

***“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE FLUJO EN UN INYECTOR
VENTURI EN EL PROCESO DE COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN PARA EL
TRATAMIENTO DE AGUAS MEDIANTE CFD”***

LUIS ESTEBAN PEREA ANGULO

**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD DEL VALLE
SANTIAGO DE CALI**

2025

***“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE FLUJO EN UN INYECTOR
VENTURI EN EL PROCESO DE COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN PARA EL
TRATAMIENTO DE AGUAS MEDIANTE CFD .”***

LUIS ESTEBAN PEREA ANGULO

**PROYECTO PRESENTADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

DIRECTORA:

[ADRIANA KATERINE NIÑO VARGAS](#) Ing., M.Sc., Ph.D

**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD DEL VALLE
SANTIAGO DE CALI**

2025

ÍNDICE GENERAL

Índice de figuras

Índice de tablas

1.	RESUMEN	7
2.	INTRODUCCION	8
3.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
4.	ANTECEDENTES	11
4.1	Mezcladores utilizados en el tratamiento de aguas.	11
4.2	Simulación de inyectores Venturi mediante CFD:	12
5.	MARCO TEORICO	15
4.2	Modelo analítico del flujo en sistema Venturi	15
4.2.1	Ecuaciones de gobierno	15
4.2	Modelo de turbulencia k- ϵ estándar	18
4.3	Restricciones del fenómeno de flujo en el dispositivo Venturi.	19
6.	OBJETIVOS	22
5.1	Objetivo general	22
5.2	Objetivos específicos:	22
7.	METODOLOGIA	23
6.1	Etapla 1: Revisión bibliográfica y fundamentación teórica	24
6.2	Etapla 2: Evaluación del efecto de la velocidad de flujo y Dosificación en la eficiencia de mezcla	24
6.2.1	Dimensionamiento del dispositivo Venturi	24
6.2.2	Enmallado de la geometría y selección de malla:	26
6.2.3	Verificación de la convergencia de malla	28
6.2.3.1	Condiciones de frontera	28
6.2.3.2	Evaluación de la calidad de la malla	29
6.2.3.3	Evaluación de la convergencia de la malla	29
6.2.4	Simulación del modelo base	30
6.2.4.1	Selección de sistema de solución (solver) para modelo base.	30
6.2.4.2	Simulaciones iniciales (régimen laminar)	30
6.2.4.3	Simulaciones iniciales (régimen turbulento)	33
6.2.4.3.1	Condiciones de frontera para el campo k	33
6.2.4.3.2	Condiciones de frontera para el campo ϵ	34
6.2.4.3.3	Activación del modelo de turbulencia en OpenFoam	35

6.3 Etapa 3: Caracterización de las variables de diseño y de respuesta	35
6.3.1 Índice de mezcla (Variable de respuesta)	35
6.3.1.1 Determinación del Índice de mezcla (IM):	35
6.3.1.2 Muestreo en la malla computacional:	36
6.3.2 Variables de Diseño	36
6.3.2.1 Dosificación [DF]:	37
6.3.2.2 Velocidad de flujo del coagulante [VC]:	37
6.3.3 Diseño experimental	37
8. RESULTADOS	38
7.1 Verificación de la convergencia de malla	38
7.2 Validación de modelo	39
7.3 Análisis de sensibilidad	41
7.3.1 Análisis de la Fracción volumétrica (α) a lo largo de corte en el eje x	41
7.3.2 Análisis del índice de mezcla (IM) a lo largo de corte en el eje X.	48
9. CONCLUSIONES	50
10. REFERENCIAS	51
ANEXOS	54
Análisis del Índice de mezcla lo largo de la geometría	54

Índice de figuras

Figura 1. Esquema de la metodología del proyecto.....	23
Figura 2. Dimensiones del Tubo Venturi seleccionadas para el modelo.....	25
Figura 3. Bloque de la tobera	26
Figura 4. Bloques de la región central	27
Figura 5. Bloque del difusor.....	27
Figura 6. Malla 1 del modelo base	28
Figura 7. Mapeo de los cortes en el sistema.....	36
Figura 8. Perfil de Presiones del modelo base del proyecto.....	40
Figura 9. Fracción volumétrica (α) vs Posición en el eje y para la velocidad 1.5 m/s en el corte 2.....	41
Figura 10. Fracción volumétrica (α) vs Posición en el eje Y para la velocidad 2 m/s en el corte 2.	42
Figura 11. Fracción volumétrica (α) vs Posición en el eje Y para la velocidad 3 m/s en el corte 2.	43
Figura 12. Fracción volumétrica (α) vs Posición en el eje Y para la velocidad 1.5 m/s en el corte 3.	44
Figura 13. Fracción volumétrica (α) vs Posición en el eje Y para la velocidad 2 m/s en el corte 3.	44
Figura 14. Fracción volumétrica (α) vs Posición en el eje Y para la velocidad 3 m/s en el corte 3.	45
Figura 15. Fracción volumétrica (α) vs Posición en el eje Y para la velocidad 1.5 m/s en el corte 4.	46
Figura 16. Fracción volumétrica (α) vs Posición en el eje Y para la velocidad 2 m/s en el corte 4.	46
Figura 17. Fracción volumétrica (α) vs Posición en el eje Y para la velocidad 3 m/s en el corte 4.	47
Figura 18. Índice de mezcla (IM) vs Posición en el eje X para la velocidad 1.5 m/s en cada uno de los cortes variando la dosificación.	48
Figura 19. A) Índice de mezcla (IM) vs Posición en el eje x para la velocidad 2 m/s en cada uno de los cortes variando la dosificación. B) Índice de mezcla (IM) vs Posición en el eje x para la velocidad 3 m/s en cada uno de los cortes variando la dosificación.....	49

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Antecedentes del proyecto.....</i>	<i>13</i>
<i>Tabla 2. Restricciones del fenómeno de flujo del Modelo. (Perea L,2025).....</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 3. Dimensiones del dispositivo Venturi del modelo.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 4. Condiciones de frontera archivo de malla.</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 5. Condiciones de frontera caso base Laminar.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 6. Condiciones de frontera de la simulación en régimen turbulento</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 7. Rango de valores seleccionado para cada variable</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 8. Propuesta de consolidado de resultados del diseño experimental</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 9. Caracterización de mallas para estudio de convergencia</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 10. Validación del Modelo base vs Modelo de Manzano.</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 11. Consolidado de resultados del índice de Mezcla del análisis de sensibilidad.</i>	<i>54</i>

1. RESUMEN

El presente proyecto tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de mezcla inducida por un inyector tipo Venturi en el proceso de coagulación y floculación para el tratamiento de aguas, mediante simulaciones numéricas basadas en Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). A diferencia de otros estudios centrados en la geometría, la investigación se enfocó en analizar el efecto de las condiciones operativas específicamente la velocidad de entrada y la dosificación del coagulante sobre la calidad de la mezcla, con el propósito de optimizar la dispersión de partículas y mejorar la eficiencia global del proceso.

Inicialmente se desarrolló un modelo analítico sustentado en los principios de conservación de masa y cantidad de movimiento, a partir del cual se definió una geometría base del inyector y se establecieron las condiciones de contorno para la simulación. Posteriormente, se construyó el dominio computacional mediante la herramienta BlockMesh y se implementó el modelo numérico empleando el solucionador twoLiquidMixingFoam de OpenFOAM, el cual permitió describir el comportamiento monofásico, bi-componente de la mezcla agua-coagulante bajo diferentes escenarios de operación.

El modelo fue validado mediante la comparación de los campos de presión con datos de un caso de referencia, alcanzando un error porcentual inferior al 6 %, lo que demuestra su capacidad predictiva y confiabilidad. A través del análisis de sensibilidad, se identificó que la condición de mayor eficiencia de mezcla, evaluada por el Índice de Mezcla (IM), se presentó a una velocidad de 2 m/s y una dosificación tipo B (relación 0,5). Estos resultados respaldan la viabilidad técnica del inyector Venturi como alternativa hidráulica eficaz para la mezcla rápida, al eliminar la necesidad de energía externa y reducir los costos operativos. Se recomienda incluir en trabajos futuros la evaluación tridimensional del flujo, la inclusión de las posibles reacciones químicas y la influencia de la temperatura para mejorar la precisión del análisis del fenómeno,

Palabras clave: Eficiencia de mezcla, Mecánica de fluidos, Dispositivos Venturi, Tratamiento de aguas, Dinámica computacional de fluidos.

2. INTRODUCCION

Los mezcladores tipo Venturi, al igual que otros mezcladores hidráulicos, son instrumentos ampliamente utilizados en sistemas de riego y para el tratamiento de aguas residuales, potabilizadoras y en la producción, especialmente en las etapas de coagulación y floculación. En estos procesos, se requieren altos gradientes de velocidad para garantizar una adecuada dispersión de los coagulantes, lo que favorece las reacciones del proceso. Esta condición permite incrementar la eficiencia del proceso, debido a que promueve una mayor interacción entre las partículas suspendidas y minimiza la presencia de zonas de baja dispersión.

El principio de funcionamiento de los dispositivos tipo Venturi se basa en el teorema de Bernoulli, el cual establece que, un fluido en movimiento, al disminuir la sección transversal de un conducto o tubería por el que se transporta, se genera un aumento en la velocidad del fluido y una disminución simultánea en su presión; característica que permite iniciar y mantener el proceso de mezcla sin necesidad de suministrar energía externa adicional ni incorporar piezas móviles al sistema. En consecuencia, los costos asociados tanto a la inversión inicial como a la operación del sistema tienden a disminuir en comparación con los mezcladores mecánicos (Howe et al., 2012).

En este contexto, las partículas orgánicas e inorgánicas presentes en el agua, en especial las macropartículas, pueden removerse mediante el proceso de floculación. Específicamente, en la macro floculación, en el cual la acumulación de partículas se ve favorecida por la inducción de gradientes de velocidad y la generación eficiente de mezcla (Howe et al., 2012).

Un parámetro clave para evaluar el desempeño de los mezcladores Venturi es la eficiencia de mezcla (IM). Esta variable de respuesta permite identificar de qué forma se distribuyen e interactúan los diferentes componentes dentro del sistema, determinando cuáles y cuántos de ellos participan activamente en el proceso. Diversas investigaciones han propuesto algunos enfoques para estimar analíticamente dicha eficiencia, uno de ellos en particular, el trabajo de (Manzano, 2014), se destaca por elaborar un diseño experimental en el cual se consideran dos variables como el diámetro de la sección transversal del dispositivo y la velocidad de entrada o de alimentación de los fluidos, características que se encuentran directamente relacionadas con la geometría del sistema.

El análisis del comportamiento del flujo en dispositivos Venturi puede abordarse mediante diferentes métodos, siendo el estudio experimental enfocado en las variaciones de caudal una de las técnicas tradicionales más utilizadas para validar modelos tanto analíticos como numéricos. Para el último caso, correspondiente a los modelos numéricos, la simulación de flujos mediante técnicas de fluidodinámica computacional (CFD) ha demostrado ser una alternativa efectiva para evaluar el rendimiento y la utilidad del dispositivo (Masgo, S. L. B., 2020). En el marco de estudios sobre modelos numéricos, el uso de CFD permite analizar y evaluar cómo la geometría del Venturi influye en las condiciones de mezcla y si estas son los

suficientemente eficaces para lograr elevadas tasas de remoción de contaminantes (Howe et al., 2012).

Teniendo en cuenta lo anterior, el presente trabajo tiene como propósito principal evaluar la eficiencia de mezcla inducida por un inyector Venturi como variable de respuesta, empleando para ello simulaciones numéricas mediante el uso de CFD. El análisis se enfocó en determinar si la variación de la configuración geométrica del dispositivo influye en el comportamiento de flujo y en la calidad de la mezcla, parámetros importantes para optimizar la etapa de floculación en sistemas de tratamiento de aguas.

Para llevar a cabo este análisis, se desarrolló inicialmente un modelo analítico que describía el comportamiento del flujo a través del dispositivo Venturi, a partir de principios fundamentales y simplificaciones basadas en la mecánica de fluidos. Para el modelo se incluyeron las ecuaciones de conservación de masa y de cantidad de movimientos, así como algunas consideraciones geométricas específicas del sistema. Posteriormente y con base en este análisis, se definió una geometría base del inyector y se construirá el dominio computacional correspondiente, basado en la generación de una malla mediante la función BlockMesh del software de OpenFoam.

Finalmente, se implementó un modelo numérico que permite resolver el sistema de ecuaciones gobernantes mediante el uso de un solucionador de OpenFoam que mejor se ajuste a las consideraciones establecidas en el modelo, seleccionando condiciones de frontera específicas y parámetros físicos asociados al comportamiento real de los fluidos. Asimismo, se planteó un diseño experimental en el cual se considerarán parámetros clave (variables de diseño) como la dosificación y la velocidad de entrada, con el fin de realizar un análisis de sensibilidad que permita identificar algunas condiciones de operación que maximicen la eficiencia de la mezcla, y, por ende, mejoren el proceso de floculación en sistemas de tratamiento de aguas.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los últimos años, Colombia ha logrado ampliar significativamente la cobertura a un servicio esencial para la vida como lo es el acceso al agua potable, incluso en regiones apartadas del país donde anteriormente no se cumplían los estándares de calidad establecidos por la normativa vigente (Guaqueta, 2011). No obstante, a pesar de los grandes esfuerzos y los importantes logros que se han alcanzado hasta el momento, persisten desafíos importantes en cuanto a la eficiencia operativa de muchas plantas de tratamiento, especialmente en zonas rurales y en donde es difícil el acceso debido a la coyuntura social del país. Como lo expresan los datos del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, presentados en el Congreso de ANDESCO en junio de 2024, estiman que 13,8 millones de personas viven “sin acceso a agua potable”. Frente a esta problemática, es indispensable que el gobierno, la academia y la industria desarrollen estrategias que no solo garanticen la disponibilidad y la calidad del recurso hídrico, sino que también reduzcan los costos operacionales y optimicen los niveles de remoción de sustancias contaminantes presentes en el agua. Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA). (2024)

En el contexto del tratamiento de aguas, el proceso de coagulación-floculación desempeña un papel fundamental, debido a que este permite agrupar las partículas suspendidas que no pueden eliminarse de forma natural en el agua cruda, generando flóculos de mayor tamaño que pueden ser separados mediante métodos físicos posteriores (Benjumea – Hoyos et al., 2021). Para que este proceso de separación sea efectivo, es fundamental una adecuada mezcla que facilite la interacción entre las macropartículas. No obstante, cuando se presentan fenómenos de turbulencia dentro del flujo, las condiciones de operación suelen variar no solo en el tiempo, sino también en el espacio, lo que añade un grado de dificultad a su predicción mediante métodos tradicionales de cálculo basados únicamente en ecuaciones de diseño, por lo que resulta importante replantear el uso de métodos numéricos para su solución (Howe et al., 2012).

En esencia, esta investigación parte de la necesidad de mejorar la eficiencia de los procesos de mezcla, especialmente en contextos donde los recursos son limitados y se requieren soluciones accesibles y rápidas. En este orden de ideas, la investigación presenta un enfoque ligado al estudio de tecnologías hidráulicas de bajo costo, siendo los mezcladores tipo Venturi una alternativa prometedora y rentable para el tratamiento de aguas a gran escala. Diferentes estudios han centrado su atención en estos dispositivos, analizando su desempeño mediante simulaciones computacionales en las que se evalúan cómo factores como la geometría influyen directamente en la calidad de mezcla generada; presentándose la posibilidad de diseñar sistemas más eficientes, sostenibles y adaptables a las actuales condiciones operativas.

En comparación con este tipo de estudios centrados en la geometría, la presente investigación se considera la modificación de condiciones operativas en la entrada del coagulante como la velocidad de flujo y dosificación para analizar su efecto en la variación de la eficiencia de mezcla en el dispositivo Venturi.

4. ANTECEDENTES

4.1 Mezcladores utilizados en el tratamiento de aguas.

A lo largo de la historia, el proceso de coagulación – floculación ha requerido el uso de diferentes equipos de mezcla para facilitar la incorporación de partículas suspendidas y mejorar la eficiencia de remoción. En este contexto, se han desarrollado distintos tipos de sistemas de mezcla, principalmente clasificados como mecánicos e hidráulicos.

Los sistemas de mezcla mecánica operan mediante dispositivos rotativos dentro de los cuales se incluyen las hélices, paletas o propelas, cuya función es inducir agitación a través de la transferencia directa de energía al fluido. Dentro de este grupo, se destacan los denominados retro mezcladores, los cuales son ampliamente reconocidos por su eficiencia. Según menciona Moncada et al., en el 2016, la potencia suministrada a las propelas constituye un parámetro determinante en el desempeño del proceso de mezcla, debido a que se condiciona la eficiencia energética del sistema. Asimismo en el 2004, De Vargas, en su investigación destaca que este tipo de equipos, especialmente los mezcladores mecánicos “en línea”, suelen ser utilizados en sistemas de mezcla rápida, debido a la agitación casi instantánea que generan.

En contraste, los sistemas hidráulicos prescinden de elementos mecánicos móviles y aprovechan las variaciones geométricas del sistema y la energía del propio fluido específicamente obtenida por el trabajo ejercido para inducir el fenómeno de mezcla. Al interior de esta categoría, se destacan los mezcladores estáticos como los evaluados por Diaz, en el 2016, quien analizó la eficiencia de mezcla a partir de la capacidad de producir una mezcla homogénea con el menor espacio posible y la menor pérdida de presión asociada. En su estudio, se identificó que algunos parámetros geométricos (variables de diseño) como el ángulo de torsión influyen significativamente en el rendimiento del dispositivo.

Adicionalmente, otros sistemas hidráulicos como los mezcladores “en línea”, descritos también por De Vargas, en el 2004, son eficaces para flujos pequeños y aplicaciones de mezclas instantáneas. Adicionalmente, se mencionan los resaltos hidráulicos, los cuales generan condiciones favorables para las mezclas mediante cambios abruptos en la sección transversal del conducto, aprovechando la energía disponible del flujo.

Un caso particular de la aplicación de dispositivos hidráulicos corresponde a los inyectores tipo Venturi. Para el año 2011, López – Grimmer et al, emplearon este tipo de dispositivos para la incorporación de un flujo de cloro gaseoso en sistemas de tratamiento de agua los cuales ya habían pasado previamente por procesos de floculación y sedimentación. Cabe resaltar que, en dicho estudio, el Venturi funcionó como mezclador hidráulico el cual, mediante la generación de una zona de vacío en la garganta del dispositivo, permitió la inyección eficiente del gas al flujo del líquido.

4.2 Simulación de inyectores Venturi mediante CFD:

Los inyectores Venturi han permitido satisfacer la necesidad de realizar cambios del régimen de flujo para diferentes necesidades, y todo esto es analizado mediante estudios de Fluido Dinámica computacional como se presentan en las siguientes investigaciones.

En el 2009, Huang et al analizaron a través de CFD la relación que hay entre los parámetros estructurales como la configuración geométrica dada por los diámetros de la entrada, salida y sección de contracción-expansión. Las diferentes configuraciones demostraron que al fijar la presión de entrada del fluido y la posición de la entrada del punto de estrangulación, se evidencia que la capacidad para succión es función únicamente del diámetro de contracción-expansión.

En el 2016, Niño presenta un estudio del fenómeno de cavitación del tubo Venturi comparando datos experimentales con un análisis numérico computacional; y evaluando diferentes modelos de turbulencia y de cavitación. El autor concluyó que la selección del modelo de turbulencia no es significativa, mientras que la selección de los modelos de cavitación genera un impacto en los resultados numéricos cuando se comparan con los datos experimentales.

En el 2021, Robles enfoca su investigación en el efecto que tiene el caudal de agua, a través del dispositivo Venturi, sobre la tasa de transferencia del oxígeno en un proceso de aireación. Los resultados evidenciaron una relación lineal entre el coeficiente de transferencia y el caudal. Al igual que en las investigaciones anteriores, se establece que, al especificar un caudal adecuado para modelar el fenómeno en el dispositivo, existe una manera para obtener su tasa de transferencia por medio de la relación lineal que presentan.

En el 2014, Manzano et al usaron Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para el diseño y análisis del funcionamiento de cuatro inyectores Venturi en fase de prototipo, y validaron los resultados a través de pruebas de laboratorio; además observaron el efecto de implementar la inyección de flujo como método para difusión de químicos. En conclusión, los prototipos propuestos lograron obtener flujos en el comportamiento aceptable para el proceso de fumigación (riego de agroquímicos).

De otro lado, en el 2018, Ttito simuló el comportamiento de flujo en un dispositivo Venturi, usando CFD para estudiar la dosificación de aditivos alimentarios a cosechas y analizando variables como: largo y ancho de garganta, diámetro de entrada y salida y diámetro del capilar; teniendo como variable de respuesta el rendimiento de succión. Los autores encontraron que la implementación del CFD permite una predicción del fenómeno con un nivel de significancia aceptable, por lo que puede ser aplicado para la optimización del dispositivo.

Finalmente, en 2018, Gracia implementó CFD usando OpenFoam, para trabajar un sistema de tubo Venturi basado en un dispositivo real. En esta investigación cambió la geometría,

con la intención de encontrar presiones y velocidades específicas a través de simulaciones de 6 diferentes modelos. Como conclusión, determinó que las simulaciones usando CFD son útiles en la modelación del sistema y la selección de la geometría óptima, lo cual permite escalar el análisis de dispositivos a nivel industrial.

Luego de revisar algunas de las investigaciones existentes, como punto de referencia relevante en el campo de la simulación de dispositivos Venturi se puede señalar que se han alcanzado avances significativos en esta línea de investigación, dando un impulso para continuar trabajando en ella.

Para tener una mayor claridad la tabla 1 presenta un resumen conciso de los antecedentes mencionados.

Tabla 1. *Antecedentes del proyecto.*

Nombre de autor	Fecha	Nombre del artículo / estudio	Modelo de turbulencia utilizado	Hallazgo principal
De Vargas	2004	Cepis - Plantas de Filtración Rápida	No aplica	Mezcladores mecánicos 'en línea' son eficaces para mezcla rápida debido a la agitación casi instantánea.
Huang et al.	2009	CFD simulation to the flow field of venturi injector	k - epsilon	La succión depende únicamente del diámetro de contracción-expansión. Al haber fijado la presión de entrada y la posición de la entrada de succión.
López–Grimmau et al.	2011	Estudio de un sistema de potabilización de aguas superficiales con productos naturales en burkina faso	No aplica	El Venturi funcionó como mezclador hidráulico eficiente entre un gas entrante a una solución líquida, en este caso agua.
Manzano et al.	2014	Design and prediction performance of venturi injectors in drip irrigation	k-e (RNG) y RSM	Validaron simulaciones de CFD con pruebas de laboratorio; encontrando aceptable la efectividad de los Venturi realizando la inyección de flujo para la difusión de químicos.
Moncada et al.	2016	Simulación y validación experimental del proceso de mezcla de fluidos newtonianos y no newtonianos	k-omega	La potencia suministrada en las propelas condiciona la eficiencia energética de un sistema de mezcla.

Díaz	2016	Modelamiento fluido dinámico de un mezclador estático kenics estudio de influencia del ángulo de torsión helicoidal en calidad de mezcla	No aplica	La eficiencia de mezcla como capacidad de generar mezcla homogénea en el menor espacio. Las variables geométricas como el ángulo de torsión influyen en el rendimiento del Venturi.
Niño	2016	Estudio del fenómeno de cavitación en un tubo de Venturi por medio de dinámica de fluidos computacional	k-omega SST y RSM	La selección del modelo de turbulencia tiene un valor menos significativo en comparación a la selección del modelo de cavitación. Debido al efecto de los modelos en los resultados numéricos
Ttito	2018	Diseño, simulación y evaluación de deprimógenos tipo Venturi, aplicado a la inyección de aditivos alimentarios	k-e (RNG) y RSM	CFD predice el fenómeno de succión en el Venturi, analizando variaciones geométricas, con una precisión aceptable y útil para optimización de dispositivo.
Gracia	2018	Análisis pérdidas de carga en tubos Venturi mediante técnicas CFD	K-e (RNG)	CFD permite a través de la modelación numérica, determinar la geometría óptima, además escalar tanto el análisis como el modelo a un nivel industrial.
Robles	2021	Evaluación del efecto del caudal de agua en la tasa de transferencia de oxígeno de aereadores Venturi	No aplica	Muestra la relación lineal entre caudal y coeficiente de transferencia de oxígeno.

5. MARCO TEORICO

4.2 Modelo analítico del flujo en sistema Venturi

4.2.1 Ecuaciones de gobierno

Con el fin de analizar el comportamiento de flujo en un sistema tipo Venturi, particularmente enfocado en el fenómeno de mezcla entre diferentes componentes, es fundamental partir de las ecuaciones de gobierno que describen el sistema. Estas ecuaciones se expresan como función de las propiedades individuales de cada especie presente, permitiendo definir nuevas variables de estado que sirvan de base para establecer los balances de masa y de cantidad de movimiento para la mezcla final (Ghaemi et al., 2021).

En primera instancia, se define como variable de estado el momentum total m de la mezcla, el cual corresponde a la sumatoria de los momentos individuales de cada componente.

$$m \equiv m_a + m_b \quad (1)$$

Donde a y b son los componentes de la mezcla, agua y coagulante respectivamente, lo que significa que este sistema se describe como monofásico ambos en fase líquida y bicomponente.

$$\Delta m = \rho_{red} \Delta v = \frac{\rho_b}{\rho} m_a - \frac{\rho_a}{\rho} m_b \quad (2)$$

Adicionalmente, se considera el diferencial de momentum entre los componentes, el cual involucra dos propiedades esenciales: la densidad de masa reducida de la mezcla (ρ_{red}) y el diferencial de velocidad (Δv). Ambas variables se pueden expresar en función de las propiedades individuales de las especies, es decir, Δv se relaciona directamente con las velocidades de cada componente del sistema (v_a , v_b), mientras que ρ_{red} depende de las densidades de los mismos (ρ_a , ρ_b). Estas formulaciones permiten describir con mayor precisión el comportamiento dinámico del sistema que se encuentra bajo estudio (Ghaemi et al, 2021). Obteniéndose las siguientes ecuaciones:

$$\rho_{red} = \frac{\rho_b \rho_a}{\rho} \quad (3)$$

$$\Delta v = v_a - v_b \quad (4)$$

En este contexto, también se debe tener en cuenta el gradiente de velocidades, ya que permite caracterizar la distribución del flujo en las zonas de mezcla. definiéndose en la siguiente expresión:

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (5)$$

A partir de allí, se pueden definir las ecuaciones de transporte, siendo la ecuación de continuidad una importante para cada componente puro. Estas ecuaciones se pueden expresar de la siguiente forma:

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} = \nabla \cdot (v_a \rho_a) \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho_b}{\partial t} = \nabla \cdot (v_b \rho_b) \quad (7)$$

Donde ρ corresponde a la densidad de cada componente puro, y describe la variación de dicha densidad con respecto al tiempo, en función de la divergencia del producto entre la velocidad del flujo (v) y la densidad parcial del componente. Ahora se puede definir la velocidad parcial de cada componente de la siguiente manera:

$$v_a = v + \frac{\rho_b}{\rho} \Delta v \quad (8)$$

$$v_b = v + \frac{\rho_a}{\rho} \Delta v \quad (9)$$

La formulación anterior permite analizar cómo cambia la densidad en funciones de las condiciones dinámicas del sistema. Asimismo, es posible definir la velocidad parcial de cada componente, analizando el comportamiento en el plano bidimensional x-y, por lo que la velocidad se descompone en dos ecuaciones independientes asociadas a cada dirección espacial.

Posteriormente, se plantea el balance de momentum para el sistema, que no solo considera las velocidades de flujo y la densidad, sino que también incorpora otros términos como el tensor de esfuerzos viscosos (τ) y el gradiente de presión (∇p). Este balance se expresa de la siguiente manera (Zhao et al, 2019):

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v v) - \nabla \cdot \tau = -\nabla p \quad (10)$$

Una vez planteadas las ecuaciones de momentum, es necesario descomponer los esfuerzos viscosos en función de la viscosidad cinemática (ν) de cada uno de los componentes que conforman la mezcla. Para ello, se toma en consideración las velocidades de flujo individuales (v_i) de cada especie, ya que estas influyen directamente en los esfuerzos internos generados dentro del fluido. Asimismo, se incorpora en el modelo el término de Temperatura (T), el cual con el fin de considerar las variaciones térmicas que puedan afectar la dinámica del flujo. Estos elementos se integran del balance de momentum, y como se presenta en la ecuación 11:

$$\tau_i = \rho_i \nu_i [\nabla v_i + (\nabla v_i)^T] \quad (11)$$

Finalmente, se plantea una ecuación de transporte basada en la fracción volumétrica (α_i) de cada especie dentro de la mezcla, siendo (i) el respectivo componente. Esta ecuación también incorpora el término de velocidad de difusión ($\mathbf{V}$), el cual hace referencia al movimiento de las especies químicas debido a los gradientes de concentración. Otro término importante es w_i , correspondiente a la tasa de producción o consumo de la especie i debido a reacciones químicas. No obstante, en el contexto de la presente investigación, se asume $w_i=0$, dado que no se contempla la presencia de reacciones químicas entre los componentes.

$$\frac{\partial \rho \alpha_i}{\partial x} + \nabla \cdot (\rho \alpha_i \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \alpha_i \mathbf{V}_i) = w_i \quad (12)$$

De esta manera al considerar que no existe difusión secundaria, se puede aplicar la ecuación de Stefan-Maxwell para describir la difusividad dentro del sistema adaptada al caso bicomponente (Zhao et al, 2019):

$$\nabla X_a = \sum_{b=1}^N \frac{X_a X_b}{D_{ab}} (V_a - V_b) \quad (13)$$

Esta ecuación relaciona la fracción molar (X) de las especies con el coeficiente de difusión binaria (D_{ab}) entre los pares de los componentes a y b. El valor de D_{ab} es un parámetro característico que debe determinarse experimentalmente o mediante correlaciones apropiadas para representar de forma precisa el comportamiento difusivo de la mezcla.

$$V_i = \frac{-D_{i,mix}}{X_i} \nabla X_i \quad (14)$$

A partir de las expresiones anteriores y con base en la ley de Fick, se puede definir la velocidad de difusión total en términos de un coeficiente de difusión medio ($D_{i,mix}$), el cual representa una estimación global de la difusión de cada componente dentro de la mezcla. Este

coeficiente se obtiene a partir de los coeficientes de difusión binarios previamente definidos, utilizando una relación promedio ponderada que permite simplificar el modelo sin perder precisión en los resultados. A continuación, se expresa la ecuación correspondiente:

$$D_{i,mix} = \frac{1-\alpha_i}{\sum_{b \neq a}^N \frac{\alpha_i}{D_{ab}}} \quad (15)$$

4.2 Modelo de turbulencia k-ε estándar

Los modelos de turbulencia permiten representar con mayor precisión el comportamiento dinámico del fluido, especialmente en condiciones donde predominan regímenes turbulentos. Esto suele ser relevante en el estudio de este tipo de sistemas de mezcla, debido a que la presencia de flujos turbulentos permite una mayor homogenización del sistema, lo cual se traduce en una mezcla más uniforme de los componentes. En otras palabras, en presencia de turbulencia se incrementa la frecuencia de colisiones entre partículas, lo que genera un aumento significativo en la transferencia de cantidad de movimiento, calor y masa (Versteeg,2007).

El modelo de turbulencia k-ε estándar ha sido ampliamente utilizado en simulaciones de dinámica de fluidos debido a su balance entre precisión y eficiencia en gasto computacional. Este modelo es especialmente adecuado para analizar flujos turbulentos en geometrías complejas como la del dispositivo tipo Venturi, permitiendo predecir con buena aproximación los patrones de flujo en su interior (Huang,2009). El modelo se basa en la resolución de dos ecuaciones diferenciales acopladas. Una para la energía cinética turbulenta (**k**) y otra para la tasa de disipación de esa energía (**ε**). Asimismo, se incluyen términos asociados a la producción de energía turbulenta (**G_k**), la viscosidad turbulenta (**μ'**) y la densidad del fluido (**ρ**), junto con algunos parámetros empíricos definidos como constantes **σ_k, σ_ε, C_{1ε}, C_{2ε}**. Estas ecuaciones, conocidas comúnmente como las ecuaciones de transporte del modelo k-ε se detallan en las expresiones correspondientes a la Ec. 16 y Ec. 17 (Huang et al., 2009), y constituyen una herramienta fundamental para la predicción del desarrollo de la turbulencia dentro del sistema.

$$\frac{\delta(\rho k)}{\delta t} + \frac{\delta(\rho k u_i)}{\delta x_i} = \frac{\delta}{\delta x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\delta k}{\delta x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (16)$$

$$\frac{\delta(\rho \varepsilon)}{\delta t} + \frac{\delta(\rho \varepsilon u_i)}{\delta x_i} = \frac{\delta}{\delta x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\delta \varepsilon}{\delta x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon} \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (17)$$

Estas ecuaciones permitirán considerar el efecto turbulento en el análisis de la eficiencia de mezcla del dispositivo Venturi. Por otra parte, $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ son los respectivos coeficientes turbulentos de Prandtl, es decir, son los parámetros que definen la relación entre la difusividad de una partícula específica y la difusividad dada por la turbulencia.

4.3 Restricciones del fenómeno de flujo en el dispositivo Venturi.

Antes de proceder con la simulación computacional del sistema, fue necesario establecer un conjunto de restricciones y consideraciones que permitieran representar con mayor precisión el comportamiento del flujo dentro del inyector Venturi. Cada una de estas variables influye directamente en la formulación del modelo, ya sea limitando ciertas condiciones, estableciendo supuestos razonables o simplificando el sistema de ecuaciones. Entre tanto, a continuación, en la *Tabla 2*, se describen las restricciones físicas, termodinámicas y de transporte que se tuvieron en cuenta, junto con las justificaciones técnicas que respaldan el porqué de su aplicación en el contexto de la presente investigación.

Tabla 2. Restricciones del fenómeno de flujo del Modelo. (Perea L,2025)

Parámetros		Restricción o efecto
ν	Viscosidad cinemática	Pérdidas de energía debido al consumo que representa la viscosidad presente en el fluido, aumenta por las especies.
ρ	Densidad	Principalmente por lo que la presión haga en ella, si hay variación de densidad por cambio de presión, el flujo es compresible.
dp	Diferencial de presión	El efecto de esta afecta en la compresibilidad del flujo y tiene un impacto directo en el momentum del sistema.
q	Flujo de calor	Influencia en la pérdida energía del sistema por transferencia de calor.
Dab	Coefficiente de transferencia	Es significativo en el fenómeno y depende de la naturaleza y comportamiento de las especies
α	Fracción de especies	Tiene un efecto en cómo se desarrolla la mezcla del sistema y en la difusión de los componentes
w_i	Tasa de generación y consumo de especies	Registra las interacciones y la cinética química presente tanto por la formación y pérdida de especies.
k, ϵ	Términos de turbulencia	Influye en el régimen del flujo y determinando el efecto de las turbulencias generadas en el sistema

- ◆ **Viscosidad cinemática:** La viscosidad cinemática genera un gasto de energía en el sistema debido a la resistencia interna al movimiento. Este parámetro aumenta dependiendo de las especies presentes. Cabe destacar que, esta dependencia se debe a que la viscosidad del fluido es directamente proporcional a la relación en las viscosidades de los componentes presentes (promedio de la mezcla, $\text{agua} = 1e^{-6} \frac{m^2}{s}$, componente 2(coagulante) = $1.01e^{-6} \frac{m^2}{s}$)
- ◆ **Densidad:** La restricción se encuentra estrechamente relacionada con el efecto que tiene la presión sobre este parámetro ya que, si los cambios de presión afectan significativamente la densidad, por consiguiente, se asume que, el flujo es compresible. En el caso de la presente investigación, se partirá de la premisa de que el sistema es

incompresible. Para la densidad del sistema se tiene en cuenta la densidad promedio de cada una de las especies involucradas (promedio de mezcla agua= $990 \frac{kg}{m^3}$.coagulante= $1000 \frac{kg}{m^3}$)

- ◆ **Diferencial de presión:** Como anteriormente se indicó, la variación de presión puede definir si el sistema es compresible o no, no obstante, influye directamente en el momentum del sistema, necesario para entender el comportamiento del flujo.
- ◆ **Flujo de calor:** Esta variable habla de la pérdida de energía del sistema por transferencia de calor. Sin embargo, en este sistema no se considera este fenómeno de transporte.
- ◆ **Coeficiente de transferencia:** Es uno de los parámetros con mayor influencia en el fenómeno, depende directamente de la naturaleza de los componentes individuales y el comportamiento de las especies alterando también la transferencia de masa del sistema.
- ◆ **Fracción de especies:** Determina de qué forma se producirá la mezcla de los componentes y es un parámetro que también afecta la difusividad de las especies, es decir, sin el análisis de este parámetro, no se entendería la composición de la mezcla. Este parámetro varía con respecto al tiempo (fracción agua inicial=1 fracción componente 2 inicial =0)
- ◆ **Tasa de generación y consumo de especies:** Esta variable registra de qué forma las interacciones y la cinética química afectan la proporción de las especies en el sistema. No obstante, como anteriormente se indicó, en la investigación presente, no se tendrán en cuenta las reacciones químicas.
- ◆ **Términos de turbulencia:** Estos términos son relevantes para definir el régimen de flujo y los efectos de las turbulencias generadas en el sistema, buscando principalmente el modelo más parecido a las condiciones más reales.

6. OBJETIVOS

5.1 Objetivo general

Evaluar la eficiencia de mezcla en un inyector Venturi durante el proceso de coagulación y floculación en un sistema de tratamiento de aguas usando Fluido dinámica computacional.

5.2 Objetivos específicos:

- Determinar el modelo fenomenológico que describa el comportamiento de flujo en un dispositivo Venturi usado en el proceso de coagulación- floculación de aguas.
- Analizar el efecto de la velocidad de flujo y dosificación en el dispositivo Venturi en la eficiencia de mezcla del proceso de mezcla rápida para tratamiento de aguas.
- Determinar las especificaciones dosificación y de velocidad que mejoran la eficiencia de la mezcla en un dispositivo Venturi y comparar con estudios reportados en la literatura

7. METODOLOGIA

En esta sección se describen de forma detallada las actividades y procedimientos que se llevaron a cabo con la finalidad de evaluar la eficiencia de mezcla en un dispositivo tipo Venturi, aplicado específicamente al proceso de tratamiento y purificación de aguas. La metodología se estructuró por fases, cada una de ellas alineadas con los objetivos planteados en la investigación, de forma que se garantizara una rigurosidad técnica en cada etapa del estudio.

Para tener una idea del esquema general se presenta la información en la *figura 1* donde se realiza un bosquejo simple de las actividades desarrolladas para la ejecución del proyecto.

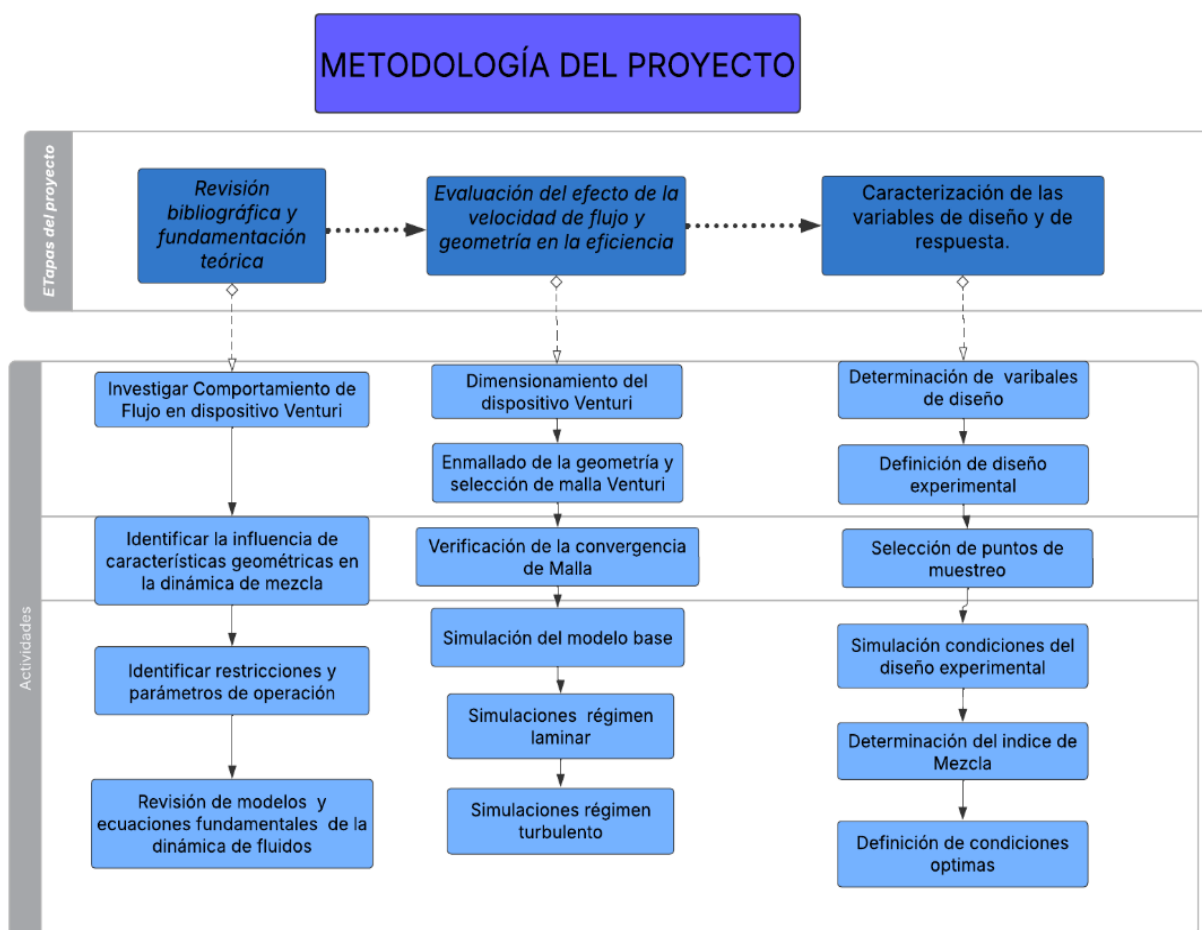


Figura 1. Esquema de la metodología del proyecto

6.1 Etapa 1: Revisión bibliográfica y fundamentación teórica

Para cumplir con el primer objetivo planteado, el cual está orientado a la comprensión del fenómeno de mezcla en dispositivos tipo Venturi, se desarrolló una revisión bibliográfica exhaustiva con el fin de tener claridad y construir las bases teóricas del estudio. Esta revisión incluyó los siguientes enfoques:

- Comportamiento de flujo en dispositivos tipo Venturi, enfatizando en cómo influyen las características geométricas sobre la dinámica de mezcla y en la aplicabilidad del Venturi en sistemas de tratamiento de aguas.
- Identificación de restricciones y parámetros de operación involucrados en este tipo de sistemas, como las condiciones de entrada, características fisicoquímicas de los fluidos y criterios de diseño.
- Revisión de algunos modelos y de las ecuaciones fundamentales relacionadas con la dinámica de fluidos y la transferencia de masa en sistemas con mezclado turbulento, que permiten describir matemáticamente el comportamiento del sistema.

6.2 Etapa 2: Evaluación del efecto de la velocidad de flujo y Dosificación en la eficiencia de mezcla

Para cumplir con el segundo objetivo, el cual se basa en analizar de qué forma la velocidad de flujo y la dosificación en este tipo de dispositivos influyen en la eficiencia de mezcla, se desarrolló el siguiente procedimiento:

6.2.1 Dimensionamiento del dispositivo Venturi

Se seleccionó como modelo base de referencia la geometría del dispositivo reportado por (Manzano et al., 2014), Geometría G1 de prototipo en el cual se fue incrementando la velocidad V_1 , a partir de un valor mínimo de $0,5 \frac{m}{s}$ a una presión 150 kpa. empleando las dimensiones del primer prototipo referenciado en dicho trabajo, las cuales se adaptaron a escala real. Las dimensiones específicas se reportan en la *Tabla 3*, y su configuración gráfica en un plano 2D se ilustra en la *Figura 2*.

El modelo consta de dos entradas:

- Entrada 1: Corresponde al flujo principal de agua, previamente tratada, que ingresa por la sección inicial del dispositivo.
- Entrada q: Ubicada justo en la zona de estrangulamiento del Venturi, es la entrada secundaria por donde se dosifica el coagulante que reaccionará con el flujo principal para dar paso al inicio del proceso de floculación en el tratamiento de aguas.

El tramo comprendido entre las dos entradas (es decir, desde la entrada 1 hasta la entrada 2 o zona de estrangulamiento) se encuentra la sección del difusor, donde el flujo experimenta un incremento súbito de presión debido a la convergencia geométrica. Posteriormente, el fluido atraviesa la zona de tobera, donde la presión disminuye progresivamente hasta alcanzar la salida

Tabla 3. Dimensiones del dispositivo Venturi del modelo

D1. Diámetro entrada (mm)	D3. Diámetro de salida (mm)	D2. Diámetro de estrangulamiento (mm)	q. Diámetro de entrada en estrangulamiento (mm)	Ld. Longitud de difusor (mm)	Lt. Longitud de tobera (mm)	Lg. Longitud zona de cambio de presión (mm)
57	57	17,1	6	100	43	30

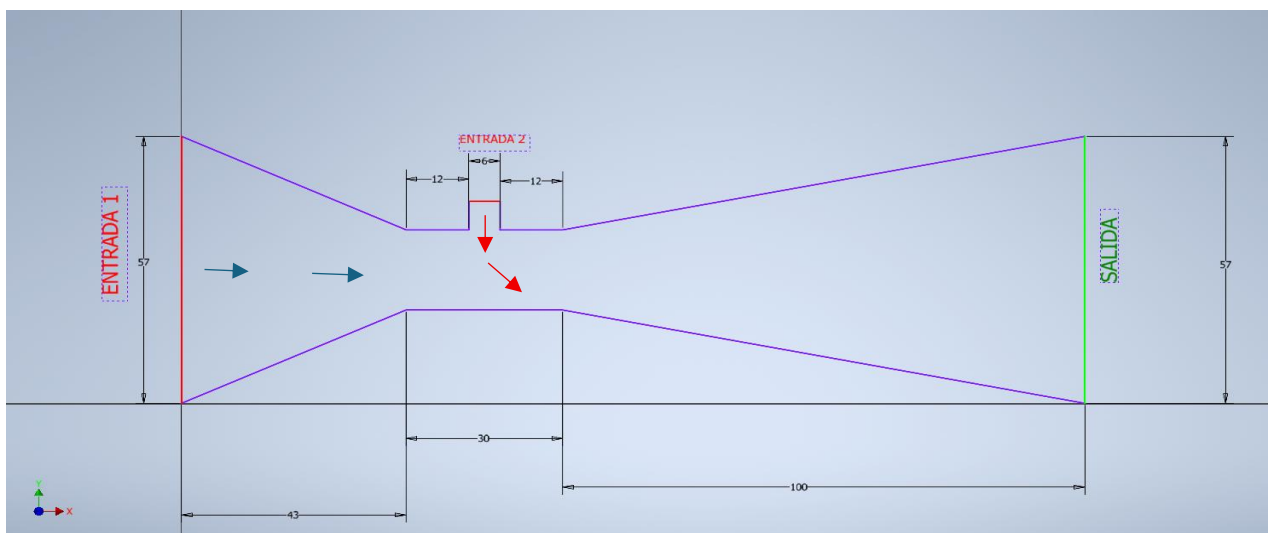


Figura 2. Dimensiones del Tubo Venturi seleccionadas para el modelo.

6.2.2 Enmallado de la geometría y selección de malla:

El proceso de enmallado se desarrolló con la finalidad de representar computacionalmente el dominio físico del dispositivo, lo cual es necesario establecer para la posterior simulación del comportamiento del flujo. Para ello:

- Se diseñó una representación digital de la geometría del Venturi utilizando herramientas CAD (Autodesk Inventor), la cual permitió obtener una visualización más precisa del dominio del sistema.
- Se eligió un tipo de malla hexaédrica estructurada, trabajado en un entorno tridimensional (3D), definido por 1 mm de espesor en el eje Z por cuestión de la configuración de la lectura de la malla requerida por OpenFoam, de esta manera es necesario aclarar que el análisis es de enfoque bidimensional(2D). con especial atención al refinamiento en zonas críticas como la entrada secundaria y la región de estrangulamiento, que corresponde al espacio físico donde se puede apreciar los fenómenos más relevantes de mezcla en el proceso de floculación

El enmallado se ejecutó en el módulo BlockMesh, en el cual se definieron diferentes bloques que representan cada una de las secciones del Venturi. Estos bloques se subdividieron en caras y nodos con la finalidad de establecer una estructura clara del dominio computacional.

Por simplicidad y para facilitar el consolidado y análisis de los resultados, la geometría se segmentó en:

- Un bloque para la tobera en donde se encuentra la entrada 1 (por donde ingresa el flujo principal) y que se caracteriza por tener forma de trapecio. En la *Figura 3*, se puede visualizar el bloque en un plano 2D

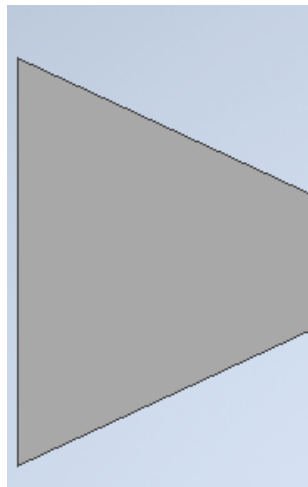


Figura 3. Bloque de la tobera

- Para la zona central se realizó una subdivisión en 4 bloques, los cuales constituyen la región en donde se presenta la interacción de flujos: bloque izquierdo, derecho, central y uno superior correspondiente a la entrada q . En la *Figura 4* se ilustran las divisiones anteriormente mencionadas.

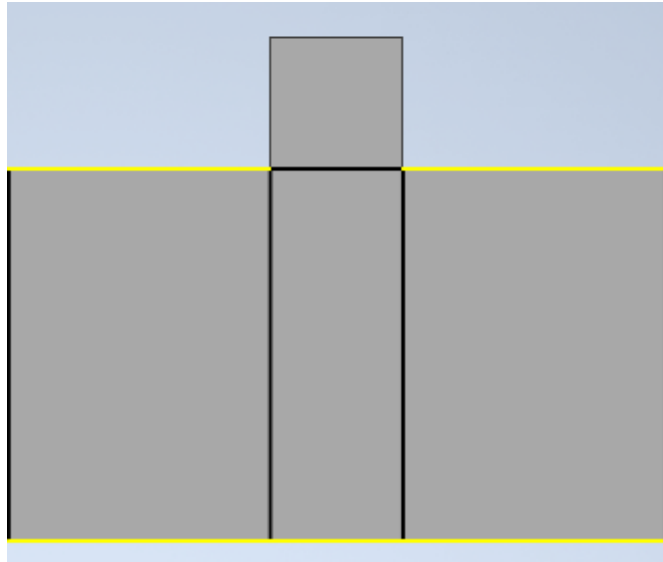


Figura 4. Bloques de la región central

- Un bloque final que representa la zona de difusor por la cual transita el fluido hasta llegar a la salida. La *Figura 5* muestra la geometría de dicho bloque.

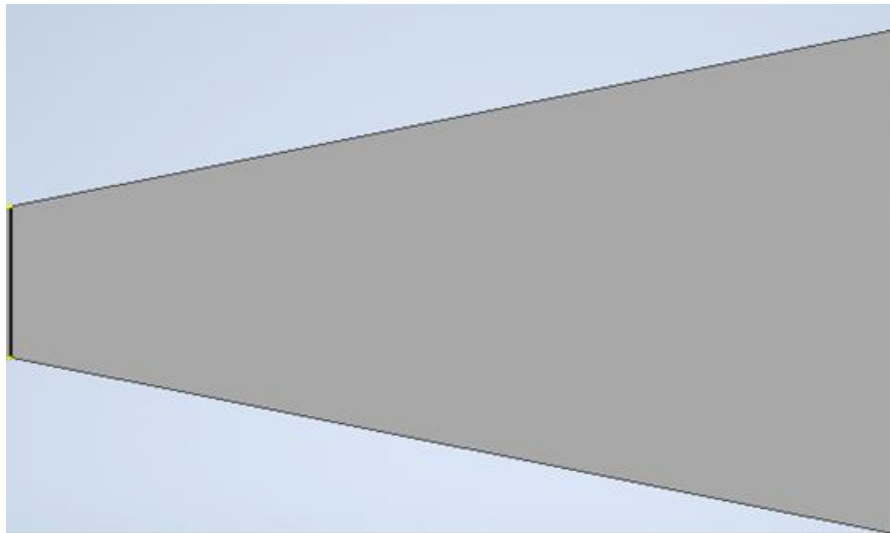


Figura 5. Bloque del difusor

Una vez definidos los bloques con base en el dimensionamiento presentado anteriormente, se generó la malla estructurada, compuesta por elementos hexaédricos, la cual alcanzó un valor específico de en la escala de Skewness, una medida que evalúa la calidad geométrica de los elementos de una malla computacional, evaluando qué tan deformados están respecto a su forma ideal. La interpretación numérica de esta medida establece que el valor reportado es considerado aceptable para garantizar precisión en las simulaciones, ya que cumple con el requisito de ser inferior a 0.9 (Versteeg,2007). Asimismo, la *Figura 6* presenta la representación gráfica de la malla 1 del modelo Base, la cual consta de 7582 elementos. Donde se ve que la zona de estrangulamiento tiene mayor refinación para capturar gradientes de flujo.

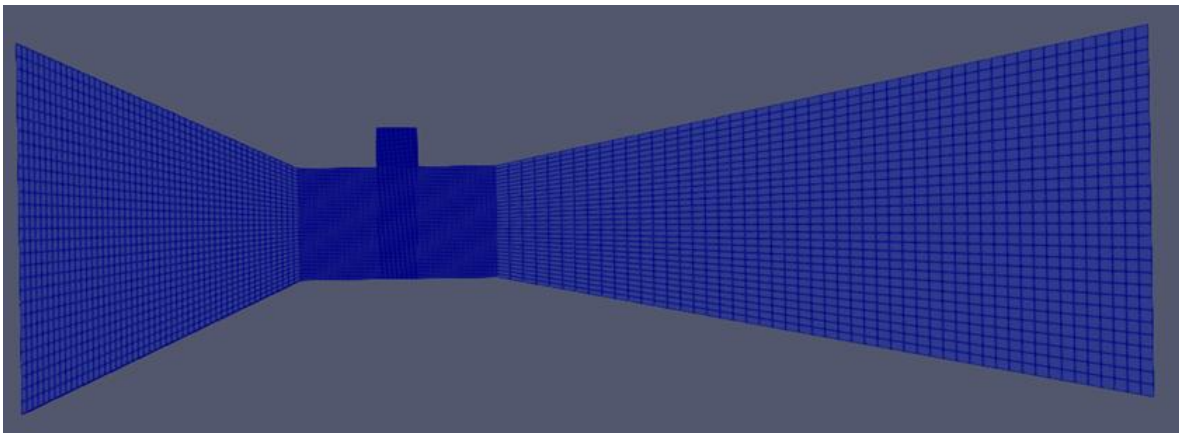


Figura 6. Malla 1 del modelo base

6.2.3 Verificación de la convergencia de malla

Para garantizar resultados precisos y confiables en el modelo numérico, se llevó a cabo un proceso adicional de verificación de la convergencia de la malla. Este procedimiento consistió en definir los parámetros iniciales del modelo estructurado, incluyendo las condiciones iniciales del flujo, así como en el análisis posterior de la calidad de la malla y en su refinamiento progresivo teniendo en cuenta si cumplía o no con determinados parámetros de aceptabilidad.

6.2.3.1 Condiciones de frontera

Se parte de la premisa de que el flujo se transporta a través del interior de la geometría, es decir que, no existe ningún flujo circúndate en la superficie externa (por fuera del dominio computacional de la geometría). En este tipo de sistemas, por lo general, se tienen en cuenta solo tres tipos de condiciones de frontera que asignar para las diferentes caras del dispositivo, las cuales son: *wall*, *patch* y *empty*.

Las condiciones de frontera fueron determinadas según la naturaleza del recorrido del fluido dentro del dispositivo. Las caras que no representan entradas ni salidas de flujo, pero que forman parte del recorrido interno de este, fueron designadas como pared, es decir, una condición tipo *wall*; dentro de esta categoría se incluyeron zonas como la cara superior e inferior del difusor y la tobera, así como la *zona de estrangulamiento*. Las zonas de entrada y salida (entrada 1, entrada q y salida) se definieron como *patch*, ya que permiten el ingreso o salida de flujo.

Finalmente, las caras frontal y trasera de la geometría del dispositivo, al tratarse de un modelo bidimensional, hay unas zonas en la que no se debe tener en cuenta ese recorrido del flujo porque se tomaría como una zona donde no hay una sección “tangible” del dominio, se definieron como *empty*, evitando así que el programa realice cálculos sobre dichas secciones del sistema, ya que lo lee como si fuese una región vacía. A continuación, en la *Tabla 4* se presenta un consolidado con la asignación de cada tipo de frontera según la cara o el segmento.

Tabla 4. Condiciones de frontera archivo de malla.

<i>CARA / SECCIÓN</i>	<i>CONDICIÓN DE FRONTERA</i>
<i>ENTRADA 1</i>	Patch
<i>ENTRADA 2</i>	Patch
<i>SALIDA</i>	Patch
<i>PAREDES TOBERA</i>	Wall
<i>PAREDES DIFUSOR</i>	Wall
<i>PAREDES SECCIÓN CENTRAL</i>	Wall
<i>CARAS FRONTAL Y TRASERA</i>	Empty

6.2.3.2 Evaluación de la calidad de la malla

Se evaluó la calidad de la malla a través de parámetros como la ortogonalidad, la relación de aspecto y el parámetro de asimetría conocido como Skewness. Este último fue fundamental para identificar la deformación de los elementos de la malla respecto a su forma ideal y se logró mantener este indicador dentro de rangos aceptables para asegurar su estabilidad numérica.

6.2.3.3 Evaluación de la convergencia de la malla

Para alcanzar la convergencia, se procedió a refinar la malla de forma progresiva y a repetir los análisis desde la generación de la malla hasta lograr la convergencia. El propósito de este procedimiento consiste en garantizar una solución numéricamente estable y mayor precisión en los resultados posteriores a la simulación.

6.2.4 Simulación del modelo base

Una vez definidos los parámetros de la malla y las condiciones de frontera descritas previamente, se procedió a configurar y a llevar a cabo la simulación del modelo base o de referencia. Esta etapa consistió en implementar las condiciones de operación dentro del entorno computacional, tomando en consideración todos los parámetros iniciales definidos para el proyecto. La simulación se efectuó de forma progresiva, iniciando con un análisis en régimen laminar y, posteriormente, se evaluó el comportamiento del sistema bajo condiciones de turbulencia en donde se incluyen variables adicionales.

6.2.4.1 Selección de sistema de solución (solver) para modelo base.

La herramienta computacional empleada para desarrollar esta simulación es el software de código abierto basado en C++, *OpenFoam* en su versión 10. Este programa está estructurado en carpetas organizadas jerárquicamente, donde cada una de ellas contiene la información necesaria y las condiciones específicas para representar numéricamente el fenómeno que se desea analizar.

Dado que el caso de estudio corresponde a un sistema de mezcla entre fluidos en fase líquida incompresibles, en el cual se no se considera la compresibilidad del fluido (es decir que, se asume que no hay variaciones en la densidad inducidas por el cambio de presión), se seleccionó el solver *twoLiquidMixingFoam*. Este sistema de solución está diseñado para resolver las ecuaciones de gobierno de mezclas líquidas por medio de un enfoque Euleriano, donde algunas propiedades físicoquímicas y de transporte asociadas al sistema, como la densidad y la viscosidad cinemática, son evaluadas como el valor promedio entre los dos fluidos. (Alam, 2020).

Es importante destacar que este solver trabaja bajo un esquema transitorio, esto significa que las variables del flujo cambian en el tiempo, lo que significa que el análisis de resultados debe realizarse seleccionando instantes de tiempo en específicos, lo que permite evidenciar de qué forma fluctúa el fenómeno a lo largo de la simulación. Cabe aclarar que los resultados son tomados cuando el sistema alcanza un visible estado estacionario donde las propiedades a través del tiempo no presentan cambios.

6.2.4.2 Simulaciones iniciales (régimen laminar)

En la primera fase de la simulación, se parte del supuesto que por defecto tiene el solver, y es que, el fenómeno ocurre en régimen laminar. Esta elección permite evaluar el comportamiento inicial del flujo bajo condiciones de baja velocidad, permitiendo la detección de inestabilidades numéricas y validando la calidad del enmallado sin la complejidad de añadir directamente un modelo de turbulencia.

Los campos que se consideraron relevantes para solucionar el sistema de ecuaciones de gobierno son:

- La velocidad (U)
- La fracción de volumen del coagulante (α)
- La presión ($prgh$)
- Propiedades físicas como densidad y viscosidad cinemática de ambos fluidos (agua y coagulante)
- El coeficiente de transferencia de masa (D_{ab})
- La gravedad, como constante clave que la diferencia de otros solver de sistemas multifásicos.

La intención principal de esta etapa era observar el desarrollo del flujo a velocidades bajas, comprobar la estabilidad numérica del sistema y establecer una base sólida antes de incorporar modelos de turbulencia, los cuales implican mayor gasto computacional y sensibilidad numérica.

Con respecto a las condiciones de frontera, se consideraron configuraciones específicas con la intención de mantener el régimen de flujo laminar y asegurar resultados más precisos:

- Entradas (entrada 1 y entrada 2): No se utilizaron velocidades muy altas para no generar alteraciones en el régimen de flujo, por lo cual se impuso una velocidad constante mediante la condición de *fixedValue*. Esta condición especifica el valor numérico del vector de velocidad que ingresa por dichas superficies.
- Salida: Se utilizó la condición *zeroGradient*, que permite fijar que el gradiente de la velocidad en la dirección de salida sea cero, evitando tener que imponer restricciones de flujo que afecten la solución del acoplamiento presión – velocidad (Versteeg,2007).
- Paredes (walls): Se empleó la condición de no desplazamiento *noSlip*, la cual impone que la velocidad del fluido sea cero en las paredes, simplificando el análisis de comportamiento en esas zonas y reduciendo las posibilidades de inestabilidad numérica.
- Zonas frontal y trasera: Como se mencionó anteriormente, al tratarse de una simulación bidimensional, estas caras adquirieron la condición de frontera tipo *Empty*, eliminándolas del dominio computacional para evitar cálculos innecesarios.

En cuanto al campo de presión (*prgh*), es importante destacar que está definido por una presión relativa (presión in gauge), es decir, corresponde a la diferencia entre la presión atmosférica y la del sistema (Cengel,2015). Las condiciones aplicadas en torno a esta variable fueron:

- Entradas: Se definieron con la condición de frontera *fixedFluxPressure*, una configuración sensible a los efectos gravitacionales que permite calcular correctamente la distribución de presión a lo largo del plano del dispositivo sin imponer un valor fijo.
- Salida: Se aplicó la condición *fixedValue*, para establecer un valor de referencia que permita determinar los valores de presión en los diferentes nodos del campo interno.
- Paredes: Se mantuvo la condición *zeroGradiente*, evitando restricciones adicionales en la dirección normal a la superficie.
- Zonas frontales y traseras: Se consideran como *Empty*, ya que son regiones en las que no se efectuarán cálculos de la simulación.

Para el campo Alpha, correspondiente a la fracción de volumen del coagulante, se implementó una condición particular. Utilizando el comando *setFields*, se estableció un subdominio de forma hexagonal en la entrada 2 con un valor de 1, lo que significa que esa región está completamente ocupada por el fluido coagulante. Esta configuración adicional permitió simular adecuadamente la alimentación localizada del componente secundario en el sistema.

En la carpeta “0” del solver utilizado, específicamente en el archivo denotado como *alpha.sludge*, se detallaron las condiciones de frontera para este campo en cuestión:

- Entrada 2: Se definió con la condición *fixedValue* con un valor de 1, correspondiente al valor definido mediante el comando *setFields*.
- Entrada 1: También se utilizó la condición *fixedValue* con un valor de 0, lo que indica ausencia del coagulante en esa región.
- Salida y paredes: Tiene una condición de *zeroGradient*, permitiendo que el campo se desarrolle internamente sin influencias adicionales en los bordes
- Zonas frontales y traseras: Condición *Empty*, suprimiendo su participación en el cálculo del solver.

A continuación, en la *Tabla 5* se presenta un resumen de todas las condiciones de frontera que se especificaron para cada una de las caras de la geometría del dispositivo teniendo en cuenta los factores físicos evaluados, campo de presión, velocidad y alpha.

Tabla 5. Condiciones de frontera caso base Laminar

<i>Cara / sección</i>	<i>Presión (in gauge)</i>	<i>Velocidad</i>	<i>Alpha</i>
<i>Entrada 1</i>	fixedFluxPressure	fixedValue	fixedValue
<i>Entrada 2</i>	fixedFluxPressure	zeroGradient	fixedValue
<i>Salida</i>	fixedValue	zeroGradient	zeroGradient
<i>Paredes (walls)</i>	Zerogradient	Noslip	zeroGradient
<i>Caras frontal y trasera</i>	Empty	empty	Empty

6.2.4.3 Simulaciones iniciales (régimen turbulento)

Con la finalidad de representar de forma más precisa el comportamiento real del sistema de mezcla, fue necesario tener en consideración el régimen turbulento dentro del proceso de simulación. Si bien el análisis se realizó bajo el supuesto de flujo laminar e incompresible para corroborar la convergencia de la malla y facilitar el análisis de las condiciones de frontera, la naturaleza del fenómeno en cuestión refiere a una mezcla de dos líquidos, lo que justifica la implementación de un modelo de turbulencia que permita captar las fluctuaciones e inestabilidades propias de este tipo de flujos. Por esta razón, se adaptó la configuración numérica del modelo base a un modelo de turbulencia adecuado.

El modelo seleccionado fue el $k-\epsilon$ (*kEpsilon*), una formulación ampliamente utilizada que se basa en el enfoque *Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)*. Este modelo brinda algunos beneficios, como lo es su bajo costo computacional y su capacidad para describir flujos turbulentos plenamente desarrollados en un enfoque macroscópico, lo que lo convierte en una opción adecuada para el estudio del sistema analizado.

Con la incorporación de este modelo de turbulencia, es necesario introducir dos nuevos campos físicos fundamentales en la caracterización de la turbulencia:

- Energía cinética de turbulencia (k)
- Tasa de disipación energía turbulenta (ϵ)

Estos campos al igual que los ya definidos previamente en el régimen laminar, deben contar con condiciones de frontera apropiadas para asegurar la estabilidad numérica, resultados precisos y soluciones físicamente coherentes.

6.2.4.3.1 Condiciones de frontera para el campo k

- Entradas (entrada 1 y entrada q): Se asignó una condición de tipo *fixedValue*, estableciendo un valor específico de energía cinética turbulenta. Este valor fue estimado considerando un grado de turbulencia cercano al 5% en relación con las

propiedades del flujo, lo cual suele ser muy común en contexto prácticos de la industria donde el régimen turbulento está presente en casi todos los procesos.

- Salida: Se utilizó la condición de *zeroGradient*, permitiendo que los valores de k en esta zona se definan a partir del gradiente del campo interno sin estar sujeto a restricciones adicionales.
- Paredes: Se utilizó la función de pared *kqRWallFunction*, una condición especializada para el modelo k - ϵ , la cual permite modelar el comportamiento del campo k en la proximidad de las superficies sólidas de forma más realista.
- Caras frontal y trasera: Como se ha explicado previamente, al tratarse de un modelo 2D, estas superficies fueron definidas como *Empty* para excluirlas del cálculo y evitar errores numéricos durante la simulación.

6.2.4.3.2 Condiciones de frontera para el campo ϵ

- Entradas: Al igual que para el campo k , se asignó una condición *fixedValue* con valores determinados en función de las características del flujo.
- Salida: Se definió como *zeroGradient*
- Paredes: Se utilizó la función de pared *epsilonWallFunction*, la cual es específica para este modelo y garantiza una lectura adecuada del comportamiento del campo de disipación cerca de las paredes.
- Caras frontal y trasera: Se mantuvo la condición *empty*

A continuación, en la *Tabla 6* se presenta el consolidado con las condiciones de frontera para la simulación del proceso en régimen turbulento.

Tabla 6. Condiciones de frontera de la simulación en régimen turbulento

<i>Cara / sección</i>	<i>Energía cinética turbulencia(k)</i>	<i>Epsilon (ϵ)</i>
<i>Entrada 1</i>	fixedValue	fixedValue
<i>Entrada 2</i>	fixedValue	fixedValue
<i>Salida</i>	zeroGradient	zeroGradient
<i>Paredes (walls)</i>	kqRWallFunction	epsilonWallFunction
<i>Caras frontal y trasera</i>	Empty	empty

6.2.4.3.3 Activación del modelo de turbulencia en OpenFoam

Para habilitar la simulación en régimen turbulento dentro del entorno operativo de OpenFoam, fue necesario realizar una modificación clave en la carpeta *constant*, específicamente en el archivo denotado como *MomentumTransport*. En este archivo se estableció como tipo de simulación *RASModel*, lo cual indica que el solver empleará una formulación basada en promedios de Reynolds (RAS). La sintaxis empleada en esta configuración incluyó la declaración del modelo kEpsilon como el solver de turbulencia activo.

Esta modificación fue esencial para que el solucionador pueda efectuar el cambio de un enfoque laminar a uno turbulento, manteniéndose muchas de las condiciones de frontera y parámetros definidos previamente, pero incluyendo ahora los efectos complejos del transporte de fluidos en régimen turbulento dentro del sistema de mezcla.

6.3 Etapa 3: Caracterización de las variables de diseño y de respuesta

6.3.1 Índice de mezcla (Variable de respuesta)

6.3.1.1 Determinación del Índice de mezcla (IM):

En el presente trabajo, la variable de respuesta seleccionada para evaluar el rendimiento del proceso de mezclado en el inyector tipo Venturi es el índice de mezcla (IM). Este parámetro permite cuantificar el grado de homogeneización de las fases fluidas, y, en consecuencia, determinar la eficiencia del sistema de mezcla bajo análisis.

El índice de mezcla se calcula a partir de la distribución espacial de las fracciones de masa de un fluido trazador en diferentes posiciones o áreas transversales del inyector. La obtención de estos datos se realiza mediante fluidodinámica computacional (CFD), una herramienta que permite estudiar cómo varía la concentración del trazador a lo largo del recorrido del inyector (Alam,2020).

El índice de mezcla se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$IM = 1 - \frac{\sigma_C}{\sigma_{C0}} \quad (18)$$

Donde:

- σ_C : Es la desviación estándar de la concentración medida en una sección o nodo a evaluar dentro de la geometría del inyector
- σ_{C0} : Es la desviación estándar correspondiente a la condición inicial sin mezcla.

La homogeneidad de la mezcla se evalúa en diferentes secciones, para determinar la velocidad y eficiencia del proceso de mezclado en función de la geometría y condiciones de flujo. Este índice varía entre los valores de 0 y 1, donde valores cercanos a 1 indican una

mayor homogeneidad en el proceso de mezcla, y, en consecuencia, valores cercanos a 0 representan niveles deficientes de mezclado (Hoffman,2006).

6.3.1.2 Muestreo en la malla computacional:

Para determinar con mayor precisión el índice de mezcla, se realiza un muestreo en los cortes ubicados en la malla del dominio computacional. La malla se compone de aproximadamente 4 cortes distribuidos a lo largo de toda la geometría del inyector, con una menor densidad en las zonas cercanas a las paredes y superior en las regiones donde se espera un mayor gradiente de concentración. La selección de los cortes es estratégica, se ubican en zonas críticas donde se puede visualizar el comportamiento de cada sección y a continuación se enuncia su distribución:

- **El primer corte** se ubica en la región de entrada donde se alimenta el agua al inyector.
- **El segundo corte** se ubica en la región de entrada donde se alimenta el coagulante al inyector y se evidencia el inicio del proceso de mezcla debido a la interacción de ambos fluidos.
- **El tercer corte** se ubicado en la salida de la zona de estrangulamiento y en el inicio de la del difusor. con la finalidad de comprender con qué intensidad se ha generado la homogenización de las fases donde es más representativo el efecto Venturi.
- **El cuarto y último corte** se especifica en la región del difusor y salida del inyector, donde inicia la dispersión de la mezcla.

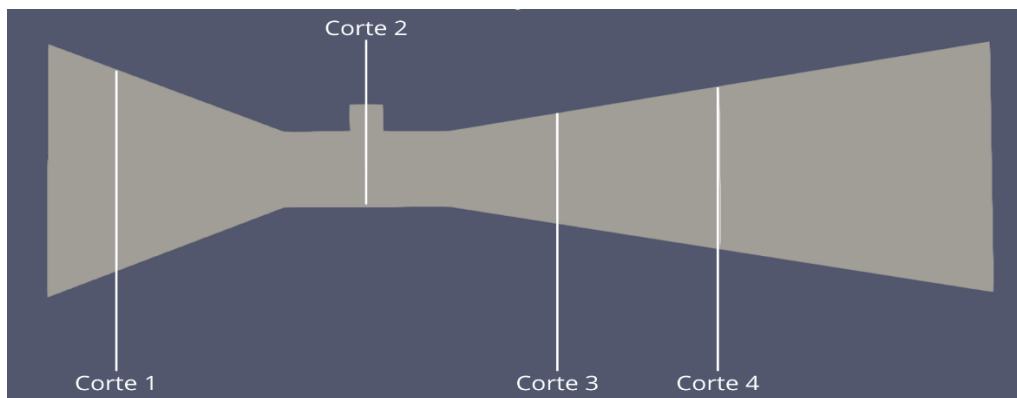


Figura 7. Mapeo de los cortes en el sistema

6.3.2 Variables de Diseño

Con el objetivo de identificar la eficiencia de mezclado en inyectores tipo Venturi, se seleccionaron dos variables de diseño clave: la velocidad de flujo del coagulante y la dosificación, con el objetivo de distinguir si las variables tienen un impacto significativo en los mecanismos de mezcla y evaluar la eficiencia del proceso bajo diferentes condiciones operativas.

6.3.2.1 Dosificación [DF]:

La variable dosificación se define operativamente como la relación de las tasas de flujo volumétrico de los dos líquidos que ingresan al sistema, expresada como un valor adimensional. Su elección como variable de diseño obedece a una serie de razones de tipo técnico y práctico.

En primer lugar, tiene una influencia directa sobre el patrón de flujo en el inyector, afectando significativamente la longitud del frente de mezcla y el nivel de interacción entre los fluidos. En segundo lugar, es una variable fácilmente controlable si se desea replica en un entorno experimental gracias al uso de equipos de inyección precisa, lo cual permite establecer corridas reproducibles y fácilmente medibles (Ali, Shujan et al, 2023). Finalmente, es de gran relevancia en aplicaciones micro y macro fluidicas, donde el control de caudales es indispensable para procesos de análisis, síntesis y separación, lo que lo convierte en un parámetro llamativo para el desarrollo del conocimiento académico e industrial (Ghaemi et al., 2021).

6.3.2.2 Velocidad de flujo del coagulante [VC]:

La selección de la velocidad de flujo del coagulante como una de las variables de diseño, responde a la influencia directa que puede existir sobre la variable de respuesta. Desde la perspectiva de dinámica de fluidos, este factor impacta considerablemente en la estructura y dinámica de un fluido, modifica la intensidad de los esfuerzos cortantes, la generación de vórtices y, según el régimen de flujo, facilita la aparición de cavitación (Alam, 2020).

Para el diseño experimental, se seleccionaron tres niveles de velocidad (nivel bajo, punto central y nivel alto) con el objetivo de abarcar un rango representativo que permita identificar y comprender diferentes escenarios y condiciones del sistema de mezclado.

A continuación, en la *Tabla 7* se consolida el rango seleccionado para cada una de las variables de diseño previamente enunciadas:

Tabla 7. Rango de valores seleccionado para cada variable

Nivel / Variable	Velocidad de flujo [m/s]	Dosificación
Bajo (B)	1.5	0.5
Punto central (C)	2	0.75
Alto (A)	3	1

6.3.3 Diseño experimental

Teniendo en cuenta los factores y niveles definidos en la Tabla 6 para el diseño experimental, se establecieron dos variables de diseño: la dosificación y la velocidad de flujo del coagulante. Cada una de estas variables se evalúa en tres niveles: bajo, alto y un punto central, lo que permite identificar tanto los efectos individuales como las posibles interacciones binarias entre ellas.

Bajo este enfoque, se configuró un diseño factorial 3^2 , que incluye cuatro corridas iniciales junto con un punto central. La aplicación de los puntos centrales al diseño factorial es especialmente importante en la evaluación estadística de la superficie de respuesta y la normalidad de la data, ya que permiten detectar con mayor facilidad la presencia de interacciones multifactoriales en el comportamiento de la variable de respuesta debido a que ajustan el error en la predicción de nuevas observaciones (Montgomery, 2006).

A continuación, en la *tabla 8* se presenta el formato que se completará en la sección de resultados con la información obtenida para la variable de respuesta. Donde cada corrida es rotulada por un código compuesto de dos partes. La primera es un número que indica la velocidad en m/s (1.5, 2 y 3) y la segunda parte representa el nivel de la dosificación en la entrada 2, como son definidas en la *tabla 6* ($A=1$, $B=0.5$, $C=0.75$).

Tabla 8. *Propuesta de consolidado de resultados del diseño experimental*

Corrida	CORTE 1	CORTE 2	CORTE 3	CORTE 4
1.5A				
1.5B				
1.5C				
2A				
2B				
2C				
3A				
3B				
3C				

8. RESULTADOS

7.1 Verificación de la convergencia de malla

Con la finalidad de analizar el modelo planteado en el presente proyecto, fue necesario desarrollar una estrategia de enmallado que permitiera el comportamiento del fenómeno físico que se encuentra bajo estudio. Inicialmente, se definieron los bloques base a partir de las dimensiones geométricas indicadas previamente, con lo cual se construyó una malla estructurada inicial, la cual se caracterizaba por tener subdivisiones amplias que sirvieron como punto de partida para el proceso de refinamiento de la malla seleccionada.

Con el objetivo de mejorar las resoluciones en regiones críticas del dominio, especialmente aquella donde se espera mayor complejidad del flujo, se aplicaron una secuencia de refinamientos progresivos en áreas específicas. Este procedimiento dio lugar a la generación de dos mallas adicionales, cada una con un grado superior de refinamiento, el cual fue evaluado con base en parámetros geométricos específicos: skewness y la relación de aspecto.

En este caso el skewness es una medida de la desviación que hay entre la forma real de las celdas y una forma ideal (en este caso hexaedros). Generalmente si el parámetro es cercano a 0.5 o inferior se toma como aceptable, pero basados en las tendencias de criterios de calidad en Openfoam se toleran valores de trabajo menores a 0.9. Por otra parte, la relación de aspecto es la razón entre la longitud más larga y la más corta de la celda, ayudando a identificar las celdas alargadas, generando posibles inestabilidades. El valor ideal para la calidad suele ser 1, pero OpenFoam admite un rango de trabajo de relaciones menores a 5 principalmente si las celdas que tiene el alargamiento están en la dirección a flujo.

Teniendo en cuenta el resumen que se presenta en la *Tabla 9*, la que indicó una mayor calidad fue la correspondiente al tercer nivel de refinamiento, que se denota como malla 3, la cual presentó una *relación de aspecto* de 4.03803 y un *skewness* de 0.703213, ya que son los valores mas cercanos a los valores aceptables mencionados anteriormente. Estos valores indican un nivel aceptable entre la regularidad de los elementos y su alineación, lo que permitió alcanzar una solución numérica con una buena convergencia, garantizando en este orden de ideas la fiabilidad en los resultados obtenidos para el modelo de turbulencia seleccionado

Tabla 9. Caracterización de mallas para estudio de convergencia

<i>Malla/ parámetro</i>	<i>Tamaño de elemento</i>	<i># de Nodos</i>	<i># de Elementos</i>	<i>Skewness</i>	<i>Relación de aspecto</i>
Malla 1	0.000203	7582	3600	0.746276	4.2123
Malla 2	0.000122	20662	10000	0.835124	4.68033
Malla 3	8.65E-05	45742	22400	0.703213	4.03803

7.2 Validación de modelo

Para la validación del modelo computacional desarrollado, se consideró la presión como variable principal de comparación, en concordancia con el estudio de referencia realizado por (Manzano,2018). Esta comparación se fundamenta en que uno de los objetivos de dicha investigación y del presente trabajo, es analizar las variaciones de presión dentro del sistema, las cuales pueden inducir fenómenos como la cavitación. Teniendo en cuenta lo anterior, la presión se estableció como el parámetro de control para evaluar la precisión del modelo.

Cabe resaltar que la comparación se realizó específicamente con el modelo denominado G1, el cual, según lo reportado en (Manzano,2018), no presenta cavitación, lo que permite establecer una base teórica coherente para validar el comportamiento de flujo del modelo numérico implementado en el presente trabajo. Lo cual se ve evidenciado en la *Figura 8*.

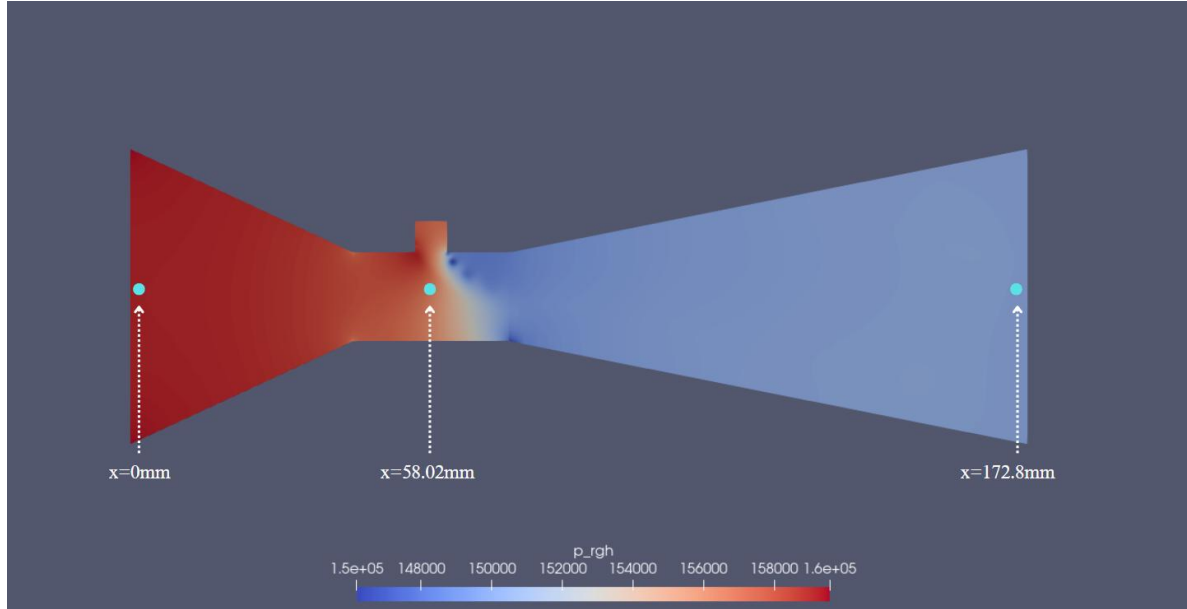


Figura 8. Perfil de Presiones del modelo base del proyecto

En la *Tabla 10* se presenta un resumen detallado de las presiones registradas en los diferentes cortes o segmentos seleccionados a lo largo de la geometría, tanto para el modelo base desarrollado en este estudio como para el modelo propuesto por Manzano, así como también, se incluye el cálculo del error relativo en cada punto, lo que permite verificar la fiabilidad del modelo y su nivel de concordancia con el modelo de referencia.

Tabla 10. Validación del Modelo base vs Modelo de Manzano.

<i>Punto en x(mm)</i>	<i>Pmodelo(kPa) (Manzano,2018)</i>	<i>Prgh(kPa) (modelo base)</i>	<i>% Error</i>
0	160.34	151.46	5.538
58.02	148.07	149.9	1.236
172.8	158.06	149.9	5.163

7.3 Análisis de sensibilidad

En esta sección se presentan los análisis realizados basados en el diseño experimental anteriormente mencionado con la intención de encontrar un conjunto de parámetros que ofrezcan la mayor eficiencia de mezcla.

7.3.1 Análisis de la Fracción volumétrica (α) a lo largo de corte en el eje x

En cada corte se realizó un análisis de la tendencia de los Alpha (α) agrupadas por velocidades, en cada grupo de velocidades se presentan los resultados de cada dosificación.

Como se observa en la *Figura 9*, los resultados correspondientes a una velocidad de inyección del coagulante de 1.5 m/s evidencian que la mayor tendencia en la fracción volumétrica (α) se presenta bajo la condición de mayor dosificación, es decir, para la relación equivalente a 1 ($\alpha_{b0} = 1$). Esta condición favorece una mayor concentración del coagulante en el flujo, reflejándose en los valores obtenidos para α en el tramo inicial del sistema.

No obstante, es importante resaltar que para esta misma velocidad se identifica un punto específico de inflexión en el comportamiento de α , ubicado a una distancia de **35.7 mm** sobre el eje Y. A partir de esta posición, se observa una caída abrupta de la fracción volumétrica, indicando una zona con mayor dispersión del coagulante. Esta tendencia descendente continua de manera progresiva hasta alcanzar un mínimo localizado en los **33.3 mm**, punto que marca el inicio de la “zona muerta”, donde el mezclado se vuelve significativamente menos eficiente.

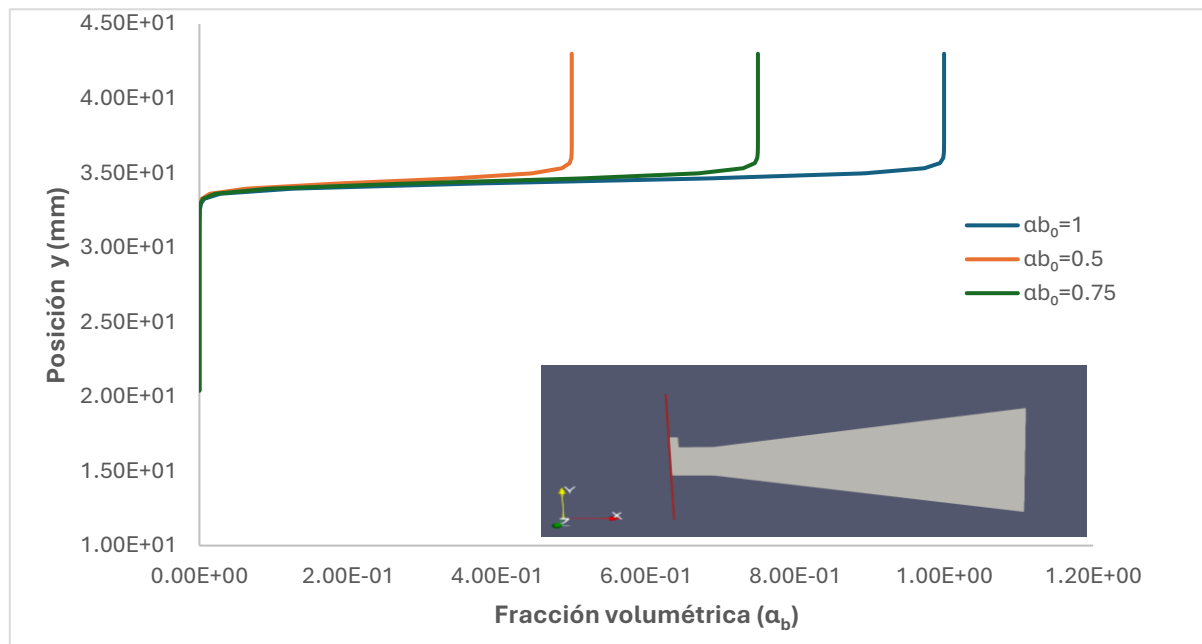


Figura 9. Fracción volumétrica (α) vs Posición en el eje y para la velocidad 1.5 m/s en el corte 2.

Para el caso en que la velocidad de inyección del coagulante es de 2 m/s, se identifica un punto de inflexión en la fracción volumétrica α ubicado en los **35.0 mm** sobre el eje Y, como se puede observar en la *Figura 10*. A partir de esta posición, la fracción volumétrica comienza a disminuir notoriamente, indicando una transición a una zona de menor eficiencia de mezcla. La zona muerta se presenta a una distancia de **32.8 mm**, lo que indica una ligera reducción en su extensión en comparación con la observada en el caso anterior (velocidad de 1.5 m/s).

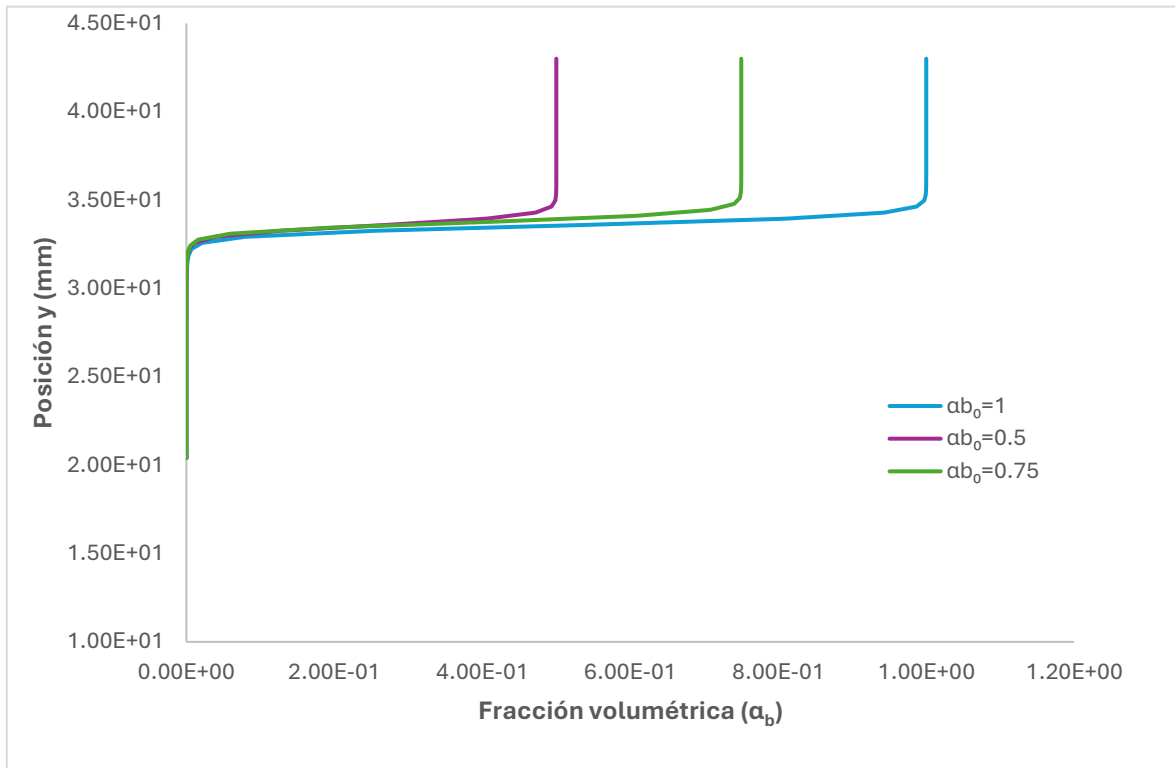


Figura 10. Fracción volumétrica (α) vs Posición en el eje Y para la velocidad 2 m/s en el corte 2.

De forma similar, para una velocidad de **3 m/s**, el punto de inflexión se mantiene en **35.0 mm**, sin variaciones respecto al caso anterior. No obstante, se observa que el inicio de la zona muerta ocurre a una distancia aún menor, específicamente en los **31.4 mm**, lo que sugiere que, a mayor velocidad, la región donde disminuye significativamente la fracción volumétrica del coagulante se contrae.

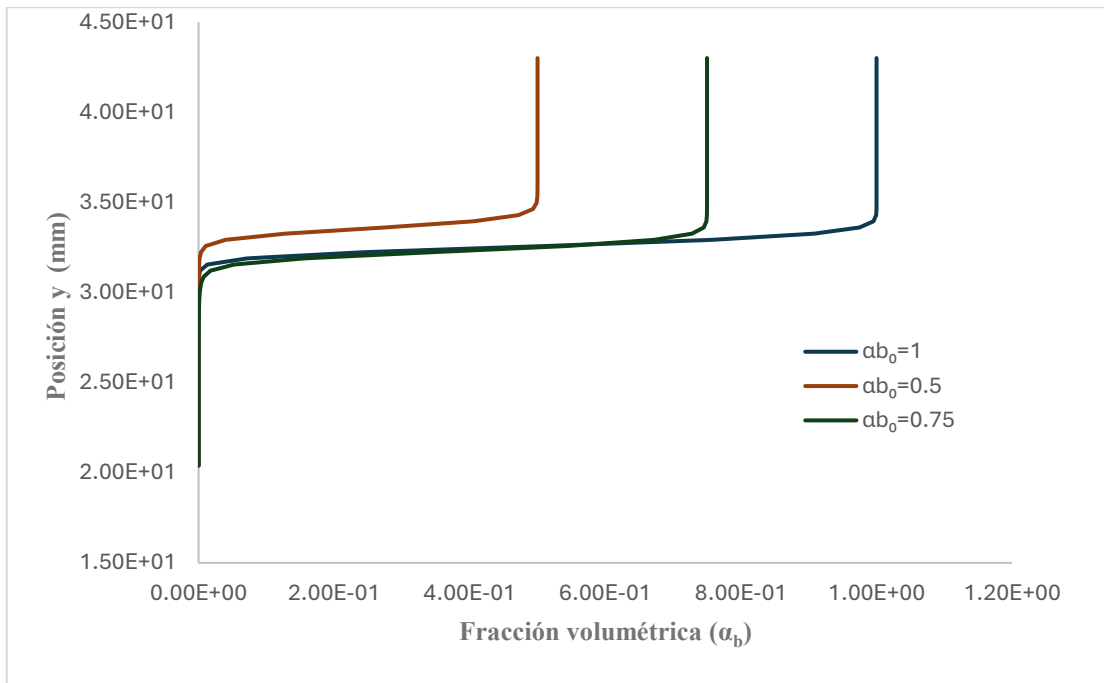


Figura 11. Fracción volumétrica (α) vs Posición en el eje Y para la velocidad 3 m/s en el corte 2.

En la *Figura 12* se presenta el comportamiento de la fracción volumétrica (α) en el corte 3, correspondiente al grupo de simulaciones donde se varia la dosificación y se mantiene fija la velocidad de inyección del coagulante en un valor de 1.5 m/s. Al igual que en el corte 2, se mantiene una relación directamente proporcional entre la dosificación del coagulante y los valores de α , por lo que, a mayor dosificación, mayor es la concentración del coagulante de flujo. No obstante, a diferencia del comportamiento observado en el corte anterior, en este caso α no permanece constante hasta alcanzar el punto de inflexión, sino que presenta un incremento localizado en una región intermedia sobre el eje y, antes de llegar a dicha inflexión

Otro punto importante es que el inicio de la zona “muerta” es decir, aquella donde α tiende a cero, se inicia en los 19.1 mm sobre el eje Y, indicando una mayor eficiencia de mezcla respecto al corte anterior. El valor máximo de α se alcanza con una dosificación de $\alpha_{b0} = 1$, iniciando con un α de 0.55 en la zona superior y alcanzando un pico de 0.744 en los 31.8 mm

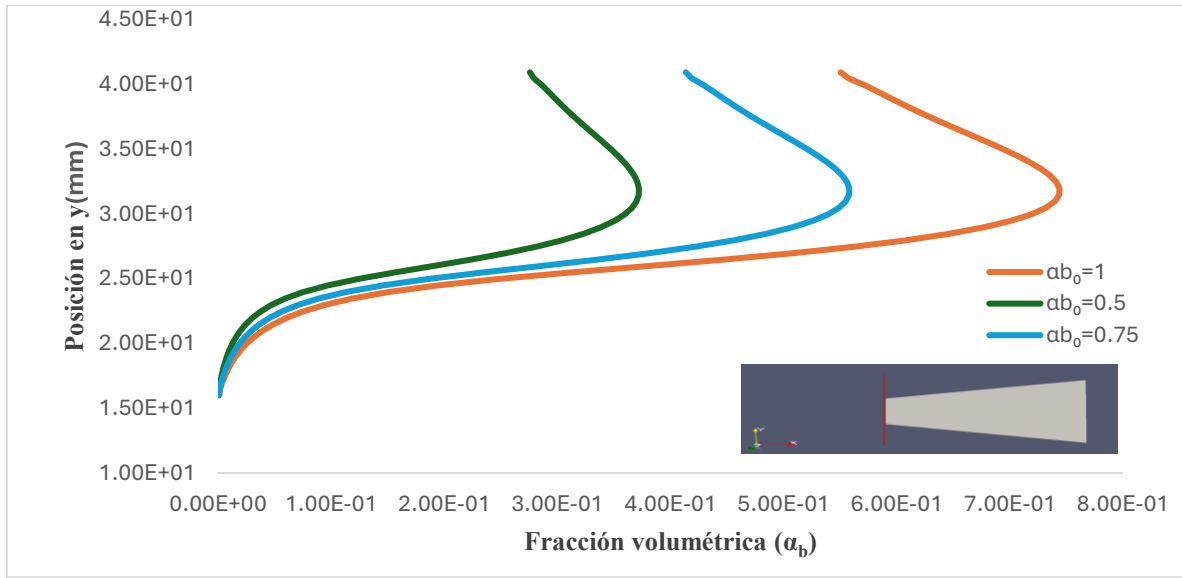


Figura 12. Fracción volumétrica (α) vs Posición en el eje Y para la velocidad 1.5 m/s en el corte 3.

Para el grupo de la velocidad 2 m/s el punto de inflexión es de 29.6 mm como se ve en la Figura 13, en esta también se puede ver la que el inicio de la zona muerta es en un punto de menor distancia en Y es decir la zona muerta es menor iniciando en 16.0 mm. Para este grupo también la dosificación con mayor presencia de coagulante es la de $\alpha_{b0} = 1$ la cual en la parte superior tiene un α de 0.56 y en el punto de inflexión el α es de 0.78.

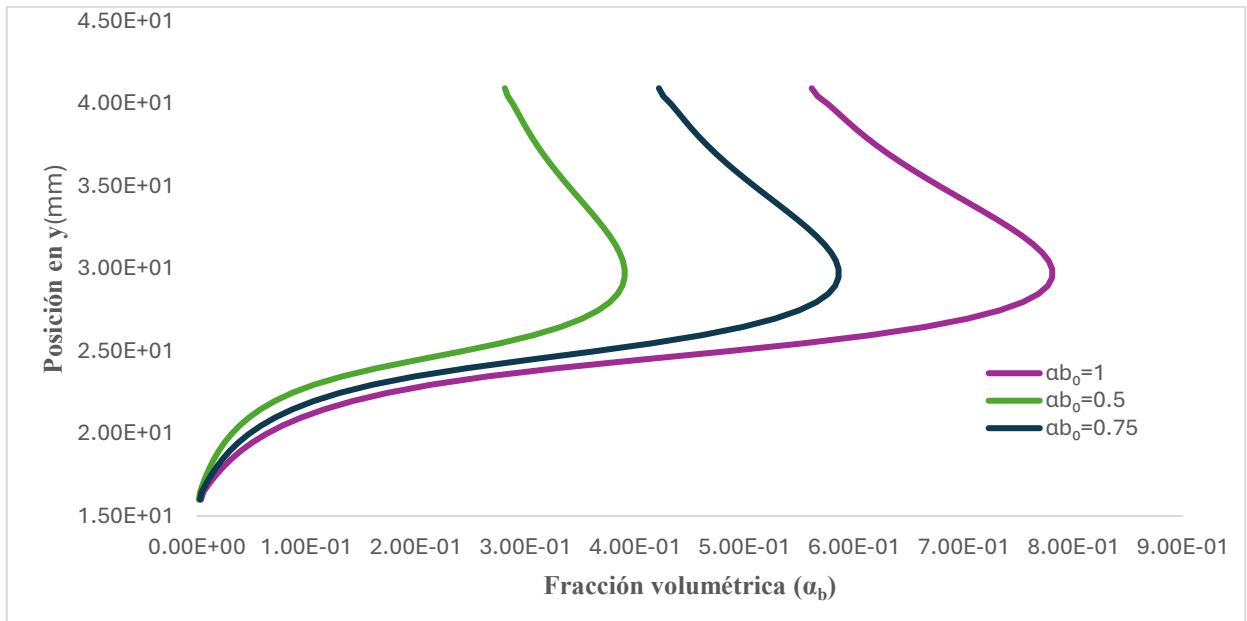


Figura 13. Fracción volumétrica (α) vs Posición en el eje Y para la velocidad 2 m/s en el corte 3.

Para el grupo de la velocidad 3 m/s el punto de inflexión es de 29.7 mm como se ve en la *Figura 14*, en esta también se puede ver la que el inicio de la zona muerta se mantiene en 16.0 mm. Para este grupo también la dosificación mayor es la de $\alpha_{b0} = 1$ la cual en la parte superior tiene un α de 0.65 y en el punto de inflexión el α es de 0.88.

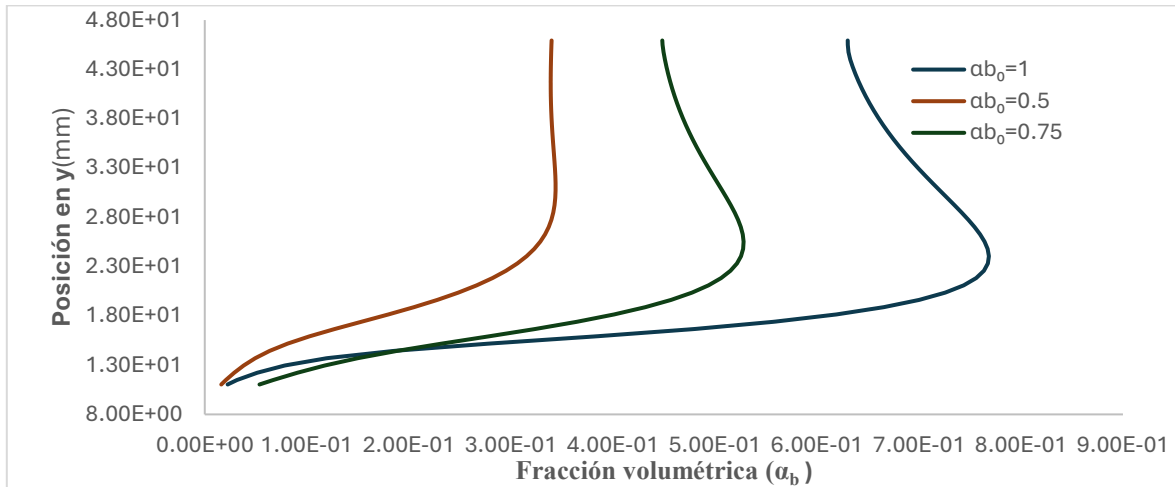


Figura 14. Fracción volumétrica (α) vs Posición en el eje Y para la velocidad 3 m/s en el corte 3.

En el corte 4, representado en la *Figura 15*, se evidencia la zona muerta más reducida entre todos los cortes analizados, lo cual indica una mayor eficiencia en la dispersión de los componentes, y entre tanto, una mejor calidad de mezcla. Esta zona se inicia a una distancia de 11.0 mm sobre el eje Y, lo que refleja una distribución más uniforme del coagulante desde etapas tempranas del inyector. Asimismo, se observa que el flujo principal en esta sección presenta mayores variaciones a lo largo del eje y, en comparación con los cortes anteriores.

En cuanto a los valores de α , el caso con dosificación $\alpha_{b0} = 1$ vuelve a registrar los valores más altos, iniciando con un α de 0.46 en la zona superior y alcanzando un máximo de 0.561 en el punto de inflexión, ubicado en los 28.6 mm.

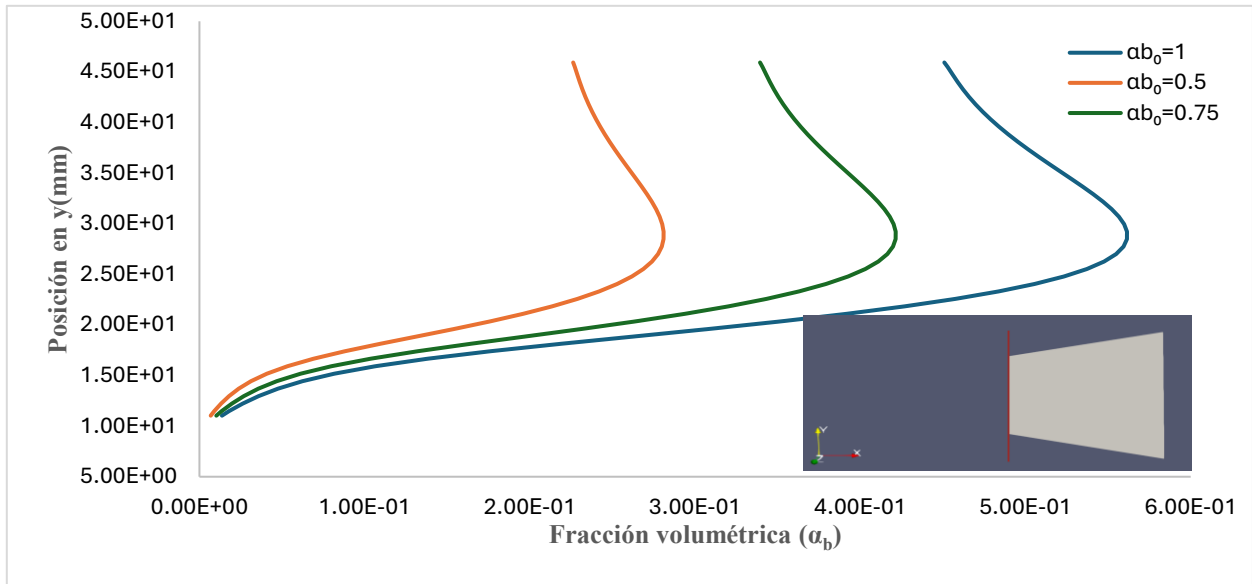


Figura 15. Fracción volumétrica (α) vs Posición en el eje Y para la velocidad 1.5 m/s en el corte 4.

Para el grupo de la velocidad 2 m/s el punto de inflexión es de 26.8 mm como se ve en la *Figura 16*, en esta también se puede identificar la que el inicio de la zona muerta es en la misma distancia en Y es decir que para este corte hasta el momento las velocidades no han afectado el tamaño de dicha zona muerta. Para este grupo también la dosificación mayor es la de $\alpha_{b0} = 1$ la cual en la parte superior tiene un α de 0.50 y en el punto de inflexión el α es de 0.61.

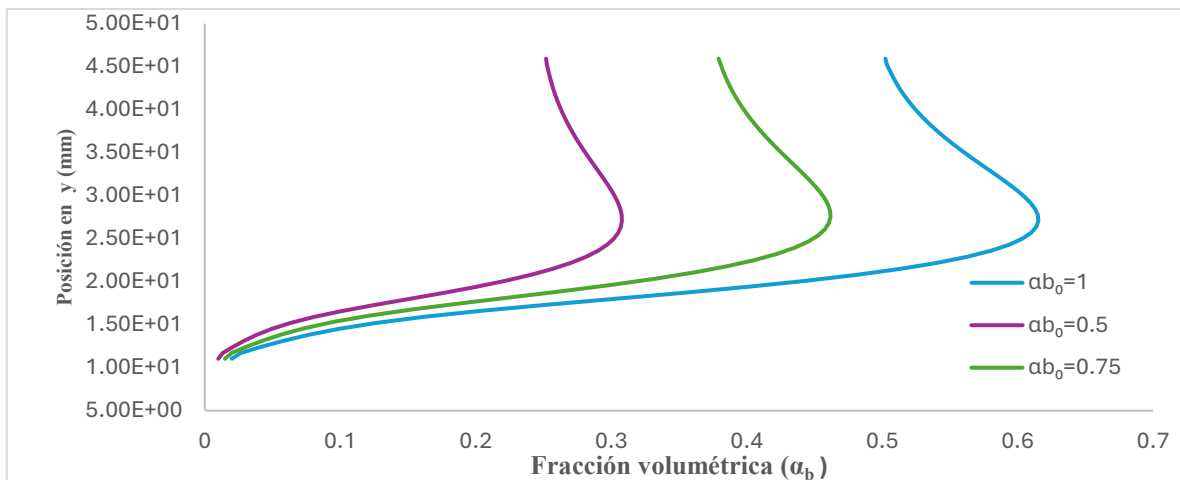


Figura 16. Fracción volumétrica (α) vs Posición en el eje Y para la velocidad 2 m/s en el corte 4.

Continuando con la tendencia de los cortes anteriores, la mayor fracción volumétrica es la presentada por la mayor velocidad de entrada 3m/s teniendo el punto de inflexión en el grupo de dosificación $\alpha_{b0} = 1$ en la posición y de 23.6 mm con un α de 0.77.

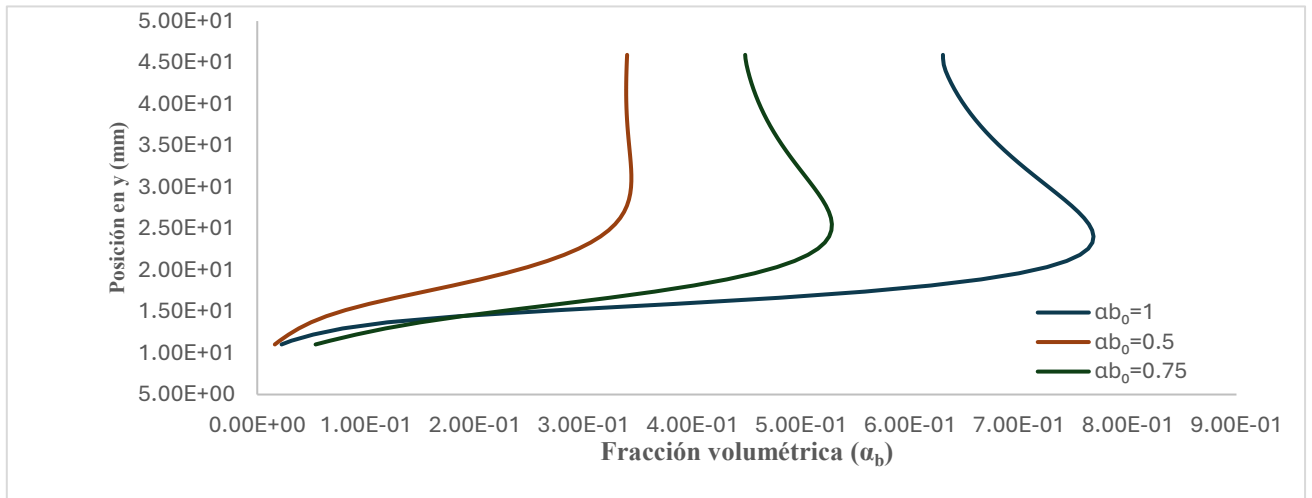


Figura 17. Fracción volumétrica (α) vs Posición en el eje Y para la velocidad 3 m/s en el corte 4.

7.3.2 Análisis del índice de mezcla (IM) a lo largo de corte en el eje X.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para el IM en distintos cortes del canal, bajo diferentes condiciones de velocidad y dosificación. Estos análisis permiten identificar cómo varía la eficiencia del proceso de mezclado a medida que los fluidos avanzan por el sistema, y proporcionan información clave para evaluar el impacto de las variables de diseño propuestas para la presente investigación sobre la dispersión del coagulante.

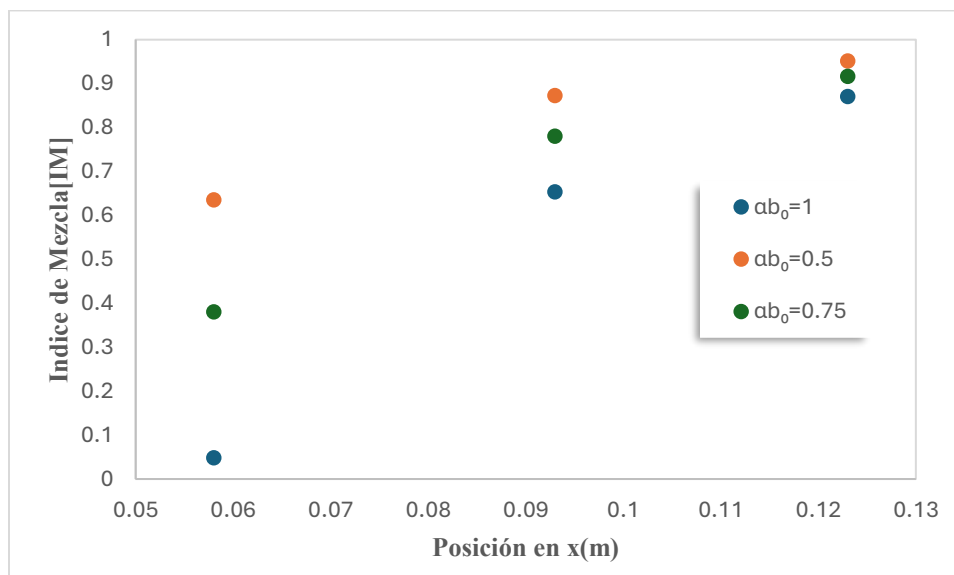


Figura 18. Índice de mezcla (IM) vs Posición en el eje X para la velocidad 1.5 m/s en cada uno de los cortes variando la dosificación.

En la *Figura 18* se presenta el comportamiento del índice de mezcla (IM) evaluado a lo largo de distintos cortes transversales del inyector tipo Venturi, con excepción del primer corte, en el cual solo circula agua, sin la inyección de coagulante. Para el análisis correspondiente, se fijó la velocidad del coagulante en 1.5 m/s y se variaron las relaciones de dosificación, entendidas como la proporción volumétrica entre el coagulante y el flujo principal de agua.

Los resultados indican que, en los cortes 2 y 3, un aumento en la relación de dosificación conduce a una disminución del índice de mezcla. Por ejemplo, en el corte 2, cuando la dosificación es baja ($\alpha_{b0} = 0.5$) se alcanza un IM de 0.635, mientras que con una dosificación alta de $\alpha_{b0} = 1$, es decir, cuando el flujo de coagulante es igual al flujo total de la entrada 2, el IM disminuye hasta 0.048. Este mismo comportamiento se replica en el corte 3, lo cual indica que, manteniendo constante la velocidad de inyección, una menor proporción de coagulante favorece la eficiencia del proceso de mezcla. Esta tendencia puede explicarse en que, al ingresar en una proporción reducida la carga volumétrica del coagulante, permite una interacción más eficiente y homogénea entre ambas corrientes, facilitando la dispersión del aditivo en las zonas iniciales del canal.

En contraste, en el corte 4 ubicado hacia el extremo final del inyector, en la región del difusor, se observa un comportamiento diferente, debido a que independientemente de la dosificación inicial, las tres curvas evaluadas en la *Figura 18* alcanzan valores elevados de IM de: 0.87, 0.92 y 0.95, respectivamente. Esto rápidamente indica que, las corrientes ya han experimentado suficiente distancia, tiempo de residencia y procesos de interacción para alcanzar un estado de máxima homogeneidad, es decir, en este punto, el proceso de dispersión de la fase coagulante se encuentra saturado, por lo que variaciones adicionales en la dosificación no generan diferencias significativas en la calidad de mezcla.

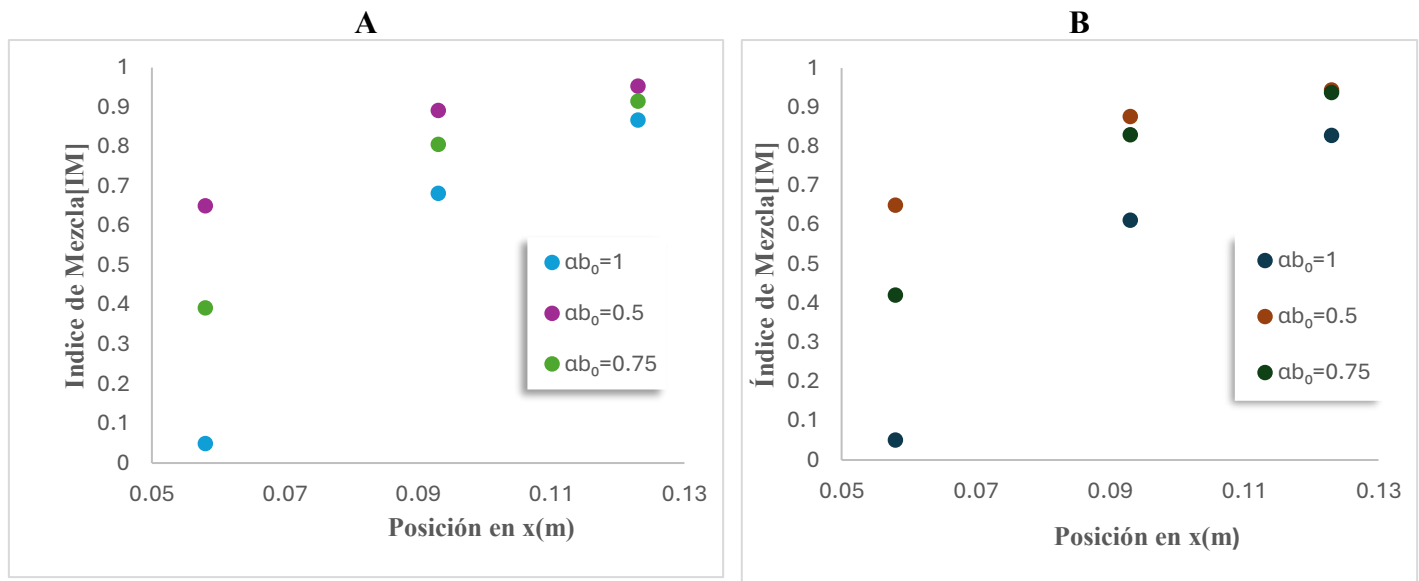


Figura 19. A) Índice de mezcla (IM) vs Posición en el eje x para la velocidad 2 m/s en cada uno de los cortes variando la dosificación. **B)** Índice de mezcla (IM) vs Posición en el eje x para la velocidad 3 m/s en cada uno de los cortes variando la dosificación.

En las Figuras 19A y 19B se analizan nuevamente los perfiles del índice de mezcla (IM) en función de la distancia a lo largo del inyector tipo Venturi, manteniendo los mismos cortes transversales y relaciones de dosificación (1, 0.5 y 0.75) evaluados anteriormente. La diferencia en este caso radica en que se incrementó la velocidad del flujo de coagulante a 2 m/s y 3 m/s, respectivamente, con el fin de estudiar el efecto de este parámetro sobre la eficiencia del proceso de mezcla.

De forma general, los resultados mantienen la misma tendencia observada en el caso anterior (1.5 m/s), donde una mayor relación de dosificación entre coagulante y agua tiene asociado un menor IM. Esta relación inversa se conserva en todos los cortes analizados, lo cual confirma que un exceso de coagulante dificulta su dispersión eficiente en las zonas iniciales del canal. No obstante, al aumentar la velocidad del coagulante, se identifica un leve

incremento en los valores absolutos del IM, posiblemente debido a una mayor generación de turbulencia que favorece la mezcla.

En el corte 4, el comportamiento varía ligeramente en la Figura 19B. A 3 m/s, las curvas correspondientes a las dosificaciones $\alpha_{b0} = 0.5$ y $\alpha_{b0} = 0.75$ alcanzan índices de mezcla más altos (0.943 y 0.937) en comparación con la relación $\alpha_{b0} = 1$ (0.827). Esto a grandes rasgos indica que, a velocidades elevadas, la mezcla mejora incluso con mayor dosificación, lo que favorece una homogenización completa al final del sistema.

9. CONCLUSIONES

A partir del desarrollo de la presente investigación, se concluye la viabilidad de emplear un modelo numérico basado en *Dinámica de fluidos computacional* (CDF) para el estudio del comportamiento de los fluidos involucrados en el proceso de mezcla rápida, utilizando un inyector tipo Venturi como dispositivo o dominio de estudio.

El modelo presentó una adecuada previsibilidad, al presentar un margen de error inferior al 6% en el parámetro de validación (la presión), lo que sustenta su potencial como herramienta de predicción para futuras variaciones en la geometría o condiciones de operación, permitiendo así reducir la dependencia de pruebas experimentales costosas y complejas.

Dentro del análisis de sensibilidad, y según el rango establecido en el diseño experimental, se identificó que la condición de mayor eficiencia de mezcla evaluada mediante el factor del Índice de mezcla (IM), se obtuvo para una velocidad de flujo de 2 m/s y una dosificación tipo B (relación 0.5). Este resultado evidencia la capacidad del modelo no solo para simular con precisión, sino también para extender su aplicación a un mayor número de escenarios y contextos que se encuentren dentro de los intervalos de operación definidos.

Adicionalmente, los valores de eficiencia de mezcla (IM) que se obtuvieron, dejan un precedente que respalda el empleo de los dispositivos Venturi como alternativas eficaces para la etapa de mezcla rápida en procesos de tratamiento de agua, destacando su utilidad práctica y aplicabilidad en escenarios reales.

No obstante, a pesar de los resultados favorables, es importante reconocer las limitaciones propias del modelo desarrollado. En este orden de ideas, se recomienda que para futuros estudios se incorpore el análisis de fenómenos adicionales como las reacciones químicas que es posible que se desarrollen entre fases, la influencia directa de la temperatura sobre las propiedades del sistema y, especialmente, la influencia de temperatura en el caso de tener modificaciones en la geometría impactando en la simetría, el realizar análisis tridimensional. Estas mejoras a la larga permitirán obtener representaciones aún más certeras del proceso, contribuyendo al diseño de tecnologías para la mezcla eficiente de fluidos.

10. REFERENCIAS

- Alam, M. M., Watanuki, K., & Takao, M. (2020). Numerical analysis of two-liquid flow in a micro-spiral channel. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 297-304. Retrieved from <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-1892-824> doi:10.1007/978-981-15-1892-824/F IGU RES/7
- Ali, S., & Castleberry, S. (2023). Investigating the hydrodynamics of intravenous drug infusions. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2023.123752> doi: 10.1016/j.ijpharm.2023.123752
- CENGEL, Y. A., & BOLES, M. (2015). *Termodinámica: Un enfoque ingenieril* (8.^a ed.). McGraw-Hill.
- Charrière, B., Decaix, J., & Goncalvès, E. (2015). A comparative study of cavitation models in a venturi flow. *European Journal of Mechanics B/Fluids*, 49 , 287-297. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.euromechflu.2014.10.003> doi: 10.1016/j.euromechflu.2014.10.003
- Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico. (2024). Comunicado de prensa sobre cifras de acceso, cobertura y calidad del agua potable en Colombia. CRA. <https://www.cra.gov.co>
- Demirel, E., & Aral, M. (2016, 11). Unified analysis of multi-chamber contact tanks and mixing efficiency based on vorticity field. part i: Hydrodynamic analysis. *Water*, 8 , 495. doi: 10.3390/w8110495
- de Vargas, L. (2004). Cepis - plantas de filtración rápida. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Retrieved from
- Díaz, H. (2016). Modelamiento fluido dinámico de un mezclador estático kenics estudio de influencia del ángulo de torsión helicoidal en calidad de mezcla.
- Gamisans, X., Sarrà, M., & Lafuente, F. J. (2004). Fluid flow and pumping efficiency in an ejector-venturi scrubber. *Chemical Engineering and Processing*, 43 , 127-136. doi: 10.1016/S0255-2701(03)00104-1
- Ghaemi, A., Hübner, M., Minceva, M., & Germann, N. (2021). Phase field analysis of binary mixtures with partially miscible components. *International Journal of Multiphase Flow*, 138 , 103613. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2021.103613> doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2021.103613

- Ghassemi, H., & Ashrafizadeh, S. M. (2015, 4). Experimental and numerical investigation on the performance of small-sized cavitating venturis. *Flow Measurement and Instrumentation*, 42 , 6-15. doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2014.12.007
- GRACIA, J. M. (2018). Análisis pérdidas de carga en tubos Venturi mediante técnicas CFD. Retrieved from
- GUÁQUETA, M. D. P. (2011). Diseño de la mejor configuración integrando tratamientos de purificación de agua utilizados en sistemas portátiles lifestraw y lifesaver bottle marcela del pilar guáqueta carvajal universidad de los andes facultad de ingeniería departamento de ingeniería química. Retrieved from <http://www.invdes.com.mx/antiores/Marzo2000/htm/cna82.html>.
- Hoffmann, M., Schlüter, M., & Rübiger, N. (2006). Experimental investigation of liquid-liquid mixing in T-shaped micro-mixers using laser Doppler velocimetry. Retrieved from
- Howe, K., Hand, D., Crittenden, J., Trussell, R. R., & Tchobanoglous, G. (2012). *Principles of water treatment* (Tech. Rep.). John Wiley & Sons, Inc.
- Huang, X., Li, G., & Wang, M. (2009). Cfd simulation to the flow field of venturi injector. *IFIP International Federation for Information Processing*, 294 , 805-815. Retrieved from <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4419-0211-53> doi: 10.1007/978-1-4419-0211-53/COVER
- López-Grimau, V., & Amante, B. (2011). Estudio de un sistema de potabilización de aguas superficiales con productos naturales en Burkina Faso. XV Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos Huesca.
- Manzano, J., Azevedo, B. M. D., Bomfim, G. V. D., Álvaro Royuela, Palau, C. V., & Thales, T. V. (2014). Design and prediction performance of venturi injectors in drip irrigation. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 18 , 1209-1217. doi: 10.1590/1807-1929/AGRIAMBL.V18N12P1209-1217
- Masgo, S. L. B. (2020, 1). Experimental and numerical study of the pressure of the water flow in a venturi tube. *Ingenius*, 2020 , 9-22. doi: 10.17163/INGS.N23.2020.01
- Masgo, S. L. B. T. (2019, 12). Estudio experimental y numérico de la presión del flujo de agua en un tubo Venturi. *Ingenius*, 9-22. doi: 10.17163/ings.n23.2020.01
- Moncada, G., & Pita, H. (2016). Simulación y validación experimental del proceso de mezcla de fluidos newtonianos y no newtonianos.

- Moncho, I. (2017). Procesos de mezcla en flujos turbulentos con técnicas de la mecánica de fluidos computacional (CFD).
- Montgomery, D. C. (2017). Design and analysis of experiments (I. J. W. . Sons, Ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Nino-Forero, L. F. (2017). Estudio del fenómeno de cavitación en un tubo de Venturi por medio de dinámica de fluidos computacional .Universidad de los Andes.
Retrieved from <http://hdl.handle.net/1992/19061>
- Robles, T. J. M. (2021). Evaluación del efecto del caudal de agua en la tasa de transferencia de oxígeno de aereadores Venturi.
- Ttito, J. L. (2018). DiseÑo, simulaciÓn y evaluaciÓn de deprimÓgenos tipo venturi, aplicado a la inyecciÓn de aditivos alimentarios.
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). An introduction to computational fluid dynamics second edition (Tech. Rep.). Retrieved from www.pearsoned.co.uk/versteeg
- Zhao, P., Yang, Q., & Ge, H. (2019). reactingfoam-sci: An open source CFD platform for reacting flow simulation. Computers and Fluids, 190 , 114-127. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2019.06.008>
doi: 10.1016/j.compfluid.2019.06.008

ANEXOS

Análisis del Índice de mezcla lo largo de la geometría

Tabla 11. Consolidado de resultados del índice de Mezcla del análisis de sensibilidad.

Corrida	CORTE 1	CORTE 2	CORTE 3	CORTE 4
1.5A	0	0.048012	0.653618	0.870210
1.5B	0	0.635345	0.872989	0.951386
1.5C	0	0.380567	0.780083	0.916512
2A	0	0.049073	0.681666	0.867068
2B	0	0.650253	0.891126	0.953198
2C	0	0.392300	0.805929	0.915237
3A	0	0.050627	0.611616	0.827468
3B	0	0.650252	0.875865	0.943473
3C	0	0.420451	0.829885	0.937276