Aplicación de la Cavitación Hidrodinámica en el Tratamiento de la Carga Orgánica de Aguas Representativas del Proceso de Beneficio Húmedo del Café

Angie Gabriela Roa Martínez y Karoll Yuliana Palencia Mora

Trabajo de Grado para optar por el título de Ingeniero Químico

Modalidad Trabajo de Investigación

Directora

María Mercedes Duarte Mantilla

Magíster en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

A mis padres, por brindarme la oportunidad de estudiar y por todos los esfuerzos que realizaron para que pudiera alcanzar esta meta. Gracias por su apoyo, comprensión y confianza en cada etapa de este camino, especialmente en los momentos en los que las dificultades hicieron que el objetivo pareciera más lejano. A mi novio, por acompañarme durante esta etapa y ser un apoyo constante en los días más retadores. Gracias por tu paciencia, tus palabras de ánimo y por recordarme, incluso en los momentos de mayor incertidumbre, que siempre vale la pena seguir adelante. Y, finalmente, a mis amigos, por su compañía, su ayuda y por todos los momentos que hicieron más ligero y agradable este recorrido. Cada conversación, cada consejo y cada instante compartido dejaron una huella importante en esta etapa de mi vida.

-Angie Roa

A mi madre, quien ha sido mi mayor ejemplo de fortaleza y dedicación. Gracias por cada sacrificio realizado, por creer en mí y por brindarme el apoyo necesario para alcanzar cada una de mis metas. Su esfuerzo y confianza han sido fundamentales en este camino. A mis hermanos y amigos, por acompañarme durante este proceso, por sus palabras de aliento, su comprensión y por ser una fuente constante de motivación para seguir adelante. Su compañía y apoyo hicieron más llevaderos los desafíos encontrados a lo largo de esta etapa. Y especialmente a mi pareja, por estar a mi lado en cada momento, por su paciencia, apoyo incondicional y por impulsarme a no rendirme en los momentos más difíciles. Gracias por celebrar cada logro conmigo y por ser un pilar importante durante este proceso académico y personal. A todos ustedes, que formaron parte de este recorrido y contribuyeron de una u otra manera a la culminación de esta meta, les dedico este trabajo con profundo amor, gratitud y admiración. Gracias por creer siempre en mí.

-Karoll Palencia

Agradecimientos

Agradecemos, en primer lugar, a nuestras familias y seres queridos, por su apoyo, comprensión y acompañamiento durante nuestra formación académica. Su confianza y aliento fueron fundamentales para culminar esta etapa.

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a nuestra directora de proyecto, por su orientación, dedicación y disposición para compartir sus conocimientos, así como por su acompañamiento durante el desarrollo de esta investigación.

A la Escuela de Ingeniería Química y a la Universidad Industrial de Santander, por brindarnos los espacios, recursos y herramientas que hicieron posible la ejecución de este trabajo. También al personal de laboratorio que contribuyeron al desarrollo experimental y al fortalecimiento de nuestra formación profesional. Asimismo, agradecemos a nuestros profesores, quienes a lo largo de la carrera compartieron sus conocimientos y experiencias, dejando enseñanzas que trascenderán más allá de este proyecto y de nuestra etapa universitaria.

Finalmente, agradecemos a nuestros amigos y compañeros, por su apoyo, colaboración y por todos los momentos compartidos durante estos años. Su compañía hizo de este camino una experiencia más enriquecedora y memorable. A todas las personas que, de una u otra manera, aportaron a la realización de este trabajo, nuestro más profundo agradecimiento.

Este trabajo representa no solo el resultado de un proceso de investigación, sino también el apoyo y las enseñanzas de todas las personas que hicieron parte de este camino. A todos ustedes, gracias por acompañarnos en la construcción de esta meta.

Tabla de Contenido

Tabla de Contenido **4**
Lista de figuras **7**
Introducción **11**
1. Objetivos **13**
1.1. Objetivo General: 13
1.2. Objetivos Específicos: 13
2. Marco Conceptual **14**
2.1 Fundamentos de la Cavitación Hidrodinámica 14
2.1.1 Numero de Cavitación 14
2.1.2 Criterio de Inicio de Cavitación 15
2.2 Dispositivos para la Generación de Cavitación Hidrodinámica 15
2.3 Sistema Rotor-estator SPR 16
2.3.1 Variables de Referencia 17
2.3.2 Parámetros Geométricos Relevantes 17
2.4 Características Fisicoquímicas de las Aguas del Beneficio Húmedo del Café 18
2.5 Sacarosa como Molécula Modelo 19
2.6 Bases Teóricas de las Técnicas Analíticas Utilizadas 19
2.6.1 Refractometría [°Brix] 20
2.6.2 Medición de pH 20
2.6.3 Oxígeno Disuelto (OD) 21
2.6.4 Conductividad Eléctrica 21
3. Estado del Arte **23**
4. Metodología **26**
4.1 Alistamiento y Adecuación del Sistema de Cavitación Hidrodinámica 26
4.1.1 Intervenciones Realizadas Durante la Puesta en Marcha 29

4.1.2 Calibración de Instrumentos de Medición 31
4.2 Ajuste de Parámetros de Operación y Determinación del Régimen de Cavitación 31
4.2.1 Variables de Operación del Sistema 31
4.2.2. Barrido de Cv Entre Niveles de Presión 33
4.2.3 Pruebas Preliminares de Operación Hidrodinámica 34
4.3 Selección y Caracterización de la Molécula Modelo 34
4.3.1 Selección y Preparación de la Sacarosa Como Molécula Modelo 34
4.3.2 Diseño de Experimentos 35
4.3.3 Protocolo de Ejecución de Ensayos y Toma de Muestras 37
4.3.4 Tratamiento de los Datos: Línea Base y Constante Cinética 39
5. Análisis de Resultados 41
5.1. Caracterización del Sistema y Determinación del Régimen de Cavitación 41
5.2 Caracterización Fisicoquímica Inicial de las Soluciones de Sacarosa 42
5.3 Evolución Temporal de los Parámetros Fisicoquímicos Durante la Cavitación 44
5.3.1 Evolución Temporal de los °Brix 44
5.3.2 Repetibilidad de las Corridas del Punto Central 47
5.3.3 Evolución Temporal del pH, OD y Densidad 49
5.4 Efecto de los Parámetros de Operación Sobre la Transformación (DCC/RSM) 52
5.4.1 Ajuste Cinético 53
5.4.2 Análisis de Varianza ANOVA de la Reducción de °Brix 54
5.4.3 Análisis complementario del Régimen Hidrodinámico (Número de Cavitación) 57
5.4.4 Limitaciones del Diseño Experimental en Sistemas de Recirculación 60
5.5. Síntesis de Condiciones de Operación y Proyección a Aguas Reales 60
6. Conclusiones 63
7. Recomendaciones 65
Referencias Bibliográficas 66

Lista De Tablas

Tabla 1.Limitaciones identificadas y respuestas de adecuación en la puesta en funcionamiento 30
Tabla 2.Variables independientes de entrada del sistema de cavitación 32
Tabla 3.Variables dependientes del sistema de cavitación 32
Tabla 4.Estimación preliminar del barrio de σ de entrada entre niveles de presión 33
Tabla 5.Matriz Experimental 36
Tabla 6.Recirculaciones acumuladas 38
Tabla 7.Condiciones operativas exploradas y número de cavitación calculado 41
Tabla 8.Caracterización fisicoquímica inicial de las soluciones de sacarosa 43
Tabla 9.Valores de Meseta y Δ de pH, OD, Conductividad y Densidad 49
Tabla 10. Indicadores importantes en el análisis estadístico para %reducción °Brix 55
Tabla 11.Indicadores importantes en el análisis estadístico para Cv 58

Lista de figuras

Figura 1.Diagrama de la metodología del proyecto 26
Figura 2.Fotografía del montaje final con componentes etiquetados 27
Figura 3.Interfaz gráfica de control del sistema 28
Figura 4.Grafica con y sin la fase de dilución para concentración nominal de 9.09% 44
Figura 5.Grafica con y sin la fase de dilución para concentración nominal de 23.37% 45
Figura 6.Grafica con y sin la fase de dilución para concentración nominal de 37.5% 46
Figura 7.Evolución de la replicas y su reproducibilidad 48
Figura 8. Superficie 3D para reducción °Brix 56
Figura 9.Superficie de respuesta para número de cavitación 59

Lista de Apéndices

Los apéndices están disponibles en el Repositorio Institucional

Apéndice A. Caracterización del Mucílago del Café

Apéndice B. Parámetros Fisicoquímicos de las Aguas Mieles del Café

Apéndice C. Especificaciones Técnicas

Apéndice D. Perfiles de Temperatura con y sin Serpentín

Apéndice E. Protocolo Detallado de Operación, Seguridad y Manejo de Residuos

Apéndice F. Memorias de Cálculo del Número de Cavitación

Apéndice G. Datos Brutos de las Pruebas Preliminares Hidrodinámicas

Apéndice H. Planos PFD y P&ID

Apéndice I. Diseño de Experimentos

Resumen

Título: Aplicación de la Cavitación Hidrodinámica en el Tratamiento de la Carga Orgánica de Aguas Representativas del Proceso de Beneficio Húmedo del Café

Autores: Angie Gabriela Roa Martínez, Karoll Yuliana Palencia Mora

Palabras Clave: Aguas Mieles, Cavitación Hidrodinámica, Degradación de materia orgánica, Sacarosa, Tratamiento de aguas residuales.

Descripción: El beneficio húmedo del café demanda grandes volúmenes de agua y genera efluentes —aguas mieles— de elevada carga orgánica que no pueden verterse sin tratamiento. La cavitación hidrodinámica es una tecnología emergente capaz de degradar materia orgánica mediante la formación y colapso de microburbujas.

En este trabajo se realizó la puesta en funcionamiento y experimentación de una planta piloto de cavitación hidrodinámica tipo rotor-estator de ondas de choques (Shockwave Power Reactor, SPR), empleada en una investigación doctoral de la Universidad Industrial de Santander. Para la evaluación del sistema en este proyecto, se utilizó una solución modelo de agua destilada y sacarosa en tres niveles de concentración, seleccionando la sacarosa como compuesto representativo en lugar de utilizar aguas mieles reales.

Mediante un diseño central compuesto (DCC) se evaluó el efecto de la concentración de sacarosa y de la presión de entrada sobre variables fisicoquímicas como °Brix, pH, conductividad, oxígeno disuelto y densidad, con el fin de caracterizar el comportamiento del cavitador bajo diferentes condiciones de operación. Los resultados permitieron establecer las condiciones de operación bajo las cuales el sistema genera el régimen cavitante, delimitar la sensibilidad de las variables fisicoquímicas globales como indicadores de transformación y evidenciar que, bajo las condiciones evaluadas, los cambios fisicoquímicos de la solución modelo se mantuvieron dentro de la incertidumbre de las técnicas empleadas. Con ello, el trabajo genera la base experimental y metodológica para futuras investigaciones orientadas al tratamiento de aguas mieles reales, en las que se plantea la Demanda Química de Oxígeno como principal variable de respuesta, contribuyendo al desarrollo de tecnologías sostenibles para el manejo de efluentes del sector cafetero.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Directora: María Mercedes Duarte Mantilla, Magíster en Ingeniería Química

Abstract

Title: Application of Hydrodynamic Cavitation in the Treatment of the Organic Load of Representative Wastewater from the Wet Coffee Processing

***Authors*:** Angie Gabriela Roa Martínez, Karoll Yuliana Palencia Mora

***Keywords*:** Coffee wastewater, Hydrodynamic cavitation, Organic matter degradation, Sucrose, Wastewater treatment.

***Description*:** Wet coffee processing requires large volumes of water and generates effluents —coffee wastewater— with a high organic load that cannot be discharged without treatment. Hydrodynamic cavitation is an emerging technology capable of degrading organic matter through the formation and collapse of microbubbles.

In this study, a hydrodynamic cavitation pilot plant based on a rotor-stator shockwave reactor (Shockwave Power Reactor, SPR), used in a doctoral research project at the Universidad Industrial de Santander, was adapted, commissioned and experimentally evaluated. For the system assessment, a model solution consisting of distilled water and sucrose at three concentration levels. Sucrose was selected as a representative compound instead of using real coffee wastewater.

Using a central composite design, the effects of sucrose concentration and inlet pressure on physicochemical variables such as °Brix, pH, conductivity, dissolved oxygen, and density were evaluated to characterize the behavior of the cavitation reactor under different operating conditions. The results made it possible to establish the operating conditions under which the system generates the cavitation regime, to delimit the sensitivity of the global physicochemical variables as indicators of transformation, and to show that, under the conditions evaluated, the physicochemical changes of the model solution remained within the uncertainty of the techniques employed. On this basis, the work provides the experimental and methodological foundation for future research focused on the treatment of real coffee wastewater —with Chemical Oxygen Demand proposed as the main response variable— thereby contributing to the development of sustainable technologies for the management of effluents from the coffee sector.

* Degree project.
** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: María Mercedes Duarte Mantilla, Master in Chemical Engineering

Introducción

Colombia es el tercer productor y exportador mundial de café, con una participación cercana al 8 % del mercado global (Legiscomex, 2024). No obstante, el beneficio húmedo de este grano genera efluentes de alta carga contaminante, denominados aguas mieles, en volúmenes que alcanzan hasta los 40 L/kg de café pergamino seco. Estas aguas residuales se caracterizan por una elevada concentración de materia orgánica, registrando valores de Demanda Química de Oxígeno (DQO) superiores a los 15.000 mg/L, lo que evidencia una elevada carga orgánica y un alto potencial contaminante cuando son vertidas sin tratamiento adecuado (Torres-Valenzuela et al. 2019). En este contexto, la búsqueda de tecnologías eficientes para el tratamiento de aguas mieles es una prioridad. Entre las alternativas emergentes destaca la cavitación hidrodinámica, un proceso basado en la generación, crecimiento y colapso implosivo de microburbujas que liberan la energía suficiente para promover la degradación de la materia orgánica persistente.

Sin embargo, a pesar de su potencial, la información sobre la aplicación de esta tecnología en aguas mieles es escasa o se encuentra protegida bajo secreto industrial. Por lo tanto, se requiere abordar la tecnología mediante una caracterización inicial del equipo. En consecuencia, este estudio se centra en evaluar el sistema disponible en la UIS mediante pruebas preliminares a escala de laboratorio en la planta piloto de cavitación hidrodinámica tipo rotor-estátor de ondas de choque (Shockwave Power Reactor, SPR), empleando una solución modelo de agua destilada y sacarosa como un sistema simplificado y reproducible. La sacarosa se seleccionó como compuesto representativo de los carbohidratos presentes en el mucílago de café, lo que permite aislar los efectos del fenómeno sobre una matriz orgánica de composición conocida.

La pregunta de investigación que guía este estudio es: ¿bajo qué condiciones operativas el sistema de cavitación hidrodinámica tipo rotor-estátor genera de manera efectiva el régimen de

cavitación, y qué cambios fisicoquímicos produce sobre una solución modelo de sacarosa representativa de la carga orgánica del mucílago? Resolver esta interrogante establecerá las bases experimentales para la posterior aplicación de la tecnología en efluentes reales del beneficio húmedo del café.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General:

Aplicar la cavitación hidrodinámica en el tratamiento de aguas representativas del proceso de beneficio húmedo del café, determinando, mediante pruebas preliminares con una solución modelo, las condiciones de operación bajo las cuales el sistema rotor–estátor genera el fenómeno y la respuesta fisicoquímica asociada a la transformación de la materia orgánica.

1.2. Objetivos Específicos:

1. Adecuar y poner en operación de una planta piloto de cavitación hidrodinámica disponible en la Escuela de Ingeniería Química de la UIS, por medio del ajuste de los equipos e instrumentación, determinando las condiciones de caudal, presión y temperatura bajo las cuales el reactor rotor–estátor de ondas de choque (Shockwave Power Reactor, SPR) genera el régimen de cavitación.
2. Caracterizar la respuesta fisicoquímica de soluciones modelo de sacarosa sometidas a cavitación hidrodinámica, mediante la ejecución de un diseño central compuesto y el seguimiento temporal de los parámetros medibles con la instrumentación disponible (°Brix, conductividad, pH, oxígeno disuelto y densidad).
3. Determinar el efecto de la concentración de sacarosa y de la presión de entrada sobre el grado de transformación de la solución modelo, identificando mediante metodología de superficie de respuesta las condiciones de operación más favorables dentro del dominio experimental explorado.

2. Marco Conceptual

2.1 Fundamentos de la Cavitación Hidrodinámica

La cavitación hidrodinámica es un fenómeno que ocurre cuando un líquido circula a través de una región donde la presión local disminuye por debajo de su presión de vapor, sin que exista un cambio significativo de temperatura. Esta reducción de presión provoca la formación de cavidades o burbujas de vapor en el seno del fluido, generando un sistema bifásico líquido-vapor. Posteriormente, cuando dichas burbujas son transportadas hacia zonas de mayor presión, colapsan de forma violenta, produciendo microchorros, ondas de choque, elevadas presiones y temperaturas locales, así como intensos fenómenos de turbulencia y formación de vórtices. Estos efectos físicos y químicos hacen de la cavitación hidrodinámica una tecnología de interés para aplicaciones como el tratamiento de aguas residuales, la desinfección, la degradación de contaminantes y el procesamiento agroindustrial (Domínguez Martínez, 2018; Gutiérrez-Mosquera, Arias-Giraldo & Cardona-Naranjo, 2019).

2.1.1 Numero de Cavitación

El número de cavitación constituye el parámetro adimensional más utilizado para caracterizar la propensión de un flujo líquido a cavitar. Su interés práctico radica en que permite relacionar las condiciones hidrodinámicas del sistema con la posibilidad de que, en alguna región del campo de flujo, la presión local descienda hasta valores próximos a la presión de vapor del líquido. En consecuencia, este parámetro se emplea de manera extensiva en el análisis de válvulas, toberas, Venturi, placas de orificio, turbomáquinas y reactores de cavitación hidrodinámica (Franc, J.-P., & Michel, J.-M., 2005). Asimismo, se considera uno de los parámetros más relevantes para evaluar la intensidad del fenómeno y comparar el desempeño de diferentes dispositivos generadores de cavitación, ya que está directamente relacionado con las condiciones de presión y

velocidad que gobiernan la formación y colapso de las burbujas (Gutiérrez-Mosquera et al., 2019; Maldonado Reyes, 2025).

La forma general más extendida del número de cavitación se expresa como

$$\sigma = \frac{P_{ref} - P_v}{\frac{1}{2}\rho v_{ref}^2} \qquad \text{(Ec. 1)}$$

Donde, P_{ref} es la presión de referencia absoluta del flujo, en Pa; P_v es la presión de vapor del líquido a la temperatura de operación, en Pa; ρ es la densidad del líquido, en kg/m^3 y v_{ref} es la velocidad de referencia, en m/s. En este documento, el número de cavitación se denota indistintamente como σ o Cv; ambos símbolos son sinónimos y no deben confundirse con el coeficiente de flujo de válvulas.

2.1.2 Criterio de Inicio de Cavitación

De manera operacional, el inicio de la cavitación suele expresarse mediante la condición σ ≤ σi, donde σi es el número de cavitación incipiente. Este valor no es universal, ya que depende de factores como la geometría del dispositivo, la rugosidad superficial, la temperatura del líquido, el contenido de gases disueltos, la distribución de núcleos de cavitación, la intensidad de la turbulencia y el método experimental empleado. Por esta razón, es necesario distinguir entre el número de cavitación incipiente, asociado a la primera aparición detectable de cavidades, y el número de cavitación de diseño u operación, empleado para garantizar un régimen de cavitación suficientemente intenso (Franc & Michel, 2005; Brennen, 2014).

2.2 Dispositivos para la Generación de Cavitación Hidrodinámica

La cavitación hidrodinámica puede generarse mediante diferentes configuraciones diseñadas para producir reducciones locales de presión, las cuales se clasifican en dispositivos estáticos y dinámicos. Los dispositivos estáticos generan cavitación a partir de cambios en la geometría del flujo; entre los más utilizados se encuentran los tubos Venturi y las placas de orificio,

donde la aceleración del fluido produce una disminución de la presión local que favorece la formación y el posterior colapso de cavidades de vapor (Gutiérrez-Mosquera et al., 2019; Wang et al., 2021). Por otra parte, los dispositivos dinámicos generan cavitación mediante elementos móviles que transfieren energía mecánica al fluido. Dentro de esta categoría se destacan los reactores tipo rotor-estator, en los cuales la interacción entre un rotor giratorio y un estator fijo produce fluctuaciones periódicas de presión que favorecen la nucleación, crecimiento y colapso de burbujas de cavitación de manera más eficiente y controlada (Petkovšek et al., 2013; Šarc et al., 2017; Gostiša et al., 2021). De acuerdo con estudios recientes desarrollados en la Universidad Industrial de Santander, los dispositivos Venturi, placas de orificio y reactores rotor-estator constituyen las configuraciones más empleadas para aplicaciones de tratamiento de aguas residuales debido a su eficiencia en la degradación de contaminantes y en los procesos de desinfección (Granados Alba & Lemus Moreno, 2024; Maldonado Reyes, 2025).

Debido a su capacidad para generar cavitación de forma controlada y a su elevada eficiencia energética, los reactores rotor-estator han recibido creciente atención en aplicaciones de intensificación de procesos, tratamiento de aguas residuales y degradación de compuestos orgánicos, razón por la cual constituyen el objeto de estudio de este trabajo.

2.3 Sistema Rotor-estator SPR

En los reactores rotor–estator, la cavitación hidrodinámica se genera por la interacción entre un rotor en movimiento y un estator fijo. La rotación a altas velocidades produce fuertes gradientes de velocidad, elevadas tasas de cizalla, vórtices y fluctuaciones periódicas de presión en el fluido. (Malkapuram & Sonawane, 2025). Cuando estas reducciones locales de presión alcanzan valores inferiores a la presión de vapor del líquido, se forman cavidades de vapor que posteriormente colapsan al ingresar a regiones de mayor presión (Jyoti & Pandit, 2001).

En sistemas rotor–estator que incorporan orificios o cavidades geométricas, el fenómeno se intensifica debido a la aceleración local del fluido a través de dichas restricciones. La combinación de efectos rotacionales y aceleraciones localizadas favorece la formación de zonas de baja presión, microchorros y altos niveles de turbulencia, incrementando la intensidad de la cavitación y la transferencia de energía al medio líquido.

2.3.1 Variables de Referencia

La velocidad de referencia más empleada en este tipo de sistemas es la velocidad periférica de la punta del rotor:

$$U_{tip} = \omega R = \pi D N \qquad \text{(Ec. 2)}$$

donde **ω** es la velocidad angular en [rad/s] y **R** es el radio del rotor, **D** es el diámetro del rotor y **N** la frecuencia de rotación [rev/s]. En rotores cavitantes, la velocidad periférica constituye la escala dinámica dominante porque controla la magnitud de la aceleración tangencial, la intensidad de la cizalla y la frecuencia de paso rotor–estator.

2.3.2 Parámetros Geométricos Relevantes

Los principales parámetros geométricos que gobiernan el desempeño de los reactores de cavitación hidrodinámica tipo rotor-estator (SPR) incluyen el diámetro o radio del rotor, la holgura rotor-estator, el número y geometría de dientes, ranuras u orificios, el diámetro de las perforaciones, el área abierta total, el patrón de distribución angular y la profundidad de las cavidades. Adicionalmente, variables operativas como la velocidad de rotación, el caudal y la presión de operación influyen directamente sobre la intensidad de la cavitación. Diversos estudios han demostrado que una menor holgura entre rotor y estator, una mayor velocidad periférica y configuraciones geométricas que favorezcan la generación de vórtices y fluctuaciones periódicas de presión incrementan la velocidad local del fluido, disminuyen el número de cavitación efectivo

y favorecen la nucleación, crecimiento e implosión de burbujas, intensificando así el fenómeno de cavitación y sus efectos mecánicos y químicos (Petkovšek et al., 2013; Šarc et al., 2017; Gostiša et al., 2021; Granados Alba & Lemus Moreno, 2024; Maldonado Reyes, 2025).

2.4 Características Fisicoquímicas de las Aguas del Beneficio Húmedo del Café

Las aguas mieles procedentes del beneficio húmedo del café son caracterizadas por ser un a agua acida con alto contenido de material orgánico, este tipo de aguas también se caracteriza por el alto nivel de turbiedad y color. Su conductividad suele ser alta por las sales disueltas, y su pH ácido (4,0–4,5) refleja la abundancia de iones libres de hidrógeno. El grado de descomposición es elevado por la presencia de amonio y sales generadas en procesos fermentativos asociados a la alta concentración de azúcares (*Torres Valenzuela et al., 2019*). Además, contienen compuestos bioactivos —cafeína, ácidos acéticos, propiónico y valérico, fenoles, entre otros— de potencial interés industrial (*Aguilera et al., 1998*). Comparada con las aguas negras urbanas (500–1000 mg/L), la carga orgánica del aguamiel resulta de 7 a 13 veces mayor (*Acarley & Quipuzco, 2020*). (Apéndice A. Parámetros Fisicoquímicos de las Aguas Mieles del Café).

Estas aguas se generan durante el beneficio húmedo del café, proceso en el cual se emplea agua para remover la pulpa y el mucílago que recubren el grano. El mucílago constituye una matriz rica en carbohidratos y compuestos pécticos, responsables de gran parte de la carga orgánica presente en las aguas residuales del proceso. De acuerdo con Braham y Bressani (1978), en base seca los carbohidratos representan aproximadamente el 83,77 % de la composición del mucílago, distribuidos principalmente en sustancias pécticas (≈36 %), azúcares reductores como glucosa y fructosa (≈30 %), azúcares no reductores, principalmente sacarosa (≈20 %), y celulosa junto con cenizas (≈17 %). Por su parte, Puerta y Ríos (2011) reportan que el mucílago fresco contiene entre

85 y 91 % de agua y entre 6,2 y 7,4 % de azúcares, características que favorecen su rápida fermentación natural.

2.5 Sacarosa como Molécula Modelo

Aunque la sacarosa no constituye la fracción predominante de los carbohidratos presentes en el mucílago de café, su utilización como compuesto modelo permite estudiar de manera controlada los mecanismos fundamentales de transformación inducidos por cavitación, tales como la hidrólisis, la oxidación por radicales libres y la degradación de materia orgánica. El empleo de compuestos modelo es una estrategia ampliamente utilizada en ingeniería química y en procesos de oxidación avanzada debido a que facilita el control de las variables experimentales, mejora la reproducibilidad de los ensayos y permite comprender mecanismos cinéticos antes de abordar sistemas multicomponentes de mayor complejidad (Levenspiel, 1999; Gogate & Pandit, 2011). En el ámbito específico de la cavitación hidrodinámica, diversos estudios han utilizado compuestos orgánicos puros para evaluar fenómenos de degradación y remoción de carga orgánica, debido a que permiten aislar el efecto de las variables operativas y del fenómeno cavitacional sobre el sustrato de interés (Alves et al., 2019; Malkapuram y Sonawane, 2025). Adicionalmente, la sacarosa presenta ventajas experimentales asociadas a su alta solubilidad en agua, disponibilidad comercial, estabilidad química y facilidad de preparación, características que favorecen su empleo como molécula modelo para representar la fracción de azúcares no reductores presentes en el mucílago de café antes de avanzar hacia matrices más complejas que contienen glucosa, fructosa y otros compuestos orgánicos.

2.6 Bases Teóricas de las Técnicas Analíticas Utilizadas

Con el fin de evaluar los cambios fisicoquímicos inducidos por la cavitación hidrodinámica en las soluciones de sacarosa, se emplearon técnicas que monitorean la concentración de sólidos

disueltos, la acidez del medio, la concentración de oxígeno disuelto y la presencia de especies iónicas. A continuación, se describen sus principios, utilidad y limitaciones.

2.6.1 Refractometría [°Brix]

La refractometría es una técnica basada en la medición del índice de refracción de una solución, propiedad óptica directamente relacionada con la concentración de sustancias disueltas. El índice de refracción corresponde a la relación entre la velocidad de la luz en el vacío y su velocidad en el medio analizado, lo que permite estimar de manera rápida y no destructiva el contenido de sólidos solubles presentes en una muestra líquida (AOAC International, 2019).

Los resultados se expresan comúnmente en grados Brix [°Brix], definidos como gramos de sacarosa contenidos en 100 g de solución. En soluciones acuosas de sacarosa, existe una relación directa entre la concentración del soluto y el valor de °Brix, por lo que este parámetro constituye una herramienta útil para monitorear posibles cambios asociados a procesos de degradación o transformación de la molécula modelo durante la cavitación hidrodinámica (Nielsen, 2017).

2.6.2 Medición de pH

El pH es una medida de la actividad de los iones hidrógeno (H^+) presentes en una solución y constituye un indicador de su grado de acidez o alcalinidad. Su determinación se realiza mediante potenciometría utilizando un electrodo de vidrio sensible a los cambios de concentración de protones y un electrodo de referencia que proporciona un potencial constante (Harris, 2020; Skoog et al., 2018).

La diferencia de potencial generada entre ambos electrodos se relaciona con el pH de la solución de acuerdo con la ecuación de Nernst. En el contexto de esta investigación, el monitoreo del pH permite identificar posibles modificaciones químicas derivadas de la cavitación, tales como la formación de compuestos ácidos o cambios en el equilibrio químico del sistema (Skoog et al., 2018). Entre las principales limitaciones de esta técnica se encuentran su sensibilidad a la

temperatura, la necesidad de calibración periódica con soluciones patrón y la posible interferencia de especies presentes en medios de elevada fuerza iónica (Harris, 2020).

2.6.3 Oxígeno Disuelto (OD)

El oxígeno disuelto (OD) corresponde a la concentración de oxígeno molecular presente en una solución líquida y se expresa en mg/L. Este parámetro es utilizado para evaluar la calidad del agua, así como fenómenos de transferencia de masa, aireación y actividad biológica en sistemas acuáticos (Wetzel, 2001; APHA et al., 2023). La medición del OD puede realizarse mediante sensores electroquímicos u ópticos. En los sensores electroquímicos, el oxígeno difunde a través de una membrana selectiva y participa en reacciones de reducción que generan una señal eléctrica proporcional a su concentración, mientras que los sensores ópticos se basan en fenómenos de luminiscencia y apagamiento por oxígeno (Hach, 2020; APHA et al., 2023).

En procesos de cavitación hidrodinámica, la concentración de oxígeno disuelto puede modificarse debido a la formación, crecimiento y colapso de cavidades, los procesos de aireación asociados y las variaciones de temperatura generadas durante la operación. Sin embargo, la interpretación de este parámetro debe realizarse con precaución, ya que su solubilidad depende de factores como la temperatura, la presión atmosférica y la composición del medio líquido (Malkapuram y Sonawane, 2025; APHA et al., 2023).

2.6.4 Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica es una medida de la capacidad de una solución para transportar corriente eléctrica y depende de la concentración, movilidad y naturaleza de los iones presentes en el medio (Harris, 2020; Skoog et al., 2018). Su determinación se realiza mediante la aplicación de una diferencia de potencial entre dos electrodos, registrando la corriente generada como consecuencia del movimiento de las especies cargadas. Este parámetro proporciona información

indirecta sobre cambios en la composición química de la solución y sobre la presencia de especies ionizables formadas durante el tratamiento (Skoog et al., 2018).

En el presente estudio, la conductividad constituye un indicador complementario para evaluar posibles transformaciones inducidas por la cavitación hidrodinámica. Sin embargo, se trata de una técnica no específica, ya que la señal obtenida corresponde al efecto combinado de todos los iones presentes en la muestra (Harris, 2020).

3. Estado del Arte

El proceso convencional del beneficio húmedo de café implica altas cantidades de agua, desencadenando una alta huella hídrica, además de la generación de efluentes —aguas mieles— de elevada carga orgánica que no pueden verterse sin tratamiento por el riesgo para las comunidades cercanas. En este contexto, las tecnologías convencionales suelen ser costosas y demandar grandes áreas, lo que dificulta su adopción por pequeños y medianos caficultores. (González Ipuz & Vega Rojas, 2022); de ahí el interés en alternativas compactas, de bajo costo operativo y escalables, condición que la cavitación hidrodinámica satisface por su simplicidad mecánica y su eficiencia energética. Este fenómeno se basa en la formación, crecimiento y colapso de microburbujas que, al implosionar, liberan energía suficiente para fragmentar y transformar materia orgánica, tornándose una tecnología emergente de tratamiento (Zheng et al., 2022).

El estudio de Zheng et al. (2022) presenta una revisión exhaustiva respecto a la cavitación hidrodinámica, analizando las diferentes configuraciones de reactores, los fenómenos de generación de radicales y las variables operativas para la degradación de contaminantes, comparando desempeño, escalabilidad y limitaciones. En el campo de los residuos del café, Szaja et al. (2024), presenta una evaluación del tratamiento del cuncho del café mediante cavitación hidrodinámica y reportaron mejoras en biodegradabilidad y solubilización de compuestos, con un balance favorable entre eficiencia y consumo energético. Para matrices reales de aguas residuales urbanas de Santander, (Jara Mora et al. 2024) demostraron, sobre vertimientos al río Fonce, la capacidad de un reactor rotativo de cavitación para reducir la carga microbiológica sin generar subproductos de desinfección, lo que respalda la pertinencia regional de la tecnología.

Entre los dispositivos disponibles, los reactores rotor–estátor han recibido creciente atención por estudios recientes dada su capacidad de generar cavitación controlada con elevada

eficiencia energética y escalabilidad para aplicaciones de tratamiento de aguas y degradación de contaminantes (Malkapuram y Sonawane, 2025; Jyoti & Pandit, 2001). Desde la perspectiva fluidodinámica, Goud et al. (2024) emplearon simulación CFD para mostrar que el aumento de la velocidad del rotor intensifica los campos de velocidad y las caídas locales de presión que gobiernan la cavitación, mientras que Gostiša et al. (2021) evaluaron un reactor rotor–estátor de disco con pernos bajo distintas configuraciones, demostrando su capacidad para intensificar el fenómeno y reducir la carga orgánica en medios acuosos.

Los reactores rotatorios tipo rotor–estator han sido identificados como dispositivos prometedores para la cavitación hidrodinámica, especialmente por su eficiencia en procesos de desinfección y tratamiento de aguas residuales (Maldonado Reyes, 2025). Asimismo, los mecanismos físicos asociados a la cavitación, como la formación de microburbujas, microjets y ondas de choque, permiten explicar su potencial para la transformación de contaminantes en medios acuosos (Pulgarín Ramírez & Chiquillo Maldonado, 2026). No obstante, su aplicación específica en aguas mieles del café continúa siendo limitada, lo que justifica su evaluación en este tipo de efluente agroindustrial (Hernández & Patiño Guio, 2025).

El estudio de la cavitación hidrodinámica aplicada a carbohidratos se ha apoyado ampliamente en el uso de moléculas modelo, ya que estas permiten evaluar los mecanismos de degradación y oxidación bajo condiciones controladas, reduciendo la complejidad asociada a las matrices reales. En este contexto, Alves et al. (2019) compararon el desempeño de dispositivos Venturi y de placa de orificio haciendo seguimiento a la demanda química de oxígeno (DQO) en soluciones de sacarosa y en un efluente real de la industria de bebidas azucaradas. Los autores optimizaron la presión de entrada, analizaron la cinética de degradación y evaluaron el efecto sinérgico de la cavitación con peróxido de hidrógeno, demostrando que la sacarosa constituye una

molécula modelo adecuada para estudiar los fenómenos de transformación de compuestos orgánicos de naturaleza azucarada. Este trabajo representa un antecedente relevante para la presente investigación, al respaldar el uso de la sacarosa como una aproximación simplificada de la fracción biodegradable presente en las aguas mieles del beneficio húmedo del café.

Con base en estos antecedentes, la presente investigación se orienta a la puesta en funcionamiento de un sistema de cavitación hidrodinámica rotativa tipo rotor–estátor, previamente adecuado por J. S. Blair Camacho, junto con Villamizar Mejía y Duarte Mantilla, quienes desarrollaron e integraron el sistema de control, automatización y monitoreo en tiempo real. A partir de esta plataforma experimental, en el presente trabajo se integraron los componentes del sistema de proceso, se acondicionaron los equipos auxiliares y se ajustaron las condiciones de operación necesarias para establecer el régimen de cavitación hidrodinámica. Asimismo, se realizó la caracterización de la respuesta fisicoquímica del sistema utilizando soluciones modelo de sacarosa. Si bien investigaciones previas han abordado la degradación de soluciones de sacarosa mediante cavitación o el tratamiento de aguas mieles reales con diferentes configuraciones de reactores, no se identificaron estudios que documenten de manera integral la puesta en funcionamiento, el ajuste operativo y la evaluación experimental de un sistema rotor–estátor para esta aplicación específica. En consecuencia, este trabajo no solo valida experimentalmente la operación del sistema bajo condiciones controladas, sino que también establece una base metodológica y experimental para futuras investigaciones orientadas al tratamiento de aguas mieles reales y a su posterior escalamiento hacia aplicaciones piloto e industriales.

4. Metodología

La metodología se estructuró en cuatro fases secuenciales (Figura 1): (i) alistamiento, adecuación y puesta en funcionamiento del sistema de cavitación hidrodinámica rotor–estátor (SPR); (ii) ajuste de los parámetros de operación, evaluación de la instrumentación y determinación del régimen de cavitación soportado sobre la base del sistema de monitorio, instrumentación y control trabajado en conjunto con la E3T; (iii) selección y caracterización de la sacarosa como molécula modelo; y (iv) diseño y ejecución del plan experimental con soluciones modelo, con seguimiento de los parámetros fisicoquímicos disponibles.

Figura 1.

Diagrama de la metodología del proyecto



4.1 Alistamiento y Adecuación del Sistema de Cavitación Hidrodinámica

El sistema de cavitación hidrodinámica empleado corresponde a un reactor tipo rotor-estator, disponible en el Laboratorio de Procesos de la Escuela de Ingeniería Química de la UIS. En su configuración final, el sistema quedó compuesto por los siguientes elementos principales *(ver Figura 2 — fotografía del montaje final, Figura 3 — Interfaz gráfica de control, El PFD y P&ID del sistema en el Apéndice H)*:

1. Tanque de mezclado y recirculación [TK- 03, ≈5L, acero inoxidable, almacenamiento y recirculación del fluido de trabajo]

2. Bomba periférica Wolfox [WF0847, potencia de 1 HP (746 W), alimentación 120 V – 60 Hz, altura máxima de 45 m y caudal máximo de 45 L/min]
3. Serpentín de enfriamiento (línea de entrada al reactor)
4. Válvula de aguja [bypass de control de caudal de entrada
5. Reactor rotor-estátor de ondas de choque [Shockwave Power Reactor, SPR, accionado por un motor WEG NEMA 56-IP21 de ½ HP y velocidad nominal de 1720 rpm]
6. Sensor de flujo de entrada y salida (efecto Hall)
7. Sensor de temperatura de salida tipo PT100
8. Manómetro analógico de entrada y salida (corroboración de presión)
9. Sensor digital de presión de entrada y salida (piezorresistivos)
10. Interfaz gráfica de control (HMI) del sistema, aportada por la E3T

Figura 2.

Fotografía del montaje final con componentes etiquetados

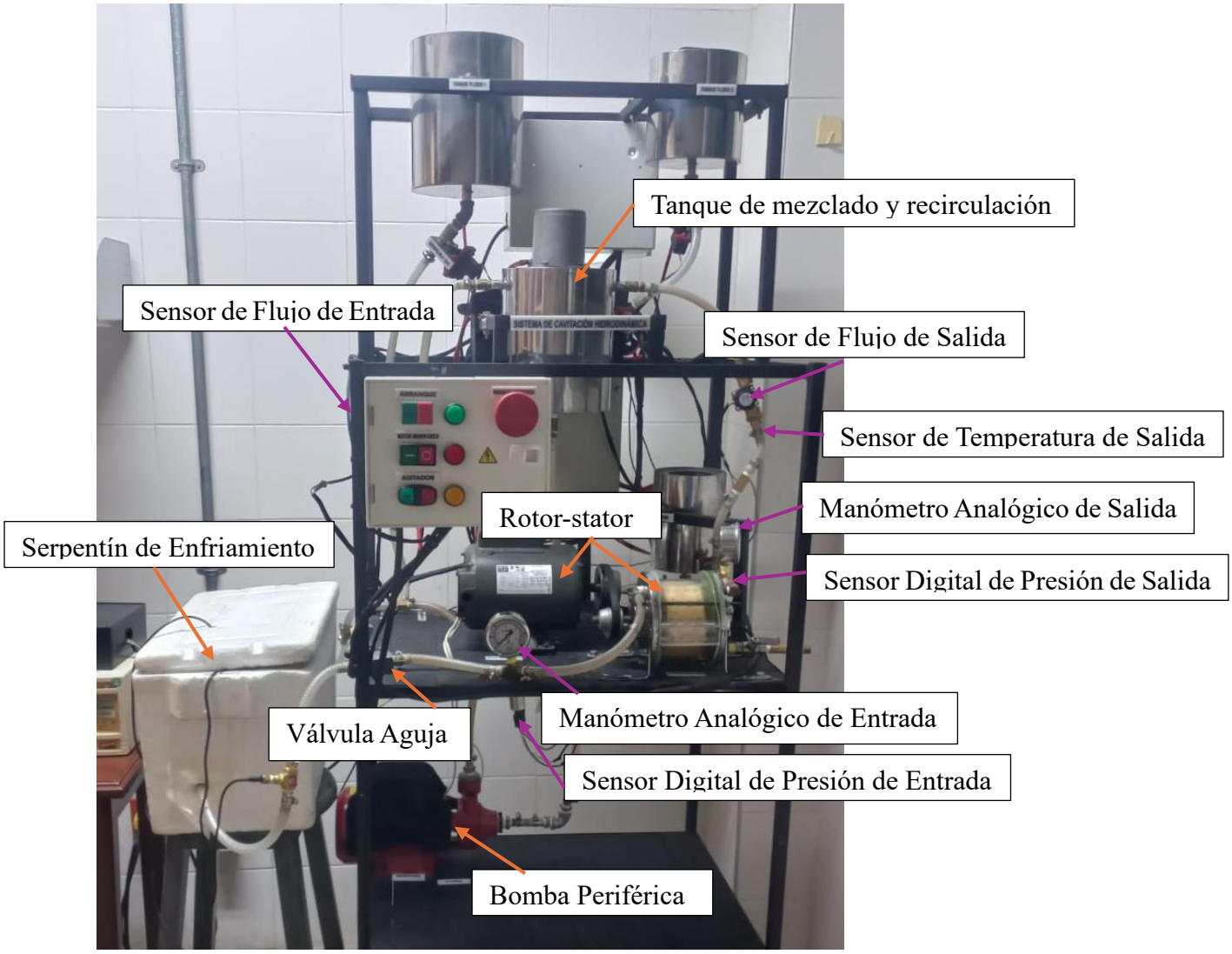
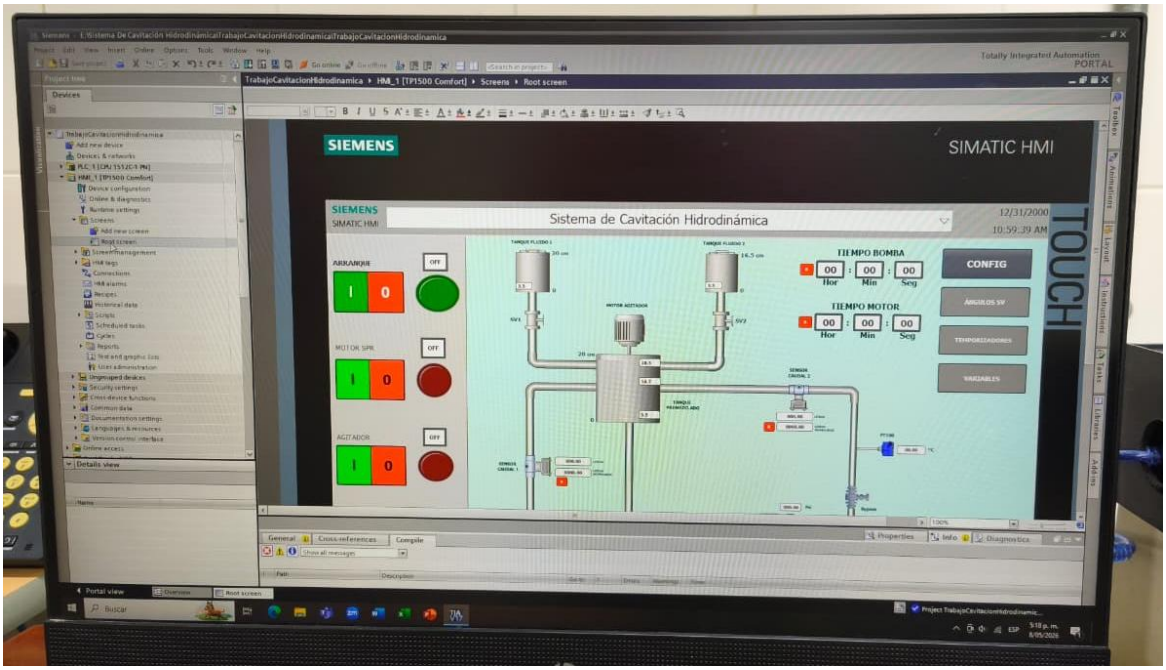


Figura 3.

Interfaz gráfica de control del sistema



La descripción funcional del sistema se soporta en dos diagramas incluidos en el Apéndice C y articulados con la documentación de instrumentación de la E3T: el diagrama de flujo de proceso (PFD), que representa el circuito cerrado tanque → bomba → bypass/serpentín → reactor SPR → retorno; y el diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID) en nomenclatura ISA-5.1, junto a una tabla que resume la nomenclatura de instrumentos y elementos del lazo que deben aparecer etiquetados en el P&ID.

4.1.1 Intervenciones Realizadas Durante la Puesta en Marcha

La adecuación consistió en integrar y configurar componentes hasta lograr un sistema operativo capaz de sostener la cavitación (resumen en la Tabla 5), en el apéndice C se encuentran todos los componentes que definen las características operativas del sistema y las especificaciones técnicas completas de los componentes del sistema.

a) **Integración de la bomba periférica.** Se incorporó una bomba periférica disponible, de mayor altura dinámica, que entrega la presión mínima requerida para inducir cavitación.

b) **Integración del tanque de recirculación.** Se adoptó un tanque de mayor capacidad para estabilizar la succión frente al caudal de la bomba y reducir las fluctuaciones de presión.

- **Montaje y sellado del cavitador.** Se reensambló el reactor, se reemplazaron los sellos y se mejoró el cierre acrílico para garantizar la hermeticidad.
- **Configuración de la línea de entrada.** Se dispuso un bypass antes del serpentín y se reubicó el sensor de flujo, permitiendo el control independiente de caudal y presión mediante una válvula a la salida del serpentín.
- **Incorporación del serpentín de enfriamiento.** En operación continua la temperatura alcanzaba hasta 55 °C, lo que reduce la presión de vapor, incrementa σ e inhibe la cavitación; el serpentín mantuvo la temperatura de entrada en ≈24–37 °C durante todos los ensayos (perfiles en el Apéndice D).
- **Instrumentación de la línea de salida.** se adicionaron a la línea de salida un sensor de flujo, un sensor de temperatura y un manómetro analógico de corroboración, aumentando la precisión y redundancia en la medición de las variables de proceso.

Tabla 1.

Limitaciones identificadas y respuestas de adecuación en la puesta en funcionamiento

Limitación identificada	Naturaleza	Respuesta de adecuación
Presión de entrada insuficiente para inducir cavitación	Técnica	Integración de una bomba periférica de mayor altura dinámica.
Fluctuaciones de presión por tanque de baja capacidad	Técnica	Integración de un tanque de recirculación de mayor capacidad.
Pérdida de hermeticidad del cavitador	Técnica	Renovación de sellos y mejora del cierre acrílico.
Pérdidas de carga en la línea de entrada	Técnica	Configuración con bypass y reubicación del sensor de flujo.
Incremento térmico que inhibe la cavitación (hasta 55 °C)	Técnica	Incorporación de serpentín de enfriamiento.

Limitación identificada	Naturaleza	Respuesta de adecuación
Costo y variabilidad de aguas mieles reales	Presupuestal	Uso de solución modelo de sacarosa, reproducible y de bajo costo.

4.1.2 Calibración de Instrumentos de Medición

Previo al inicio de la etapa experimental, se calibraron todos los equipos de medición de parámetros fisicoquímicos. El pH-metro se calibró con soluciones tampón certificadas de pH 4.00, 7.00 y 10.00. El multiparámetro (conductividad, OD y temperatura) se calibró según las instrucciones del fabricante con soluciones de referencia certificadas para conductividad y por el método de saturación de aire para OD. El refractómetro se verificó con agua destilada (0.0 °Brix a 20°C). El densímetro se verificó con agua destilada a temperatura controlada.

4.2 Ajuste de Parámetros de Operación y Determinación del Régimen de Cavitación

Previo a la ejecución de los ensayos experimentales, se realizaron pruebas de estabilización hidráulica del sistema con agua destilada, variando la presión de entrada mediante el ajuste de la válvula de control y manteniendo activa la recirculación del circuito. Durante estas pruebas se registraron continuamente las variables presión de entrada, presión de salida, caudal y temperatura mediante la interfaz de monitoreo desarrollada por *Blair Camacho, J. S. & et al.* (2025).

Con los datos experimentales obtenidos se calcularon los números de cavitación correspondientes a cada condición de operación, con el propósito de identificar el intervalo de presiones capaz de garantizar un régimen cavitante estable. Adicionalmente, se verificó que la temperatura del sistema permaneciera dentro del intervalo de operación recomendado (≈24–37 °C), minimizando variaciones significativas en la presión de vapor del líquido y asegurando condiciones reproducibles durante los ensayos.

4.2.1 Variables de Operación del Sistema

Variables Independientes de Entrada. Las variables de proceso identificadas como controlables o medibles con el instrumental disponible son:

Tabla 2.

Variables independientes de entrada del sistema de cavitación

Variable	Símbolo	Unidad	Modo de control
Caudal de entrada	Q	L/min	Válvula de aguja (bypass)
Presión de entrada	Pe	Pa	Variable monitoreada
Presión de salida	Ps	Pa	Variable monitoreada
Temperatura de entrada	Te	°C	Serpentín de enfriamiento
Concentración de sacarosa	C_0	% p/p	Preparación de la solución
Tiempo de tratamiento	t	min	Cronómetro

Variables Dependientes. Las variables de proceso dependientes y que se midieron para observar el cambio en la solución luego de pasar por el sistema y, por ende, por el proceso de cavitación hidrodinámica.

Tabla 3.

Variables dependientes del sistema de cavitación

Parámetro	Técnica	Qué indica en el proceso	Limitación
°Brix	Refractometría (Refractómetro)	Estima la concentración de sólidos solubles presentes en la solución.	Permiten estimar indirectamente la concentración de sólidos solubles presentes en la solución y monitorear posibles cambios asociados a la transformación de la sacarosa.
pH	Potenciometría (pH-metro)	Permite identificar cambios en la acidez o alcalinidad del medio asociados a las reacciones inducidas por cavitación.	Puede permanecer prácticamente constante, aunque ocurran transformaciones químicas importantes.
OD	Sonda electroquímica u óptica (Multiparámetro)	Refleja fenómenos de transferencia de masa, aireación, desgasificación o consumo de oxígeno durante la operación.	Muy sensible a cambios de temperatura.
Conductividad	Conductimetría (Multiparámetro)	Indica cambios en la concentración de especies iónicas presentes en la solución. Puede aumentar si se generan compuestos más pequeños o especies ionizables.	La sacarosa es poco ionizable, por lo que cambios pequeños pueden ser difíciles de interpretar. También depende de la temperatura.
Densidad	Densimetría (Densímetro)	Permite detectar cambios globales en la concentración de sólidos disueltos y en las propiedades físicas del fluido	Poco sensible a transformaciones químicas leves

Nota. Adaptación propia a partir de Nielsen (2017), Harris (2020), Skoog et al. (2018), APHA, AWWA & WEF (2023), AOAC International (2019) y Nielsen (2017).

4.2.2. Barrido de Cv Entre Niveles de Presión

Como el cavitador es rotacional, U_{tip} queda fijada por las RPM y σ de sistema varía poco dentro de un mismo nivel de presión. Los valores experimentales de σ obtenidos para los tres niveles de presión fueron $0{,}67 \pm 0{,}006$, $0{,}817 \pm 0{,}003$ y $1{,}096 \pm 0{,}005$, respectivamente, en buena concordancia con las estimaciones preliminares. Este rango de valores atraviesa el umbral de la unidad ($\sigma = 1$), confirmando que el diseño experimental permitió explorar distintos regímenes de cavitación dentro del sistema rotor-estator.

Tabla 4.

Estimación preliminar del barrio de σ de entrada entre niveles de presión

P entrada	P absoluta (Psi)	σ estimado
2 psi	≈ 15.147	≈ 0,61
8 psi	≈ 21.14	≈ 0,86
14 psi	≈ 27.14	≈ 1,11
P entrada	**σ promedio**	**DE**
2 psi	≈ 0.67	0.006
8 psi	≈ 0.817	0.003
14 psi	≈ 1.096	0.005

Los valores presentados corresponden al promedio de los números de cavitación calculados experimentalmente para cada nivel de presión evaluado. Los cálculos individuales por corrida se presentan en el Apéndice F.

4.2.3 Pruebas Preliminares de Operación Hidrodinámica

Se realizaron pruebas exploratorias con agua destilada para evaluar la estabilidad operativa del sistema bajo diferentes condiciones de caudal y presión. Durante cada ensayo se registraron la presión de entrada, presión de salida, caudal y temperatura del fluido. Los resultados de estas pruebas sirvieron como base para la caracterización hidrodinámica presentada en la Sección 4.2.2 y para la selección de las condiciones experimentales definitivas.

4.3 Selección y Caracterización de la Molécula Modelo

La sacarosa fue seleccionada como molécula modelo para los ensayos experimentales debido a su representatividad dentro de la fracción de carbohidratos presente en el mucílago de café y en las aguas residuales derivadas del beneficio húmedo. Los criterios teóricos que sustentan esta selección se presentan en las Secciones 2.4, 2.5 y en el Estado del Arte (Capítulo 3).

Con el propósito de evaluar la respuesta del sistema de cavitación hidrodinámica bajo condiciones controladas y reproducibles, se prepararon soluciones acuosas de sacarosa a diferentes niveles de concentración representativos del intervalo reportado para este tipo de efluentes.

4.3.1 Selección y Preparación de la Sacarosa Como Molécula Modelo

Como mencionado antes en la sección 2.5, la sacarosa es un disacárido ampliamente presente en matrices naturales y presenta propiedades fisicoquímicas que la hace adecuada para estudios de transformación de materia orgánica en sistemas acuosos. Su alta solubilidad en agua permitió trabajar en un amplio rango de concentraciones y evaluar la respuesta del sistema ante la transformación de un compuesto orgánico representativo. Asimismo, su disponibilidad comercial y facilidad de manejo la convirtieron en una alternativa viable para la ejecución de ensayos a escala experimental, garantizando reproducibilidad y control en las condiciones de operación.

Se empleó sacarosa comercial grado alimenticio (Riopaila®, pureza ≥ 99 %) y agua destilada para la preparación de las soluciones experimentales. Se prepararon soluciones acuosas de sacarosa a tres concentraciones, seleccionadas para abarcar el rango de sólidos disueltos característico de las aguas del beneficio húmedo de café y explorar el comportamiento del sistema en diferentes regímenes de viscosidad y concentración:

- **Solución S1:** 9.09% p/p — baja concentración
- **Solución S2:** 23.37% p/p — concentración intermedia
- **Solución S3:** 37.5% p/p — alta concentración

Las masas requeridas fueron determinadas mediante balance de materia y pesadas utilizando una balanza analítica. Posteriormente, las soluciones se mezclaron con la masa correspondiente de sacarosa comercial [Riopaila®, pureza ≥99%] en agua destilada con el volumen de trabajo requerido [3 L] y luego fueron sometidas a agitación hasta obtener una mezcla homogénea antes de la caracterización fisicoquímica inicial.

4.3.2 Diseño de Experimentos

Se evaluó el efecto de las variables del sistema sobre la solución modelo. Se definieron tres factores: concentración de sacarosa (tres niveles valor nominal: 9,09 / 23,37 / 37,5 % p/p), presión

de entrada (tres niveles: ≈2 / ≈8 / ≈15 psi) y tiempo de operación (constante, 45 min, para evitar que el incremento térmico comprometa la cavitación y los componentes).

Tipo de Diseño Experimental. Dado que el tiempo es constante, se implementó un diseño central compuesto (DCC) de dos factores (concentración y presión). El DCC estima efectos lineales, de interacción y de curvatura mediante puntos factoriales, axiales y centrales, con un número reducido de corridas. El número de corridas es $N = 2^{\mathrm{k}} + 2\mathrm{k} + n_c$, con k = 2 y n_c= 5: $N = 4 + 4 + 5 = 13$. (Tabla 9).

Tabla 5.

Matriz Experimental

Ensayo	Concentración (%p/p)	Presión nominal de ent.	Tiempo de oper.	Tipo
1	Baja (9,09%)	2 psi	45 minutos	Factorial
2	Baja (9,09%)	15 psi	45 minutos	Factorial
3	Alta (37,5%)	2 psi	45 minutos	Factorial
4	Alta (37,5%)	15 psi	45 minutos	Factorial
5	Intermedia (23,37%)	2 psi	45 minutos	Axial
6	Intermedia (23,37%)	15 psi	45 minutos	Axial
7	Baja (9,09%)	8 psi	45 minutos	Axial
8	Alta (37,5%)	8 psi	45 minutos	Axial
9-13	Intermedia (23,37%)	8 psi	45 minutos	Central

Nota: Los niveles de concentración corresponden a los valores nominales del diseño. Las concentraciones reales de operación fueron corregidas posteriormente para considerar el efecto de la dilución inicial del sistema.

Estrategia de Análisis Estadístico (RSM en dos Etapas). La presentación siguió la metodología de superficie de respuesta (RSM), donde el DCC ajusta un modelo cuadrático y el ANOVA lo evalúo. En la Etapa 1 (por corrida), cada corrida es una curva de 11 tiempos, sin embargo, debido al efecto de dilución inicial del sistema, el instante experimental de 5 min se adoptó como el tiempo cero ($t_r = 0$). En consecuencia, se realizó con esos datos el ajuste cinético sobre [0, 40] min (10 tiempos), y se resumió con la constante k y el Δ% de reducción a 40 min). En la Etapa 2 (entre corridas), con los 13 valores se ajustó $\mathrm{Y} = \beta_0 + \beta_1\mathrm{X}_1 + \beta_2\mathrm{X}_2 + \beta_{11}\mathrm{X}_1^2 +$

$\beta_{22}X_2^2 + \beta_{12}X_1X_2$ (donde X_1 = concentración, X_2 = presión, codificadas), y sobre él se corrió el ANOVA, reportando: significancia global (F, $p < 0,05$); falta de ajuste (los 5 puntos centrales dan el error puro, 4 g.l., buscando no significativa); significancia de cada término; R^2, R^2-ajustado y R^2-predicho y superficie 3D y la optimización. El análisis de esta estrategia está en la sección 5.4 y el desarrollo numérico y las tablas van al Apéndice I.

4.3.3 Protocolo de Ejecución de Ensayos y Toma de Muestras

Modelo De Reactor: El sistema es un reactor discontinuo (batch) operado en recirculación que combina ambos comportamientos: el tanque actúa como CSTR (mezcla perfecta, función de reservorio) y el reactor SPR se aproxima a un PFR de residencia corta (1,5 a 3,5 s por paso según el caudal), siendo la zona donde ocurre la transformación. A lo largo de los 45 min de operación, el sistema puede aproximarse como un reactor batch perfectamente mezclado, en el que la concentración se considera uniforme en el espacio y variable únicamente con el tiempo, hipótesis ampliamente utilizada para sistemas de recirculación y reactores discontinuos. (Levenspiel, 1999; Gogate & Kabadi, 2009; Arrojo, 2007)

Secuencia del Ensayo. El protocolo se aplicó de forma idéntica en cada corrida:

- **Preparación**: verificar limpieza y secado del sistema. Cargar el tanque con la solución correspondiente. Activar el serpentín y esperar estabilización de la temperatura de entrada. Registrar los parámetros iniciales (t = 0 min) antes de encender la bomba.
- **Arranque**: encender la bomba y ajustar la válvula de bypass hasta el caudal establecido. Verificar estabilización de presión y caudal en la HMI. Iniciar el cronómetro.
- **Toma de Muestras**: extraer muestras de 50 mL del tanque en 11 tiempos: t = 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 y 45 min, registrando simultáneamente Q_s, P_e, P_s, T_e, Ts,T entrada

serpentin, Tsalida serpentín y Tenfriamiento, Cada corrida queda caracterizada por su valor inicial (t0) y once puntos hasta t45.

- **Medición de Respuesta:** Lectura de °Brix con refractómetro (3 gotas), densidad con densímetro, y pH, conductividad y OD con el multiparámetro; cada parámetro por duplicado, promediando, manteniendo el electrodo sumergido hasta estabilización.
- **Finalización y limpieza**: Apagar la bomba a t = 45 min. Drenar. Lavar con agua corriente (5 min × 2) y luego con agua destilada (5 min × 1). Dejar enfriar ≈1 h antes del siguiente ensayo. *(El protocolo completo con instrucciones de seguridad, verificaciones de arranque y manejo de residuos se presenta en el **Apéndice E**.)*

Efecto del Muestreo de 50 mL. Con 11 puntos de 50 mL se retiran 550 mL, equivalentes a ≈ 18 % de un lazo de ≈ 3 L. El retiro de una alícuota representativa de una mezcla homogénea no altera la concentración del lote restante (propiedad intensiva), por lo que el seguimiento de °Brix no se sesga; sin embargo, reduce el volumen recirculante por escalones y acelera el conteo de recirculaciones, que con la corrección aumenta ≈ 10 % a los 45 min respecto del cálculo con volumen constante (Tabla 6). En lo operativo, se vigiló el nivel del tanque hacia el final de cada corrida para evitar succión de aire en la bomba.

Número de Pasadas y Recirculaciones. El número de recirculaciones completas hasta un tiempo t es $N_{p(t)} = Q * \frac{t}{V}$. El caudal depende del nivel de presión (≈5 / 8 / 12 L/min para 2 / 8 / 15 psi), por lo que a igual tiempo de reloj las corridas no son equivalentes en exposición: a los 45 min el nivel alto acumula muchas más recirculaciones que el bajo. Por ello las corridas se comparan por número de recirculaciones (Tabla 6). El tiempo acumulado de exposición a cavitación, $t_{cav} = t * \left(\frac{V_{cav}}{V_{lazo}}\right)$, es independiente del caudal.

Tabla 6.

Recirculaciones acumuladas

t (min)	2 psi (5 L/min)	8 psi (8 L/min)	15 psi (12 L/min)
0	0	0	0
5	8,5	13,6	20,3
10	17,1	27,4	41,0
15	25,9	41,4	62,1
20	34,8	55,7	83,5
25	43,9	70,2	105,3
30	53,1	85,0	127,6
35	62,6	100,1	150,2
40	72,2	115,5	173,3
45	82,0	131,2	196,8

Nota. El volumen inicial teórico del sistema fue $V_0 \approx 3{,}0$L. Debido a la extracción sucesiva de muestras de 50 mL, el volumen recirculante disminuyó durante cada corrida y fue corregido en el cálculo de N.

El protocolo completo, con instrucciones de seguridad y manejo de residuos, se presenta en el Apéndice E. Las magnitudes reportadas por corrida (Qop, V₀ y V(t), Np(t), τcav, tcav, σsist y σlocal, k y Δ% a 45 min) se consolidan en los ***Apéndices F y G***.

4.3.4 Tratamiento de los Datos: Línea Base y Constante Cinética

El seguimiento de la transformación se realizó sobre la concentración de sólidos solubles, que en este trabajo se midió directamente como °Brix (C ≡ °Brix). Antes de cualquier ajuste estadístico, se corrigió el valor considerado t=0, por las razones que se explican a continuación.

Valor de Referencia C₀. La concentración nominal de la solución se definió en t = 0 min, correspondiente a la preparación e incorporación de la solución al sistema. Sin embargo, la primera medición puede verse afectada por la presencia de agua remanente del lavado retenida en el volumen muerto del circuito (tuberías, cuerpo del reactor, serpentín y bypass), lo que ocasiona una dilución inicial antes de que la solución alcance una mezcla homogénea. Por esta razón, se adoptó como referencia para el análisis el primer valor estable y homogenizado de cada corrida (t = 5 min), instante en el que el sistema ya había completado suficientes recirculaciones para garantizar

una composición uniforme. En consecuencia, el intervalo comprendido entre 0 y 5 min se consideró una etapa de acondicionamiento del sistema y no de reacción. No obstante, el dato registrado en t = 0 min se conservó para observar el efecto de dilución inicial, este análisis se hace en la sección 5.3.1.

5. Análisis de Resultados

5.1. Caracterización del Sistema y Determinación del Régimen de Cavitación

Los resultados de las pruebas preliminares de operación hidrodinámica con agua destilada y serpentín activo se presentan en la Tabla 7. Los valores reportados corresponden a las condiciones reales de operación registradas directamente por los sensores de cauda, presión y temperatura del sistema, y no a los niveles nominales del diseño experimental. Como se observa, la presión de entrada efectivamente medida difiere ligeramente de los valores nominales establecidos (2, 8, 15 psig) debido a la respuesta del propio circuito hidráulico frente al ajuste de la válvula de control. Estas diferencias entre el valor nominal y el efectivamente medido es coherente con las limitaciones estructurales del diseño en sistemas de recirculación declaradas en la sección 5.4.4, y refuerza la decisión de emplear las variables de media y no las nominales como referencia del análisis. Para cada combinación de caudal y presión diferencial ensayada se reporta el número de cavitación calculado mediante la Ecuación 1, indicando si las condiciones corresponden al régimen de cavitación ($Cv \leq 1$).

Tabla 7.

Condiciones operativas exploradas y número de cavitación calculado

Ensayo	Qe **[**L/min**]**	Pe **[psi]**	Ps **[psi]**	ΔP **[psi]**	Te **[**°C**]**	Ts	Cv	Régimen
H-01	10.5	14.25	10.64	3.61	28.44	29.27	1.1315	Cavitación improbable
H-02	7.98	7.3	5.66	1.64	30.65	31.37	0.8303	Cavitación incipiente
H-03	5.63	2.3	1.58	0.72	28.66	31.38	0.629	Cavitación moderada
H-04	12	15.76	10.37	5.39	31.58	32.22	1.0769	Cavitación improbable
H-05	7.1	8.8	7.46	1.34	32.43	33.04	0.826	Cavitación incipiente
H-06	4.63	2.47	1.19	1.28	33.20	33.81	0.575	Cavitación intensa
H-07	10.01	15.11	9.76	5.35	32.98	33.81	1.104	Cavitación improbable
H-08	6	8.9	5.67	3.23	32.75	33.14	0.87	Cavitación incipiente
H-09	1.89	2.29	1.5	0.73	33.42	33.58	0.633	Cavitación moderada
H-10	6.05	8.86	5.69	3.17	33.78	33.95	0.8678	Cavitación incipiente
H-11	5.95	8.84	5.59	3.25	32.37	33.23	0.8571	Cavitación incipiente

Ensayo	Qe [L/min]	Pe [psi]	Ps [psi]	ΔP [psi]	Te [°C]	Ts	Cv	Régimen
H-12	6	9.04	5.75	3.29	32.71	33.12	0.875	Cavitación incipiente
H-13	6	8.8	5.57	3.23	32.14	32.81	0.86	Cavitación incipiente

Los valores de número de cavitación obtenidos abarcaron un rango entre 0.575 y 1.132, permitiendo explorar diferentes regímenes hidrodinámicos dentro del reactor rotor-estátor. De acuerdo con la clasificación reportada en la literatura, valores de $\boldsymbol{C_v > 1}$ corresponden a condiciones donde la cavitación es improbable, mientras que intervalos entre 0.8 y 1.0 se asocian con cavitación incipiente, entre 0.6 y 0.8 con cavitación moderada y valores inferiores a 0.6 con cavitación intensa (Carpenter et al., 2017). Los resultados muestran que las condiciones de 8 psi generaron predominantemente un régimen de cavitación incipiente, mientras que las presiones de entrada de 2 psi permitieron alcanzar estados de cavitación moderada e incluso intensa (H-06), confirmando que la disminución de la presión de entrada favorece el desarrollo del fenómeno cavitante en el sistema estudiado. Cabe señalar que los valores obtenidos a 15 psi se ubican ligeramente por encima del umbral σ = 1, por lo que estas condiciones se clasifican como de cavitación improbable, sin descartar episodios locales e intermitentes de cavitación dada la proximidad al umbral. Debe precisarse, además, que la clasificación de regímenes empleada (Tabla F1) fue propuesta a partir de dispositivos de restricción como placas de orificio y Venturi, donde la velocidad de referencia corresponde a la garganta del dispositivo. Su aplicación a reactores rotor–estátor, utilizando la velocidad periférica del rotor como escala de referencia, constituye una aproximación, pues el valor absoluto de σ depende fuertemente de la definición adoptada para la velocidad y la presión de referencia (Šarc et al., 2017). Por esta razón, en este trabajo los valores de σ se interpretan en términos comparativos —para ordenar las condiciones de operación según su propensión a cavitar— y no como umbrales absolutos del fenómeno

5.2 Caracterización Fisicoquímica Inicial de las Soluciones de Sacarosa

Antes de cada ensayo se realizó la caracterización fisicoquímica inicial de las soluciones preparadas con el fin de establecer las condiciones de referencia para el análisis posterior de los cambios inducidos por la cavitación hidrodinámica. Se determinaron los parámetros de °Brix, pH, Conductividad, Oxígeno disuelto, Densidad y Temperatura.

La Tabla 8 presenta los valores basales de los parámetros fisicoquímicos medidos en las soluciones de sacarosa en condiciones estáticas (t = 0, sin cavitación), junto con los valores de referencia reportados en las tablas ICUMSA u otra literatura, para soluciones de sacarosa a 25°C.

Tabla 8.

Caracterización fisicoquímica inicial de las soluciones de sacarosa

Parámetro	S1 (9.09% p/p)	S2 (23.37% p/p)	S3 (37.5% p/p)	Valor literatura (25°C)	Referencia
°Brix	8.68	25.96	35.74	9.1/23.4/37.5	ICUMSA specification and standard SPS-3, 2000)
Densidad (g/mL)	1.04	1.11	1.17	1.035/1.099/1.168	(ICUMSA specification and standard SPS-4,1998)
pH	7.19	7.29	7.06	6.7-7.2	(Maldonado Reyes, 2025)
Conductividad (µS/cm)	14.42	12.99	8.16	8.1-16	(Bakam Nguenouho et al., 2022)
OD (mg/L)	4.03	3.05	2.22	N.R.	N.R.
Temperatura (°C)	24	24	24	---	---

La Tabla 8 muestra una diferencia entre la concentración nominales de las soluciones de sacarosa y los valores de °Brix determinados experimentalmente antes del inicio de cada ensayo. Las diferencias observadas pueden asociarse a las incertidumbres inherentes a la preparación de las soluciones, incluyendo la precisión en el pesaje de la sacarosa, la medición del volumen de agua y las limitaciones propias de la determinación refractométrica. La literatura reporta que las soluciones patrón de sacarosa presentan valores de °Brix muy próximos a su concentración nominal, con desviaciones generalmente inferiores a ±0,1 °Brix bajo condiciones controladas, por lo que las variaciones encontradas se consideran atribuibles al error experimental acumulado y resaltan la importancia de caracterizar experimentalmente cada lote antes de iniciar los ensayos. Por otro lado, se observó un incremento progresivo de la densidad al aumentar la concentración

de sacarosa, comportamiento consistente con lo reportado por los estándares ICUMSA y con la relación concentración-densidad.

5.3 Evolución Temporal de los Parámetros Fisicoquímicos Durante la Cavitación

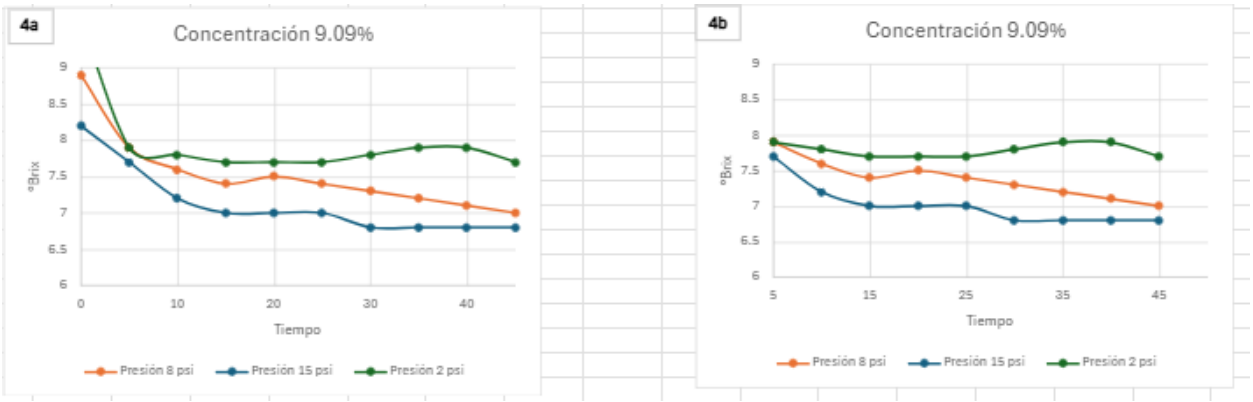
Con el fin de evaluar el comportamiento de las soluciones de sacarosa sometidas a cavitación hidrodinámica, se realizó el seguimiento temporal de los principales parámetros fisicoquímicos medidos durante los ensayos. La evolución de °Brix, oxígeno disuelto, pH, conductividad y densidad permitió identificar posibles cambios asociados a la cavitación generada por el sistema rotor-stator y establecer cuáles parámetros presentan mayor sensibilidad frente a las condiciones de operación estudiadas.

5.3.1 Evolución Temporal de los °Brix

Las Figuras 4, 5 y 6 presentan la evolución temporal del °Brix para las tres concentraciones evaluadas. Con el fin de diferenciar el efecto del acondicionamiento hidráulico del fenómeno cavitante, cada concentración se presenta en dos representaciones: la primera incluye la medición inicial (t = 0), mientras que la segunda considera únicamente el intervalo correspondiente al período de reacción empleado para el análisis.

Figura 4.

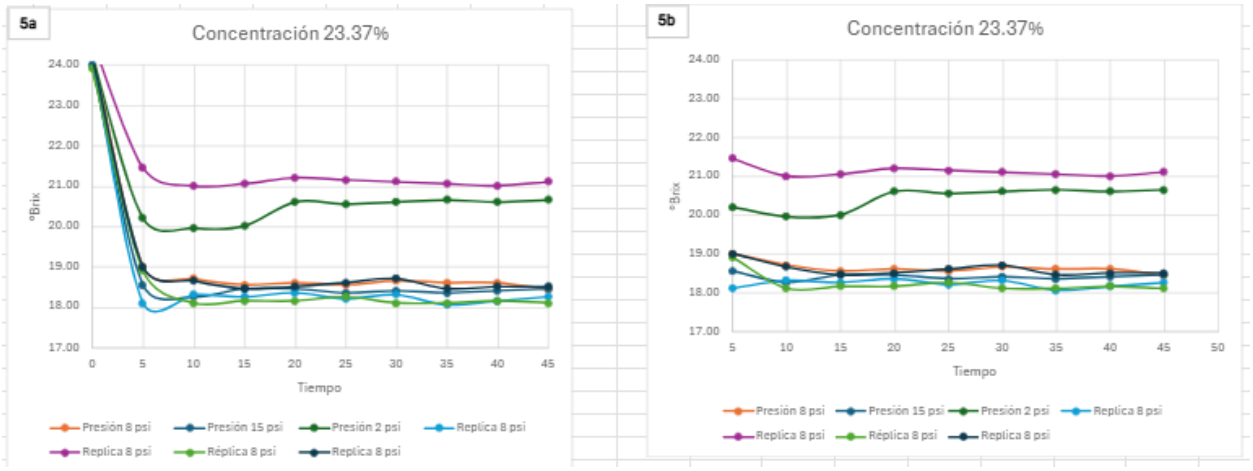
Gráfica con y sin la fase de dilución para concentración nominal de 9.09%



En las tres concentraciones se observó una disminución pronunciada del °Brix durante los primeros cinco minutos de operación, seguida por variaciones de menor magnitud durante el resto de la corrida. La reducción inicial se atribuye principalmente al proceso de acondicionamiento hidráulico del sistema y a la dilución asociada al volumen retenido en el reactor y la tubería, mientras que las variaciones posteriores corresponden al comportamiento de la solución una vez establecida la recirculación. Por esta razón, el ajuste cinético y la metodología de superficie de respuesta se desarrollaron utilizando únicamente los datos comprendidos entre 5 y 45 minutos, evitando que la etapa de acondicionamiento influyera sobre el estudio de la transformación. Este comportamiento es consistente con lo reportado en sistemas de cavitación hidrodinámica de recirculación, donde la etapa inicial suele estar dominada por fenómenos de mezcla y homogenización antes de que el sistema alcance un régimen de operación representativo (Gogate y Pandit, 2005; Thanekar et al., 2021).

Figura 5.

Grafica con y sin la fase de dilución para concentración nominal de 23.37%



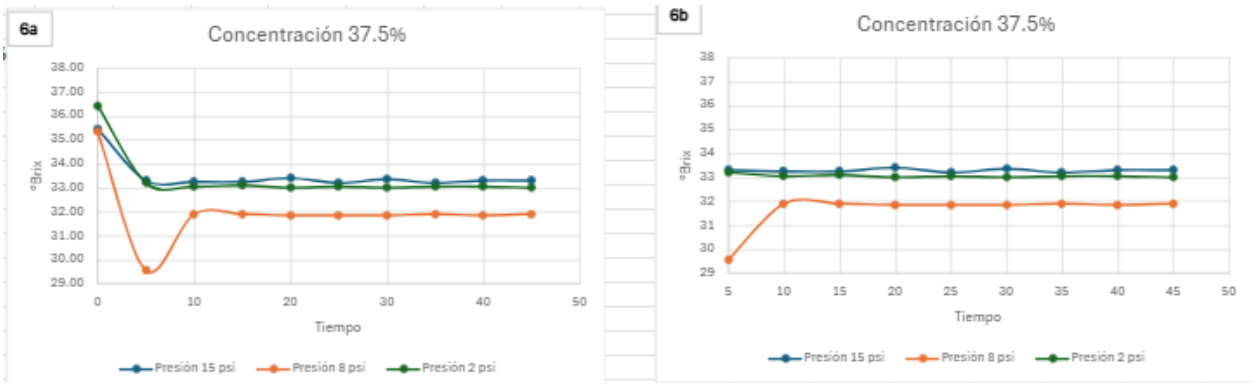
Aunque se esperaba una disminución más pronunciada de los °Brix por efecto de la transformación de la sacarosa, algunas corridas presentaron ligeros incrementos después de la fase de dilución. Este comportamiento puede atribuirse a la sensibilidad de la medición refractométrica

frente a pequeñas variaciones de temperatura y composición de la solución, así como a la incertidumbre experimental asociada al método (Nielsen, 2017; AOAC International, 2019). Adicionalmente, los °Brix constituyen una medida indirecta de sólidos solubles y no permiten diferenciar entre sacarosa y otros compuestos disueltos presentes en el medio, por lo que pequeñas fluctuaciones no necesariamente indican un aumento real de la concentración de sacarosa (Nielsen, 2017). Por esta razón, los incrementos observados se interpretan como variaciones inherentes al sistema experimental y a la técnica analítica, más que como una generación de sólidos solubles durante el proceso de cavitación.

Pero los resultados en la mayoría de las corridas son positivos, pues se tiene una disminución de los °Brix, paulatinos y en algunos casos con pequeñas subidas antes del descenso. En específico, los valores atípicos en esa disminución son justificables con las condiciones dadas durante las pruebas, la réplica de 8psi en color fucsia en la gráfica de 23.37%, correspondiente a la corrida 11, se justifica pues en esa corrida ocurrió una subida de la temperatura a 37°, esa es posiblemente la causa de esa corrida atípica. En el caso de la corrida 9, con color verde oscuro en la gráfica, correspondiente a la corrida de 2 psi a concentración de 23.37% al minuto 20, que es donde se aprecia el incremento, la presión de salida tuvo una caída, antes oscilaba entre de ≈1.4-1.2 y pasó a 0.49, este cambio pudo afectar el valor de los °Brix y eso resultó en el ligero aumento que se observa en la gráfica.

Figura 6.

Grafica con y sin la fase de dilución para concentración nominal de 37.5%



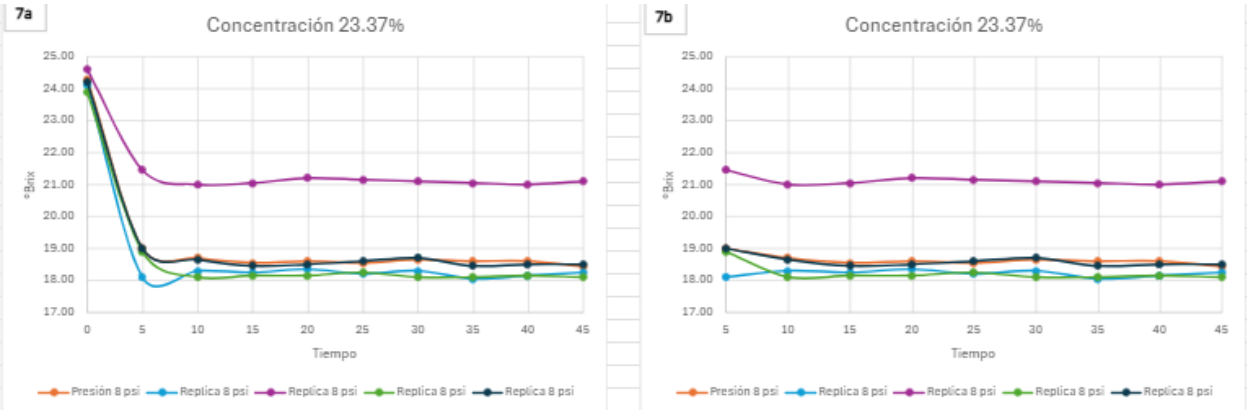
Al comparar las tres concentraciones, se observa que la magnitud de la disminución inicial aumentó conforme se incrementó la concentración de sacarosa, siendo más evidente para la solución al 37,5 %, mientras que la solución al 9,09 % presentó variaciones más moderadas. Una vez superados los primeros cinco minutos, las tres concentraciones conservaron el comportamiento general de la respuesta, caracterizado por fluctuaciones alrededor de un intervalo relativamente estrecho, sin evidenciar cambios progresivos de gran magnitud. Este comportamiento sugiere que, bajo las condiciones evaluadas, la cavitación hidrodinámica produjo modificaciones limitadas sobre el contenido de sólidos solubles, resultado coherente con estudios que reportan que la transformación de carbohidratos por cavitación ocurre de manera gradual y depende tanto de la intensidad del régimen cavitante como del tiempo de residencia efectivo de la solución dentro de la zona activa del reactor (Jyoti y Pandit, 2001; Gogate y Pandit, 2005).

5.3.2 Repetibilidad de las Corridas del Punto Central

La Figura 7 presenta la evolución temporal de las cinco réplicas realizadas en el punto central del diseño experimental (23,37% de sacarosa y 8 psi), condición incluida para estimar el error puro del Diseño Central Compuesto (DCC) y evaluar la repetibilidad del procedimiento experimental. Al igual que en las figuras anteriores, la representación 7a incluye el tiempo inicial, mientras que la 7b considera únicamente el intervalo comprendido entre 5 y 45 minutos, utilizado posteriormente para el ajuste.

Figura 7.

Evolución de la replicas y su reproducibilidad



La comparación entre las cinco corridas muestra un comportamiento similar durante el período de reacción, conservando la tendencia observada para las demás concentraciones. Aunque se evidencian diferencias en los valores absolutos de °Brix entre algunas réplicas, particularmente durante los primeros minutos, las curvas mantienen una evolución temporal consistente y sin cambios abruptos una vez finalizada la etapa de acondicionamiento hidráulico. Estas diferencias pueden atribuirse a la variabilidad experimental inherente a la preparación de las soluciones, al procedimiento de medición y a las condiciones de operación del sistema, aspectos esperados en estudios experimentales con sistemas de recirculación (Montgomery, 2020).

Con el fin de cuantificar dicha variabilidad, se calcularon el promedio, la desviación estándar y la varianza de las cinco réplicas para cada instante de muestreo (Figura I1 en al apéndice I). Los resultados muestran que el promedio de °Brix disminuyó de 24,22 a 18,88 °Brix durante los primeros cinco minutos, mientras que la desviación estándar, excluyendo el tiempo inicial, permaneció alrededor de 1,2 °Brix y la varianza entre 1,37 y 1,60, evidenciando una variabilidad prácticamente constante durante el período de reacción. Este comportamiento respalda la utilización de las réplicas para la estimación del error puro del diseño y confirma que las

diferencias observadas corresponden principalmente a la variabilidad experimental propia del sistema y no a cambios sistemáticos en la respuesta.

5.3.3 Evolución Temporal del pH, OD y Densidad

Con el fin de complementar el seguimiento del proceso de cavitación hidrodinámica, se evaluó la evolución temporal del pH, la conductividad eléctrica, el oxígeno disuelto (OD) y la densidad durante el período de reacción (5-45 min). Debido a que estas variables no presentaron tendencias monótonas ni ajustes cinéticos representativos, su comportamiento se resume mediante los rangos de variación registrados en cada corrida (Tabla 9).

Tabla 9.

Valores de Meseta y Δ de pH, OD, Conductividad y Densidad

Corrida	%[p/p]	Presión [psi]	Rango pH	Rango Cond.	Rango OD [mg/L]	Rango ρ [g/mL]
1	9.09	15	7.46-7.62	14.08-18.78	3.79-4.92	1.04
2	9.09	8	7.05-7.37	15.18-19.5	3.2-3.98	1.05
3	9.09	2	7.15-7.8	9.75-14.75	3.38-3.86	1.04
4	37.5	15	7.18-7.39	11.81-15.86	2.18-2.45	1.15-1.17
5	37.5	8	6.54-7.1	10.11-11.15	2.3-2.91	1.13-1.16
6	37.5	2	7.03-7.27	9.56-13.51	2.32-87	1.14-1.17
7	23.37	15	7.01-7.12	13.92-17-91	3.03-3.64	1.08-1.1
8	23.37	8	6.93-7.17	13.41-15.34	2.87-3.43	1.08-1.1
9	23.37	2	7.09-7.19	16.84-19.07	2.52-3.13	1.085-1.1
10	23.37	8	6.65-7.12	10.79-19.67	2.99-3.37	1.08-1.1
11	23.37	8	6.7-6.97	11.41-12.82	2.95-3.42	1.09-1.105
12	23.37	8	6.76-7.14	15.82-18.8	3.08-3.31	1.08-1.1
13	23.37	8	6.78-7.07	15.16-16.32	2.9-3.54	1.08-1.1

Nota. Los rangos corresponden a los valores registrados durante el período de reacción (t = 5 a 45 min, equivalente a 40 min de reacción). Las concentraciones y presiones reportadas corresponden a los niveles nominales del diseño experimental.

Evolución Temporal del pH. El pH permaneció cercano a la neutralidad durante todos los ensayos, con valores comprendidos entre 6,54 y 7,80, sin evidenciar cambios sistemáticos asociados a la presión o la concentración de sacarosa. Estas variaciones fueron inferiores a una

unidad de pH, indicando que la cavitación hidrodinámica, en ausencia de agentes oxidantes o reactivos químicos adicionales, no produjo modificaciones significativas en el equilibrio ácido-base del sistema. Este comportamiento coincide con lo reportado por Gogate y Pandit (2005) y (Thanekar et al. 2021), quienes indican que el pH suele mantenerse relativamente constante durante tratamientos por cavitación hidrodinámica, especialmente cuando el proceso depende únicamente del colapso de cavidades y de la generación localizada de radicales.

Evolución Temporal del OD. El oxígeno disuelto registró valores entre 2,18 y 4,92 mg/L, sin una tendencia definida durante las corridas. La variabilidad obsrvada puede atribuirse al equilibrio dinámico entre la aireación producida por la recirculación del fluido y el consumo local de oxígeno asociado a la formación de especies reactivas durante el colapso de las cavidades. Comportamientos similares han sido descritos en estudios de cavitación hidrodinámica, donde el oxígeno disuelto presenta fluctuaciones moderadas debido a la coexistencia de procesos de transferencia de masa y reacciones radicalarias (Jyoti y Pandit, 2001; Thanekar et al., 2021).

Evolución Temporal de la Conductividad. La conductividad eléctrica presentó el mayor rango de variación entre las variables evaluadas, con intervalos comprendidos entre aproximadamente 9,56 y 19,67 µS/cm. A diferencia del pH, este parámetro mostró una mayor sensibilidad a las condiciones experimentales, comportamiento esperado debido a que la conductividad depende directamente de la concentración y movilidad de las especies iónicas presentes en la solución. En procesos de cavitación hidrodinámica aplicados al tratamiento de aguas residuales, diversos autores han reportado que la conductividad puede fluctuar durante la operación como consecuencia de la transformación de compuestos orgánicos y de la liberación o consumo de especies disueltas, sin que ello implique necesariamente una tendencia creciente o decreciente uniforme **(**Gogate y Pandit, 2005; Thanekar et al., 2021**).** En el presente estudio, las

oscilaciones observadas son consistentes con este comportamiento y reflejan la dinámica propia de un sistema de recirculación sometido a cavitación.

Evolución Temporal de la Densidad. Por su parte, la densidad permaneció prácticamente constante durante todas las corridas, con valores comprendidos entre 1,04 y 1,17 g/mL, dependiendo de la concentración inicial de sacarosa. La ausencia de variaciones apreciables confirma que las transformaciones inducidas por la cavitación fueron insuficientes para generar cambios detectables en esta propiedad macroscópica, la cual depende principalmente de la concentración global del soluto y de la temperatura de la solución. Este resultado es coherente con el comportamiento esperado para soluciones acuosas de sacarosa sometidas a tiempos de tratamiento relativamente cortos, donde la densidad permanece prácticamente invariable mientras la concentración total de sólidos disueltos no experimente cambios importantes.

En conjunto, los resultados evidencian que las variables fisicoquímicas evaluadas presentaron fluctuaciones durante el período de reacción, incluyendo algunos comportamientos puntuales que no siguieron una tendencia estrictamente decreciente o creciente. Estas variaciones no necesariamente representan un incremento o una disminución real de la transformación de la materia orgánica, sino que reflejan la naturaleza dinámica de un sistema de cavitación hidrodinámica operado en recirculación, donde el colapso de las cavidades ocurre de manera localizada, generando zonas con diferente intensidad de tratamiento a lo largo del proceso (Gogate y Pandit, 2005; Brennen, 2014). Adicionalmente, factores como pequeñas diferencias en la preparación de las soluciones, la resolución de los equipos de medición, la incertidumbre instrumental y las condiciones hidráulicas del sistema pueden contribuir a la dispersión experimental observada entre mediciones consecutivas (Montgomery, 2020).

En este contexto, la ausencia de una disminución monótona en parámetros como el °Brix no implica necesariamente la inexistencia de transformaciones inducidas por la cavitación, sino que pone de manifiesto las limitaciones propias de emplear variables globales como indicadores indirectos de degradación. Diversos autores señalan que, en procesos de oxidación avanzada y cavitación hidrodinámica, la evaluación de la eficiencia del tratamiento se fortalece mediante el seguimiento de parámetros integrales de carga orgánica, como la Demanda Química de Oxígeno (DQO) o el Carbono Orgánico Total (COT), los cuales presentan una relación más directa con el grado de mineralización de la materia orgánica (Jyoti y Pandit, 2001; Gogate y Pandit, 2005; Thanekar et al., 2021). En consecuencia, para estudios futuros, se observa la necesidad de complementar el monitoreo de parámetros fisicoquímicos con técnicas analíticas de mayor sensibilidad y especificidad, con el fin de reducir la incertidumbre experimental y obtener una caracterización más robusta de las transformaciones promovidas por la cavitación hidrodinámica.

5.4 Efecto de los Parámetros de Operación Sobre la Transformación (DCC/RSM)

Una vez analizada la evolución temporal de las variables fisicoquímicas, se evaluó la influencia de las condiciones de operación sobre la respuesta del sistema mediante la metodología de superficie de respuesta (RSM) asociada al diseño central compuesto (DCC). El análisis se organizó en cuatro partes: la selección de la variable de respuesta a partir del ajuste cinético (5.4.1); el análisis de varianza sobre la reducción de sólidos solubles por corrida (5.4.2); un análisis complementario del régimen hidrodinámico mediante el número de cavitación (5.4.3); y la declaración de las limitaciones del diseño experimental en sistemas de recirculación (5.4.4). El propósito fue identificar las variables más sensibles al fenómeno de cavitación y delimitar, de manera honesta, el alcance de la información que el desarrollo experimental permitió extraer bajo las condiciones evaluadas.

5.4.1 Ajuste Cinético

Con el propósito de resumir la evolución temporal de los °Brix en una única variable de respuesta y facilitar la comparación entre las diferentes condiciones experimentales, se evaluaron modelos cinéticos de orden uno y de orden dos para cada corrida de cavitación.

El modelo de orden uno se fundamentó en la ecuación $\ln(C/C0) = -k1 \cdot t$, obtenida de la integración de la ley de velocidad de primer orden. El modelo de orden dos se fundamentó en la ecuación $1/C - 1/C0 = k2 \cdot t$, obtenida de la integración de la ley de velocidad de segundo orden. C corresponde al valor de la variable de interés (°Brix) en el tiempo t y C0 es el valor de referencia, mientras que k1 y k2 son las constantes cinéticas aparentes de orden uno y de orden dos, respectivamente. Al representar $\ln(C/C0)$ y $(1/C - 1/C0)$ en función del tiempo, la pendiente de cada recta permite determinar k1 y k2 mediante regresión lineal (Levenspiel, 1999; Fogler, 2016).

Para cada una de las 13 corridas experimentales se ajustaron ambos modelos y se comparó su coeficiente de determinación (R^2) con el fin de seleccionar, para cada corrida y variable de respuesta (°Brix), la cinética que mejor describiera el comportamiento observado. La tabla I3, en el apéndice I resumen constantes cinéticas y los coeficientes de determinación obtenidos con ambos modelos y el modelo seleccionado como de mejor ajuste. Sin embargo, como se observa en la tabla I3, el análisis de los coeficientes de determinación (R^2) evidenció que las respuestas experimentales no presentaban un ajuste satisfactorio a dichos modelos cinéticos, por lo que las constantes calculadas no representaban de manera confiable el comportamiento del sistema por lo que las constantes calculadas no representan de manera confiable el comportamiento del sistema y se descartó su uso como variable de respuesta. En consecuencia, se adoptó como variable de respuesta la reducción de sólidos solubles por corrida, definida como el cambio relativo del contenido de °Brix durante el período de reacción, $\Delta°\text{Brix}\ (\%) = [(°\text{Brix}_5 - °\text{Brix}_{45})/°\text{Brix}_5] \times 100$,

donde $°Brix_5$ y $°Brix_{45}$ corresponden a las lecturas a los 5 y 45 minutos de operación, es decir, al primer valor estable una vez completada la etapa de acondicionamiento hidráulico (Sección 4.3.4) y al valor registrado al finalizar la corrida, respectivamente. Se empleó la forma relativa porque normaliza el cambio respecto a la concentración efectiva de cada corrida y permite comparar condiciones con niveles de sólidos solubles muy distintos. A diferencia de la constante cinética, esta respuesta no presupone un orden de reacción y captura directamente el cambio neto observado durante el tratamiento, por lo que constituye un indicador más robusto frente a las fluctuaciones no monotónicas descritas en la Sección 5.3. Los valores positivos de Δ°Brix indican reducción del contenido de sólidos solubles, mientras que los valores negativos o cercanos a cero se interpretan dentro de la incertidumbre de la medición discutida en la Sección 5.3.1, sin eliminarse del análisis.

5.4.2 Análisis de Varianza ANOVA de la Reducción de °Brix

La significancia del modelo se evaluó mediante un análisis de varianza (ANOVA), considerando un nivel de confianza del 95 % ($p < 0,05$). De acuerdo con Montgomery (2020), un modelo de superficie de respuesta debe presentar significancia global, adecuados indicadores de ajuste y términos estadísticamente representativos para describir la influencia de los factores sobre la variable de respuesta.

Con el propósito de evaluar la respuesta fisicoquímica del sistema, se seleccionó el porcentaje de reducción de °Brix como variable de respuesta para el ajuste del modelo de superficie de respuesta. Como se presenta en la Tabla 10, el modelo cuadrático ajustado para el porcentaje de reducción de °Brix presentó un valor de F global de 1.8374 y un valor p de 0.2242, por lo que no fue estadísticamente significativo al nivel de confianza del 95 %. El coeficiente de determinación fue $R^2 = 0.5676$, indicando que el modelo explica aproximadamente el 56.76 % de la variabilidad observada en la respuesta. Sin embargo, el R^2 ajustado disminuyó a 0.2587 y el R^2 predicho fue negativo, lo que evidencia una baja capacidad predictiva del modelo. El análisis de los términos

individuales mostró que únicamente la concentración codificada (X_1) fue estadísticamente significativa (p = 0.0369). El coeficiente asociado a este término fue negativo, indicando que el incremento de la concentración inicial de sacarosa tiende a disminuir el porcentaje de reducción de °Brix. En contraste, la presión de operación (X_2), los términos cuadráticos y la interacción concentración-presión (X_1X_2) no presentaron efectos estadísticamente significativos.

Por otra parte, la prueba de falta de ajuste arrojó un valor de p = 0.0711, superior a 0.05, indicando que la falta de ajuste no fue estadísticamente significativa respecto al error puro estimado a partir de las réplicas del punto central. Aunque este resultado sugiere que el modelo reproduce adecuadamente la tendencia promedio de los datos dentro del dominio experimental, los indicadores globales de ajuste evidencian que su capacidad explicativa y predictiva es limitada. En consecuencia, la superficie de respuesta debe interpretarse como una herramienta descriptiva para visualizar tendencias del proceso y no como un modelo de optimización o de predicción fuera del intervalo experimental evaluado.

Tabla 10.

Indicadores importantes en el análisis estadístico para %reducción °Brix

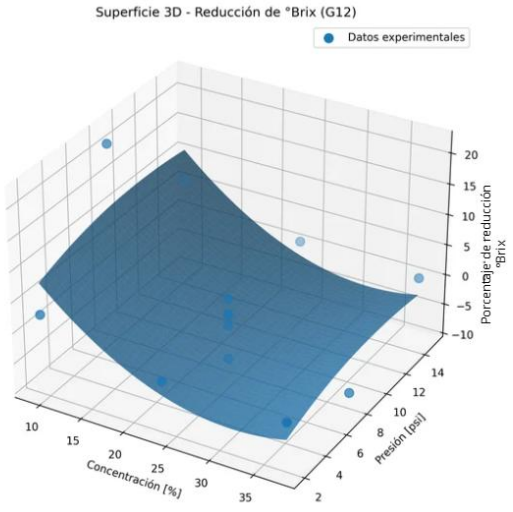
Indicador	Valor
F global	1.837
p global	0.224
R^2	0.568
p falta de ajuste	0.071
Términos significativos	X1

La Figura 8 presenta la superficie de respuesta obtenida para el porcentaje de reducción de °Brix en función de la concentración inicial de sacarosa y la presión de operación. De manera consistente con los resultados del ANOVA, la superficie permite identificar únicamente tendencias generales, observándose una dispersión considerable de los datos experimentales alrededor del

modelo ajustado, lo que indica que la variación del °Brix no depende exclusivamente de estas dos variables.

Figura 8.

Superficie 3D para reducción °Brix



En la superficie se aprecia una tendencia hacia mayores porcentajes de reducción a bajas concentraciones de sacarosa, mientras que al incrementar la concentración inicial la respuesta disminuye y permanece cercana a cero, e incluso alcanza valores negativos en algunas corridas, reflejando incrementos aparentes del °Brix. Este comportamiento puede atribuirse a la variabilidad experimental previamente discutida, así como a la limitada sensibilidad del °Brix para describir por sí solo las transformaciones fisicoquímicas inducidas por la cavitación hidrodinámica. En sistemas sometidos a cavitación se ha reportado que parámetros globales como el contenido de sólidos solubles pueden presentar fluctuaciones debido a la dinámica de mezcla, la recirculación del fluido y la naturaleza heterogénea del colapso de las cavidades, sin que ello represente necesariamente una ausencia del fenómeno de cavitación (Gogate y Pandit, 2005). Asimismo, la superficie muestra una tendencia hacia mayores porcentajes de reducción al aumentar la presión de operación. No obstante, este comportamiento debe interpretarse con cautela, ya que resulta

contrario a la tendencia esperada a partir del número de cavitación, según el cual un incremento de la presión absoluta favorece el aumento del número de cavitación y, por tanto, disminuye la probabilidad e intensidad del fenómeno cavitacional. Esta discrepancia refuerza la evidencia de que la respuesta obtenida mediante el porcentaje de reducción de °Brix estuvo influenciada por fuentes adicionales de variabilidad experimental y que este parámetro, de manera aislada, no constituye un indicador suficientemente robusto para caracterizar la intensidad de la cavitación.

5.4.3 Análisis complementario del Régimen Hidrodinámico (Número de Cavitación)

Con el fin de complementar la interpretación de la respuesta fisicoquímica del sistema, se analizó el comportamiento del número de cavitación promedio (Cv), parámetro hidrodinámico directamente relacionado con la intensidad del fenómeno cavitacional. A diferencia del porcentaje de reducción de °Brix, esta variable presentó un comportamiento estadístico más consistente y una interpretación física acorde con las condiciones de operación del reactor.

El modelo cuadrático ajustado para el número de cavitación (Cv) presentó una significancia global altamente significativa ($F = 294{,}69$; $p = 5{,}61 \times 10^{-8}$), indicando que la combinación de los términos incluidos explica de manera adecuada la variabilidad observada en la respuesta. Asimismo, el modelo alcanzó un coeficiente de determinación (R^2) de 0,9953, un R^2 ajustado de 0,9919 y un R^2 predicho de 0,9587, valores que evidencian una elevada capacidad descriptiva y predictiva del modelo. Según Montgomery (2020), la proximidad entre el R^2 ajustado y el R^2 predicho indica que el modelo presenta una adecuada estabilidad y capacidad de predicción dentro del dominio experimental evaluado. El análisis de los términos individuales mostró que la concentración (X_1) ($F = 6{,}96$; $p = 0{,}0335$), la presión (X_2) ($F = 1457{,}58$; $p = 2{,}20 \times 10^{-9}$) y el término cuadrático de la concentración (X_1^2) ($F = 8{,}93$; $p = 0{,}0203$) ejercieron un efecto estadísticamente significativo sobre el número de cavitación. En contraste, el término cuadrático de la presión (X_2^2) y la interacción concentración-presión (X_1X_2) no presentaron significancia

estadística ($p > 0,05$), indicando que, dentro del dominio experimental evaluado, su contribución al comportamiento del número de cavitación fue limitada.

La prueba de falta de ajuste presentó un valor de $p = 0.0164$, indicando una falta de ajuste estadísticamente significativa respecto al error puro estimado a partir de las réplicas del punto central. De acuerdo con Montgomery (2020), este resultado sugiere que aún existen componentes de variabilidad que no son completamente representados por el modelo cuadrático. En el presente estudio, esta condición puede atribuirse a la naturaleza altamente dinámica del fenómeno de cavitación hidrodinámica, donde pequeñas variaciones en el campo de flujo, la formación y el colapso de cavidades, así como las fluctuaciones locales de presión y velocidad, generan respuestas difíciles de representar mediante un modelo empírico de segundo orden (Brennen, 2014; Gogate y Pandit, 2005). Sin embargo, la elevada significancia global del modelo y los altos valores de R^2 indican que dichas desviaciones no comprometen su capacidad para describir el comportamiento general del régimen cavitante dentro de la región experimental.

Tabla 11.

Indicadores importantes en el análisis estadístico para Cv

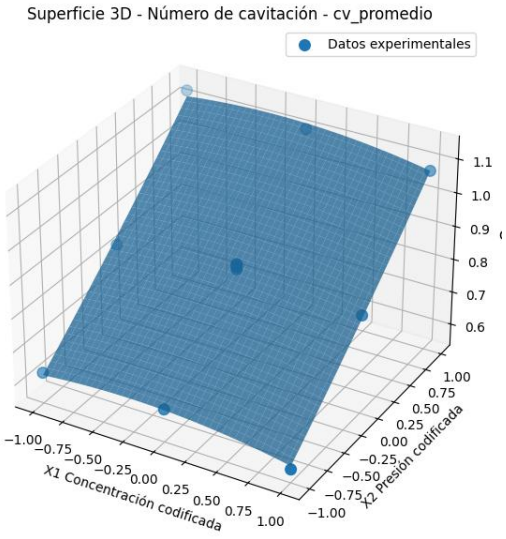
Indicador	Valor
F global	294.7
p global	5.61×10^{-8}
R^2	0.9953
p falta de ajuste	12.7
Términos significativos	X1, X2, X_1^2

En conjunto, los resultados evidencian que el modelo proporciona una representación estadísticamente robusta del comportamiento del número de cavitación dentro del dominio experimental evaluado, permitiendo analizar con confiabilidad la influencia de la concentración y la presión sobre el régimen hidrodinámico del reactor.

En la Figura 9 presenta la superficie de respuesta obtenida para el número de cavitación promedio (Cv) en función de la concentración de sacarosa (X_1) y la presión de operación (X_2). De acuerdo con el modelo estadístico previamente validado, la superficie describe adecuadamente la variación del régimen cavitante dentro del dominio experimental, permitiendo interpretar la influencia conjunta de ambos factores sobre el comportamiento hidrodinámico del reactor.

Figura 9.

Superficie de respuesta para número de cavitación



La superficie muestra que a medida que aumenta la presión de operación, el valor de **Cv** también se incrementa, mientras que la concentración produce una ligera curvatura asociada a los cambios en propiedades del fluido, como la viscosidad y la presión de vapor, que afectan el desarrollo de la cavitación (Brennen, 2014; Gogate y Pandit, 2005). Los menores valores de σ se localizaron en la región de baja presión (≈2 psi), alcanzando valores cercanos a 0,58–0,64, asociados a condiciones de cavitación moderada a intensa. En contraste, a presiones cercanas a 15 psi se obtuvieron valores superiores a 1,0, correspondientes a condiciones donde la cavitación es incipiente o poco probable. Estos resultados confirman que la presión de operación es el parámetro dominante para controlar el régimen cavitante del reactor rotor-estátor empleado en este estudio.

5.4.4 Limitaciones del Diseño Experimental en Sistemas de Recirculación

Finalmente, es necesario declarar una limitación estructural del diseño experimental empleado. El diseño central compuesto presupone que los niveles de los factores se fijan de manera exacta y reproducible en cada corrida. En el presente sistema, sin embargo, la concentración efectiva de operación difiere sistemáticamente del nivel nominal debido a la dilución generada por el agua remanente en el volumen muerto del circuito (tuberías, cuerpo del reactor, serpentín y bypass), efecto cuantificado en la Sección 5.3.1, y que además varía ligeramente entre corridas según el drenado y secado alcanzado en la limpieza.

En consecuencia, el parámetro de partida real de cada ensayo no coincide con el nivel de diseño, y la codificación de X_1 se realizó sobre los valores nominales de preparación. Por esta razón, los niveles codificados de X_1 deben interpretarse como categorías ordenadas de concentración (baja, intermedia y alta) más que como valores puntuales exactos, y las superficies obtenidas describen tendencias dentro del dominio explorado antes que predicciones cuantitativas precisas. Esta es una condición inherente a los sistemas discontinuos operados en recirculación con volumen muerto no despreciable, y constituye una fuente adicional de error experimental que se suma al error puro estimado con las réplicas del punto central.

Para mitigar este efecto, en el presente trabajo se adoptó el valor medido $°Brix_5$ como referencia interna de cada corrida, de modo que la respuesta $\Delta°Brix$ % se calcula respecto a la concentración efectivamente presente en el sistema y no respecto al valor nominal.

5.5. Síntesis de Condiciones de Operación y Proyección a Aguas Reales

Los resultados obtenidos permitieron establecer una visión integral del comportamiento del reactor rotor-estátor y responder la pregunta de investigación planteada. En primer lugar, se verificó que la generación del régimen cavitante dependió directamente de las condiciones

hidrodinámicas de operación. El análisis del número de cavitación mostró que las condiciones de 2 y 8 psi condujeron a valores de $Cv \leq 1$, correspondientes a regímenes de cavitación intensa, moderada o incipiente, mientras que a 15 psi se obtuvieron valores superiores a la unidad, asociados a una cavitación improbable. Estos resultados evidencian que el incremento de la presión de entrada no garantiza por sí mismo una mayor intensidad del fenómeno, siendo necesario considerar el comportamiento hidrodinámico completo del sistema.

En cuanto a la respuesta fisicoquímica de la solución modelo, la exclusión del periodo inicial de dilución permitió evaluar únicamente la etapa donde el sistema operó bajo condiciones estables de recirculación. Bajo este criterio, los °Brix y la conductividad fueron las variables que presentaron la mayor sensibilidad frente a las condiciones de operación, mientras que el pH, el oxígeno disuelto y la densidad mostraron variaciones reducidas y actuaron principalmente como parámetros complementarios de seguimiento. Este comportamiento coincide con lo reportado en procesos de cavitación hidrodinámica aplicados al tratamiento de aguas, donde los indicadores relacionados con la composición de la solución presentan una mayor sensibilidad que las propiedades fisicoquímicas globales (Gogate y Pandit, 2005; Thanekar et al., 2021).

El análisis mediante la metodología de superficie de respuesta permitió establecer la influencia conjunta de la concentración y la presión sobre el número de cavitación, identificando las condiciones hidrodinámicas alcanzadas dentro de la región experimental. Los resultados evidenciaron que la presión fue el factor predominante, mientras que la concentración presentó un efecto secundario asociado a las propiedades del fluido. En consecuencia, la definición de las condiciones de operación para estudios posteriores debe fundamentarse tanto en la respuesta estadística del modelo como en criterios hidrodinámicos, privilegiando aquellas regiones donde el

sistema opere bajo **Cv ≤ 1**, condición asociada a una mayor probabilidad de desarrollo del fenómeno de cavitación (Brennen, 2014; Franc y Michel, 2005).

Finalmente, los resultados obtenidos demuestran que la solución modelo de sacarosa constituye una herramienta adecuada para estudiar el comportamiento del sistema bajo condiciones controladas, permitiendo identificar las variables de operación más influyentes y establecer una metodología de análisis reproducible. Esta etapa proporciona la base experimental para la aplicación posterior del reactor al tratamiento de aguas mieles reales, donde la complejidad de la matriz incrementará la importancia de variables asociadas directamente a la degradación de la materia orgánica, particularmente la Demanda Química de Oxígeno (DQO), la cual se plantea como la principal variable de respuesta en estudios posteriores.

6. Conclusiones

Se logró adecuar y poner en operación la planta piloto de cavitación hidrodinámica tipo rotor–estátor, estableciendo las condiciones de caudal, presión y temperatura del dominio experimental bajo las cuales el sistema opera de forma estable y reproducible. La caracterización hidrodinámica demostró que el régimen cavitante ($Cv \leq 1$) se alcanza a presiones de entrada de 2 y 8 psi, con condiciones de cavitación moderada a intensa en el nivel bajo de presión, mientras que a 15 psi el fenómeno resulta improbable ($Cv > 1$). La presión de entrada fue el parámetro dominante del régimen cavitante y su disminución —no su aumento— favoreció el desarrollo de la cavitación en el sistema estudiado; la concentración de sacarosa ejerció un efecto secundario asociado a la modificación de las propiedades del fluido.

En cuanto a la respuesta fisicoquímica de la solución modelo, una vez descontado el período inicial de dilución (adoptando $t = 5$ min como referencia), las variaciones de °Brix, pH, oxígeno disuelto, conductividad y densidad durante el período de reacción se mantuvieron mayoritariamente dentro de la incertidumbre experimental del montaje, siendo el °Brix y la conductividad los parámetros de mayor sensibilidad relativa. El análisis estadístico de la reducción de sólidos solubles (Δ°Brix) no evidenció efectos significativos de la concentración ni de la presión sobre la respuesta global dentro del dominio evaluado, lo que delimita la sensibilidad mínima de las variables globales empleadas. Este resultado no descarta la ocurrencia de transformaciones inducidas por la cavitación, pero establece que su magnitud, bajo 45 minutos de tratamiento y sin agentes oxidantes auxiliares, se encuentra por debajo del umbral de detección de las técnicas analíticas disponibles.

La metodología de superficie de respuesta, aplicada al número de cavitación, permitió cuantificar la influencia conjunta de la presión —factor dominante— y de la concentración —

efecto secundario y no lineal— sobre el régimen hidrodinámico, y delimitar las regiones de operación con $Cv \leq 1$ que deben privilegiarse en investigaciones futuras. Asimismo, se identificó y declaró una limitación estructural del diseño experimental en sistemas de recirculación: la dilución por volumen muerto hace que el nivel real del factor concentración difiera del nominal, condición que se mitigó adoptando el valor medido a los cinco minutos como referencia interna de cada corrida, y que obliga a interpretar los niveles del diseño como categorías de concentración y las superficies obtenidas como tendencias dentro del dominio explorado.

Finalmente, el empleo de la sacarosa como molécula modelo permitió operar el sistema bajo condiciones controladas y reproducibles, establecer los protocolos de operación, muestreo y análisis, y definir una ventana preliminar de condiciones hidrodinámicas para el tratamiento. En conjunto, este trabajo entrega un sistema piloto operativo, caracterizado y documentado, junto con una base metodológica y estadística —con sus limitaciones identificadas— que constituye el punto de partida para la evaluación del tratamiento de aguas mieles reales del beneficio húmedo del café.

7. Recomendaciones

En futuras investigaciones se sugiere incorporar parámetros de calidad del agua de mayor relevancia ambiental, tales como la Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Biológica de Oxígeno (DBO_5), carbono orgánico total (COT), sólidos suspendidos totales y color, con el fin de cuantificar directamente la eficiencia de remoción de carga contaminante alcanzada mediante cavitación hidrodinámica.

Debido a que la sacarosa representa únicamente una fracción de los carbohidratos presentes en el mucílago del café, se recomienda estudiar moléculas modelo adicionales como glucosa, fructosa, pectinas o mezclas representativas de carbohidratos, permitiendo una aproximación más cercana a la composición real de las aguas residuales cafeteras.

Se sugiere ampliar el dominio experimental mediante la evaluación de otros niveles de presión, caudal y tiempo de residencia, con el fin de determinar con mayor precisión las condiciones que maximizan la intensidad de cavitación y la eficiencia del tratamiento.

En la evaluación de aguas residuales reales del beneficio húmedo del café, considerar la variabilidad inherente de sus parámetros de entrada, como la concentración de materia orgánica, el pH, la conductividad y el contenido de sólidos. Para ello, se recomienda emplear diseños experimentales que incorporen dicha variabilidad como un factor de estudio, con el fin de evaluar la robustez del proceso de cavitación hidrodinámica y establecer condiciones de operación representativas para su aplicación en escenarios reales.

Referencias Bibliográficas

Acarley, F., & Quipuzco, L. (2020). Producción de metano mediante digestión anaerobia de aguamiel, subproducto del beneficio húmedo del café. *Agroindustrial Science, 10*(1), 7–16.

Aguilera, Y., Consuegra, R., & Rapado, M. (1998). *Treatment of coffee wastewater by gamma radiation*. International Atomic Energy Agency (IAEA).

Alves, P. H. L., Silva, P. de S. L., Ferreira, D. C., & Gonçalves, J. C. de S. I. (2019). COD removal from sucrose solution using hydrodynamic cavitation and hydrogen peroxide: A comparison between Venturi device and orifice plate. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 24*, e12. https://doi.org/10.1590/2318-0331.241920180147

American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Environment Federation. (2023). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (24th ed.). American Public Health Association.

AOAC International. (2019). *Official methods of analysis of AOAC International* (21st ed.). AOAC International.

Arrojo, S. (2007). *Cavitación hidrodinámica aplicada a tratamiento de efluentes* [Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid].

Bakam Nguenouho, O. S., Chevalier, A., Potelon, B., Benedicto, J., & Quendo, C. (2022). Dielectric characterization and modelling of aqueous solutions involving sodium chloride and sucrose and application to the design of a bi-parameter RF-sensor. Scientific Reports, 12(1), 7209. https://doi.org/10.1038/s41598-022-11355-w

Blair Camacho, J. S. (2025). *Sistema de monitoreo, instrumentación y control para reactor de cavitación hidrodinámica*. Documento interno, Universidad Industrial de Santander.

Box, G. E. P., & Draper, N. R. (2007). Response surfaces, mixtures, and ridge analyses (2nd ed.). John Wiley & Sons.

Braham, J. E., & Bressani, R. (1978). *Coffee pulp: Composition, technology, and utilization*. Institute of Nutrition of Central America and Panama.

Brennen, C. E. (2014). *Cavitation and bubble dynamics*. Cambridge University Press.

Carpenter, J., Badve, M., Rajoriya, S., George, S., Saharan, V. K., & Pandit, A. B. (2017). Hydrodynamic cavitation: An emerging technology for the intensification of various chemical and physical processes in a chemical process industry. *Reviews in Chemical Engineering, 33*(5), 433–468. https://doi.org/10.1515/revce-2016-0032

Domínguez Martínez, J. A. (2018). La cavitación hidrodinámica. *Revista Ciencia Universitaria, 16*(1).

Flórez García, I. C. (2015). *Producción de celulosa bacteriana a partir de procesos fermentativos utilizando mucílago de café como fuente de carbono* [Tesis de maestría, Universidad Industrial de Santander].

Fogler, H. S. (2016). *Elements of chemical reaction engineering* (5th ed.). Pearson Education.

Franc, J.-P., & Michel, J.-M. (2005). *Fundamentals of cavitation*. Springer.

Gogate, P. R., & Kabadi, A. M. (2009). A review of applications of cavitation in biochemical engineering/biotechnology. *Biochemical Engineering Journal, 44*(1), 60–72. https://doi.org/10.1016/j.bej.2008.10.006

Gogate, P. R., & Pandit, A. B. (2001). Hydrodynamic cavitation reactors: A state of the art review. *Reviews in Chemical Engineering, 17*(1), 1–85. https://doi.org/10.1515/REVCE.2001.17.1.1

Gogate, P. R., & Pandit, A. B. (2005). A review and assessment of hydrodynamic cavitation as a technology for the future. Ultrasonics Sonochemistry, 12(1-2), 21-27. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2004.03.0

Gogate, P. R., Sutkar, V. S., & Pandit, A. B. (2011). Sonochemical reactors: Important design and scale up considerations with a special emphasis on heterogeneous systems. Chemical Engineering Journal (Lausanne, Switzerland: 1996), 166(3), 1066–1082. https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.11.069

González Ipuz, J. L., & Vega Rojas, L. J. (2022). *Estado del arte de la disminución de la huella hídrica mediante el diseño sustentable del beneficio húmedo del café* [Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander].

Gostiša, J., Širok, B., Repinc, S. K., Levstek, M., Stražar, M., Bizjan, B., & Zupanc, M. (2021). Performance evaluation of a novel pilot-scale pinned disc rotating generator of hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry, 72*, 105431. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105431

Gostiša, J., Zupanc, M., Dular, M., Širok, B., Levstek, M., & Bizjan, B. (2021). Investigation into cavitational intensity and COD reduction performance of the pinned disc reactor with various rotor-stator arrangements. *Ultrasonics Sonochemistry, 77*, 105669. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105669

Goud, E. H., Srinivas, A., Sutar, S. M., Kumari, A., & Srinivasan, D. R. (2026). CFD investigation of hydrodynamic characteristics and cavitation behaviour in a rotational hydrodynamic cavitation reactor with literature-based validation. Journal of the Indian Chemical Society, 103(8), 102791. https://doi.org/10.1016/j.jics.2026.102791

Granados Alba, M. I., & Lemus Moreno, L. D. (2024). *Estudio de la viabilidad técnica de la cavitación en el tratamiento de aguas residuales para la empresa AC Ingeniería Virtual* [Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander].

Gutiérrez-Mosquera, L. F., Arias-Giraldo, S., & Cardona-Naranjo, D. F. (2019). Cavitación hidrodinámica: Un enfoque desde la ingeniería y la agroindustria. *Scientia et Technica, 24*(2), 283–304. https://doi.org/10.22517/23447214.19921

Hach. (2020). *Dissolved oxygen measurement handbook*. Hach Company.

Harris, D. C. (2020). *Quantitative chemical analysis* (10th ed.). W. H. Freeman.

Hernández Hernández, H. V., & Patiño Guio, A. D. (2025). *Evaluación de la cavitación en el tratamiento de aguas de la industria cafetera con fines de reúso para AC Ingeniería Virtual* [Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander].

ICUMSA. (1998). *Specification and standard SPS-4: Density of sucrose solutions*. International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis.

ICUMSA. (2000). *Specification and standard SPS-3: Sucrose solution Brix tables*. International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis.

Jara-Mora, F. A., Vargas-Tangua, F. C., Neira-Tavera, J. A., Cobos-Ramírez, L. E., Gamboa-Contreras, W., & Muñoz-Neira, M. J. (2024). Introducing a promising new disinfection technology for the Fonce River in Colombia. *TecnoLógicas, 27*(61).

Jyoti, K. K., & Pandit, A. B. (2001). Water disinfection by acoustic and hydrodynamic cavitation. *Biochemical Engineering Journal, 7*(3), 201–212. https://doi.org/10.1016/S1369-703X(00)00128-5

Levenspiel, O. (1999). *Chemical reaction engineering* (3rd ed.). John Wiley & Sons.

Legiscomex. (2024, 10 de diciembre). *Colombia: Tercer exportador de café del mundo*. https://www.legiscomex.com/colombia-tercer-exportador-de-cafe-mundo

Malkapuram, S. T., & Sonawane, S. H. (2025). Intensified physical and chemical processing using cavitation: how far are we from commercial applications of hydrodynamic cavitation? Current Opinion in Chemical Engineering, 49(101154), 101154. https://doi.org/10.1016/j.coche.2025.101154

Maldonado Reyes, A. (2025). *Estudio de vigilancia tecnológica de los sistemas de cavitación hidrodinámica como alternativa para el tratamiento de aguas residuales* [Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander].

Montgomery, D. C. (2020). Design and analysis of experiments (10th ed.). John Wiley & Sons.

Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. (2016). *Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments* (4th ed.). John Wiley & Sons.

Nielsen, S. S. (Ed.). (2017). *Food analysis* (5th ed.). Springer.

Petkovšek, M., Zupanc, M., Dular, M., Kosjek, T., Heath, E., Kompare, B., & Širok, B. (2013). Rotation generator of hydrodynamic cavitation for water treatment. *Separation and Purification Technology, 118*, 415–423. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.07.029

Puerta-Quintero, G. I., & Ríos-Arias, S. (2011). Composición química del mucílago de café, según el tiempo de fermentación y refrigeración. *Cenicafé, 62*(2), 23–40.

Pulgarín Ramírez, E., & Chiquillo Maldonado, C. C. (2026). *Validación de un modelo CFD para la simulación de cavitación hidrodinámica en dispositivos Venturi* [Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander]. Repositorio Institucional UIS.

Šarc, A., Stepišnik-Perdih, T., Petkovšek, M., & Dular, M. (2017). The issue of cavitation number value in studies of water treatment by hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry, 34*, 51–59.

Skoog, D. A., West, D. M., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2018). *Fundamentals of analytical chemistry* (10th ed.). Cengage Learning.

Song, Y., Hou, R., Zhang, W., & Liu, J. (2022). Hydrodynamic cavitation as an efficient water treatment method for various sewage: A review. *Water Science and Technology, 86*(2), 302–320. https://doi.org/10.2166/wst.2022.201

Szaja, A., Montusiewicz, A., Pasieczna-Patkowska, S., Grządka, E., Montusiewicz, J., & Lebiocka, M. (2024). Pre-treatment of spent coffee grounds using hydrodynamic cavitation. *Energies, 17*(9), 2229. https://doi.org/10.3390/en17092229

Thanekar, P., Gogate, P. R., Znak, Z., Sukhatskiy, Y., & Mnykh, R. (2021). Degradation of benzene present in wastewater using hydrodynamic cavitation in combination with air. Ultrasonics Sonochemistry, 70(105296), 105296. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105296

Torres-Valenzuela, L. S., Sanín-Villarrea, A., Arango-Ramírez, A., & Serna-Jiménez, J. A. (2019). Caracterización fisicoquímica y microbiológica de aguas mieles del beneficio del café. *Revista ION, 32*(2), 59–66. https://doi.org/10.18273/revion.v32n2-2019006

Universidad Industrial de Santander. (2026). *Documentación interna de la planta piloto de cavitación hidrodinámica rotor-estator*. Escuela de Ingeniería Química.

Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. (2025). *Sistema de control, automatización y monitoreo en tiempo real para reactor de cavitación hidrodinámica*. Documento interno.

Wang, B., Su, H., & Zhang, B. (2021). Hydrodynamic cavitation as a promising route for wastewater treatment: A review. *Chemical Engineering Journal, 412*, 128685. https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128685

Wetzel, R. G. (2001). *Limnology: Lake and river ecosystems* (3rd ed.). Academic Press.

Haoxuan Zheng, Ying Zheng, Jesse Zhu. Recent Developments in Hydrodynamic Cavitation Reactors: Cavitation Mechanism, Reactor Design, and Applications. *Engineering*, 2022, 19 (12) : 180-198 DOI:10.1016/j.eng.2022.04.027