para diseño de los floculadores.

5.3. Tipos de Floculadores y criterios de diseño

De acuerdo a la potencia utilizada para la agitación de la masa de agua se pueden clasificar como mecánicos o hidráulicos, ver **Figura1**.

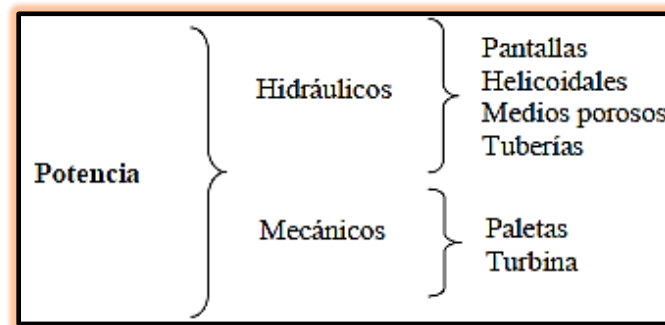


Figura 1. Clasificación de Floculadores. Fuente: Adaptada de (López, 2015)

En cuanto a su configuración, los floculadores hidráulicos más conocidos se encuentran los de flujo horizontal y vertical (Lidia de Vargas, 2004).

Los tipos de floculadores de potencia hidráulica y sus criterios de diseño se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Tipos de floculadores de potencia hidráulica y criterios de diseño.

Tipo	Características	Funcionamiento	Parámetros de diseño (RAS Título C.5.5.1)
DE TABIQUES			
HORIZONTAL	✓ Son más recomendables para pequeños caudales. ✓ Las pantallas pueden ser hechas de madera o de láminas de asbesto-cemento.	El tanque debe estar dividido por pantallas de concreto u otro material adecuado, dispuesto de forma que el agua haga un recorrido de ida y vuelta alrededor de las mismas.	Tiempo de retención y gradiente de velocidad Debe estar entre 20 s^{-1} y 70 s^{-1} y el tiempo de retención (TR) entre 20 y 30 minutos. Velocidad del agua: 0.2 m.s^{-1} a 0.6 m.s^{-1}.
VERTICAL	✓ Pueden aplicarse a caudales mayores. ✓ Son más profundos, tienen 4 metros o más de profundidad. ✓ Ocupan menor área.	El agua debe fluir por encima y por debajo de las pantallas que dividen el tanque. Debe dejarse una abertura en la base de cada pantalla con un área equivalente al 5% del área horizontal del compartimiento.	
ALABAMA	✓ Son muy vulnerables a las variaciones de caudal. ✓ Fácilmente se pueden generar espacios muertos y cortocircuitos. ✓ Fácilmente puede formarse un gran volumen muerto en la parte superior del floculador al disminuir apreciablemente el caudal.	Debe ubicarse un codo en cada cámara para impulsar el fluido hacia arriba. Los codos deben colocarse de forma alternada, en una cámara a la derecha y en la que sigue a la izquierda; en el fondo debe dejarse un desagüe conectado a un múltiple para permitir la extracción de los lodos. En cada tabique debe dejarse una boca de drenaje.	Número de cámaras: se recomienda un número mínimo de 9 cámaras. Velocidad en el codo: 0.4 m. s^{-1} y 0.2 m. s^{-1}. Gradiente de velocidad: 20 s^{-1} y 70 s^{-1} de acuerdo con la obtenida en la prueba de jarras. Tiempo de retención: 20 y 40 minutos
HELICOIDAL	✓ La energía hidráulica se usa para generar un movimiento helicoidal en el agua, inducido por su ingreso tangencial en la cámara de floculación. ✓ Se establece una distribución de velocidad de mayor a menor, inconveniente para la formación del flóculo ✓ Se recomienda usarlos en aguas con baja turbiedad y que no contengan sólidos	✓ El agua debe entrar por el fondo, en la esquina de la cámara y debe salir por encima en la esquina opuesta. ✓ Deben colocarse de manera que impidan la formación de cortocircuitos. ✓ Debe diseñarse un desagüe por cámara para la extracción de los lodos	Dimensionamiento: la unidad debe ser cuadrada, con una relación mínima entre el lado y la profundidad de 1:2 o puede circular con una relación de diámetro a profundidad mínima de 1:2. Volumen de la unidad: debe obtenerse al dividir el volumen total de acuerdo con el tiempo de retención entre el número de cámaras. Tiempo de retención y gradiente: debe determinarse a través de la prueba de jarras y calcularse con base en

	pesados en especial arena.		las pérdidas de carga en cada paso.
DE MEDIO POROSO			
MEDIO POROSO FIJO (O FLOCULACIÓN EN MEDIO GRANULAR)	✓ Flujo normalmente laminar y la eficiencia es extraordinaria. ✓ Puede flocular satisfactoriamente en pocos minutos.	Consiste en hacer pasar el agua, después de haberle aplicado los coagulantes, a través de un medio granular contenido en un tanque flujo vertical, o canal (flujo horizontal).	
MEDIO POROSO EXPANDIDO (FLOCULACIÓN EN LECHOS DE ARENA EXPANDIDA).	La velocidad del agua es ajustada de tal modo que la expansión sea de alrededor de 6 a 10%. Esto evita la obstrucción del medio poroso.	El agua cruda pasa en sentido ascendente, después de haber recibido el coagulante.	
TIPO MALLAS	✓ Se emplean mallas con una abertura que varía entre 2 y 20 milímetros, de alambre de acero galvanizado o acero inoxidable, o de hilos de nylon. ✓ Genera una distribución de gradientes de velocidad más uniforme.	Se hace pasar el agua a través de una tela con abertura de 5cm de abertura aproximadamente	

Fuente: (Arboleda, 2000; López, 2015)

Este estudio se enfoca en un floculador con características tipo floculador Alabama, es una variante del floculador vertical direccionando el flujo de agua hacia arriba, retomándola por el fondo y en lados opuestos, es decir, es un floculador de flujo vertical sin tabiques. Las recomendaciones de diseño y operación para los floculadores Alabama no tienen una base experimental conocida, por lo que es aconsejable investigar la velocidad óptima para este tipo de unidades en cada caso (Carreño y Castiblanco, 2016), además son vulnerables a las variaciones del caudal y se pueden generar espacios muertos y cortos circuitos.

La **Figura 2**. Muestra un esquema general de un floculador Cox y Alabama.

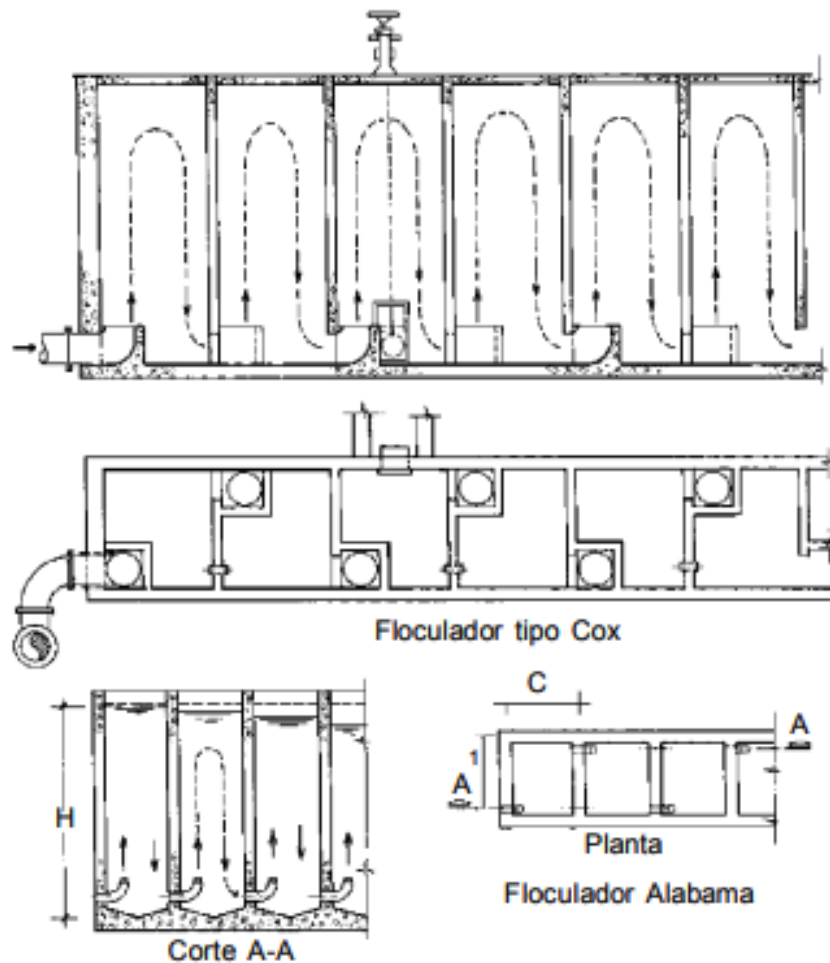


Figura 2. Floculador tipo Cox y Alabama. Fuente: Adaptada de (CEPIS, 2005)

5.4. Caracterización hidrodinámica de floculadores hidráulicos

Los factores hidrodinámicos que afectan el desempeño de los floculadores son: el tiempo de retención, el gradiente de velocidad y las variaciones del caudal; el floculador hidráulico es sensible a estos factores especialmente porque al variarse el caudal de operación en la planta, se modifican los demás factores mencionados (Lidia de Vargas, 2004), Por ello, la caracterización de los floculadores hidráulicos respecto a estos factores es necesaria.

En Colombia, se han realizado caracterizaciones de unidades de floculación hidráulicas en sistemas de tratamiento para potabilización de agua, especialmente mediante la metodología del CEPIS/OPS, la cual hasta ahora, ha sido una herramienta importante para el conocimiento operacional de las plantas, esta metodología ha sido usada por Hurtado, (2016), Carreño y Castiblanco, (2016) y otros, quienes han demostrado su relevancia en las caracterizaciones hidrodinámicas al momento de mejorar los procesos de floculación en plantas susceptibles a variaciones en las condiciones de operación. Sin embargo, con esta metodología no se puede verificar el comportamiento hidrodinámico detallado y el efecto de las variaciones del caudal al interior de las unidades de floculación.

5.4.1 Factores hidrodinámicos

- **Caudal (Q):** su variación, aumenta o disminuye los tiempos de floculación y los gradientes de velocidad.
- **Tiempo de floculación (to):** hay proporcionalidad entre aglomeración de partículas y el tiempo de floculación, el tiempo óptimo para la floculación, bajo determinadas condiciones, esta normalmente entre 20 y 40 minutos, los cuales son determinados en pruebas de jarras (jar test). Tiempo inferior o superior al óptimo produce resultados inadecuados. (Lidia de

Vargas, 2004). Se tiene por tiempo de floculación o tiempo medio de retención del flujo, a la relación de (CEPIS, 2005):

$$t_o = \frac{V}{Q}$$

Ecuación 1. Tiempo de Floculación

Dónde

t_o : tiempo medio de retención

V: volumen de la unidad

Q: caudal

- **Gradientes de velocidad (G):** en los floculadores hidráulicos, el gradiente de velocidad debe estar entre 20 s^{-1} y 70 s^{-1} de acuerdo con lo obtenido en la prueba de jarras y el tiempo de retención (RAS, 2010), conviene tener gradientes escalonados en la unidad de forma decreciente, evitando tramos intermedios con altos gradientes. Los gradientes de velocidad en estructuras de paso del agua floculada no deben ser mayores de 20 s^{-1} (Lidia de Vargas, 2004). Se calcula el gradiente con la siguiente ecuación:

$$G = \sqrt{\frac{g \times h_f}{\nu \times t_o}}$$

Ecuación 2. Gradiente de Velocidad

Dónde

G: gradiente de Velocidad

g: gravedad

h_f : pérdidas de carga totales generadas en el sistema

ν : viscosidad cinemática

t_m : tiempo medio de retención hidráulico

El gradiente de velocidad es un factor de proporcionalidad. Cuanto mayor es el gradiente de velocidad, más rápida es la velocidad de aglomeración de las partículas. Los flóculos crecerán hasta un tamaño máximo, por encima del cual las fuerzas de cizallamiento alcanzan una intensidad que los rompe en partículas menores. Es necesario graduar el gradiente de velocidad en forma decreciente, evitando tramos intermedios con altos gradientes.

5.4.2 Ensayos de trazadores

El uso de los ensayos de trazadores, ayuda a identificar el mal funcionamiento y las deficiencias hidráulicas de las unidades de tratamiento de agua potable, que se suscitan en inadecuados diseños constructivos o habitualmente en mal operación de la unidad (Aguirre, 2015), con ellos se pueden medir los tiempos de residencia reales, los índices de cortos circuitos presentes en estos floculadores y el índice de zonas de recirculación (Petra, 2003), (Marín y Zapata, 2018), con el inconveniente de estos ensayos que los datos obtenidos describen únicamente el período en el que se hace el ensayo, y no simbolizan precisamente el comportamiento en las diferentes condiciones (Idrovo, 2010). Las sustancias trazadoras se aplican a la entrada de la unidad de forma instantánea o continua, y simultáneamente se mide su concentración a la salida, tal como se muestra en la Figura 3.

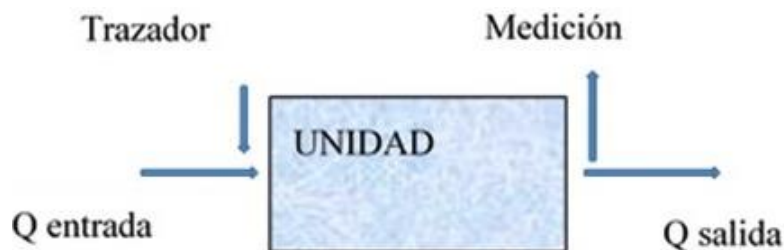


Figura 3. Aplicación de trazadores en un reactor. Fuente:(Marín y Zapata, 2018)

5.4.1.2. Trazadores

El trazador marca y hace identificable una fase específica de un sistema brindando información sobre el comportamiento de una unidad, este debe tener un comportamiento similar al material de estudio, debe detectarse con facilidad, no debe modificar significativamente las propiedades del material de estudio, ni contaminar el sistema (Jeremías y Cosme, 2006).

Dentro de las sustancias trazadoras que se han utilizado en unidades de tratamiento están:

- Isótopos radiactivos.
- Iones como: cloruros, especialmente de sodio o potasio, fluoruros, nitratos de litio o de sodio.
- Ácidos como clorhídrico y benzoico.
- Colorantes como fluoresceína, rodamina, rodamina WT.

De igual manera se usa la sal de cocina o cloruro de sodio como sustancia trazadora, su elección se debe a su fácil obtención y bajo costo, además la determinación de su concentración a la salida del reactor es fácilmente medible mediante la conductividad. No obstante, al elegir una sustancia trazadora se confirma que la concentración sea baja y que no reaccione con los compuestos que tiene el agua (Aguirre, 2015).

De igual importancia para la elección de una sustancia trazadora son el tener en cuenta: la disponibilidad del equipo de medición, la calidad y tipo de agua y la capacidad del personal (Marín y Zapata, 2018). Los ensayos de trazadores requieren de gran trabajo de campo y son aplicados a la entrada y la salida de las unidades de estudio, sin poder conocer los detalles de su funcionamiento interno. Es decir, pueden verse como un estudio de caja negra en donde la

unidad se estudia desde la entrada y la respuesta se recibe a la salida, entendiendo que es lo que hace, pero sin dar importancia en cómo lo hace en su interior.

5.4.3 Modelos hidrodinámicos

Para profundizar en el conocimiento del comportamiento del agua y elementos dentro de una unidad, se usan como herramientas la aplicación de modelos que representan los procesos intrínsecos que se producen en unidades reales de tratamiento de agua. La CFD (Computational Fluid Dynamics) o modelación hidrodinámica ostenta una gran precisión en términos de la simulación hidráulica, usando ecuaciones matemáticas para simular los patrones de flujo, acarreado así a un problema matemático no lineal que requiere del cálculo en computador para su solución (Grayman *et al.*, 1999), a partir de ecuaciones diferenciales parciales, este tipo de modelación divide un sistema de fluido en una malla o pequeños volúmenes discretos conocidos como elementos finitos para aproximarse a la geometría de la unidad.

5.4.1.3. Modelo matemático

Los modelos matemáticos se pueden catalogar en uno, dos, y tres dimensiones, acorde con la resolución espacial; modelan ecuaciones integrales (continuas) que gobiernan el sistema, representan los fenómenos físicos del sistema en relaciones matemáticas como: ecuaciones algebraicas, de regresión, ecuaciones diferenciales ordinarias y parciales, las cuales para encontrar su solución se deben simplificar (Grayman *et al.*, 1999). Estas ecuaciones corresponden a las ecuaciones de mecánica de fluidos que serán resueltas de forma numérica. Para ello, exigen la ayuda de un software que pueda resolver estas ecuaciones, obteniendo así la información que se requiere para la solución del caso de modelación hidrodinámica.

5.4.2.3. Modelos CFD

Los modelos CFD, se establecen en la modelación física del fluido, resolviendo simultáneamente los modelos matemáticos en 2D y 3D a través de técnicas numéricas y herramientas computacionales, en las que se ajustan ecuaciones diferenciales parciales no lineales que representan las propiedades básicas de conservación de la masa, el momento y energía. Además, deben ser estables, robustos, y converger a soluciones consistentes con la aproximación física planteada en los modelos matemáticos (Versteeg y Malalasekera, 2007). La modelación del fluido se puede realizar mediante las ecuaciones de Reynolds y Navier-Stokes, las cuales, no pueden ser resueltas analíticamente en la mayoría de los casos, por consiguiente, su solución requiere de una linealización (Versteeg y Malalasekera, 2007)

5.4.3.3. Modelación del comportamiento hidrodinámico unidades de tratamiento de agua

Se han desarrollado modelos CFD para el estudio de problemáticas relacionadas con el diseño y mejoras en el campo de la ingeniería ambiental, mostrando ser una poderosa, eficiente y eficaz herramienta para la solución de complicaciones en los sistemas de tratamiento de agua residual y potable, como la modelación del flujo en procesos unitarios. Esta herramienta ayuda a comprender los fenómenos hidrodinámicos relacionados con los flujos de agua en las unidades de tratamiento, en este caso en particular, se aprovecha esta herramienta para conocer el comportamiento hidrodinámico de un floculador hidráulico tipo Alabama en la PTAP “El Arroyo” en Santander de Quilichao, Cauca.

Los modelos CFD se evalúan y mejoran constantemente, con el ánimo de predecir el comportamiento del fluido y el transporte de masa con una mayor exactitud y resolución (Jakeman, Letcher y Norton, 2005).

6. METODOLOGÍA

6.1. Localización y descripción del floculador caracterizado

La unidad de floculación objeto de estudio se encuentra localizada en las instalaciones de la PTAP “El Arroyo”, en el municipio de Santander de Quilichao - Cauca, en el barrio que lleva el mismo nombre, entre la calle 2ª y la vía a San Pedro. En esta PTAP se realiza la potabilización del agua mediante un sistema convencional, en el que se realizan los procesos de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección, suministrando agua tratada para el 100 % de la cabecera municipal. En la **Figura 4** se muestra la localización de la PTAP.



Figura 4. Localización del sitio de estudio

Esta PTAP fue construida en 1946 para un caudal de 60 l.s^{-1} . Modificada en 1975 para un caudal de 85 l.s^{-1} . A partir del 2006 se modificó el sistema para tratar un caudal de 250 l.s^{-1} , el cual es el máximo caudal de operación en la actualidad (Mañunga, 2017).

La floculación en la PTAP “El Arroyo” se realiza en dos floculadores hidráulicos de flujo vertical tipo Alabama con entrada lateral del agua al floculador en el fondo, que no tienen codos para proyectar el agua hacia arriba, en su lugar tienen en el fondo recámaras de dirección de flujo. Los

floculadores están constituidos por nueve cámaras en serie unidas entre sí por la parte inferior a través de pasa muros, en la recámara final el agua sale por la parte superior opuesta a la entrada, estos floculadores trabajan a una capacidad de 125 l.s^{-1} cada uno (Marin y Zapata, 2018), la **Figura 5** muestra un esquema de los floculadores Alabama de la PTAP el Arroyo y la **Figura 6** muestra los floculadores de la PTAP y la recámara de orientación de flujo.

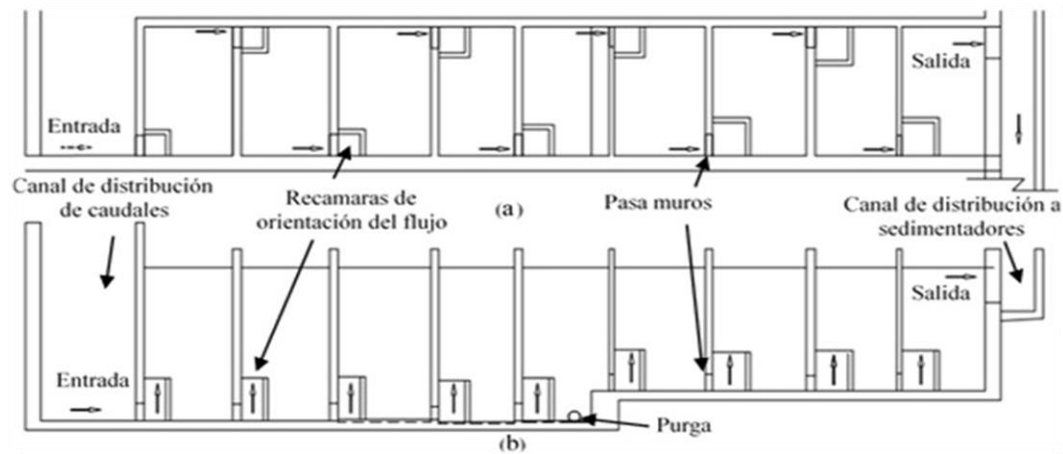


Figura 5. Esquema del floculador dos (a) planta y (b) perfil



Figura 6. Floculadores de la PTAP El Arroyo (a) y Recámara de orientación de flujo (b)

6.2. Ensayos de trazadores

Los ensayos de trazadores se han usado para validar el comportamiento hidrodinámico del flujo en estudios hechos a unidades de tratamiento de agua con modelos CFD (Montoya, 2012;

Zapata, 2017; Enríquez, 2018), por lo tanto, en este estudio para conocer el comportamiento hidrodinámico del floculador dos de la PTAP “El Arroyo”, se realizaron tres ensayos de trazadores para tres caudales de operación de la planta 180, 230, 250 l.s⁻¹, asumiendo que el caudal se distribuye de manera uniforme en los dos floculadores existentes en la planta, los caudales unitarios para el floculador dos son: 90, 115 y 125 l.s⁻¹ respectivamente con las especificaciones de diseño del floculador hidráulico tipo Alabama.

En coordinación previa con el profesional universitario de la PTAP el Ingeniero José Ramón Grueso Vanegas, personal de la planta y la colaboración de miembros del equipo técnico del proyecto “Vulnerabilidad y Riesgo en Sistemas de Agua Potable en el Cauca – AQUARISC” ingeniero Juan Felipe Hernández Arredondo y el licenciado Víctor Alfonso Castrillón Ospina. Se realizaron tres ensayos de trazadores, según la metodología sugerida por (Martínez y Betancourth, 2003), usando como trazador 2,0 kg cloruro de sodio (sal de mesa) diluidos en 10 litros de agua cruda de la planta. La solución fue adicionada en forma de pulso en el canal de distribución de caudales (lo más cerca posible a la entrada del floculador dos) y registrando la conductividad a la salida de la unidad cada minuto, con un medidor de conductividad Pocket Pro marca Hach, Colorado, USA.

6.3. Geometría del floculador dos

El primer paso en el proceso CFD consiste en la creación de la geometría o el dominio del modelo. Esta fue elaborada de acuerdo con las dimensiones reales levantadas en campo. Se desarrolló una geometría 3D en un solo cuerpo, que posteriormente se seccionó con el propósito de mejorar las condiciones para el siguiente paso (el mallado), obteniéndose como resultado una geometría con 27 cuerpos, 218 caras, 492 lados y 328 vértices, con un volumen de 150.11 m³ y un área total de 393.61 m², además fueron seleccionadas y nombradas las caras de entrada (Inlet)

y de salida (Outlet) del agua, todo lo mencionado fue elaborado usando el programa Design Modeller®, incluido en el paquete Ansys Workbench, versión 16.1. En la **Figura 7** se muestra la geometría del floculador dos en 3D.

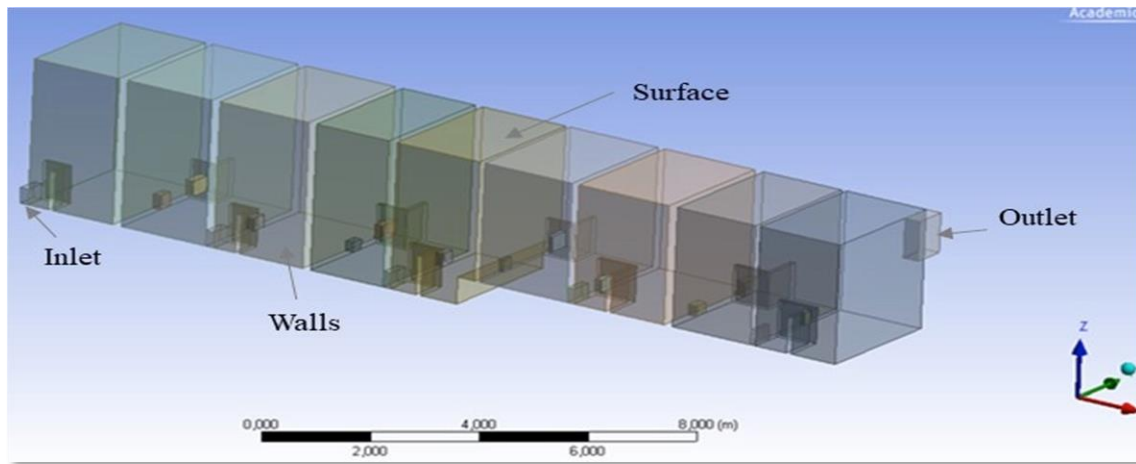


Figura 7. Vista 3D de la geometría del floculador dos

6.4. Descripción de la malla

Antes de la construcción del mallado se realizó un seccionamiento geométrico en el paso anterior, este permite mallar de mejor manera y obtener una malla de excelente calidad. Por tanto, la calidad de la malla es un elemento significativo en la convergencia, estabilidad y exactitud de los resultados en la simulación (Enríquez, 2018), motivo por el cual fue considerable el tiempo que tomó lograr la excelente calidad del mallado. Por consiguiente, la división realizada en el dominio computacional (geometría) permitió un mallado conformado por hexaedros de muy buena calidad, el cual fue creado con el programa Meshing by Ansys Inc® version 16.1. Se obtuvieron 4683 elementos para la malla gruesa (malla 1), 20795 elementos para la malla media (malla 2) y 37382 elementos para la malla fina (malla 3). Acorde con la geometría el tamaño de los elementos varió en cada malla 0.1 - 0.33 m, 0.1 - 0.33 m y 0.1 - 0.18 m respectivamente.

En cuanto a los criterios para definir la calidad de los elementos de las mallas generadas fueron: asimetría y calidad ortogonal (Ansys, 2013). En la Tabla 2 se presentan las características de las mallas empleadas en el análisis de independencia de malla, y en la **Figura 8** se presentan algunas imágenes de la distribución de los elementos.

Tabla 2. Características de los elementos en el análisis de independencia de la malla

ANÁLISIS		MALLA		
		GRUESA	MEDIA	FINA
Calidad ortogonal	Número de Elementos	4666	20722	37310
	Porcentaje	99.64	99.65	99.80
	Clasificación	Excelente	Excelente	Excelente
Oblicuidad (Skewness)	Número de Elementos	4596	20312	37159
	Porcentaje	98.14	97.68	99.40
	Clasificación	Excelente	Excelente	Excelente

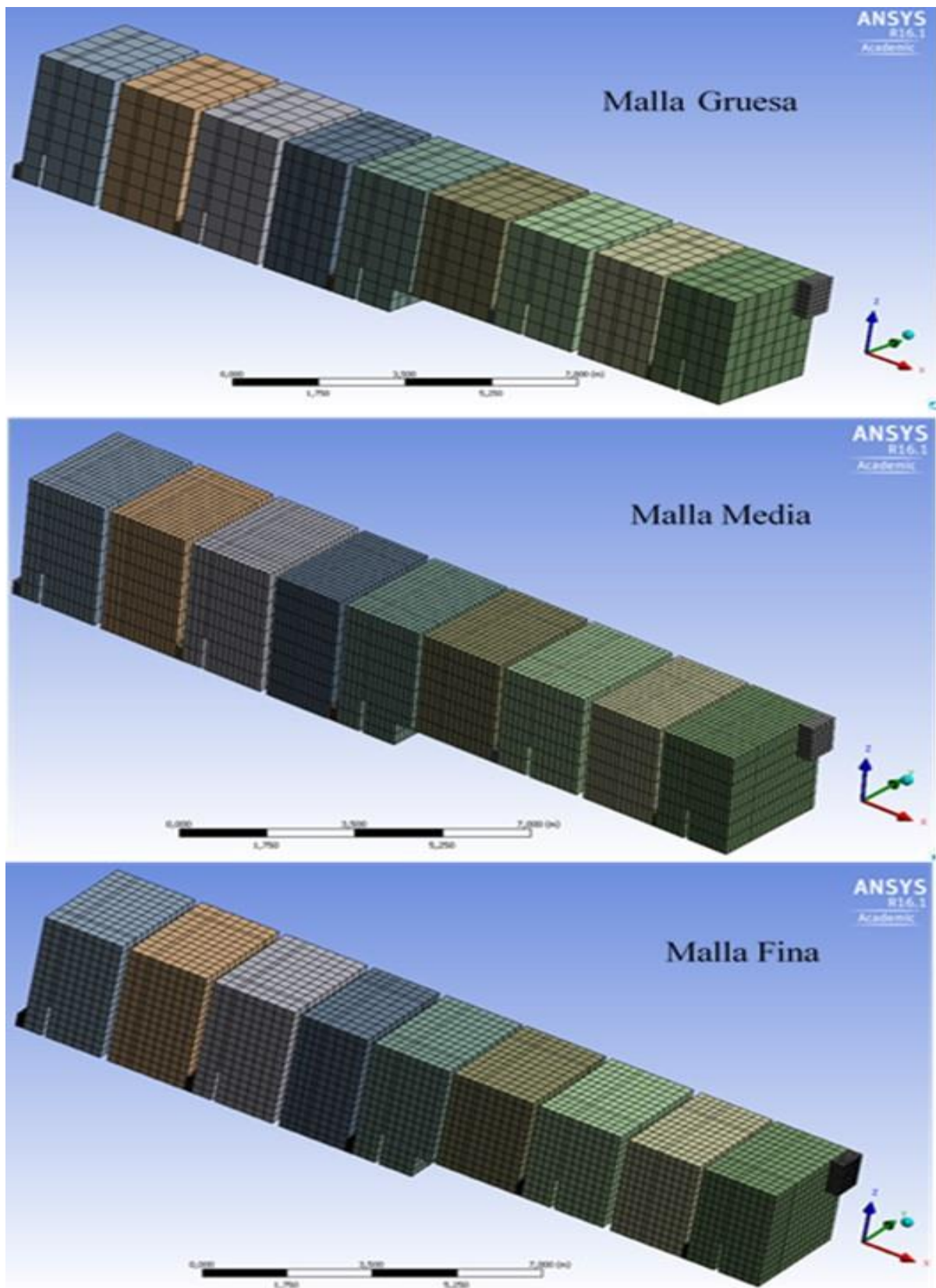


Figura 8. Mallas utilizadas y distribución de sus elementos

6.5. Configuración del modelo CFD

Luego de la creación del dominio (geometría) y la malla, se procedió a configurar el modelo CFD. En la **Figura 9** se presentan los componentes que solicita el software para la configuración del modelo. Sin embargo, previamente se verificó que el software había leído adecuadamente la malla y que no tuviese volúmenes negativos debido a que esto presenta errores en el mallado, esta verificación se hace utilizando la opción “Check” que tiene el software en la sección de configuración general, también se comprobó que la unidad de medida utilizada en la malla coincidiera con la unidad que está leyendo el software para evitar que los resultados del modelo sean incorrectos, de lo contrario con la opción “Scale”, también incluida en la sección general, pueden hacerse coincidir las unidades. Por ultimo con la opción “Report Quality” se acredita la calidad de la malla que se empleara en la simulación. La **Figura 10** muestra las opciones “Check, Scale y Report Quality”.

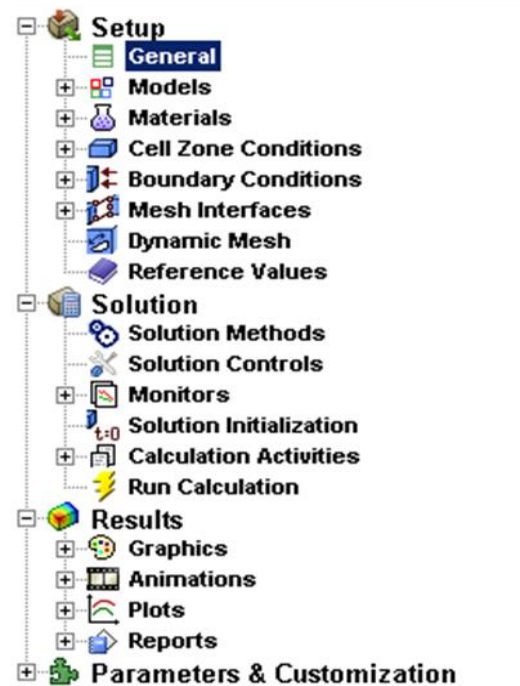


Figura 9. Componentes para la configuración.

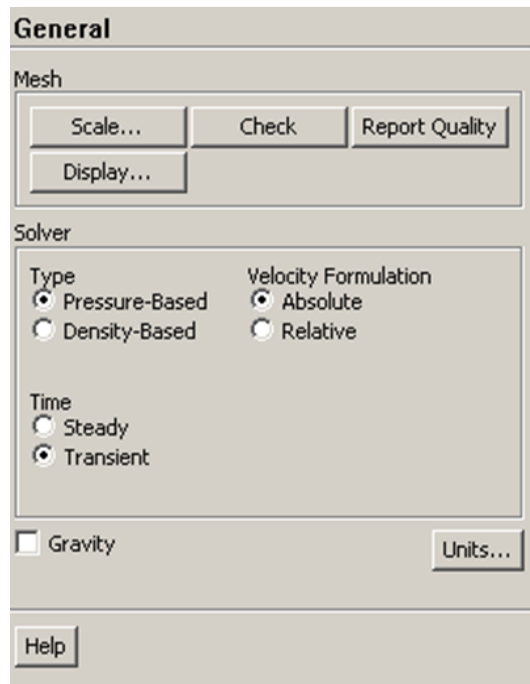


Figura 10. Opciones de la sección General

6.5.1 Configuración del solucionador (Solver)

Para la configuración del modelo es significativo la elección del solver, por lo que en esta parte están los métodos disponibles para el cálculo para la solución del modelo, el software FLUENT® cuenta con dos tipos de métodos para el solucionador (Solver): “Density-Based” y “Pressure-Based”. No obstante, los dos son usados para modelar diversos sistemas, el solucionador “Pressure-Based” se utiliza en la modelando fluidos incompresibles, mientras que el solucionador “Density-Based” se utiliza especialmente para el modelado de flujos compresibles (Ansys, 2013). Por lo tanto, y teniendo en cuenta que el agua es un fluido incompresible, en esta investigación se escogió el solucionador “Pressure-Based”. La **Figura 10** muestra la selección del solucionador.

Por otra parte, la elección de la formulación de la velocidad, entre las opciones relativa y absoluta, se escogió la velocidad absoluta, de acuerdo con las características de velocidad que se

presentan en la mayor parte del dominio computacional, en el cual, el fluido en la mayor parte se mueve poco con relación a la velocidad en la entrada del dominio (por ejemplo, un ventilador en una habitación grande) (Ansys, 2013). La opción de velocidad relativa es recomendada en casos donde la mayor parte del fluido esté en amplio movimiento a causa de la velocidad proporcionada (ej. sistemas con mecanismos de mezcla)(Enríquez, 2018), a causa de que en el floculador se desea que la velocidad del flujo no sea tan alta para evitar el rompimiento de los flóculos, en esta investigación se seleccionó la formulación de velocidad absoluta.

6.5.2 Configuración de los modelos

La modelación en el floculador se realizó mediante el uso del modelo viscoso ("Viscous"), el cual puede verse en la **Figura 11** en él se encuentra predeterminado el modelo de turbulencia k- ϵ estándar, que cuenta con suficiente exactitud en el pronóstico del comportamiento hidrodinámico en los floculadores. En la **Figura 12** se muestra la configuración del modelo de turbulencia.

En la sección del modelo de turbulencia que concierne a tratamientos cerca de la pared para flujos limitados por paredes ("Near-Wall Treatment"), se refiere a que las funciones admiten establecer los valores de velocidad, k y ϵ que se presentan en la pared, funciones que son apropiadas en dominios (geometrías) en los que las paredes son uniformes. Estas funciones se han usado con mayor amplitud en flujos de tipo industrial (Ansys, 2013), y también fueron empleadas por (Enríquez, 2018).



Figura 11. Modelo viscoso

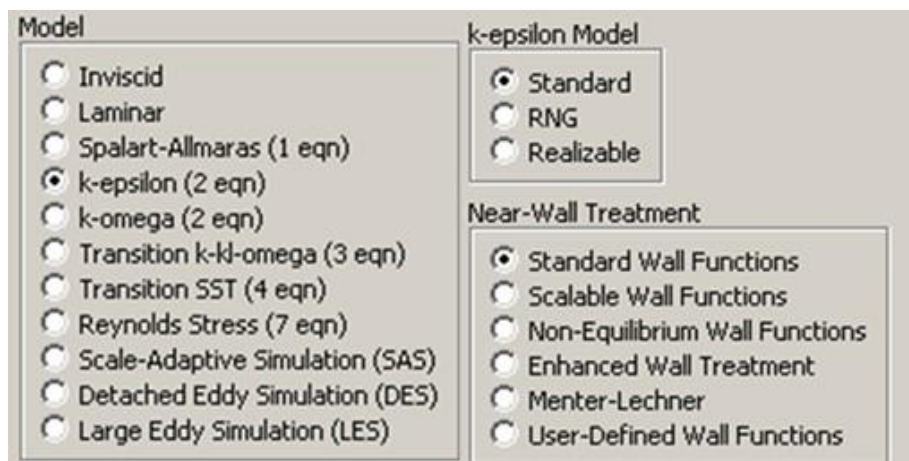


Figura 12. Modelo de turbulencia

6.5.3 Incorporación de los materiales

Luego de la configuración de los modelos se deben agregar los materiales para establecer las propiedades del fluido, en este caso agua líquida (Water-liquid) y las propiedades del material sólido (Solid) correspondientes a las paredes de concreto del dominio (geometría). En la **Figura 13** se muestra los materiales y sus propiedades.

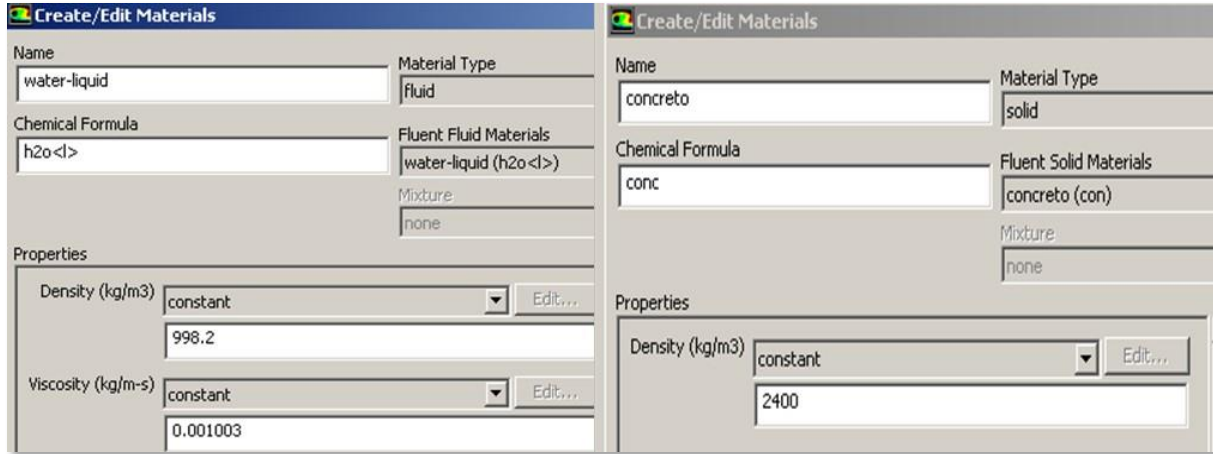


Figura 13. Materiales y propiedades

6.5.4 Condiciones de frontera

Las asignaciones de las condiciones de frontera son importantes en la simulación y en la exactitud de los resultados, por lo tanto, de la definición de la entrada y salida, es que el software calcula el balance de masa del sistema y establece si sucede o no la convergencia en la simulación. Por lo tanto, para la entrada de flujo al dominio (geometría) se utilizó la condición de frontera “Velocity Inlet”, aquí se establece la velocidad del fluido, y en la salida se utilizó la frontera “Outflow”, aquí se establecen las condiciones de salida eligiendo un factor de ponderación en la salida, para este caso solo se tiene un límite de salida, entonces el factor de ponderación es 1, es decir, la masa que entra es igual a la que sale. En la Tabla 3 se muestran los valores de las condiciones de frontera utilizados.

Tabla 3. Valores de las condiciones de frontera empleadas

Zona	Frontera	Velocidad m.s^{-1}	Reynolds Re	Intensidad de turbulencia I	Energía cinética k	Tasa de disipación de energía ϵ	Observaciones
Entrada	Velocity Inlet	0.538	2189	0.061	0.0016	0.0011	Intensidad de Turbulencia: 5 % Relación de viscosidad
		0.688	2796	0.059	0.0025	0.0021	
		0.748	3040	0.059	0.0029	0.0026	

							turbulenta: 10
							Dh: 0.408 m
Salida	Outflow	Factor de ponderación del caudal					Presión 101325 Pa. (atmosférica)
		1					

Las velocidades empleadas para alimentar la entrada al modelo (Velocity Inlet) fueron calculadas con la ecuación 3 para cada caudal unitario (90, 115, 125 l.s⁻¹), asumiendo que los caudales de operación 180, 230, y 250 l.s⁻¹ se distribuyen uniformemente en las dos unidades de floculación que operan en la PTAP.

$$v = \frac{Q}{A}$$

Ecuación 3. Velocidad de entrada

Donde:

Q: Caudal de operación m³. s⁻¹

A: Área de la entrada a la geometría m²

Para el cálculo del número de Reynolds se tiene la ecuación 4.

$$Re = \frac{\rho v_s D_H}{\vartheta}$$

Ecuación 4. Numero de Reynolds

Donde:

ρ = Densidad del fluido (Kg.m³)

v_s = velocidad del fluido (m.s⁻¹)

D_H = Diámetro hidráulico cuya sección recta no es circular (m)

ϑ = Viscosidad cinemática del fluido (m². s⁻¹)

Los parámetros de turbulencia fueron calculados con la relación entre la energía cinética (K) y la intensidad de turbulencia (I), tal como se muestra en la siguiente relación:

$$k = \frac{3}{2} (\mu_{avg} I)^2 \quad \text{Ecuación 5. Relación entre k e I}$$

Donde μ_{avg} es la velocidad media del fluido (m.s^{-1})

$$I = 0.16 (Re_{DH})^{-\frac{1}{8}} \quad \text{Ecuación 6. Intensidad de turbulencia}$$

Donde

Re corresponde al número de Reynolds cuya sección recta no es circular (adimensional)

Posteriormente, la tasa de disipación de energía se determinó con la relación que se muestra a continuación:

$$\varepsilon = \frac{k^{\frac{3}{2}}}{I} \quad \text{Ecuación 7. Tasa de disipación de energía}$$

6.5.5 Métodos de solución

En este estudio se ejecutaron diversas simulaciones de prueba, combinando los métodos de solución contenidos en el software FLUENT®. El análisis de los residuales fue básico para identificar la variable que impide la convergencia en la simulación, luego se realizaron los ajustes a la variable en cuestión en el método de solución y se ejecutó de nuevo la simulación, estos análisis y combinaciones se realizaron hasta hallar los métodos con los cuales se lograba la convergencia y el conocimiento en el comportamiento del floculador. Los métodos de solución hallados se muestran en la **Figura 14**.

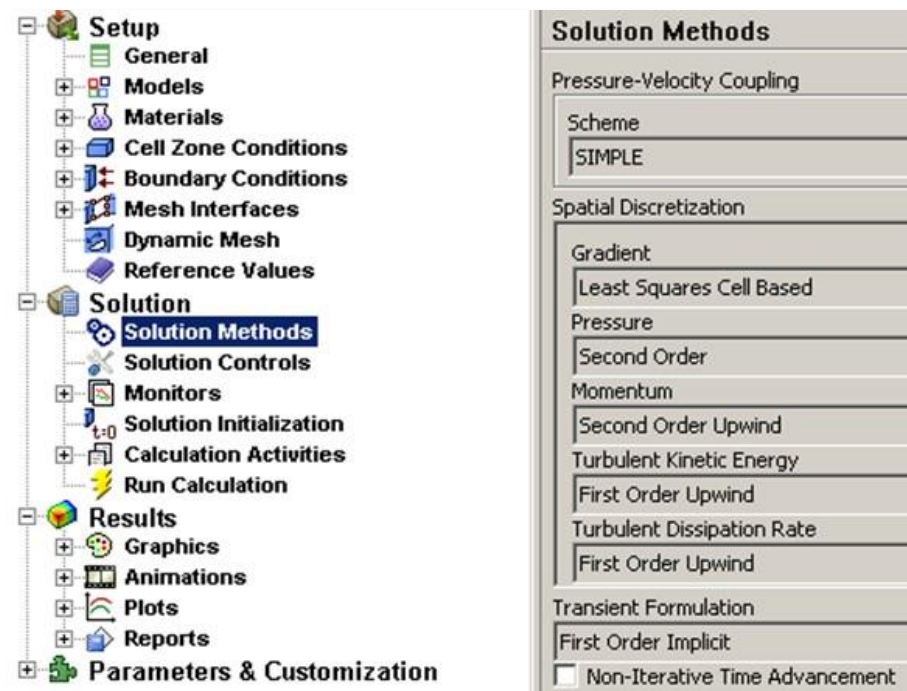


Figura 14. Métodos de solución

6.5.6 Ecuaciones gobernantes

La elaboración del modelo se apoyó en las ecuaciones de conservación para las propiedades fundamentales de masa, momento, movimiento y energía hidráulica, estas ecuaciones fueron resueltas en estado transitorio para fluido y se basaron en una descripción Euleriana siguiendo los volúmenes de control, confrontando las ecuaciones de Navier-Stokes.

6.5.1.6. Ecuación de continuidad

Realizando el balance de masa en el volumen de control se obtiene la ecuación para la conservación de continuidad para un fluido incompresible (densidad constante), como el agua.

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

Ecuación 8. Continuidad

Fuente: (Versteeg y Malalasekera, 2007)

Donde:

ρ : densidad del fluido

(u, v, w) : componentes del vector velocidad del fluido.

6.5.2.6. Ecuación de momento

La tasa de variación de momento sobre un sistema, es igual a la suma de fuerzas sobre el sistema, en este caso el volumen de control, en el cual se tienen tensiones viscosas. Ver **Figura 15**.

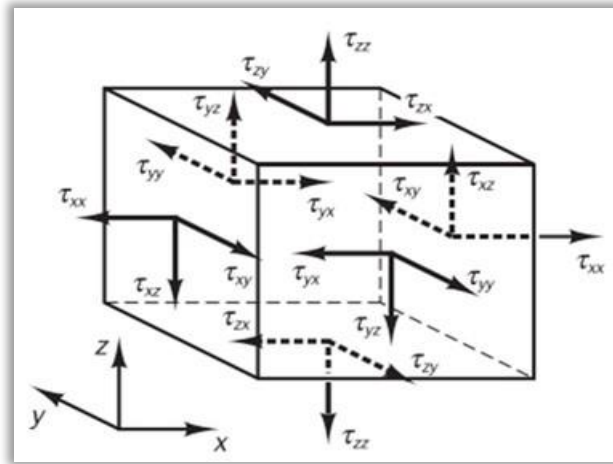


Figura 15. Tensiones dentro del volumen de control. Fuente: (Versteeg y Malalasekera, 2007)

Considerando un fluido newtoniano e incompresible en las ecuaciones de momento se obtienen las ecuaciones de Navier-Stokes.

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx}$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{My}$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + S_{Mz}$$

Ecuación 9. Ecuaciones de momento
(Navier-Stokes)

Fuente: (Versteeg y Malalasekera, 2007)

Donde:

(x, y, z): coordenadas

(ρ): densidad

(τ): tensión

(p) presión

(S_M): fuerza total en la coordenada en el elemento debido a las tensiones superficiales.

6.5.3.6. Ecuación de la conservación de la energía hidráulica

La ecuación de la conservación de la energía hidráulica se parametriza de forma simple en la ecuación de Bernoulli, esta resuelve las variaciones energéticas en los volúmenes de control, en este puede verse los componentes de los vectores de flujo **Figura 16**.

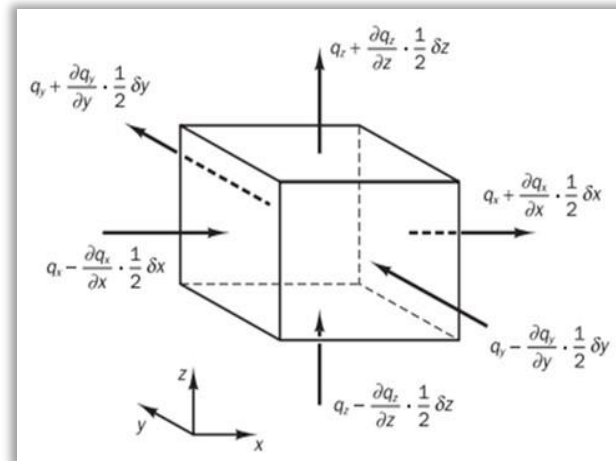


Figura 16. Componentes de los vectores de flujo. Fuente: (Versteeg y Malalasekera, 2007)

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial s} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial s} + g \frac{dz}{ds} = 0$$

Ecuación 10. Conservación de la energía hidráulica

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

Ecuación 11. Ecuación de Bernoulli

Donde:

P: presión

v: velocidad

γ peso específico

z: altura

g: Gravedad

6.5.4.6. Modelo de turbulencia

Las ecuaciones del modelo de turbulencia k-épsilon estándar para la energía cinética k y la tasa de disipación ε son:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad \text{Ecuación 12. k}$$

y,

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \end{aligned} \quad \text{Ecuación 13. } \varepsilon$$

Donde:

G_k = Representa la generación de energía cinética de turbulencia

G_b = Es la generación de energía cinética de turbulencia debido a la flotabilidad

Y_M = Es la contribución de la dilatación en fluidos compresibles

$C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ y $C_{3\varepsilon}$ = Son constantes

σ_k y σ_ε = Son los números turbulentos de Prandtl para k y ε respectivamente

S_k y S_ε = Son términos fuente definidos por el usuario para k y ε respectivamente

7. RESULTADOS DEL MODELO CFD

7.1. Estudio de trazadores y validación del campo hidrodinámico

La información de los estudios de trazadores fue analizada a través de las curvas de distribución del tiempo de residencia, (ver **Figura 17**). En las Tablas 4 y 5 se muestran los análisis de los estudios experimentales de los ensayos de trazadores para los tres caudales, las concentraciones del trazador fueron medidas a la salida del floculador dos. El floculador tiene un volumen de 150.11 m^3 y usando los parámetros asociados al esquema conceptual de los tiempos de residencia para un reactor mostrados en la **Figura 18** (Marín y Zapata, 2018), se calcularon el tiempo de retención (t_0) usando la ecuación 1 para los tres caudales unitarios de 90, 115 y 125 l.s^{-1} , estos fueron 28, 22 y 20 minutos respectivamente.

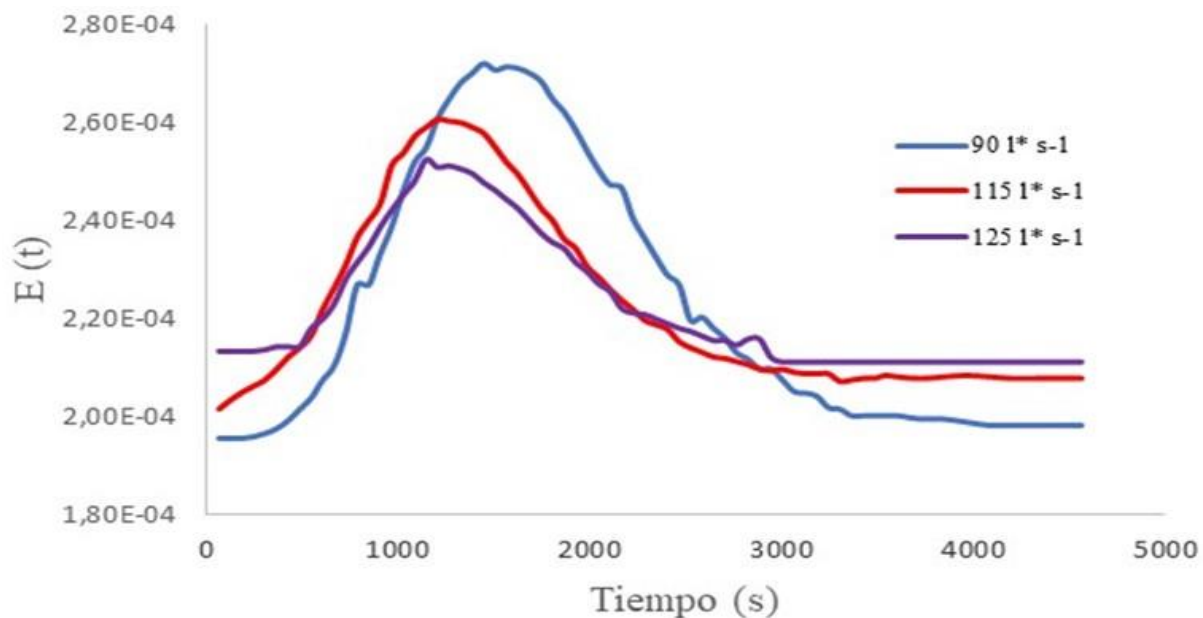


Figura 17. Distribución del tiempo de residencia. Estudios de trazadores para los tres caudales

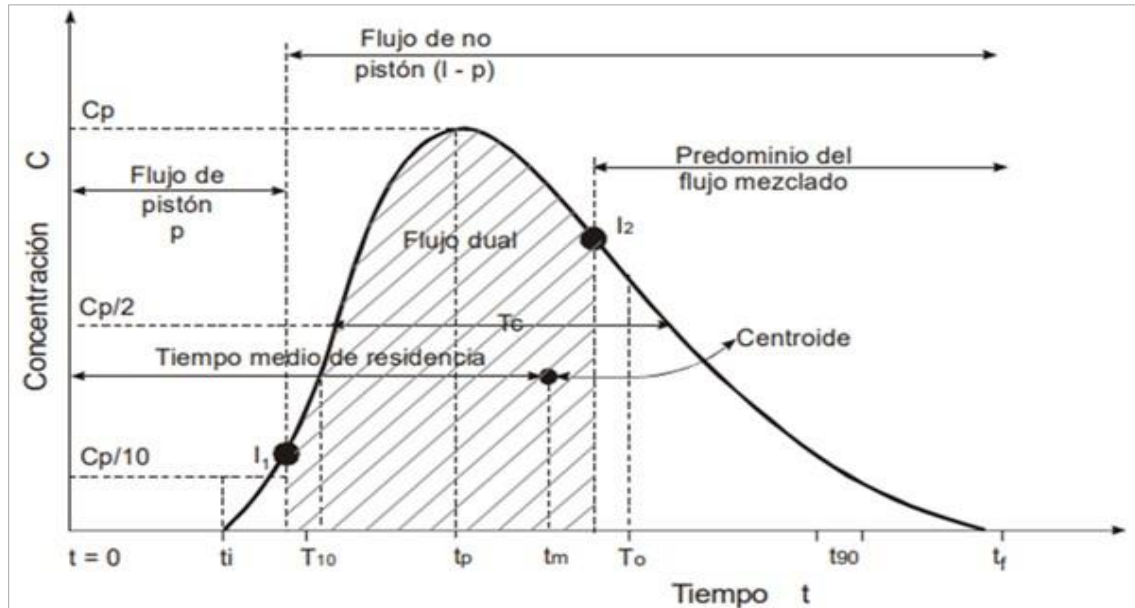


Figura 18. Esquema conceptual de los tiempos de residencia. Fuente: (Marín y Zapata, 2018)

Tabla 4. Datos de los estudios de trazadores para los tres caudales a la salida del floculador dos

Parámetro	Caudal (l.s ⁻¹)		
	90	115	125
t _i , tiempo hasta la aparición del trazador (min)	7	6	5
t _p , tiempo de máxima concentración (min)	24	20	19
t _m , tiempo modal hasta aparición del 50% del trazador (min)	27.26	24.1	22.36
t _o , tiempo teórico de retención (min)	28	22	20
t _f , tiempo final (min)	66	64	50
C ₀ , conductividad inicial a la salida (μS)	61.9	69.3	69.5
C _p , máxima conductividad a la salida (μS)	82,6	83,4	80,5

Tabla 5. Parámetros de estudio de trazador para los tres caudales en el floculador dos

Criterio	Descripción	Caudal (l.s ⁻¹)		
		90	115	125
t_i / t_0	Mide cortos circuitos. Un valor de 1 indica flujo pistón, mientras un valor de 0 indica flujo de mezcla y si es menor a 0, 3 corto circuito.	0.25	0.27	0.25
t_m / t_0	Indica cortos circuitos cuando su valor es menor a 1 y zonas muertas cuando su valor es mayor a 1	0.97	1.10	1.12
t_p / t_0	Indica la relación entre flujo pistón y flujo de mezcla del floculador	0.85	0.91	0.95

Adaptada de (Zapata, 2017)

De acuerdo con los resultados en la Tabla 5 de los cálculos derivados del estudio de trazadores para el floculador dos y para los caudales unitarios de 90, 115 y 125 l.s⁻¹, los valores menores a uno de t_i / t_0 reflejan la existencia de cortos circuitos o pasos directos entre la entrada y la salida al operar con los tres caudales; los valores de t_p / t_0 menores a uno, muestran que existe flujo de pistón y mezclado en los tres caudales, pero como los valores de t_p / t_0 son próximos a uno, muestra la tendencia al flujo pistón, es decir el flujo pistón predomina sobre el flujo de mezcla; también se puede ver que los valores para t_m / t_0 mayores a uno para los caudales de 115 y 125 l.s⁻¹ muestran la existencia de zonas muertas, estas son zonas donde el trazador queda retenido por un tiempo mayor al proyectado, el resultado de t_m / t_0 menor a uno para el caudal de 90 l.s⁻¹ no muestra la existencia de zonas muertas, sin embargo, al concluir la existencia de cortos circuitos según los valores de t_i / t_0 para este caudal, se deduce la existencia de las zonas muertas para el caudal de 90 l.s⁻¹. Estas circunstancias o fallas hidráulicas afectan considerablemente la eficiencia del proceso de floculación. La Tabla 6 resume el análisis del comportamiento hidráulico del floculador.

Tabla 6. Comportamiento hidráulico del floculador dos para los tres caudales

Caudal unitario (l.s⁻¹)	Zonas Muertas	Cortos Circuitos	Flujo Pistón	Flujo Mezclado
90	Presenta	Presenta	Tiende	Existe
115	Presenta	Presenta	Tiende	Existe
125	Presenta	Presenta	Tiende	Existe

La tabla indica que al operar el floculador con caudales de 90, 115 y 125 l.s⁻¹, este se comporta como un reactor de flujo no ideal, oscilando entre los flujos pistón y mezclado, disminuyendo su eficiencia y posteriormente afectando los procesos de sedimentación y filtración. Por eso, lo mejor es que el floculador presente el máximo de flujo de pistón, esto ayuda a que el agua tenga el tratamiento adecuado durante el tiempo de retención proyectado.

Es importante sugerir que el resultado de los estudios de trazadores identifica la presencia de zonas muertas y de cortos circuitos, pero no permite ver las zonas del floculador en las que ocurren estas condiciones. Con el desarrollo del modelo CFD, se dejó en evidencia con una mayor precisión los fenómenos hidrodinámicos al interior del floculador.

A continuación, se muestran los cálculos hidráulicos realizados para los tres caudales 90, 115, 125 l.s⁻¹ de operación, teniendo en cuenta las mediciones realizadas en campo: volumen de 150.11 m³, pérdidas de 0.14 m, temperatura 20 °C ($\nu = 1.01 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) y haciendo uso de la ecuación 2 se calculó el gradiente promedio. En la Tabla 7 se muestran los resultados de las características hidráulicas de la unidad de floculación.

Tabla 7. Características hidráulicas de la unidad de floculación

Caudal de operación (l.s⁻¹)	Caudal unitario (l.s⁻¹)	Tiempo de mezcla lenta (min)	Gradiente de velocidad (s⁻¹)
180	90	28	28
230	115	22	32
250	125	20	33

En cuanto a los tiempos de mezcla, entre 20 – 30 min (RAS, 2010); los valores de 28, 22, y 20 minutos para los caudales de 180, 230 y 250 l.s⁻¹ respectivamente, están dentro del rango recomendado. Para los valores de gradiente de velocidad 20 – 70 s⁻¹ (RAS, 2010); los valores de 28, 32 y 33 para los caudales de 180, 230 y 250 l.s⁻¹ respectivamente, están dentro del rango recomendado.

7.2. Prueba de independencia de malla

La calidad y cantidad de los elementos del mallado inciden en los resultados de la simulación, por lo tanto, la prueba de independencia de malla certifica que la precisión de los resultados no está asociado al número y tamaño de los elementos. Para este propósito, se utilizó la variable de velocidad en un punto a la salida del dominio para hacer la comparación entre las mallas, las cuales están referidas en el numeral 6.3, los resultados proporcionados por el modelo para cada malla evaluada se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Valores simulados para velocidad a la salida en las mallas evaluadas para el análisis de independencia de malla

Malla No	Nombre	No elementos	Caudal	Velocidad Salida
			l.s⁻¹	m.s⁻¹
1	Gruesa	4683	230	0.18
2	Media	20795	230	0.18
3	Fina	28110	230	0.19

En vista de que autores como De Clercq (2003, citado en Enríquez, 2018) se plantea que “entre más fina sea la malla más precisos son los resultados proporcionados por el modelo”, por tanto, se compararon los valores de velocidad a la salida de la malla gruesa y media con los valores de velocidad en la malla fina, esta comparación se presenta en la Tabla 9.

Tabla 9. Desviación obtenida en el análisis de independencia de malla

Velocidad en un punto a la salida en la malla fina m.s^{-1}	Desviación (%)	
	Malla media	Malla gruesa
0.21	5	5

Los resultados de cada malla evaluada no difieren significativamente entre sí, afirmados en estas razones de independencia de malla se prefirió la malla dos (media) como la malla recomendable para las simulaciones finales. Debido a que, la malla dos ofrece una solución aceptable con un tiempo y gasto computacional aceptables.

7.3. Resultados del modelo del floculador

Los mejores resultados en términos de convergencia de la solución, número de iteraciones y estabilidad de los residuales fueron obtenidos con el modelo Estándar, modelo basado en las ecuaciones de transporte para la energía cinética de la turbulencia (k) y su tasa de disipación (ϵ), (ver Ecuación 12 y 13). Se ejecutaron simulaciones en estado transitorio por periodos cortos de tiempo (1 hora), logrando perfiles de velocidad y turbulencia estables. Los residuales con el uso del modelo estándar cumplen con los valores recomendados, menores o iguales a 10^{-3} (Ansys, 2013). La **Figura 19** muestra el comportamiento de los caudales 180, 230 y 250 l.s^{-1} y los residuales obtenidos con el periodo de una hora.

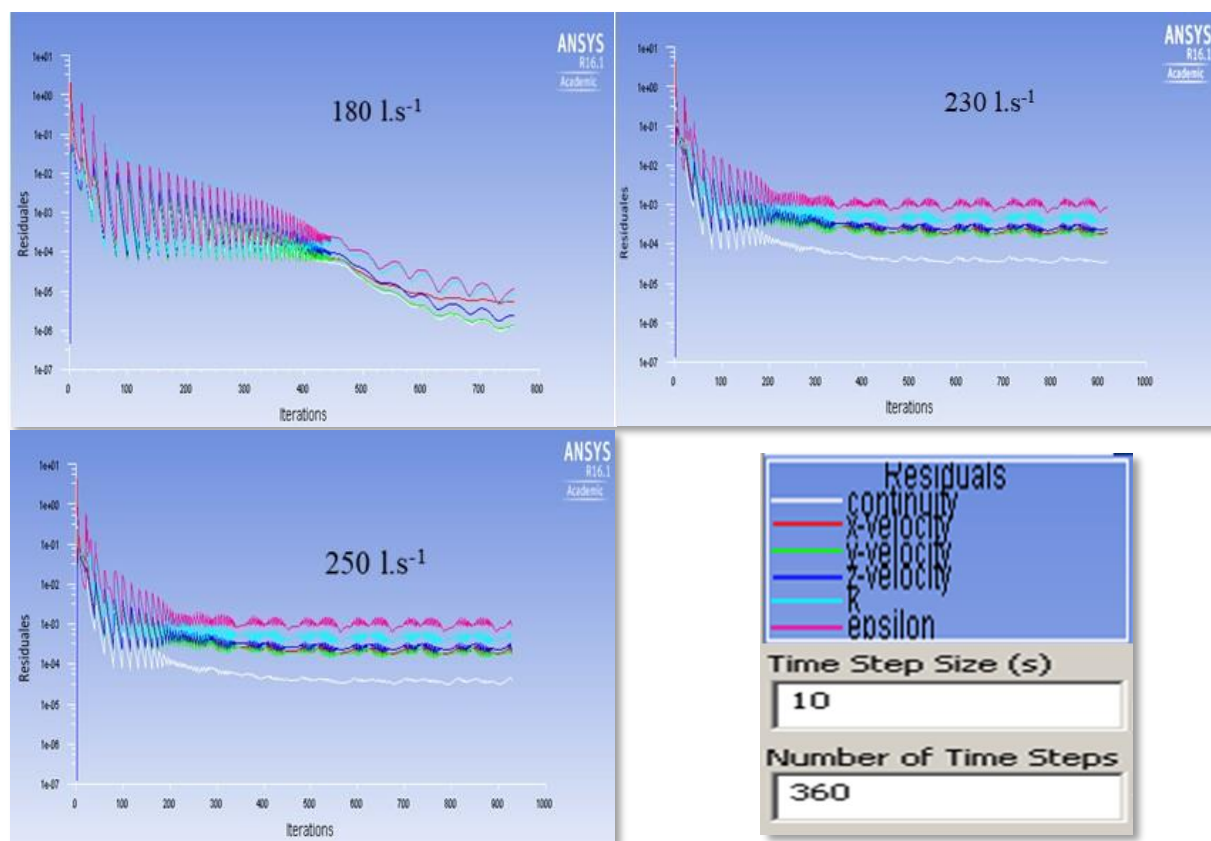


Figura 19. Comportamiento los residuales para los tres caudales en un periodo de una hora
Para ver el comportamiento hidrodinámico del floculador señalado por el modelo, se considerarán las líneas de corrientes predominantes que corresponden a vistas isométricas, corte transversal y vista superior de zonas específicas en el floculador.

En la **Figura 20**, se muestran las líneas de corriente predominantes en el floculador. En general se aprecia un flujo helicoidal en cada cámara, producto de que las recamaras de dirección y los pasa muros se encuentran opuestos uno al otro; estas líneas de corrientes predominantes en las cámaras del floculador tienen velocidades inferiores a los 0.2 m. s^{-1} , fuera del rango recomendado para el agua en las cámaras de $0.2 - 0.6 \text{ m.s}^{-1}$ (RAS, 2010). Asimismo, son notables seis cortos circuitos y cuatro zonas muertas o de recirculación del fluido, estas condiciones de flujo están potencialmente asociadas al flujo directo entre las ventanas de limpieza, como

consecuencia hay dispersión de las velocidades del fluido en las cámaras del floculador, de este modo se afecta en considerablemente el comportamiento hidrodinámico dentro del floculador.

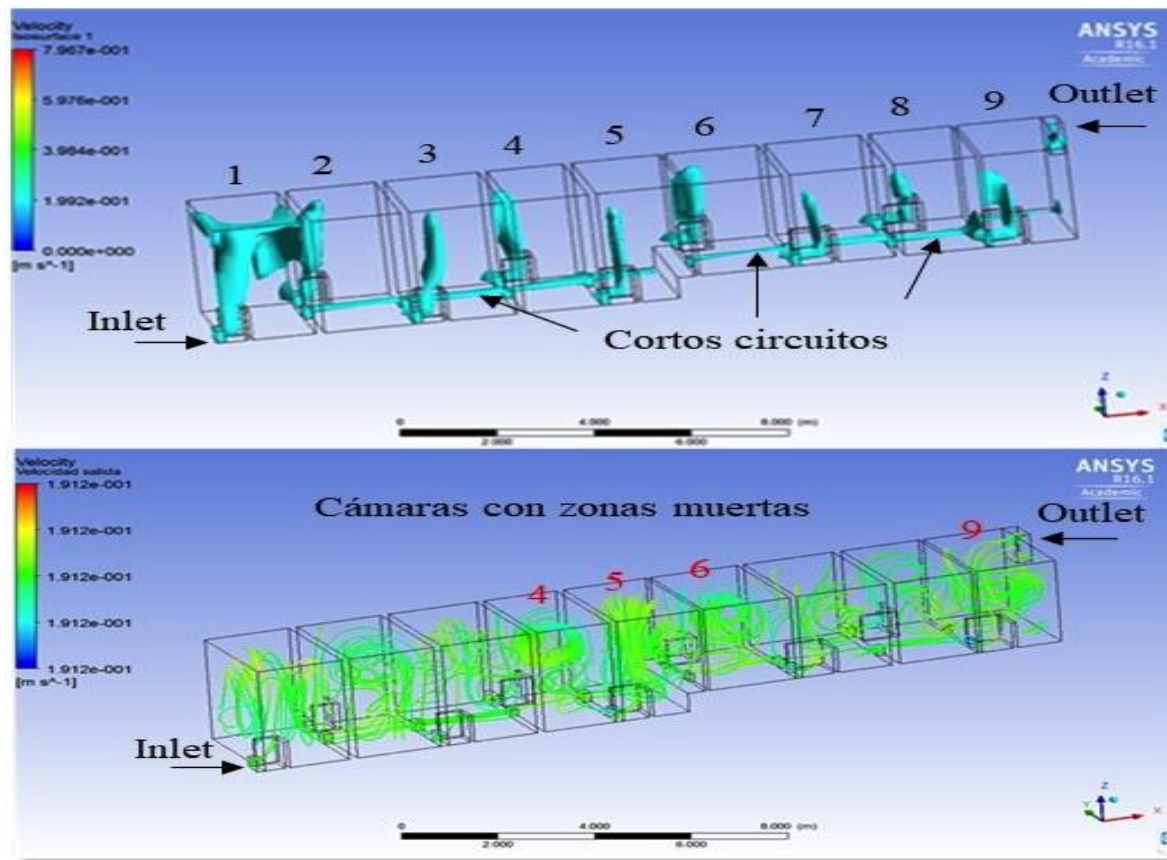


Figura 20. Líneas de corrientes predominantes en el floculador

La **Figura 21**, permite observar con más detalle las zonas de muertas y los cortos circuitos del floculador, en las cámaras cuatro y seis se presentan las mayores zonas muertas, también se observan seis cortos circuitos en las cámaras dos, tres, cuatro, seis, siete y ocho, en las cuales el flujo viaja de manera directa entre las ventanas de limpieza, produciéndose en el fondo de estas recamaras corrientes que distorsionan el flujo, impidiendo la circulación apropiada de las líneas de corriente, propiciando las zonas de muertas. Además, se genera un elevado nivel de mezcla en el fluido, reduciendo la eficiencia en el proceso.

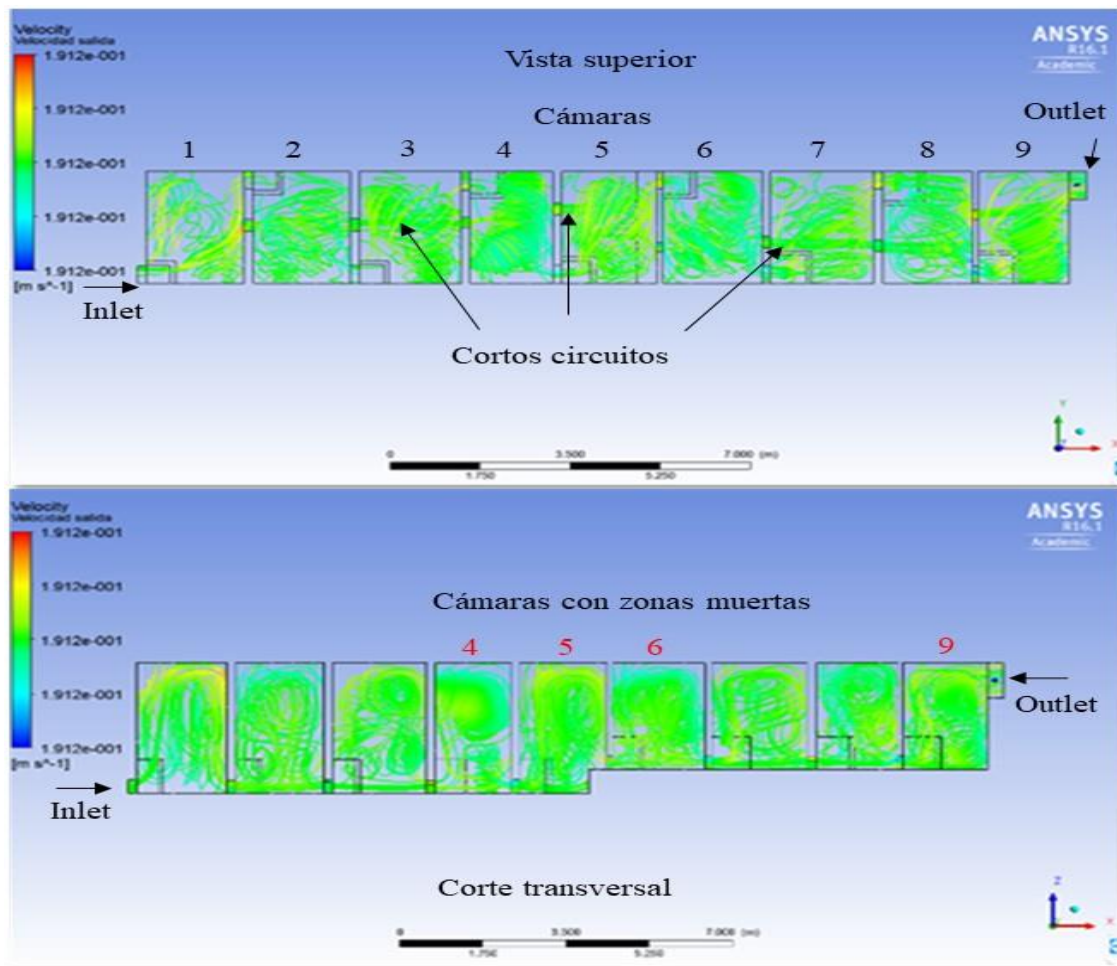


Figura 21. Vista superior y corte transversal del floculador para ver cortos circuitos y zonas de recirculación

Para validar lo observado en las líneas de corriente, se analizarán los vectores velocidad en las diferentes zonas del floculador. En la **Figura 22**, desde una vista superior, se aprecian como las velocidades en las ventanas de limpieza son mayores que las velocidades en los pasamuros. Estas diferencias generan un impacto en las líneas de corriente acrecentando la gestación de las zonas muertas y los cortos circuitos. La mayor velocidad se presenta en la ventana de limpieza tres, por lo tanto, esta situación hace que la mayor zona muerta se presenta en la cámara cuatro, esto se puede corroborar al observar la **Figura 22**. En las Tablas 10 y 11, se muestran las características y los valores de las velocidades en las ventanas de limpieza y en los pasamuros para los tres caudales unitarios 90, 115 y 125 l.s^{-1} , estos valores locales fueron tomados de la predicción del

modelo en puntos ubicados en el centro de cada elemento en cuestión, para su mejor apreciación los elementos se numeraron como se muestra en la **Figura 22**. Estos datos muestran velocidades superiores a 0.4 m.s^{-1} en todas las ventanas de limpieza y en todos los pasamuros para los caudales 115 y 125 l.s^{-1} , para el caudal de 90 l.s^{-1} se supera la velocidad de 0.4 m.s^{-1} en los pasamuros tres, cinco, siete y ocho, las velocidades mencionadas superan la recomendación del RAS, menores a 0.4 m.s^{-1} , estas velocidades provocan la ruptura del floc y reducen la eficiencia del proceso en las zonas mencionadas (Arboleda, 2000).

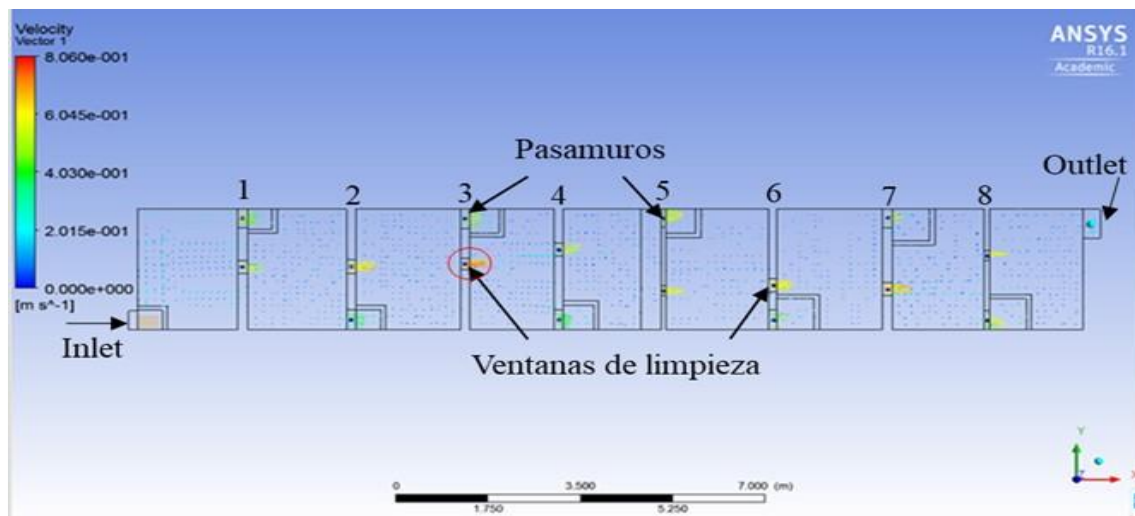


Figura 22. Vectores velocidad en las diferentes zonas del floculador

Tabla 10. Características y valores de las velocidades en las ventanas de limpieza

Ventana de limpieza	Área m^2	Coordenadas			Velocidad para cada caudal m.s^{-1}		
		x	y	z	180	230	250
1	0.1020	2.16	1.45	0.17	0.435*	0.557*	0.605*
2	0.0960	4.22	1.46	0.15	0.491*	0.628*	0.682*
3	0.0624	6.38	1.53	0.12	0.557*	0.7129*	0.775*
4	0.093	8.16	1.85	0.155	0.461*	0.5895*	0.641*
5	0.0696	10.15	0.91	0.795	0.479*	0.6126*	0.660*

6	0.0870	12.23	1.03	0.795	0.470*	0.6014*	0.654*
7	0.0750	14.4	0.94	0.775	0.516*	0.6607*	0.718*
8	0.0660	16.29	1.71	0.8	0.480*	0.613*	0.667*

* Valores por encima de lo recomendado por el RAS de 0.4 m. s^{-1}

Tabla 11. Características y valores de las velocidades en los pasamuros

Pasa muro	Área m^2	Coordenadas			Velocidad para cada caudal m.s^{-1}		
		x	y	z	180	230	250
1	0.162	2.16	2.58	0.17	0.339	0.432*	0.471*
2	0.1748	4.22	0.23	0.19	0.281	0.359	0.390
3	0.1598	6.38	2.57	0.17	0.405*	0.518*	0.563*
4	0.1748	8.16	0.23	0.19	0.322	0.412*	0.447*
5	0.1584	10.15	2.58	0.83	0.450*	0.575*	0.626*
6	0.1656	12.23	0.23	0.83	0.351	0.449*	0.488*
7	0.1485	14.4	2.58	0.815	0.412*	0.526*	0.572*
8	0.1672	16.29	0.22	0.84	0.425*	0.543*	0.591*
Salida	0.5796	18.25	2.45	3.05	0.141	0.181	0.197

* Valores por encima de lo recomendado por el RAS de 0.4 m. s^{-1}

En vista de que el flujo del agua a través de las ventanas de limpieza distorsiona las líneas de corriente deseadas y gestan las zonas muertas y los cortos circuitos, se simuló un nuevo escenario suprimiendo las ventanas de limpieza en la geometría del CFD, para ver de nuevo el comportamiento hidrodinámico del floculador. La **Figura 23**, permite observar que ahora hay más uniformidad en las líneas de corriente predominantes, que las zonas muertas y los cortos circuitos redujeron notablemente, se predican mejoras en la eficiencia del proceso. Por consiguiente, amerita hacerse un análisis más exhaustivo del CFD para este floculador en el que se examinen las modificaciones propuestas.

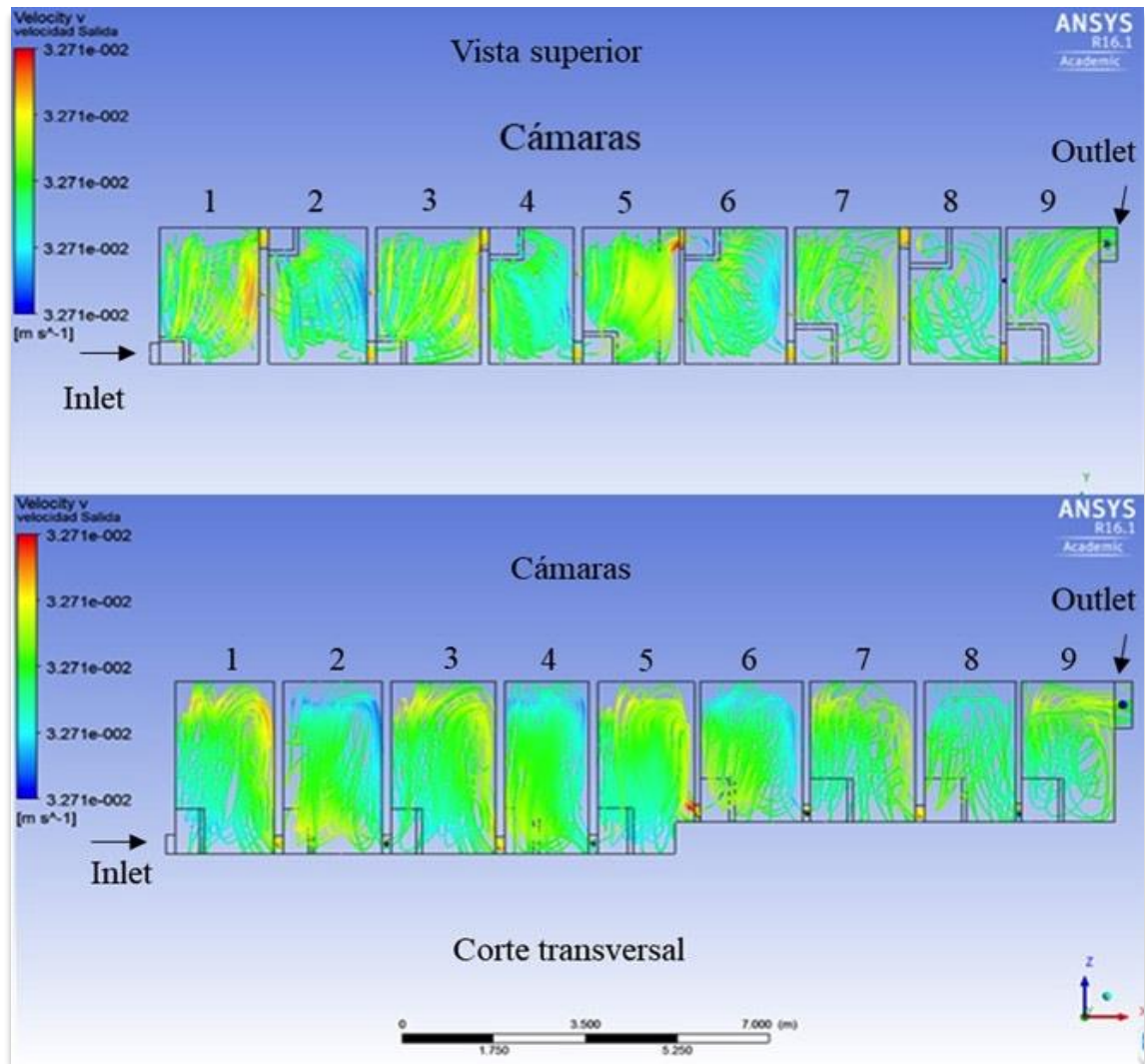


Figura 23. Vista superior y corte transversal del floculador para ver las líneas de corrientes predominantes obtenidas después de suprimir las ventanas de limpieza.

8. RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES

8.1. Recomendaciones

De los resultados de este estudio los cuales permiten un conocimiento detallado del comportamiento del floculador y de los factores que afectan su desempeño, se proponen algunas recomendaciones que pueden ser aplicadas en el corto, mediano y largo plazo, en el floculador dos de la PTAP EL Arroyo de Santander de Quilichao.

- Para disminuir los cortos circuitos y zonas muertas en el flujo de agua del floculador dos, se deben cerrar las ventanas de limpieza durante la operación. Esto también evitará que se altere el tiempo de retención de la unidad y rompimiento del flóculo.
- Al momento de operar el floculador dos, se deben evitar los cambios bruscos de caudal, ya que la unidad es muy vulnerable a estas variaciones y fácilmente se forman cortos circuitos, especialmente en la parte superior de las cámaras.
- Como las velocidades en los pasamuros superan las recomendadas en el RAS favoreciendo el rompimiento del floc, se recomienda instalar codos de dirección del flujo, que tengan en el extremo una platina de orificio que pueda ser cambiado a voluntad con el fin de modificar el gradiente (Arboleda, 2000).
- Se recomienda hacer un análisis CFD más exhaustivo en esta unidad en el cual se tengan en cuenta fenómenos como la formación y transporte de los flocs, la colisión entre partículas y el rompimiento de estos, con el objetivo de obtener una mayor y mejor aproximación al comportamiento real del floculador.
- A pesar que el floculador cumple con los rangos de gradientes de velocidad promedio y tiempo de mezcla lenta recomendados por el RAS, el modelo muestra que este análisis no

es suficiente para la evaluación de este tipo de unidades, por lo tanto, se recomienda usar la modelación CFD para una evaluación más exhaustiva y complementaria al RAS. Con esto se busca un análisis más profundo y realista de este tipo de unidades.

8.2. Conclusiones

- Al hacer las caracterizaciones hidrodinámicas de los floculadores es muy importante realizar las mediciones directamente en estas unidades, con el fin de tener información de primera mano que permita corroborar la información suministrada por las empresas y operadores, y que ayude a la elaboración de cálculos, estimaciones y decisiones más precisas.
- La elaboración del dominio computacional (geometría) y el mallado, son los primeros pasos en el proceso de modelación CFD, es importante tener en cuenta que son un tema de ingeniería y arte, que requiere de tiempo y cuidado para la obtención de un medio continuo y que los volúmenes de control que los conforman sean simples, de alta calidad y que describían el fenómeno a modelar. Por lo tanto, la precisión de los resultados dependerá en gran manera de estos pasos. Para ello fue importante, seccionar la geometría y elaborar el mallado con bastante consideración y cuidado, eligiendo el orden del mallado de la entrada hasta la salida y el uso del método multizone para forzar la creación de los volúmenes de control hexaédricos, los cuales, reducen el número de elementos y el tiempo computacional, obteniendo una alta calidad de la malla.
- Para representar el comportamiento hidrodinámico del fluido en el floculador se usó el modelo Viscous – Estándar K- ϵ de turbulencia, dando los mejores resultados en términos de convergencia de la solución. Mostrando, que los modelos CFD poseen el potencial

suficiente para representar la hidrodinámica del floculador y fenómenos más complejos como la formación y transporte de los flocs.

- En cuanto a los resultados de los ensayos de trazadores para los caudales de operación 180, 230 y 250 l.s⁻¹, se demostró que el floculador se comporta como un reactor no ideal, oscilando entre los flujos mezclado y pistón con tendencia al flujo pistón. También se demostró al detalle la existencia de cortos circuitos y de zonas muertas, por lo tanto, estas situaciones están afectando el desempeño del floculador.
- Los cálculos elaborados con las mediciones realizadas para los tres caudales unitarios 90, 115 y 125 l.s⁻¹ de la planta, muestran que las características hidráulicas para esta unidad de floculación están dentro de los rangos recomendados por el (RAS, 2010) en términos de tiempo de mezcla lenta y gradientes de velocidad promedio, sin embargo, el modelo mostró fallas hidráulicas que afectan el desempeño del floculador, por lo tanto, los análisis CFD deberían utilizarse como un análisis complementario a la evaluación propuesta por el RAS.
- Se pudo validar el modelo CFD con los resultados experimentales del ensayo de trazadores, mostrando la existencia de zonas muertas y cortos circuitos. Adicional a esto, el modelo permitió localizar al interior de la unidad las zonas donde ocurren estas fallas, sobre todo, las zonas donde se presentan los cortos circuitos que se generan entre las ventanas de limpieza. Se logró conocer los valores de las velocidades del fluido y sus cambios asociados a cada caudal. Estos datos revelaron que el fluido se mueve a velocidades mayores a 0.4 m.s⁻¹ entre las ventanas de limpieza y en los pasamuros, velocidades que potencialmente pueden ocasionar el rompimiento del floc. También se encontró que dentro de las cámaras hay velocidades menores a 0.2 m.s⁻¹ lo que favorece

la formación de zonas muertas dentro de estas. En consideración a este escenario se realizó una nueva simulación con las ventanas de limpieza cerradas, se observó la disminución de los cortos circuitos, una mayor velocidad y mejor uniformidad en las principales líneas de corriente del fluido.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ansys. (2013) Ansys fluent theory guide. Edited by Ansys. New York, USA.

Aponte, S. (2017) Modelación de Flujo en 3-D en Procesos de Mezcla Rápida en Plantas de Tratamiento Utilizando OpenFOAM. Escuela Colombiana de Ingenieria Julio Garavito. Bogotá, Colombia.

Arboleda, J. (2000) Teoría y práctica del agua. Editorial Mc Graw Hill. Bogotá. Colombia.

Cárdenas, Y. (2000) Tratamiento de agua coagulación y floculación. SEDAPAL, Evaluación de Plantas y Desarrollo Tecnológico, pp. 30-43.

Carreño, E. y Castiblanco, C. (2016) Optimización del floculador tipo alabama en la planta de tratamiento de Acuanamay con incorporación de mallas en cada una de sus camaras. tesis de Maestría, Universidad Católica de Colombia. Bogota, Colombia.

CEPIS. (2005) Evaluación de plantas de tecnología apropiada. OPS/CEPIS. Manual III: Capitulo 3. pp. 91-131. Lima, Perú.

Enríquez, L. (2018) Nueva configuración de un clarificador primario para el tratamiento del agua residual doméstica. Tesis de Doctorado, Universidad del Valle. Cali, Colombia.

Grayman, M. W. *et al.* (1999) Water Quality Modeling for Distributions System Storage Facilities. AWWA Research Foundation and American Water Works Association, United States.

Hurtado, G. (2016) Evaluación de los procesos de operación de la planta de tratamiento para potabilización de agua Villasantana ubicada en la ciudad de Pereira, Risaralda. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.

Idrovo, C. (2010) Optimización de la planta de tratamiento de Uchupucun, Cuenca. Tesis de

Maestría, Universidad de Cuenca. Cuenca, Ecuador.

Jakeman, J., Letcher, R. y Norton, J. (2005). Ten iterative steps in development and evaluation of environmental models. Ed. Elsevier. Oxford, United Kindom.

Jeremías, L. y Cosme, R. (2006). Evaluación hidrodinamica de unidades de tratamiento de agua, utilizando radiotrazadores. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.

Lidia de Vargas (2004) Tratamiento de agua para consumo humano en plantas de filtración rápida. OPS/CEPIS. Manual I: Teoría Tomo I. pp. 265-298. Lima, Perú.

López, A (2015) Tipos De Floculadores. Tesis de pregrado, Universidad Popular del Cesar. Valledupar, Cesar. Colombia.

Mañunga, A. (2017) Actualización del programa de uso eficiente y ahorro del agua para el municipio de Santander de Quilichao (Cauca). Universidad Autonoma de Occidente, Cali, Colombia.

Marín, L. y Zapata, A. (2018) Chequeo hidraulico del sistema de de potabilización “ PTAP El Arroyo ”. Analisis de vulnerabilidad e implementacion de alertas tempranas para sistemas de abastecimiento de agua en el departamento del Cauca. Cinara/Universidad del Valle. Cali, Colombia.

Aguirre, D. (2015) Evaluación del floculador en la planta de tratamiento de agua potable "La Esperanza" que abastece a los cantones machala, pasaje y el guabo, provincia de el oro. Tesis de Maestría, Universidad Técnica de Machala. Machala, México.

Martínez, G. y Betancourth, L. (2003) Evaluación de la planta de potabilización de agua empresas publicas de Armenia-Quindío. Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de Colombia.

Bogota, Colombia.

Montoya, C. (2012) Efecto del almacenamiento sobre la calidad del agua potable : evaluación experimental y simulación numérica del tanque Ciudad Jardín. Tesis de pregrado, Universidad del Valle. Cali, Colombia.

Petra, E. (2003) Estudio y rediseño de una planta potabilizadora de agua de filtración rápida (PFR). Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú

RAS. (2010). Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico. Dirección de agua potable y saneamiento básico – Ministerio de Desarrollo Económico. Bogotá, Colombia.

Versteeg, H. and Malalasekera, W. (2007) An Introduction to Parallel Computational Fluid Dynamics. The Finite Volume Method. Ed. Pearson Prentice Hall. London, United Kingdom.

Zapata, A. (2017) Modelo termodinámico para analizar procesos de biorremediación en un ecosistema acuático construido caso laguna facultativa para depuración de aguas residuales municipales. Tesis de doctorado, Universidad del Valle. Cali, Colombia.

10. ANEXO

10.1. Anexo. Ensayos de trazadores

Tabla 12. Ensayos de trazadores para los tres caudales unitarios

Tiempo (s)	90 l.s ⁻¹		115 l.s ⁻¹		125 l.s ⁻¹	
	Conductividad (μS)	E (t)	Conductividad (μS)	E (t)	Conductividad (μS)	E (t)
60	59,4	1,96E-04	6,45E+01	2,02E-04	6,80E+01	2,13E-04
120	59,4	1,96E-04	6,51E+01	2,04E-04	6,80E+01	2,13E-04
180	59,4	1,96E-04	6,56E+01	2,05E-04	6,80E+01	2,13E-04
240	59,5	1,96E-04	6,60E+01	2,06E-04	6,80E+01	2,13E-04
300	59,7	1,97E-04	6,64E+01	2,08E-04	6,81E+01	2,14E-04
360	60	1,98E-04	6,71E+01	2,10E-04	6,83E+01	2,14E-04
420	60,5	1,99E-04	6,79E+01	2,12E-04	6,83E+01	2,14E-04
480	61,2	2,02E-04	6,85E+01	2,14E-04	6,83E+01	2,14E-04
540	61,9	2,04E-04	6,93E+01	2,17E-04	6,95E+01	2,18E-04
600	63	2,08E-04	7,10E+01	2,22E-04	7,01E+01	2,20E-04
660	63,9	2,11E-04	7,24E+01	2,26E-04	7,11E+01	2,23E-04
720	65,9	2,17E-04	7,39E+01	2,31E-04	7,27E+01	2,28E-04
780	68,9	2,27E-04	7,57E+01	2,37E-04	7,38E+01	2,31E-04
840	68,9	2,27E-04	7,68E+01	2,40E-04	7,48E+01	2,35E-04
900	70,8	2,33E-04	7,79E+01	2,44E-04	7,61E+01	2,39E-04
960	72,5	2,39E-04	8,04E+01	2,51E-04	7,72E+01	2,42E-04
1020	74,7	2,46E-04	8,12E+01	2,54E-04	7,82E+01	2,45E-04
1080	76,5	2,52E-04	8,23E+01	2,57E-04	7,91E+01	2,48E-04
1140	77,4	2,55E-04	8,29E+01	2,59E-04	8,05E+01	2,52E-04
1200	79,2	2,61E-04	8,34E+01	2,61E-04	8,00E+01	2,51E-04
1260	80,4	2,65E-04	8,33E+01	2,60E-04	8,01E+01	2,51E-04
1320	81,4	2,68E-04	8,32E+01	2,60E-04	7,99E+01	2,51E-04
1380	82	2,70E-04	8,29E+01	2,59E-04	7,96E+01	2,50E-04
1440	82,6	2,72E-04	8,25E+01	2,58E-04	7,90E+01	2,48E-04
1500	82,2	2,71E-04	8,16E+01	2,55E-04	7,85E+01	2,46E-04
1560	82,4	2,71E-04	8,06E+01	2,52E-04	7,79E+01	2,44E-04
1620	82,3	2,71E-04	7,98E+01	2,50E-04	7,73E+01	2,42E-04
1680	82	2,70E-04	7,87E+01	2,46E-04	7,65E+01	2,40E-04
1740	81,5	2,69E-04	7,76E+01	2,43E-04	7,57E+01	2,37E-04
1800	80,4	2,65E-04	7,68E+01	2,40E-04	7,51E+01	2,36E-04
1860	79,6	2,62E-04	7,56E+01	2,36E-04	7,47E+01	2,34E-04
1920	78,5	2,59E-04	7,50E+01	2,35E-04	7,38E+01	2,31E-04
1980	77,2	2,54E-04	7,38E+01	2,31E-04	7,32E+01	2,30E-04
2040	76	2,50E-04	7,31E+01	2,29E-04	7,24E+01	2,27E-04

2100	75,1	2,47E-04	7,23E+01	2,26E-04	7,19E+01	2,25E-04
2160	74,9	2,47E-04	7,16E+01	2,24E-04	7,08E+01	2,22E-04
2220	73	2,41E-04	7,10E+01	2,22E-04	7,05E+01	2,21E-04
2280	71,8	2,37E-04	7,03E+01	2,20E-04	7,04E+01	2,21E-04
2340	70,6	2,33E-04	7,00E+01	2,19E-04	7,01E+01	2,20E-04
2400	69,5	2,29E-04	6,97E+01	2,18E-04	6,98E+01	2,19E-04
2460	68,9	2,27E-04	6,89E+01	2,15E-04	6,95E+01	2,18E-04
2520	66,7	2,20E-04	6,85E+01	2,14E-04	6,93E+01	2,17E-04
2580	66,9	2,20E-04	6,82E+01	2,13E-04	6,90E+01	2,16E-04
2640	66,2	2,18E-04	6,79E+01	2,12E-04	6,87E+01	2,15E-04
2700	65,6	2,16E-04	6,78E+01	2,12E-04	6,87E+01	2,15E-04
2760	64,7	2,13E-04	6,76E+01	2,11E-04	6,84E+01	2,15E-04
2820	64,3	2,12E-04	6,74E+01	2,11E-04	6,88E+01	2,16E-04
2880	63,7	2,10E-04	6,71E+01	2,10E-04	6,88E+01	2,16E-04
2940	63,7	2,10E-04	6,70E+01	2,09E-04	6,80E+01	2,12E-04
3000	63	2,08E-04	6,71E+01	2,10E-04	6,80E+01	2,11E-04
3060	62,3	2,05E-04	6,69E+01	2,09E-04	6,80E+01	2,11E-04
3120	62,2	2,05E-04	6,68E+01	2,09E-04	6,80E+01	2,11E-04
3180	62	2,04E-04	6,68E+01	2,09E-04	6,80E+01	2,11E-04
3240	61,3	2,02E-04	6,68E+01	2,09E-04	6,80E+01	2,11E-04
3300	61,2	2,02E-04	6,63E+01	2,07E-04	6,80E+01	2,11E-04
3360	60,8	2,00E-04	6,64E+01	2,08E-04	6,80E+01	2,11E-04
3420	60,8	2,00E-04	6,65E+01	2,08E-04	6,80E+01	2,11E-04
3480	60,8	2,00E-04	6,65E+01	2,08E-04	6,80E+01	2,11E-04
3540	60,8	2,00E-04	6,67E+01	2,09E-04	6,80E+01	2,11E-04
3600	60,8	2,00E-04	6,66E+01	2,08E-04	6,80E+01	2,11E-04
3720	60,6	2,00E-04	6,65E+01	2,08E-04	6,80E+01	2,11E-04
3840	60,6	2,00E-04	6,66E+01	2,08E-04	6,80E+01	2,11E-04
3960	60,4	1,99E-04	6,67E+01	2,09E-04	6,80E+01	2,11E-04
4080	60,2	1,98E-04	6,66E+01	2,08E-04	6,80E+01	2,11E-04
4200	60,2	1,98E-04	6,65E+01	2,08E-04	6,80E+01	2,11E-04
4320	60,2	1,98E-04	6,65E+01	2,08E-04	6,80E+01	2,11E-04
4440	60,2	1,98E-04	6,65E+01	2,08E-04	6,80E+01	2,11E-04
4560	60,2	1,98E-04	6,65E+01	2,08E-04	6,80E+01	2,11E-04