



# **UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO**



## **FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA E INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

### **ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**

### **TESIS**

**La cavitación hidrodinámica como pretratamiento de la vinaza de alcohol para la remoción de la carga orgánica y de fenoles.**

**PARA OBTENER EL TITULO PROFESIONAL DE  
INGENIERA QUÍMICA**

### **AUTOR**

Bachiller Keyla Eilen Castillo Bocanegra

### **ASESOR**

Dr. Segundo Alberto Vásquez Llanos – ORCID: 0000-0002-3937-9674

### **CO-ASESORA**

Dra. Ada Patricia Barturén Quispe - ORCID: 0000-0003-4566-1868

LAMBAYEQUE - PERÚ

2024



# UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO



## FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA E INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

### ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

### TESIS

**La cavitación hidrodinámica como pretratamiento de la vinaza de alcohol para la remoción de la carga orgánica y de fenoles.**

**PARA OBTENER EL TITULO PROFESIONAL DE  
INGENIERA QUÍMICA**

### APROBADA ANTE EL SIGUIENTE JURADO:

Dr. Carlos Reinerio Arce Cruzado

PRESIDENTE

Dr. Cesar Augusto Monteza Arbulú

SECRETARIO

M.SC. Manuel Antonio Díaz Paredes

VOCAL

Dr. Segundo Alberto Vasquez Llanos

ASESOR

## **DEDICATORIA**

A mis amados padres: Luis Castillo Inga y Rosa Bocanegra Llanos:

Por su amor incondicional, su constante apoyo y sus sacrificios incansables. Cada logro alcanzado es un reflejo de su dedicación y guía inquebrantable.

A mi querida abuelita: Berenice Inga Guevara:

Aunque físicamente ya no esté con nosotros, su amor y sabiduría continúan inspirándome. Esta tesis está dedicada a su memoria, como un tributo a su inquebrantable espíritu y su eterno legado.

A mi respetado asesor: Segundo Vásquez Llanos

Por su invaluable orientación, paciencia y compromiso con mi desarrollo académico. Su mentoría ha sido fundamental en cada etapa de este proyecto.

A mi estimada coasesora, Ada Patricia Barturen Quispe,

Por su colaboración, apoyo constante y valiosos aportes a lo largo de este viaje académico. Su compromiso con mi éxito ha sido verdaderamente inspirador.

A Dios,

Por ser mi fuerza en los momentos difíciles y mi guía en el camino hacia el conocimiento. Agradezco Su bendición y protección en este viaje académico y en cada aspecto de mi vida.

## **AGRADECIMIENTO**

Primeramente, quiero expresar mi profundo agradecimiento a Dios, cuya infinita misericordia ha sido la fuente de sabiduría e inteligencia que me ha permitido alcanzar esta etapa en mi vida. También deseo agradecer a mis padres, cuyo ejemplo y apoyo constante han sido una inspiración inquebrantable para mí, quienes han estado presentes de diversas maneras a lo largo de este camino.

Extendiendo mi gratitud a mi abuelita por su apoyo mientras estuvo en vida y también por su guía y cuidado espiritual que ha sido fundamental en este proceso, del cual siempre estaré agradecida.

Además, agradezco al Ingeniero, Segundo Vásquez Llanos asesor de este trabajo, cuya experiencia y conocimientos fueron indispensables para culminar este proyecto.

También quiero reconocer el aporte de mi co-asesora Ada Patricia Barturen Quispe por su orientación y apoyo constante.

No puedo dejar de mencionar a la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, nuestra alma mater, y a los profesores que impartieron conocimientos y fomentaron la ética profesional durante nuestra formación.

Agradezco también al “Instituto de Investigación del Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo” por el apoyo en materiales y equipos recibido para culminar mi tesis, conforme a lo establecido en la Resolución N° 948-2022-R del proyecto: Pretratamiento de la vinaza vía cavitación hidrodinámica y evaluación de la producción de biogás.

## INDICE

RESUMEN.....	1
ABSTRACT .....	2
INTRODUCCIÓN.....	3
CAPITULO I: DISEÑO TEÓRICO .....	5
1.1. ANTECEDENTES.....	5
1.2. BASE TEÓRICA .....	8
1.2.1. Vinazas .....	8
A. Producción de Vinazas .....	9
B. Impacto Ambiental .....	11
C. Tratamiento de Vinazas .....	12
1.2.2. Cavitación Hidrodinámica .....	15
A. Colapso de Burbujas .....	16
B. Dispositivos de restricción .....	17
C. Parámetros de Cavitación Hidrodinámica .....	20
1.2.3. Contaminantes de la Vinaza .....	23
A. Compuestos Fenólicos .....	24
B. Determinación de carga orgánica .....	25
1.2.4. Definición y operacionalización de variables .....	26
CAPÍTULO II. DISEÑO METODOLÓGICO .....	27
2.1. DISEÑO DE CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS.....	34
2.2. POBLACION Y MUESTRA .....	35
2.3. TÉCNICAS, INSTRUMENTOS, EQUIPOS Y MATERIALES .....	35
2.3.1. Técnica e instrumentos .....	35
2.3.2. Equipos y materiales .....	36
CAPITULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	38
CAPITULO IV: CONCLUSIONES .....	52
CAPITULO V: RECOMENDACIONES .....	53

CAPITULO VI: REFERENCIAS BIBLIOGRAFICA .....54

CAPITULO VII: ANEXOS.....63

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de Obtención de Vinazas. ....	8
Figura 2. Producción de Vinazas y Alcohol Etílico .....	10
Figura 3. Diagrama de Fases de Agua .....	16
Figura 4. Placas de Orificio .....	18
Figura 5. Subdivisión de los Compuestos Fenólicos .....	25
Figura 6. Diagrama de Flujo .....	27
Figura 7. Placas de Orificio de 9 y 16 agujeros .....	30
Figura 8. Esquema del Proceso de Cavitación Hidrodinámica. ....	31
Figura 9. Ubicación placas de orificio.....	31
Figura 10. Zona control de presión y temperatura.....	32
Figura 11. Control de temperatura durante proceso.....	32
Figura 12. Extracción de muestras luego del tiempo de contacto.....	33
Figura 13. Muestra de vinazas.....	35
Figura 14. Interacción de la presión y número de agujeros en la remoción de color .....	40
Figura 15. Efecto de la presión en la remoción de color.....	42
Figura 16. Efecto del número de agujeros en la remoción de color.....	42
Figura 17. Efecto del tiempo de cavitación en la remoción de color en 1 hora .....	43
Figura 18. Efecto de la presión y número de agujeros en la remoción de fenoles .....	44
Figura 19. Efecto de la presión y número de orificios en la remoción fenoles .....	45
Figura 20. Efecto del tiempo de cavitación en la remoción de fenoles durante 1 hora .....	46
Figura 21. Efecto de la presión y número de agujeros en la remoción de DQO .....	48
Figura 22. Efecto de la presión en la remoción de DQO.. .....	50
Figura 23. Efecto del número de agujeros en la remoción de DQO. ....	50
Figura 24. Acondicionamiento de la muestra. ....	63
Figura 25. Control de Caudal y Temperatura. ....	64
Figura 26. Toma de muestras .....	64
Figura 27. Caracterización de vinazas. ....	65
Figura 28. Cuantificación de fenoles. ....	66
Figura 29. Cuantificación de DQO. ....	67
Figura 30. Muestras por leer .....	68
Figura 31. Equipo de lectura de DQO .....	68
Figura 32. Ficha técnica del antiespumante.....	69

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Producción Nacional de Vinazas y Alcohol Etílico (2011-2021).....	9
Tabla 2. Parámetros de Análisis de Vinazas .....	11
Tabla 3. Número de Cavitación para Aplicación Agroindustrial .....	22
Tabla 4. Parámetros de Diseño Platos Perforados .....	23
Tabla 5. Descripción de Variables Utilizadas en el Proceso.....	26
Tabla 6. Cuadro de diseño experimental .....	30
Tabla 7. Técnica Recolección de Datos.....	36
Tabla 8. Materiales e Insumos para Análisis de DQO, SST, SDT, Ph y fenole.....	37
Tabla 9. Caracterización de Vinaza Cruda.....	38
Tabla 10. Características de las placas de orificios.....	39
Tabla 11. Parámetros de cavitación .....	39
Tabla 12. Rendimiento de cavitación y remoción de fenoles.....	47
Tabla 13. Rendimiento de cavitación y remoción de DQO. ....	51
Tabla 14. Matriz de consistencia.....	70

## RESUMEN

A inicios del 2020 a causa de la aparición del sars-cov-2 la demanda de alcohol se incrementó debido a su uso como desinfectante, por lo tanto, aumento la generación de efluentes de aguas residuales de destilerías llamados comúnmente vinazas. Por cada litro de alcohol producido se genera entre 12 a 15 litros de vinazas. Las vinazas son consideradas los residuos industriales con mayor poder tóxico y contaminante sobre el ecosistema debido a que presentan un elevado contenido de carga orgánica y de fenoles. Actualmente se vienen implementando nuevas tecnologías para abordar esta problemática, a raíz de ello se desarrolló la presente investigación la cual plantea utilizar la cavitación hidrodinámica con placas de orificio como pretratamiento eficaz para la remoción de carga orgánica y de fenoles

Para el desarrollo de la investigación, se recolectaron las muestras de las vinazas de una destilería de la región Lambayeque. Para ello, se utilizó un diseño factorial de 2x2 para evaluar el efecto de la presión y el número de agujeros de la placa de orificios sobre la remoción de carga orgánica y fenoles. Al incrementar la presión de entrada a la placa de orificio de 2 bar a 3.6 bar, se observaron mejoras significativas en la eficiencia de la remoción de contaminantes : En la remoción de color con una placa de 9 orificios la remoción aumentó de 2.45% a 28.84%, con una placa de 16 orificios, la remoción de color se incrementó de 20.42% a 27.50%; en la remoción de fenoles con una placa de 9 orificios la remoción incrementó de 83.87% a 86.43%, con una placa de 16 orificios la remoción disminuyó de 85.64% a 84.75%; en la remoción de DQO con una placa de 9 orificios la remoción aumentó de 44.48% a 62.95%, con una placa de 16 orificios, la remoción de DQO disminuyó de 57.16% a 47.82%. Estos resultados indican que la variable presión tienen una mayor significancia en la eficiencia de remoción de DQO, color y fenoles, especialmente cuando se utiliza una placa de 9 orificios. La combinación de una mayor presión un número menor de agujeros optimiza la remoción de contaminantes. En contraste, la placa de 16 orificios mostró una menor eficiencia de remoción a presiones más altas debido a una distribución del flujo menos eficiente. Estos hallazgos sugieren que la cavitación hidrodinámica es efectiva para reducir la carga orgánica y los fenoles en la vinaza de alcohol, lo que la convierte en una opción viable para su tratamiento.

**Palabras clave:** Cavitación Hidrodinámica, vinazas, placa de orificio, aguas residuales de destilería, contaminantes recalcitrantes.

## ABSTRACT

At the beginning of 2020, due to the emergence of SARS-CoV-2, demand for alcohol increased due to its use as a disinfectant, consequently increasing the generation of distillery wastewater effluents commonly known as vinasse. For every liter of alcohol produced, between 12 to 15 liters of vinasse are generated. Vinasse is considered one of the most toxic and contaminating industrial wastes to ecosystems due to its high organic load and phenol content. Currently, new technologies are being implemented to address this issue, leading to the development of this research, which proposes the use of hydrodynamic cavitation with orifice plates as an effective pretreatment for the removal of organic load and phenols.

For the research development, vinasse samples were collected from a distillery in the Lambayeque region. A 2x2 factorial design was used to evaluate the effect of pressure and the number of holes in the orifice plate on the removal of organic load and phenols. Increasing the inlet pressure to the orifice plate from 2 bar to 3.6 bar, showed significant improvements in contaminant removal efficiency: In color removal, with a 9-hole plate, removal increased from 2.45% to 28.84%; with a 16-hole plate, color removal increased from 20.42% to 27.50%. For phenol removal, with a 9-hole plate, removal increased from 83.87% to 86.43%; with a 16-hole plate, removal decreased from 85.64% to 84.75%. In COD removal, with a 9-hole plate, removal increased from 44.48% to 62.95%; with a 16-hole plate, COD removal decreased from 57.16% to 47.82%. These results indicate that pressure has greater significance in the efficiency of COD, color, and phenol removal, especially with a 9-hole plate. The combination of higher pressure and fewer holes optimizes contaminant removal. In contrast, the 16-hole plate showed lower removal efficiency at higher pressures due to less efficient flow distribution. These findings suggest that hydrodynamic cavitation is effective in reducing organic load and phenols in alcohol vinasse, making it a viable option for treatment.

**Keywords:** Hydrodynamic Cavitation, vinasse, orifice plate, distillery wastewater, recalcitrant contaminants.

## INTRODUCCIÓN

El impacto ambiental ocasionado por las industrias alcohólicas a lo largo de los años genera un problema latente que repercute directamente en la población. El proceso de elaboración de alcohol etílico produce vinazas, residuos que tienen un alto impacto ambiental debido a su elevado contenido de carga orgánica, potasio y calcio. A inicios de 2019, debido a la aparición del SARS-CoV-2, hubo un incremento en la demanda de alcohol por su uso como desinfectante. Esto provocó un aumento en la generación de efluentes de aguas residuales de destilerías, comúnmente llamados vinazas. Por cada litro de etanol producido, se generan de 12 a 15 L de vinazas con una DQO (Demanda Química de Oxígeno) entre 60-70 g/L (Ibarra, 2018), lo que complica su degradación debido a la alta carga orgánica. Adicionalmente, estas vinazas no reciben un tratamiento adecuado que permita cumplir con las características físico químicas y microbiológicas antes de ser descargadas directamente en cuerpos de agua, el suelo o el alcantarillado. Actualmente, no existe un tratamiento definitivo para estos efluentes, pero se vienen implementando pretratamientos con el fin de conseguir una solución eficaz. Una de las técnicas que está despertando interés científico es la cavitación hidrodinámica (CH). En la CH, se forman microburbujas debido a la alta presión al pasar el fluido por tubo de Venturi o placas de orificios. El colapso de estas burbujas genera la liberación de energía, lo que resulta en la degradación de la materia orgánica.

La vinaza de alcohol es un subproducto del proceso de destilación, contiene una alta carga orgánica y niveles significativos de fenoles que representan un desafío para el tratamiento y disposición final. En este estudio se investigó la influencia de la cavitación hidrodinámica como pretratamiento para la remoción de contaminantes presentes en la vinaza de alcohol. En particular, se evaluó cómo variables operativas específicas, tales como la presión de entrada al cavitador y del número de agujeros en la placa de orificio, afectan la eficiencia de remoción de la carga orgánica y los fenoles presentes en la vinaza. Los objetivos específicos incluyeron evaluar las características fisicoquímicas de la vinaza de alcohol y de la vinaza pretratada mediante la cavitación hidrodinámica, analizar la influencia de la presión de entrada al cavitador y del número de agujeros en la placa de orificio en la remoción de la carga orgánica y de fenoles, así como analizar la interacción entre la presión y el número de agujeros en la remoción de la carga orgánica y fenoles mediante la evaluación de la eficiencia de la cavitación hidrodinámica. Se formuló la hipótesis de que la cavitación hidrodinámica como pretratamiento de la vinaza de las destilerías de alcohol en la región de Lambayeque, reduciría significativamente la carga orgánica y los compuestos fenólicos presentes, facilitando su disposición final o reutilización.

El trabajo de investigación se llevó a cabo conforme a los objetivos establecidos, y los resultados obtenidos muestran una tendencia hacia una mayor eficacia de remoción a una presión de 3.6 bar en comparación con 2 bar. Además, se destaca la influencia del número de agujeros en la placa de orificio en la eficacia del proceso. Estos resultados respaldan la viabilidad de la cavitación hidrodinámica como método de tratamiento para vinazas de alcohol, proporcionando una alternativa efectiva y sostenible para su manejo.

## CAPITULO I: DISEÑO TEORICO

### 1.1. ANTECEDENTES

(Zuluaga Meza, 2019). Planteó la evaluación de los rellenos sanitarios obtenidos de los municipios de La Dorada y Aguadas mediante la cavitación hidrodinámica. Utilizaron tres muestras con tres tiempos de contacto (30 minutos, 60 minutos, 90 minutos) y utilizaron el  $H_2O_2$  como oxidante. Determinaron que el tiempo de contacto óptimo fue de 30 minutos obteniendo una remoción de Demanda Química de Oxígeno del 53.20% y una remoción de  $DBO_5$  del 51.55%.

(Gutiérrez & Cardona, 2019). Analizó el proceso de cavitación para el tratamiento de los residuos agroindustriales, evaluando los métodos y equipos utilizados en el proceso, tales como las placas de orificio y el tubo de Venturi. Además, se analizaron variables como velocidad, presión y tiempo, para lo cual se realizaron prototipos que contemplaban cada una de las condiciones dadas. Los resultados obtenidos indicaron que los parámetros geométricos afectan directamente al rendimiento del proceso. Las placas de orificio resultaron ser más eficiente debido a los colapsos drásticos y a la variación de la temperatura, mientras que el dispositivo tipo Venturi favorecía la generación de burbujas y ondas de choque más uniformes.

(Cadenas & Santos, 2020). Planteó la reducción de las concentraciones de materia orgánica y nitrogenada de las aguas del camal utilizando el tratamiento combinado con ozonización y cavitación hidrodinámica. Se tomaron tres muestras iniciales y finales con cada uno de los tratamientos para evaluar la remoción de  $DBO$ ,  $DQO$ ,  $TDS$ , entre otros parámetros. Se obtuvo una reducción de  $DBO$  del 42.19%, de  $DQO$  del 61.17%, de  $SST$  del 50.01%, de  $STD$  del 4.88% y de  $NH_4-N$  del 3.49%. Determinaron que el tratamiento combinado con ozono y cavitación hidrodinámica logra mejores resultados en la disminución de la carga orgánica en comparación con el uso de cada técnica por separado.

(Villarraig, 2021). Planteó un sistema de cavitación hidrodinámica utilizando la técnica dinámica de fluidos para el tratar aguas residuales. Se extrajeron sustratos obtenidos de la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) de Castellón, utilizando 20 litros de muestra que fueron transportadas y procesadas el mismo día. Los parámetros analizados en el sistema de cavitación incluyeron la velocidad, el tiempo, el caudal y la temperatura, correspondiente a nueve muestras evaluadas cada 10 minutos. Los parámetros de operación para reducir el  $DQO$ , fueron una la velocidad

de rotación de 500 rpm, utilizando un tiempo de contacto de 30 minutos y un flujo de recirculación de 100 L/min.

(Atayupanqui & Cáceres, 2022). Evaluó el Tratamiento combinado de Coagulación con la Cavitación Hidrodinámica para la disminución de contaminantes en Aguas Residuales de Curtiembres de Río Seco. Como resultado obtuvo una remoción del 81.7% de sólidos en suspensión totales (SST), el 73.8 % de turbidez, y el 43.9% de la Demanda Química de Oxígeno (DQO). Determinaron que la coagulación adicionada con cavitación hidrodinámica resultó en una remoción equivalente a 63.9% de DQO.

(Kumar suresh et al., 2012). Planteó el pretratamiento de agua residuales de destilería mediante cavitación hidrodinámica. Se utilizaron presiones de entrada de 13 bar y 5 bar, dilución, tiempo de reacción e índice de biodegradabilidad (BI = DBO5/DQO) como parámetros del proceso. Determinaron que al aplicar una presión de 13 bar produjo un BI elevado en comparación con la presión de 5 bar. La cavitación hidrodinámica condujo a un BI equivalente a 0.32, una reducción de DQO del 32.2%, un 3.43% de reducción de TOC y una disminución del color en un 48%. Estos resultados indican que la cavitación hidrodinámica, bajo los parámetros de operación adecuados, reduce la toxicidad de las aguas residuales a partir de la DQO, el TOC y el índice de biodegradabilidad.

(Gupta Chakinala et al., 2008). Evaluó el tratamiento de aguas industriales residuales mediante cavitación hidrodinámica y el proceso avanzado de Fenton. Se procesaron dos muestras diferentes de agua residual, considerando la presión, y la concentración de  $H_2O_2$  como parámetros de operación. Los resultados muestran que, a presiones elevadas y con una adición de peróxido de hidrógeno, se obtuvo una remoción de carbono orgánico total equivalente al rango de 60-80%.

(Agudelo Valencia et al., 2019). Planteó la evaluación de la remoción de sulfuro mediante cavitación hidrodinámica. Para ello, se utilizaron siete muestras por ensayo, considerando como variables la potencia de bomba (0.5 hp - 2 hp) y el pH (de 10 - 14); junto con tres tiempos de reacción (60 minutos, 90 minutos, 120 minutos), los parámetros de diseño variaron de acuerdo al diámetro y número de orificios; como resultados obtuvieron una remoción de 32.6% de concentración de sulfuros sin emplear catalizadores.

(Sanjay & Vivek, 2020). Evaluó la cavitación hidrodinámica con vórtices como pretratamiento de lavado gastado de la destilería (vinazas); para la obtención de biogás. Se utilizó vinazas de un ingenio azucarero de la India; con un nivel inicial de DQO de 27000 ppm. El rango de presión se mantuvo entre 2 y 5 bar, con un flujo constante de entrada. Se determinó que al trabajar con cavitación hidrodinámica en vórtice y una presión equivalente a 3.9 bar, se logró una mejora de 14% tras dos pasadas. Se observó una ganancia de energía de 2 GJ/Tonelada de DQO y un aumento del rendimiento de biogás entre el 10 y 22%, con un rango de entrada de DQO entre 120000 - 19000 ppm.

De acuerdo con los antecedentes revisados, la cavitación hidrodinámica se ha utilizado para reducir la carga orgánica, fenoles y otros contaminantes presentes en las aguas residuales. Debido a estos resultados, se espera que esta técnica pueda aplicarse aplicarlo con éxito en el tratamiento de la vinaza. Los parámetros de cavitación hidrodinámica, como el tiempo de contacto, la presión, la temperatura y la velocidad, son determinantes para obtener buenos resultados en la remoción de DQO. Actualmente, la escasez del recurso hídrico representa un obstáculo importante para los profesionales del sector agrícola. En respuesta a esta problemática, se están llevando a cabo diversas investigaciones con el fin de optimizar el manejo del recurso hídrico, lo cual se reflejará en la eficiencia de los sistemas de riego.

## 1.2. BASE TEÓRICA

### 1.2.1. Vinazas

Las vinazas son subproductos generados durante la producción de alcohol, obtenido principalmente a través de dos métodos: la fermentación directa de los jugos de la caña de azúcar o la destilación de la melaza fermentada, la composición de las vinazas varía significativamente según varios factores (la materia prima utilizada, las condiciones de fermentación y el tipo de levaduras empleadas). Estos residuos industriales poseen un alto contenido de carga microbiana derivada de restos de azúcares, levaduras y otros componentes orgánicos, además de su carga biológica, las vinazas suelen contener altas concentraciones de materia orgánica y nutrientes, lo que les confiere un potencial como recursos para aplicaciones agrícolas, como fertilizantes o mejoradores de suelos (Leal et al., 2003). Sin embargo, debido a su naturaleza corrosiva y su contenido contaminante, es fundamental implementar técnicas adecuadas de tratamiento y disposición para minimizar cualquier efecto adverso en el entorno natural y humano. La gestión adecuada de las vinazas no solo pretende reducir su impacto ambiental, sino también aprovechar su potencial como recurso en la economía circular. Estrategias como la evaporación controlada, el tratamiento biológico para la producción de biogás mediante digestión anaeróbica, y su uso en la agricultura tras dilución y mezcla adecuadas, son medidas clave para promover la sostenibilidad y minimizar los residuos en la industria del alcohol.

**Figura 1**

*Proceso de Obtención de Vinazas*



*Nota.* Extraído de “Resource Recovery from Sugarcane Vinasse by Anaerobic Digestión” (Silva et al., 2021).

Las vinazas se clasifican de la siguiente manera: Según la materia prima de origen (melaza de azúcar, la melaza de la remolacha, melaza de agave, maíz, cebadas, mezclas de mieles y jugos); por la concentración de los sólidos totales que presenta, vinaza diluida entre 8 a 10% de los sólidos totales, Vinazas semi concentradas entre 20 a 30% de los solios totales, vinazas concentradas entre 55 a 60% de solidos totales, vinazas solidas de 99 a 99.9% de solidos totales (Silva et al., 2021).

## A. Producción de Vinaza

La producción de vinaza es un proceso que comienza con la separación del jugo y el bagazo de la caña de azúcar. Una vez separados, el jugo se concentra mediante evaporación controlada para aumentar su contenido de azúcar. Este jugo concentrado se enriquece con nutrientes adicionales y ácido sulfúrico para ajustar su composición química óptima antes de pasar a la etapa crucial de fermentación. Durante la fermentación, microorganismos especializados convierten los azúcares del jugo en alcohol. Una vez completada la fermentación, el líquido resultante se somete a centrifugación para separar la levadura utilizada en el proceso. Posteriormente, se procede a la destilación, donde se obtiene alcohol puro, como subproducto, se genera vinaza, aproximadamente 13 litros por cada litro de alcohol producido. La gestión responsable de las vinazas es crucial para mitigar su impacto ambiental y aprovechar su valor potencial en aplicaciones agrícolas o industriales sostenibles.

**Tabla 1**

*Producción Nacional de Vinazas y Alcohol Etílico (2011-2021).*

Años	Producción alcohol etílico, L	Producción de vinazas, L
2011	20 047 390	260 616 070
2013	21 132 100	274 717 300
2014	21 509 972	279 629 636
2015	22 639 188	294 309 444
2016	32 762 554	425 913 202
2017	35 326 478	459 244 214
2018	46 111 186	599 445 418
2019	59 347 604.8	771 518 862.4
2020	52 338 015.4	680 394 200.2
2021	53 834 000	699 842 000

*Nota.* Recuperado de *Anuario de Estadística Ambiental* (INEI, 2021).

Como se observa en la tabla 1, la producción de alcohol etílico en el año 2019 se incrementó a 59 347 604.8 L y 771 518 862.4 L de vinazas, en comparación a los años anteriores siendo la más alta de todos los años junto con la producción del año 2021 donde hubo producción de alcohol etílico de 53 834 000 L y 699 842 000 L de vinazas (INEI, 2021). En la Figura 2 se detalla de manera gráfica cómo ha variado la producción de alcohol durante esta década (2011-2021), proporcionando una visión clara de posibles tendencias de crecimiento, estabilidad o fluctuaciones en la producción.

**Figura 2**

*Producción de Vinaza y Alcohol Etílico*



*Nota.* El gráfico representa la producción de vinazas alcohol etílico entre los periodos 2011-2021. Adaptado de INEI (2021).

La vinaza proveniente de la descarga de la caldera, poseen un color pardo claro y mientras más expuesta este al aire presenta mayor, por otra parte, la vinaza se compone de nutrientes como potasio, calcio y azufre, además de presentar un elevado contenido de materia orgánica con DQO entre 20 000 – 35 000 mg. L-1 y pH que oscila entre 3.7 y 5. En la tabla 2 se muestra la composición química de la vinaza presenta los principales parámetros donde tienen un pH comprendido entre 4.8-5.5, donde el contenido de DQO está entre 90 000-110 000 ppm (Montenegro et al., 2014).

**Tabla 2***Parámetros de Análisis de Vinazas*

Parámetros	Rango
pH	4.8 - 5.5
Conductividad	24.1-28.7 Ms/cm
DQO	90 000-110 000 ppm
DBO	31 000-54 000 ppm
Sólidos Totales	7.6 %-11.3 %
Sólidos Sedimentables	27-74 ml/L
Cenizas	3.3% - 4.8%
Materia Orgánica	5.5 %- 8.9 %
Calcio	0.16 -0.25%
Magnesio	532-880 ppm
Sodio	544 -1 800 ppm
Potasio	1.21% -1.82%

*Nota:* Recuperado de “*Estudio de la Ozonización de la Vinaza como Tratamiento Complementario para la Reducción de la Carga Orgánica*”. (Medina Carlos, 2019).

**B. Impacto Ambiental**

Debido a lo antes mencionado se puede tomar en cuenta que si estas son vertidas al suelo o entran en contacto con el agua pueden constituir una gran amenaza medio ambiental muy grave. Los principales efectos negativos que genera la inadecuada gestión de la vinaza en el medio ambiente son las siguientes:

- **En el agua**

Si es que las vinazas fueran vertidas a un punto de agua cercano, causarían en primer lugar la muerte de los ecosistemas acuáticos ,debido a que genera un aumento de nutrientes tales como fosfatos y nitratos, ocasionado un aumento de algas que se encargan de oxigenar el agua, pero cuando estas cumplen su ciclo de vida y mueren estas generan una sobre oxigenación la cual genera como consecuencia la muerte de la fauna que habitualmente está presente y a la vez la lixiviación de nitratos a las aguas subterráneas, generando los problemas medioambientales.

- **En el Aire**

Debido a la composición de la vinaza esta emite al medio ambiente diferentes compuestos tales como: metano, dióxido de carbono, óxido de nitrógeno,  $\text{NH}_3$  y algunas veces partículas que depende generalmente de cómo están salen del proceso y del manejo y disposición final que se le da (Senatore et al., 2017).

- **En el Suelo**

Lo que sucede al verter altas dosis de vinazas, sin un tratamiento previo, puede perjudicar la fertilidad de los suelos, debido al aumento de sal en las concentraciones generando un desequilibrio de los nutrientes. Esto es un grave peligro, debido a que la mayoría de las agroindustrias, tienen sus cultivos de materia prima alrededor de las mismas, por ejemplo en el caso los ingenios azucareros en los terrenos aledaños a este existen varias hectáreas sembradas con caña de azúcar la cual posteriormente va ser cosechada y usada como materia prima para la elaboración de diferentes productos, además que existen pequeñas comunidades alrededor que son conformadas generalmente por la mano de obra de la industria y sus familias (Senatore et al., 2017).

### **C. Tratamiento de Vinazas**

Actualmente existen diferentes formas de tratar y además de usar las vinazas como materia prima para la obtención de otros productos para generar nuevos valores agregados que benefician a la población. A continuación, se mencionará los principales tratamientos a los que es sometida la vinaza.

- **Tratamiento Físico**

- **Cribado**

Proceso mecánico donde se ejerce un movimiento sobre una placa perforada originando la separación de los materiales dependiendo del tamaño de las partículas.

➤ **Sedimentación**

La sedimentación es la separación de las fases sólida y líquida de una suspensión concentrada por efecto de la gravedad.

• **Tratamiento Físico Químico**

El tratamiento físico químico tiene como finalidad la oxidación de los compuestos orgánicos contaminantes mediante la adición de reactivos químicos. En este grupo se encuentran.

➤ **Floculación**

La floculación se relaciona con los fenómenos de transporte de los líquidos con las partículas que haga contacto. Esto comprende la formación de puentes químicos entre las partículas, la cual radica por la formación de malla de coágulos porosas y tridimensionales. Así se formaría un floculante lo suficientemente grande y pesado para contribuir a la sedimentación.

➤ **Ultrafiltración**

Este tipo de filtración utiliza membranas para separar diferentes tipos de sólidos y líquidos.

➤ **Electrocoagulación**

Se basa en la formación de un coagulante con un ánodo de sacrificio (cationes de hierro o aluminio), los cuales han sido corroídos por la corriente que se les aplica, mientras se da la evolución del hidrógeno en el cátodo, permite la remoción de contaminantes mediante la flotación. La eficiencia del proceso depende de la conductibilidad eléctrica.

• **Procesos de Oxidación Avanzada**

Son métodos de tratamientos basados en la formación de especies altamente oxidantes, cuyo objetivo es la eliminación de compuestos solubles no biodegradables en las aguas residuales.

➤ **Osmosis Inversa**

Se trata la transformación espontánea de moléculas de agua presentes en una solución diluida a una solución concentrada a

través de una membrana semipermeable la cual deja pasar el agua, pero no las sales disueltas.

➤ **Electrofenton**

Este proceso se usa una celda electrolítica sin dividir la cual contiene un cátodo (grafito) y un ánodo (Pt), donde se genera peróxido de hidrógeno el cual se forma por la reducción de dos electrones del oxígeno en el cátodo. Dentro de sus principales ventajas se encuentra la producción del radical hidroxilo, un oxidante fuerte y no selectivo, de las relaciones entre  $H_2O_2$  y  $Fe^{+2}$ . (Fernandez & Quispe, 2021).

➤ **Foto-fenton**

Los procesos de oxidación fotoquímica se han convertido en una alternativa muy favorable para los efluentes de este tipo. La utilización de la luz como la fuente de irradiación resulta rentable por las ventajas económicas y ecológicas. Sin embargo, la irradiación que alcanza longitudes de onda superiores a 300 nanómetros solo serán eficientes los fotocatalizadores que absorban en el rango uva-visible del espectro. (León et al. , 2020).

➤ **Ozono**

Este proceso se basa en la aplicación de ozono al medio, el cual tiene la característica más ventajosa de ser un oxidante muy poderoso, con una alta solubilidad con el agua, rápidamente disponibles y sin la formación de otros productos que tengan que ser removidos. Para utilizar su poder desinfectante en el tratamiento de aguas o residuos industriales el ozono, requiere un análisis muy exhaustivo de acuerdo a las características físicas y químicas que presenta, ya que los factores que puedan afectar el proceso son la solubilidad y su estabilidad. (Medina, 2019).

➤ **Cavitación hidrodinámica**

Ante los principales problemas de los contaminantes en el agua, el suelo y los cuerpos de agua, la cavitación hidrodinámica resulta ser una tecnología que beneficia al medio ambiente debido a que no utiliza químicos reduciendo el costo de procesamiento; a pesar que

degrada sustancias orgánicas complejas cuyos componentes son inflexibles con respecto a otros tratamientos convencionales.

- **Tratamiento Biológico**

En los tratamientos biológicos existe la depuración de la materia orgánica biodegradable, originada por la presencia de microorganismos los cuales se mantienen en suspensión o bien se adhieren generando una capa de crecimiento.

- **Tratamiento Aerobio**

Este tratamiento es usado en el tratamiento de aguas agroindustriales. Se obtienen en este proceso un subproducto principal (biomasa), que es conocida actualmente como proteína unicelular, empleado adicionalmente para la alimentación de animales. Este sistema puede trabajar con una variedad de microorganismos (bacterias puras, hongos, consorcios mixtos), pero de cada uno se obtiene un resultado diferente, generalmente depende del tipo de efluente que ha sido usado. Una de las desventajas más notorias es que en el tratamiento específico de la vinaza radica en el DQO al final de todo el proceso sigue siendo alta, debido a la biomasa que se genera, debido a esto la purificación de la vinaza es relativamente baja (Medina, 2019).

- **Tratamiento Anaerobio**

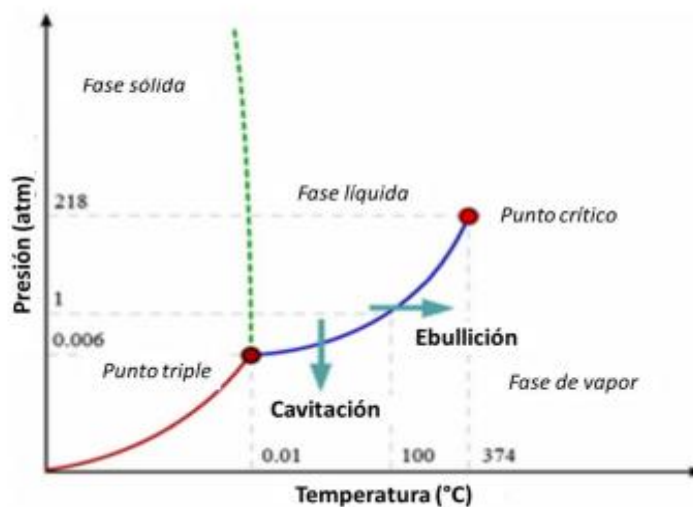
La digestión anaeróbica es un proceso biológico en que la materia orgánica es sometida a la ausencia de oxígeno, y mediante la proliferación y la acción de algunas bacterias específicas, se descompone formando un producto gaseoso, también conocido como biogás, el cual posee en su composición CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, etc. Esta conversión biológica en la que se encuentra expuesta la materia orgánica, se realiza una serie de reacciones bioquímicas que transcurren tanto de forma consecutiva como de forma simultánea. (Medina, 2019).

### 1.2.2. Cavitación Hidrodinámica

La cavitación hidrodinámica es un fenómeno complejo que describe la formación de burbujas en la fase líquida debido a alteraciones en la velocidad del flujo, influenciadas por la geometría del sistema. Este proceso ocurre cuando la presión del líquido disminuye abruptamente por encima de la presión de vapor, como resultado de variaciones en el diámetro de las tuberías o de constricciones en el sistema. La formación de burbujas durante la cavitación puede llevar a un aumento significativo de la temperatura, incluso por encima del punto de ebullición, debido a la liberación de energía cinética durante el colapso de las burbujas. Este efecto puede tener implicaciones importantes en la eficiencia y la integridad de los sistemas fluidodinámicos, ya que las altas temperaturas generadas pueden afectar el rendimiento y la durabilidad de los componentes (Sánchez Vera, 2022).

**Figura 3**

*Diagrama de Fases de Agua*



*Nota. Extraído de " Tratamiento de Aguas Residuales de Planta de Beneficio Bovino con Cavitación Hidrodinámica y Subsecuente Cultivo de Microalgas. (Sánchez Vera, 2022).*

#### A. Colapso de Burbujas

El fenómeno de cavitación ha sido objeto de precauciones debido a su impacto perjudicial en máquinas hidráulicas como bombas y válvulas. Los dispositivos hidrodinámicos de cavitación se fundamentan en la creación de flujos inestables y modos hidrodinámicos de impacto en el fluido que

atraviesa por ellos. Cuando las burbujas de vapor cambian abruptamente de estado gaseoso a líquido, colapsan, dando lugar a la formación de vórtices y pulsaciones en velocidad, presión y temperatura. La rápida implosión de las burbujas provoca que el agua acelere hacia su interior, generando un choque hidráulico con emisiones locales de alta energía. Experimentos han demostrado que estas emisiones pueden alcanzar presiones del orden de 100 MPa y temperaturas de 10000 K, aunque están confinadas en áreas muy específicas de aproximadamente 5 nm a 10 nm. Este fenómeno es de corta duración, no superando los 10 nanosegundos (Domínguez, 2018). Cuando el fluido atraviesa una sección estrecha a alta velocidad, se produce la formación y colapso de un considerable número de burbujas que implosionan tanto simétrica como asimétricamente. Las superficies sólidas comúnmente se ven afectadas por el fenómeno de cavitación generado en el dispositivo, siendo las microcorrientes de alta intensidad los responsables de la erosión del material.

## **B. Dispositivos de restricción**

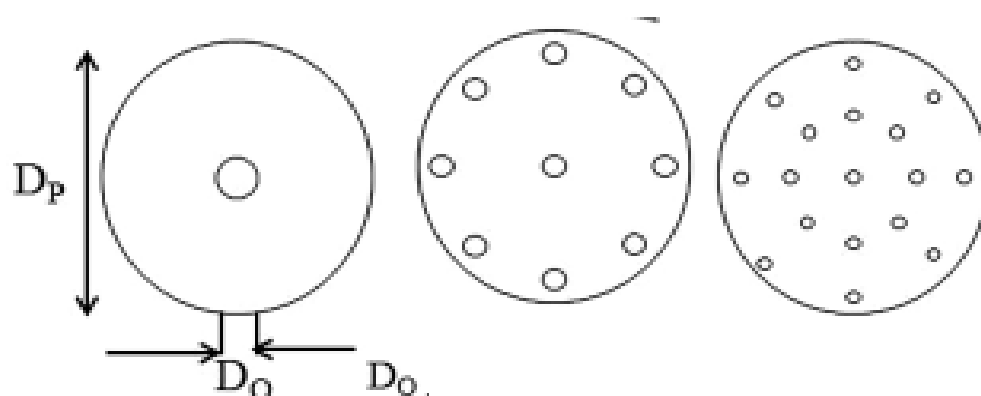
La cavitación hidrodinámica se puede iniciar fácilmente mediante la introducción de una constricción en la trayectoria del flujo de un líquido. Este proceso implica un aumento en la energía cinética y la velocidad del fluido, lo que resulta en una disminución local de la presión. Cuando esta reducción de presión es suficiente para que caiga por debajo del límite de cavitación, determinado por la presión de vapor del medio a la temperatura de operación, se forman cavidades. Posteriormente, cuando la presión se recupera, las burbujas colapsan de manera abrupta. Al pasar por la constricción, generalmente se genera una turbulencia intensa en el líquido, cuya magnitud está directamente relacionada con la caída de presión y la velocidad de restablecimiento de la misma. Estos factores están influenciados por la geometría de la garganta y las condiciones de flujo del líquido. Por lo tanto, controlando la forma, tamaño y condiciones de operación del dispositivo, es posible regular la intensidad de la cavitación para alcanzar los efectos físicos y/o químicos deseados (Domínguez, 2018).

Durante la implosión de las burbujas en sistemas de cavitación, las presiones y temperaturas resultantes, así como la cantidad de radicales libres generados, dependen de la configuración y tecnología empleada.

Equipos diseñados para cavitación utilizan dispositivos como platos perforados, tubos Venturi, rotores de alta velocidad y homogeneizadores para inducir la constricción necesaria. Las cavidades formadas varían en tamaño, típicamente en micras, y el tiempo de formación de las burbujas puede ser de microsegundos. Durante el colapso de las burbujas, se produce un aumento de la presión del flujo, lo que comprime las burbujas y reduce su tamaño. Este proceso eleva la temperatura del gas contenido dentro de las burbujas, creando condiciones de alta temperatura y presión. Además, se generan oxidantes como el grupo  $\text{OH}^\cdot$ , que son utilizados para eliminar microorganismos presentes en aguas residuales (Martín Vidaller, 2015). Los dispositivos de restricción utilizados en la cavitación hidrodinámica son el tubo de Venturi y la placa de orificios. Cuando un líquido pasa por las placas de orificio, la velocidad del líquido aumenta y la presión cae ocasionando el fenómeno de la cavitación en el que se empieza a generar burbujas las cuales se expanden y empiezan a recuperar las presiones, las cavidades colapsan liberando energía la cual desencadena una serie de reacciones generando los radicales  $\text{OH}^\cdot$ , los cuales son los responsables de la degradación de contaminantes presentes en la muestra. En la figura 4 se presentan un esquema general de las placas de orificio.

**Figura 4**

*Placas de orificio*



*Nota.* Donde  $D_p$  Representa el diámetro de placa y  $D_o$  Representa el diámetro del orificio. Extraído de “*Caracterización del Flujo en Placa de Orificio*” (López Morais, 2020-2021).

Las placas de orificio son dispositivos utilizados en sistemas de cavitación hidrodinámica, caracterizados por las siguientes propiedades fundamentales:

- **Perímetro Total de Agujeros (PTa):**

Se calcula mediante la Ec. 01, que describe el perímetro total de los agujeros distribuidos en la placa de orificio donde  $d_h$ : 1.5 mm  $d_t$ : 25.4 mm.

$$PTa = n \cdot 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_t}{2}\right) \dots \dots \dots \quad Ec. 01$$

Donde:

n: Número de agujeros.

$d_t$ : Diámetro de la tubería (mm)

- **Área de Flujo (A):**

Se determina mediante la Ec. 02, que indica el área total a través de la cual fluye el fluido en la placa de orificio.

$$A = n \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_h}{2}\right)^2 \dots \dots \dots \quad Ec. 02$$

Donde:

n: Número de agujeros

$d_t$ : Diámetro del orificio (mm<sup>2</sup>).

- **Ángulo de Convergencia ( $\alpha$ ):**

Define la convergencia del flujo hacia la garganta de la placa de orificio, influenciado por el diámetro del orificio según la Ec. 03.

$$\alpha = \frac{4}{d_h} \dots \dots \dots \quad Ec. 03$$

- **Ángulo de Divergencia ( $\beta$ ):**

Indica la divergencia del flujo después de la garganta de la placa de orificio, la relación entre el diámetro del orificio y el diámetro del paso según la Ec. 04.

$$\beta = n * \left(\frac{d_h}{d_p}\right)^2 \dots \dots \dots \quad Ec. 04$$

**Donde:**

$d_h$ : Diámetro del orificio(mm)

$d_t$ : Diámetro de la tubería (mm).

- **Área Transversal (A):**

$$A = \frac{\pi \cdot d_h^2}{4} \dots \dots \dots \text{Ec. 05}$$

Donde  $d_h$ : Diámetro del orificio

- **Velocidad del flujo:**

$$v = \frac{Q}{A} \dots \dots \dots \text{Ec.06}$$

Donde Q es el caudal volumétrico.

- **Número de cavitación**

$$C_v = \frac{P_2 - P_v}{\frac{1}{2} \rho \cdot v^2} \dots \dots \dots \text{EC. 07}$$

Donde:

$P_2$ : Presión salida dispositivo de cavitación

$P_v$ : Presión de vapor

$\rho$ : Densidad del líquido

### C. Parámetros de Cavitación Hidrodinámica

Durante el proceso de cavitación hidrodinámica se tiene que tener en consideración una serie de parámetros que garanticen que el proceso sea óptimo entre estos se encuentra:

- **Presión de entrada**

La presión ideal de ingreso será determina con el reactor a utilizar, la presión de entrada se verá afectada directamente a la intensidad de la cavitación; para cavitador hidrodinámico de tipo placa de orificios de baja presión se esperan presiones comprendidas entre 4-6 bar.

- **Velocidad del flujo**

Las configuraciones en el dispositivo de constricción posibilitan la presencia de diversas velocidades y caídas de presión, las cuales resultan en intensidades específicas de cavitación. En consecuencia, los reactores exhiben una notable flexibilidad en términos operativos,

permitiendo el control de la presión de entrada, la manipulación del flujo, la gestión de temperaturas y la adaptación a condiciones geométricas. Cuando un fluido es impulsado por una bomba, experimenta una aceleración en la cámara de cavitación debido al estrechamiento en la sección de paso, es decir, a la reducción del diámetro del flujo. De acuerdo con la ley de Bernoulli, esta aceleración resulta en una disminución de la presión con el aumento de la velocidad del líquido. Posteriormente, la desaceleración del flujo, provocada por el aumento en el área de la sección transversal del dispositivo, genera un aumento en la presión externa a la burbuja, induciendo su implosión y el consiguiente pulso de presión. (Benito & Arrojo, 2006).

- **Temperatura de operación**

Si es que tenemos un aumento en la temperatura esta afectara no solamente a la cinética de degradación sino también en el aumento de contaminantes generados en las burbujas colapsadas; es importante la optimización de la temperatura de operación va a depender específicamente del compuesto a utilizar.

- **Presión**

La presión de ingreso del fluido al sistema es crucial en la cavitación hidrodinámica, ya que influye significativamente en el colapso de las cavidades. Una presión de ingreso elevada puede provocar colapsos más energéticos, generando pulsos de presión intensos que aumentan la disociación de las moléculas de agua y potencian los efectos químicos y oxidativos del proceso. La manipulación y control de la presión de entrada se considera esencial debido a su capacidad para regular estos efectos en el sistema (Benito & Arrojo, 2006).

- **Tiempo**

Las escalas de tiempo simplemente representan los intervalos durante los cuales se desarrollan la disminución de la presión y la recuperación de la presión, fusionando así el fenómeno de la cavitación hidrodinámica. Es esencial que el tiempo de crecimiento de las burbujas sea lo suficientemente extenso para alcanzar el radio de la esfera que garantiza una implosión de intensidad apropiada.

- **pH**

La eficiencia de la degradación del compuesto se ve reducida en condiciones alcalina que en las condiciones ácidas.

- **Condiciones geométricas**

La eficiencia del proceso de cavitación va a depender de la geometría del dispositivo de cavitación. Para poder diseñar el reactor hidrodinámico se tiene que tener en cuenta la relación que existe entre el comportamiento de la cavidad y los parámetros de operación para poder cuantificar la intensidad de cavitación ejercida. Las condiciones de cavitación en las placas de orificios pueden ser alteradas al modificar la sección transversal de la placa o el perímetro de los orificios; en el caso de un tubo de Venturi al modificar el diámetro, el ángulo o la longitud de la garganta también afectan las condiciones del cavitador. (Benito & Arrojo, 2006).

**Tabla 3**

*Número de Cavitación para Aplicación Agroindustrial*

Aplicación	Cv Óptimo
Tratamiento de aguas residuales	0.15 – 0.55
Remoción microorganismos en fuentes acuíferas	0.10 – 0.54
Producción de biodiésel a partir de aceites vegetales	0.10 - 0.20
Hidrólisis de aceites	0.15 – 0.30
Despolimerización de goma de agar	0.25 - 0.38
Emulsificación	0.16 – 0.23
Síntesis de nano-partículas	0.10 - 0.61
Extracción de lípidos a partir de microalgas	1.17
Pretratamiento de biomasa lignocelulósica	0.017 -0.048
Mejoramiento del proceso de producción de cerveza	0.10 - 0.30

*Nota.* Recuperado de “*Hydrodynamic Cavitation: Engineering and Agribusiness Approach*” (Gutiérrez & Cardona, 2019).

Como se aprecia en la tabla 3 donde plantea el número de Cv óptimo para cada tratamiento industrial, este parámetro ayuda a la caracterización de las condiciones de cavitación en cada uno de los dispositivos de estrangulamiento.

**Tabla 4**

*Parámetros de Diseño Platos Perforados*

Reactor	Descripción del Equipo	Aplicación	Parámetros
	N: 33, D: 1 mm, P1: 2 Bar Cv: 0.29	Degradación de tintas en aguas residuales	A: 4 mm <sup>-1</sup> B: 0.023
Placas orificio	N: 40, D: 2 mm Cv: 0.14	Desrupción celular	A: 2mm <sup>-1</sup>
	N: 33; D: 2 mm P1:4.5 Bar Cv: 0.15	Tratamiento de aguas (desinfección)	A: 5 mm <sup>-1</sup> B: 0.04
	N: 25; D: 2 mm P1: 1.5 Bar	Síntesis de Biodiesel	A: 2 mm <sup>-1</sup> B: 0.25
	N: 1; D: 2 mm Cv: 0.15	Producción de nanopartículas	A: 2 mm <sup>-1</sup> B: 0.01

*Nota.* Donde N: Número de agujeros, D: Diámetro de excavación, P1: Presión de Ingreso, Cv: Número de cavitación. En los parámetros de diseño se encuentra A: Cociente entre perímetro de la garganta y el área de flujo, B: Relación entre el área de la constricción y el área transversal del dispositivo. Recuperado de “*Hydrodynamic Cavitation: Engineering and Agribusiness Approach*”. (Gutiérrez et al., 2019).

### 1.2.3. Contaminantes de la vinaza

Las vinazas pueden contener una variedad de contaminantes que pueden afectar negativamente al medio ambiente si no se manejan adecuadamente. Algunos de los contaminantes comunes presentes en la vinaza son:

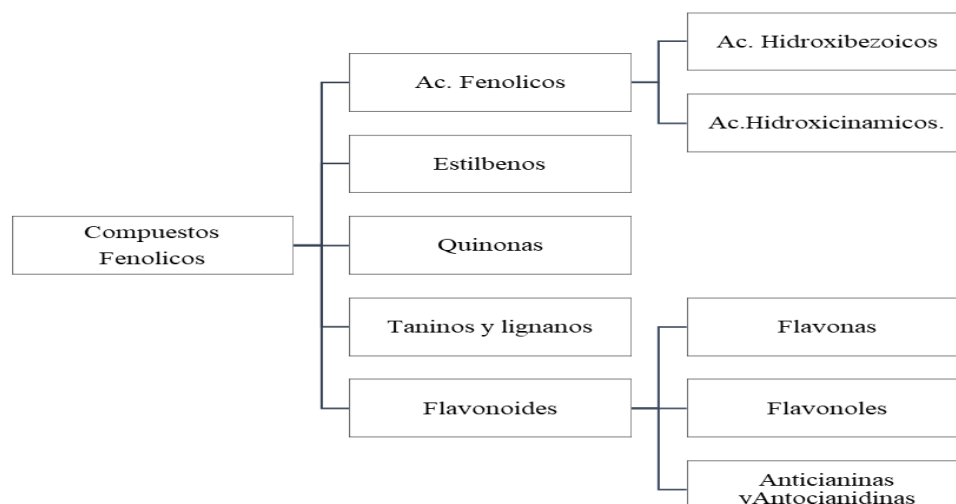
## **A. Compuestos Fenólicos**

Los compuestos fenólicos son compuestos orgánicos, en su estructura molecular contienen un grupo fenol, un anillo aromático conectado a un grupo funcional hidroxilo. Desde la estructura química, son un grupo diverso que comprenden desde las moléculas más simples como son los ácidos fenólicos hasta los polímeros más complejos como la lignina y los taninos. (Amaya, 2010). Los compuestos fenólicos se encuentran en el reino vegetal; estos compuestos debido a sus características son utilizados para el tratamiento de algunas enfermedades crónicas, estos químicamente comprenden desde las moléculas más sencillas hasta polímeros complejos. Las plantas sintetizan una variedad de productos secundarios los cuales contienen un grupo fenol.

Estas sustancias son conocidas como polifenoles, que se biosintetizan en las plantas por medio de rutas, como lo son la del ácido shikímico y la del acetato-malonato, a través de las cuales se biosintetizan más de 8000 compuestos fenólicos los cuales tienen una alta capacidad oxidativa; a pesar de su alta capacidad oxidativa estas reaccionan por la interacción ejercida. D.A (2017). En la actualidad se han logrado cuantificar un total de 14 compuestos fenólicos presentes en las vinazas (Ac. Gálico, Ac. Cumarínico, taninos, etc.); generados a partir de la melaza de caña, estos pasan por la etapa de destilación en donde se utiliza temperaturas entre 85 a 90°C; que contribuyen a la formación de activos antioxidantes (melanoidinas), responsables del color café característico de la vinaza. Los compuestos fenólicos se encuentran presentes en las vinazas, debido a la degradación de las fibras del jugo del bagazo este tipo de compuestos es tóxico en la fauna marina incluso en bajos niveles. (Aviña & Domínguez, 2023).

**Figura 5**

*Subdivisión de los Compuestos Fenólicos*



*Nota.* Representa los diferentes tipos de compuestos fenólicos presentes en la naturaleza. Información extraída de *PHENOLIC COMPOUNDS IN FOOD*. (Peñarrieta et al., 2014).

## **B. Determinación de carga orgánica**

La carga orgánica se refiere a la cantidad de materia orgánica presente en un medio, como el agua, el suelo o un efluente industrial, y se expresa típicamente en términos de la materia orgánica total (MOT), o demanda bioquímica de oxígeno (DBO); existen diversas formas de cuantificar la carga orgánica, las cuales serán mencionadas a continuación:

### ➤ **Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)**

Este método mide la cantidad de oxígeno necesario para que los microorganismos descompongan la materia orgánica presente en una muestra de agua durante un período específico de tiempo, generalmente 5 días a 20°C. La DBO se expresa en miligramos de oxígeno por litro de muestra (mg/L).

### ➤ **Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

Este método mide la cantidad total de sustancias oxidables presentes en una muestra de agua. A diferencia de la DBO, que depende de la actividad biológica, la DQO se determina mediante reacciones químicas y se expresa en miligramos de oxígeno por litro de muestra (mg/L).

### 1.2.3. Definición y operacionalización de variables

**Tabla 5**

*Descripción de Variables Utilizadas en el Proceso*

Variable	Definición	Dimensiones	Indicador	Índice	Técnicas -Métodos /Instrumentos
Variable independiente: Presión	Magnitud física que mide la fuerza en dirección perpendicular por unidad de superficie, a la entrada de la placa de orificio.	Presión de entrada	X1: Presión	Bar	-Manómetro
N.º de Orificios de Placa	Cantidad de orificios que tiene una placa para mejorar la eficiencia de remoción de contaminantes.	N.º de Orificios	X2: Placa de orificio	Orificios	-Placa de orificio
Variable Dependiente: Reducción de parámetros fisicoquímicos	Remoción de carga orgánica y fenoles que resultan ser susceptibles a la variación que ejerce la variable independiente	Demanda Química de Oxígeno Fenoles	Y1: DQO Y2: Fenoles	mg O <sub>2</sub> /L mg/L ácido gálico	-Método 5220 D (APHA, AWWA, & WEF, 1985). -Método de Folin Ciocalteu .

*Elaboración propia*

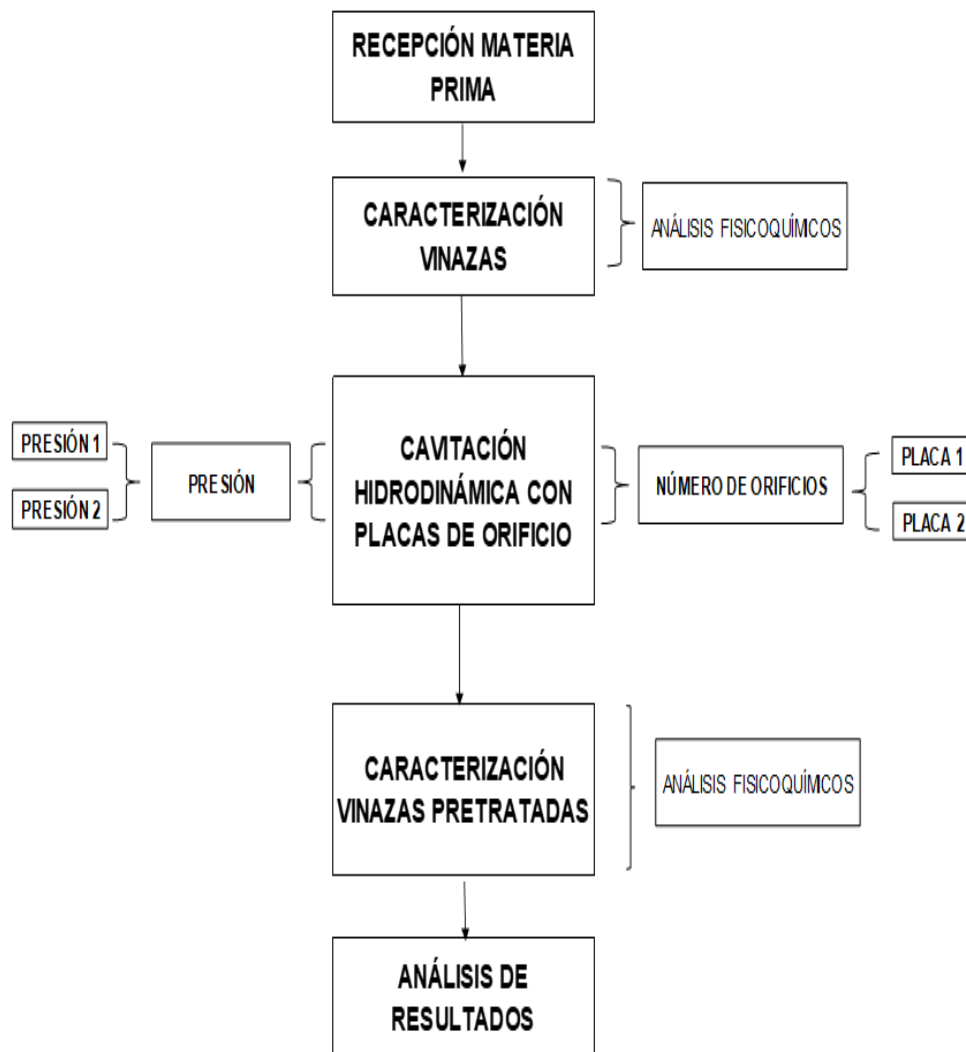
## CAPITULO II. DISEÑO METODOLÓGICO

### 2.1. PROCEDIMIENTO

La figura 6 representa el esquema del proceso experimental, donde se visualiza las diferentes etapas involucradas en la medición y análisis de las vinazas teniendo en cuenta las variables analizadas.

**Figura 6**

*Diagrama de Flujo*



*Elaboración propia*

#### 2.1.1. Recolección de la muestra

Se recolectaron 60 litros de vinaza de una destilería en la región Lambayeque, los cuales fueron almacenados en recipientes plásticos de 20 L y transportados al laboratorio de investigación de la Facultad de Ingeniería

Química de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo; donde se almacenaron en el refrigerador a 4 °C para su conservación y posterior caracterización.

### **2.1.2. Caracterización de vinazas**

Para la caracterización de la vinaza se trabajó con una dilución de vinaza/agua equivalente a 1:10. Posteriormente se extrajeron tres muestras con las cuales se llevaron a cabo los análisis de DQO, SST y Fenoles teniendo en cuenta los parámetros de pH y temperatura, siguiendo las normas técnicas de la Norma Técnica Peruana ISO/IEC 17025:2006 "Requisitos Generales Relativos a la Competencia Técnica de los Laboratorios de Ensayo y Calibración". Posteriormente se realizaron los siguientes análisis:

#### **A. Determinación de pH**

Se extrajo 50 ml de la muestra a analizar y se colocó en un vaso precipitado para la medición de pH se utilizó un potenciómetro (HANNA HI 5221), se encendió se introdujo el electrodo y posteriormente se esperó hasta que la lectura sea estable, se realizó la lectura 3 veces.

#### **B. Determinación de Fenoles**

Para la determinación de fenoles se utilizó el método de Folin-Ciocalteu. donde se elaboró la preparación de reactivos (solución de ácido gálico y solución de hidróxido de sodio), para tener la curva de calibración y posteriormente realizar las lecturas de las muestras se tomó los datos con una longitud de onda ( $\lambda = 765 \text{ nm}$ )

#### **C. Demanda Química de Oxígeno**

Para determinar el DQO se utilizó método estándar APHA 5220 D. Para esto primero se preparó la solución para la curva de calibración; posteriormente se preparó las soluciones de digestión (A y B) para luego desarrollar el procedimiento para la determinar el DQO. Se realizó la lectura en 600 nm en SPECTROMETER UV/VIS-T92.

#### **D. Determinación de Sólidos totales (ST)**

Se utilizó método estándar APHA 2540 B Para la determinación de sólidos totales se secó las cápsulas de porcelana en una estufa

(BINDER FD-115) a 105° C por 24 h. Posteriormente se dejó enfriar hasta alcanzar la temperatura ambiente. Se pesó cada cápsula tres veces y se promedió las masas. Posteriormente se colocó las cápsulas con 10 ml de muestra y se calentó en el horno a 105°C aproximadamente 3.5 h con lo cual se encontró la masa constante (m1). Se dejó enfriar las cápsulas y se pesó tres veces consecutivas y se promedió las masas (m2).

$$g/L \text{ sólidos totales} = \frac{M_2(g) - M_1(g)}{mL \text{ muestra}} \times 1000 \dots \quad \text{Ec. 08}$$

#### E. Determinación de Sólidos totales volátiles

Se utilizó método estándar 2540 E; con las cápsulas anteriormente utilizadas se llevan a la mufla (THERMOLYNE EUROTHERM-2116) a 550°C por 30 minutos y se dejó enfriar las cápsulas posteriormente se pesan obteniendo M1. Posteriormente se colocó las cápsulas con 10 ml de muestra y se calentó en el horno. Se pesó la cápsula tres veces y al promediar las masas se obtuvo la masa(m3).

$$g/L \text{ sólidos totales volátiles} = \frac{M_3(g) - M_1(g)}{mL \text{ muestra}} \times 1000 \dots \quad \text{Ec. 09}$$

#### F. Determinación de densidad

Para la determinación de la densidad se pesó una probeta calibrada de 25 ml vacía, luego se adicionó 25 mL de muestra; posteriormente se pesa en balanza analítica (KERN- ABT 220-4NM); se repite el procedimiento tres veces por cada muestra, se calculó la densidad con la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{m_{\text{vinaza}}}{15ml} \dots \quad \text{Ec. 10}$$

#### G. Acondicionamiento de muestra

Para el acondicionamiento de la vinaza se trabajó con una dilución equivalente a 1:10 utilizando 1 litro de vinaza en 10 litros de agua. Se tomó una muestra general de pH con el pH metro (HANNA) y se adicionó H2SO4 concentrado para regular el pH a 2. Posteriormente se adicionó un antiespumante (DEFOAMER 605) para reducir la formación de burbujas durante el proceso de cavitación; se adicionó 2 ml de antiespumante para 10 litros de vinaza diluida.

### 2.1.3 Cavitación hidrodinámica

Se trabajó con presiones de 2 bar - 3.6 bar y placas de orificio de 1.5 mm con 9 orificios y 16 orificios. En la Tabla 6 se presenta el diseño experimental del tratamiento de la vinaza mediante cavitación hidrodinámica:

**Tabla 6**

*Cuadro de diseño experimental*

	Orden Est	Presión	Número de agujeros
1	1	2	9
2	10	3.6	9
3	4	3.6	16
4	3	2	16
5	7	2	16
6	2	3.6	9
7	8	3.6	16
8	11	2	16
9	9	2	9
10	6	3.6	9
11	5	2	9
12	12	3.6	16

*Elaboración propia.*

**Figura 7**

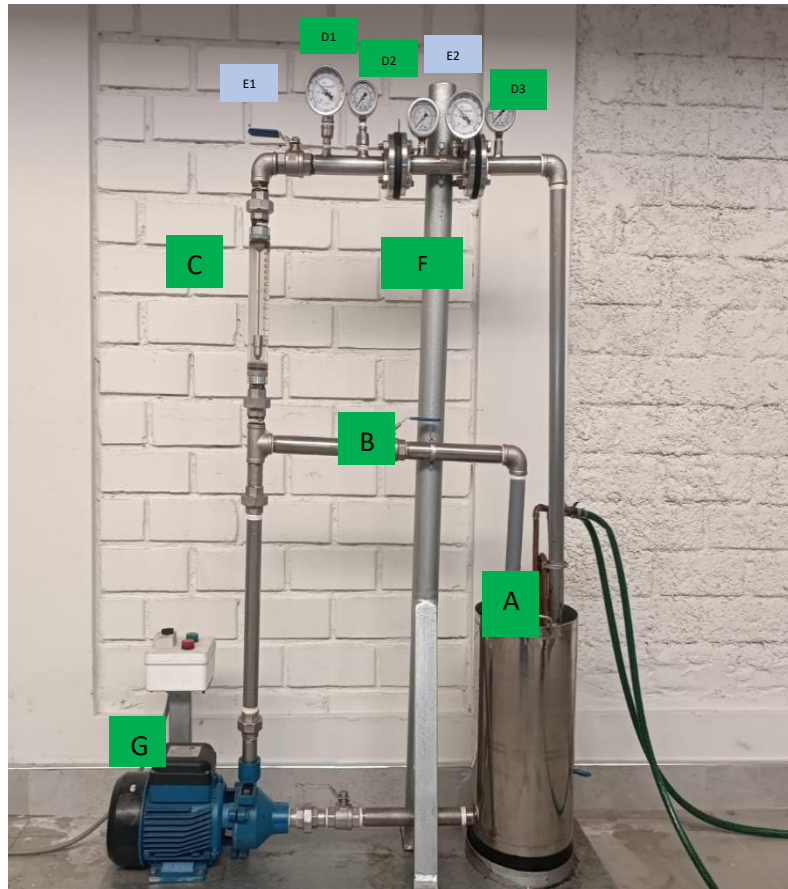
*Placas de Orificio de 9 y 16 agujeros*



*Elaboración propia*

**Figura 8**

*Esquema del Proceso de Cavitación Hidrodinámica*



*Nota.* Donde A: Tanque de almacenamiento, B: Válvula de regulación de presión, C: Rotámetro, D1-D2-D3: Manómetros, E1 - E2: Termómetros, F: Placa de orificios, G: Bomba, H: Serpentín.

**Figura 9**

*Ubicación placas de orificio*



*Elaboración propia*

**Figura 10**

*Zona control de presión y temperatura*



*Elaboración propia*

#### **H. Procedimiento de cavitación**

En la figura 8 se muestra un esquema general del módulo de cavitación hidrodinámico., donde se añadió la vinaza al tanque de almacenamiento (A), se fue cambiando la placa de orificio como se muestra en la figura 10 y controlando las condiciones de operación en la zona de control que se muestra en la figura 10; la presión y el caudal fueron regulados mediante una válvula ubicada en la línea de derivación. Posteriormente se realizaron las corridas siguiendo el cuadro del diseño experimental especificados en la Tabla 6. Posteriormente se encendió la bomba para que la muestra circulara a través del sistema de cavitación durante 60 minutos Se tomaron paulatinamente lectura de temperatura, presión y de caudal.

**Figura 11**

*Control de temperatura durante proceso*



*Elaboración propia.*

### I. Caracterización de vinaza pretratada

Para realizar los análisis para determinar DQO, Fenoles y pH después del proceso de cavitación con un tiempo de contacto de 60 minutos y número de orificios (9 orificios y 16 orificios) se tomó la muestra de vinaza tomando en cuenta el cuadro de diseño experimental se almacenaron en recipientes de 1000ml y se rotularon utilizando la siguiente denominación:

$$CH - P_X - N_Y - Z \dots \dots (1.5 \text{ mm}) \dots \dots \dots \text{Ec. 11}$$

Donde:

CH: Abreviación de Cavitación Hidrodinámica.

P<sub>x</sub>: Presión de operación (2 Bar -3.6 Bar).

N<sub>y</sub>: Número de orificios de la placa (9 orificios - 16 orificios).

Z: Tiempo de contacto

### Figura 12

*Extracción de muestra luego del tiempo de contacto*



*Elaboración propia*

### J. Caracterización de vinaza pretratada

Para la caracterización de la vinaza después del proceso de cavitación con un tiempo de contacto de 60 minutos y número de placas de orificios;

se trabajó con el mismo procedimiento descrito en el apartado “b” (caracterización de vinazas). Posteriormente se extrajeron tres muestras con las cuales se llevaron a cabo los análisis.

#### K. Cálculo del rendimiento de cavitación

El rendimiento de cavitación se refiere a la capacidad de una bomba para manejar adecuadamente la cavitación, un fenómeno que ocurre cuando la presión del líquido cae por debajo de su presión de vapor, formando burbujas que colapsan violentamente. Para calcular el rendimiento de cavitación se utilizó las siguientes ecuaciones :

- **Potencia disipada**

$$P = \frac{(\Delta p \cdot Q)}{v} \dots\dots\dots \text{Ec.12}$$

**Donde:**

$\Delta P$ : Caída de presión

Q: Caudal

V: Volúmen de tratamiento

- **Cantidad de fenoles-DQO degradados**

$$c_d = c_0 - c_f \dots\dots\dots \text{Ec. 13}$$

**Donde:**

Co: Concentración inicial

Cd: Concentración final

#### 2.1.4 Análisis estadístico

Los resultados experimentales se reportaron como la media  $\pm$  desviación estándar, y cada experimento se realizó por triplicado para asegurar la precisión de los datos. Para el análisis estadístico de los datos, se empleó un análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia del 5% ( $p < 0.05$ ). Este análisis permitió identificar las diferencias significativas entre los grupos experimentales. Posteriormente, se utilizó la prueba de post hoc de Duncan para determinar específicamente cuál de los grupos se diferencian entre sí.

En las situaciones donde los datos no cumplían con los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza, se recurrió a la prueba no paramétrica de Kruskal -

Wallis, se aplicó la prueba de post hoc de Holm. El software R se utilizó para llevar a cabo los análisis estadísticos y los gráficos se generaron utilizando el software Origin Pro 2022. En la figura 7 se muestra el diagrama de flujo de cavitación hidrodinámica.

## **2.2. POBLACIÓN Y MUESTRA**

### **2.2.1. Población**

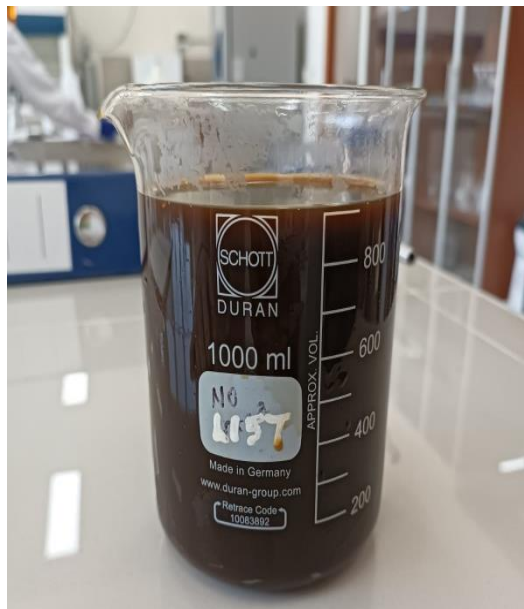
La población estaba conformada por las vinazas de alcohol producidas por las destilerías de la Región Lambayeque.

### **2.2.2. Muestra**

Se empleó una muestra de tipo probabilístico aleatorio simple, consistente en 1 litro de vinaza cruda diluida con 10 litros de agua de grifo, determinada por la capacidad del equipo experimental. De este volumen se extrajeron alícuotas de 1 000 ml para los análisis en el laboratorio.

### **Figura 13**

*Muestra de vinaza*



*Elaboración propia*

## 2.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS, EQUIPOS Y MATERIALES

### 2.3.1. Técnicas e instrumentos

Para el presente estudio se emplearon las siguientes técnicas e instrumentos de recolección de datos, tal como se muestra en la Tabla 7:

**Tabla 7**

*Técnica Recolección de Datos*

Parámetros	Técnica	Instrumento
pH	Potenciométrico	Potenciómetro digital
DQO	Standard Methods “Examination of Water and Wastewater” 22nd Edition.SM 5220 D	Espectrómetro
SST/TDS	Standard Methods “Examination of Water and Wastewater” 22nd Edition. SM 2540 D.	Estufa, mufla
Fenoles	Método 5550 de Folin-Ciocalteu	Espectrómetro

*Elaboración propia*

#### A. Instrumentos de recolección de datos

La recolección de datos para el proyecto consta de dos partes:

- Documental:

Se ha recopilado información de las revistas indexadas en SCOPUS, Web of Science y de Wiley de los últimos 10 años, así como de tesis nacionales e internacionales, libros y estadísticas nacionales, regionales e internacionales de las destilerías alcoholeras.

- Observación y muestreo:

A través de experimentos con muestras aleatorias, se extrajo la información y los datos científicos mediante la caracterización de la vinaza alcoholera y la vinaza pretratada. Estos datos fueron registrados en una ficha de recolección de datos y en una libreta de apuntes.

### 2.3.2. Equipos y materiales

En la Tabla 8 se menciona los materiales laboratorio, reactivos y equipos utilizados para cada análisis, estos son fundamentales para poder garantizar la fiabilidad de los resultados obtenidos en el estudio.

**Tabla 8**

*Materiales e Insumos para Análisis de DQO, SST, SDT, pH y fenoles*

Análisis	Métodos Analíticos		
	Reactivos	Materiales	Equipos
pH	Agua destilada	Pizetas	PHmetro
	Buffer 4.01	Vaso	
	Buffer 7.01	precipitado 50 ml	
	Buffer 11.01		
DQO	Agua destilada	Probeta 200 ml	Balanza analítica
	10.216 g	Probeta 500 ml	Thermoreactor
	Dicromato de potasio (417 ml)	Crisoles	Espectrofotómetro
	Ácido sulfúrico	Probetas 100 ml	
	33.3 g	Pipetas 10 ml	
	Sulfato de	Botella Ámbar	
	mercúrio (2.53 g)	250 ml	
	Sulfato de plata	Tubos	
SST-SDT		Crisoles	Estufa
	Agua destilada	Capsula de porcelana	Mufla
		Filtro	Balanza
		Espátula	
Fenoles	Reactivo Folin	Matríz 100 ml	Balanza
	Carbonato de cálcio (20%)	Pipeta 10 ml	Espectrómetro
		Matraz 100 ml	

*Elaboración propia.*

### CAPITULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Caracterización de vinazas

En la Tabla 9 se detallan los resultados de la caracterización de la vinaza cruda.

**Tabla 9**

*Caracterización de la Vinaza Cruda*

ANALISIS	Unidades	Valor promedio	(Singh et al., 2021)	(Prazeres et al., 2019)
pH	-	4.62 ± 0.017	4.1	4.27-4.32
Fenoles	mg AG/L	338.5 ± 14.44*	13970 ± 1660**	-
ST	mg/L	85177±784	149100 ± 480	21500 – 22200
STV	mg/L	27957 ±191	-	13900 – 15200
CE	dS/m	29.66±0.072	-	8.21 – 8.56
DQO	mg O2 /L	106137 ± 3303	147400 ± 850	30633 – 31600
Color		2.3073±0.0021*	-	-
Color aparente			marrón oscuro	

\*Vinaza diluida: relación 1:10, \*\*: aguas residuales crudas de destilería, ABS: absorbancia

Este análisis abarcó una variedad de parámetros de las vinazas, la cual presenta baja acidez, como se muestra en la Tabla 9. Además, se observó que la demanda química de oxígeno, los sólidos totales y el contenido total de fenoles están por debajo de los valores reportados por Singh et al. (Singh et al., 2020) y otros autores. Específicamente, se ha reportado que el DQO de la vinaza fue de  $110065 \pm 11486 \text{ mg L}^{-1}$ , el contenido fenólico de  $10834 \pm 1476 \text{ mg L}^{-1}$ , y un pH de  $4.39 \pm 0.006$  (España-Gamboa et al., 2017). Sin embargo, otros autores han reportado valores inferiores a los encontrados en este trabajo (Prazeres et al., 2019). La caracterización de la vinaza cruda muestra variaciones en los parámetros analizados en comparación con estudios previos. Las diferencias observadas pueden estar relacionadas con variaciones en la composición de la materia prima, los procesos de fermentación y las condiciones específicas del proceso de destilación (España-Gamboa et al., 2017).

### 3.2. Características de las placas de orificio

La tabla 10 proporciona las características de las placas de orificio consideradas en la cavitación hidrodinámica

**Tabla 10**

*Características de las Placas de orificio*

Placas de Orificio	Número de Agujeros (n)	Perímetro total agujeros, mm	Área de flujo (mm <sup>2</sup> )	Espesor placa (mm)	$\alpha$ (min <sup>-1</sup> )	$\beta$
PO1	9	42.41	15.90	2	2.67	0.031
PO2	16	75.40	28.24	2	2.67	0.056

*Elaboración propia*

En la tabla 11 se proporciona información sobre las condiciones operativas que se consideraron en la cavitación hidrodinámica.

**Tabla 11**

*Parámetros de Cavitación*

Combinación	P2 (Pa)	PV (Pa)	Densidad kg/m <sup>3</sup>	Q (m <sup>3</sup> /s)	A (m <sup>2</sup> )	V (m/s)	Cv
CHP2N9-20	72000	7631	968.16	0.00028	1.59E-05	17.61	0.43
CHP2N16-20	100000	8218	987.35	0.00040	2.83E-05	14.13	0.93
CHP3.6N9-20	96000	8625	996.43	0.00035	1.59E-05	22.01	0.36
CHP3.6N16-20	150000	10682	991.44	0.00057	2.83E-05	20.14	0.69

*Elaboración propia*

La presión y el número de cavitación (CV) son factores determinantes en la formación de cavidades como en el colapso de las mismas. Al aumentar la presión también aumenta el caudal y la velocidad en la placa de orificios, lo que reduce el

número de cavitación. (Katiyar y otros, 2024). En la tabla 11 se observa que, para placas con 9 y 16 orificios, el CV disminuye de 0.43 a 0.36 y de 0.93 a 0.69 respectivamente, cuando la presión sube de 2 a 3.6 bar. Sin embargo, al aumentar el número de orificios a una misma presión, el CV tiende a elevarse. Aunque el CV refleja la prospección del líquido a cavitarse, no siempre predice la eficiencia final del proceso. (Rajoriya y otros, 2017). Se ha observado que un CV de 0.36 logrado con una placa de 9 orificios y una presión de 3.6 bar es eficaz para remover el color, DQO y fenoles; debido a que a un CV más bajo promueve la generación de radicales hidroxilo, mejorando la degradación de contaminantes orgánicos. (Rajoriya y otros, 2017).

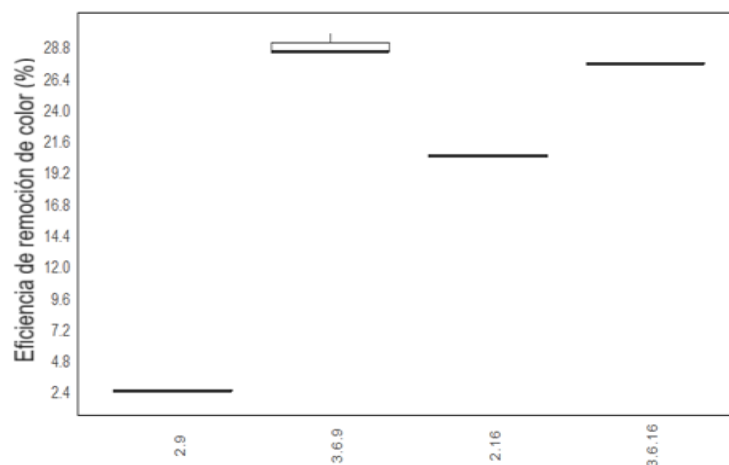
### 3.3. Efecto de la presión y el número de agujeros

#### 3.3.1. Efecto de la presión y el número de agujeros en la remoción de color

Se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, debido que los datos no cumplieron con el supuesto de normalidad ( $p < 0.05$ ). Se encontró una diferencia estadísticamente significativa ( $p < 0.05$ ) en la interacción entre la presión y el número de agujeros en la eficiencia de remoción de color, esto indica que al menos una de las combinaciones de la presión y el número de agujeros de las placas orificios afectan de manera eficiente en la remoción de color. En la figura 14 se muestra la interacción de la presión y número de agujeros remoción color.

**Figura 14**

*Interacción de la presión y número de agujeros en la remoción de color*



Fuente: Software R Studio

Con una mayor presión (3.6 bar) y un menor número de agujeros en las placas de orificio (9 agujeros), la remoción de color de la vinaza diluida es más efectiva. Esto sugiere que una menor cantidad de agujeros permite concentrar la cavitación en áreas específicas lo que aumenta la eficiencia de remoción de color (Kabata et al., 2024). Con la misma presión, pero utilizando una placa con 16 agujeros, la remoción de color sigue siendo efectiva, aunque ligeramente inferior en comparación con la combinación anterior. Esto se debe a la dispersión de la energía de cavitación a través de un mayor número de orificios, lo que reduce la intensidad de cada punto de cavitación (Kabata et al., 2024). La configuración óptima de presión y número de agujeros es crucial para maximizar la eficiencia del proceso de cavitación hidrodinámica en la remoción de contaminantes. Al incrementar la presión de entrada a la placa de orificio de 2 bar a 3.6 bar, se observó un aumento en la remoción de color de  $2.45 \pm 0.06 \%$  a  $28.84 \pm 0.81 \%$  utilizando una placa de 9 orificios. En el caso de la placa de 16 orificios, la remoción de color incrementó de  $20.42 \pm 0.13 \%$  a  $27.50 \pm 0.06\%$ . El aumento de presión en la placa de 9 orificios mejora significativamente la remoción de color debido a una mayor turbulencia y una mejor mezcla entre el agua y los componentes de color (Smith et al., 2007).

Aunque la placa de 16 orificios también muestra una mejora con el aumento de presión, su eficiencia inicial a 2 bar ya es considerablemente alta. Un mayor número de orificios puede generar una mejor distribución del flujo a presiones elevadas, incrementando la eficiencia de remoción (Gutiérrez & Cardona, 2019). Estos resultados son consistentes con estudios previos que destacan la importancia de la turbulencia y la distribución del flujo en la eficiencia de la remoción de contaminantes, investigaciones sobre la remoción de compuestos orgánicos volátiles y otros contaminantes también muestran que una mayor presión mejora la remoción en sistemas con múltiples puntos de salida (Tapie et al., 2016). Por lo tanto, los resultados indican que el aumento de presión mejora la remoción de color en ambas placas, siendo más pronunciado el efecto en la placa de 9 orificios.

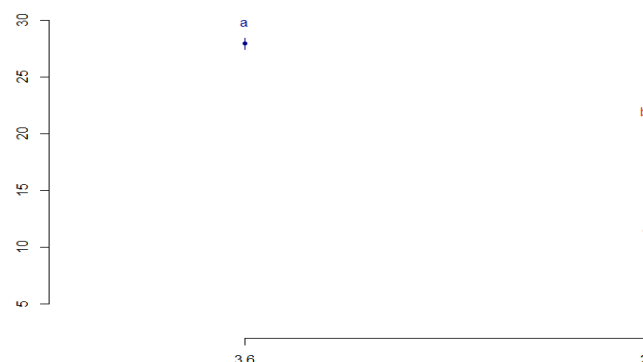
#### **A. Efecto de la presión**

La figura 15 muestra el efecto de la presión en remoción de color. Los valores etiquetados con las letras a y b indican diferencias

estadísticamente significativas. La presión de 3.6 bar resulta ser más efectiva en la remoción del color en comparación con la presión de 2 bar.

### Figura 15

*Efecto de la presión en la remoción de color*



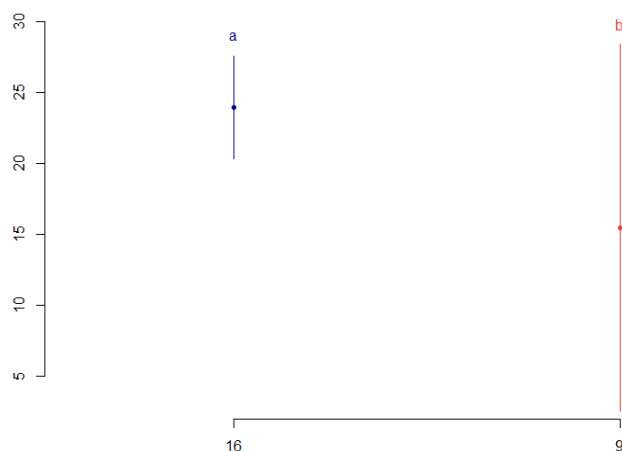
Fuente: Software R Studio

### B. Efecto del número de agujeros

La figura 16 muestra el efecto del número de agujeros en remoción de color. Los valores etiquetados con las letras a y b indican diferencias estadísticamente significativas. La placa con 16 agujeros resulta ser más efectiva en la remoción del color en comparación con la placa con 9 agujeros.

### Figura 16

*Efecto del número de agujeros en la remoción de color*



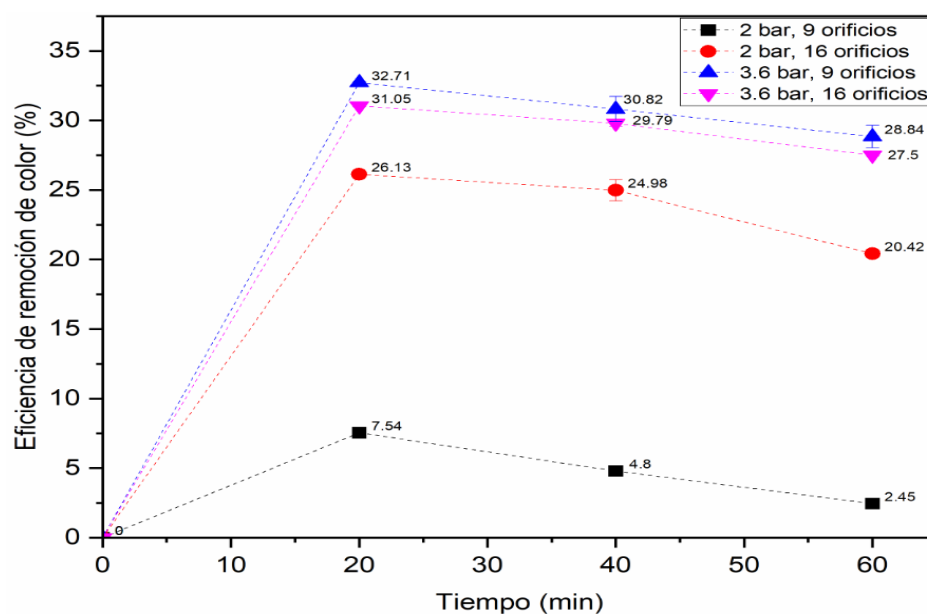
Fuente: Software R Studio

### C. Efecto del tiempo de cavitación en la remoción de color de la vinaza de alcohol de caña de azúcar durante 1 hora

La figura 17 muestra del tiempo de cavitación en la remoción de color de las vinazas durante 1 hora.

**Figura 17**

*Efecto del tiempo de cavitación en la remoción de color en 1 hora*



Fuente: Software Origin 2022

A los 20 minutos, la eficiencia más alta en la remoción de color se alcanza a una presión de 3.6 bar con un valor de  $32,71\% \pm 0,067$  ligeramente superior al  $31,05\% \pm 0,37$  obtenido a 2 bar para ambos ajustados. A 2 bar, la eficiencia es menor, alcanzando solo un  $26,13\% \pm 0,034$  con una placa de 16 orificios. Esta alta eficiencia se atribuye a la formación, crecimiento e implosión de cavidades en el fluido, inducidos por las variaciones de presión y el incremento en la velocidad debido a la cavitación (Nieto y col., 2021).

El aumento inicial en eficiencia de la remoción de color se explica por la generación de un número suficiente de cavidades, cuyo colapso produce radicales OH reactivos que descomponen los compuestos responsables del color, generando productos intermedios que siguen reaccionando con los radicales hasta su completa degradación (Poblete y col., 2020). Sin embargo, a los 60 minutos, se observa una disminución en la eficiencia de remoción de color para ambos ajustes, siendo más notable a 2 bar con 9 orificios, con

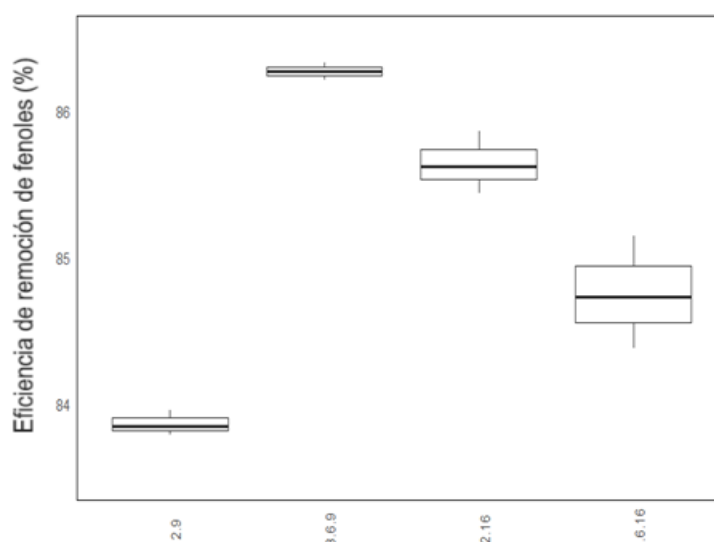
una reducción de  $2,45\% \pm 0,067$ . Este descenso se debe a que los gases inicialmente favorecen la cavitación, pero a medida que el proceso avanza, estos se eliminan del medio, reduciendo la efectividad de la cavitación (Thanekar y otros, 2018).

### 3.3.2. Efecto de la presión y el número de agujeros en la remoción de Fenoles

El análisis de ANOVA dio un valor de  $p < 0.05$ , lo que indica que existe una interacción significativa entre la presión de entrada y el número de orificios de la placa, sugiriendo que el efecto de la variación de la presión depende del número de orificios de la placa. Para identificar dichas diferencias se aplicó la prueba post hoc de Duncan. La figura 18 muestra la interacción de la presión y el número de agujeros en la remoción de fenoles.

**Figura 18**

*Efecto de la presión y número de agujeros en la remoción de fenoles*



Fuente: Software R Studio

Con una presión de 3.6 bar y con una placa de orificios de 16 agujeros la remoción de fenoles disminuye en comparación con la placa de orificios de 9 agujeros. La distribución menos uniforme del flujo y la caída de presión a través de los múltiples orificios reducen la eficiencia de la cavitación hidrodinámica, dispersando la energía y disminuyendo la intensidad de la descomposición de fenoles (Saharan, 2011). Al incrementar la presión de entrada a la placa de orificio de 2 bar a 3.6 bar con la placa de 9 orificios, se observó que la remoción de fenoles aumentó de  $83.867 \pm 0.0862\%$  a  $86.430$

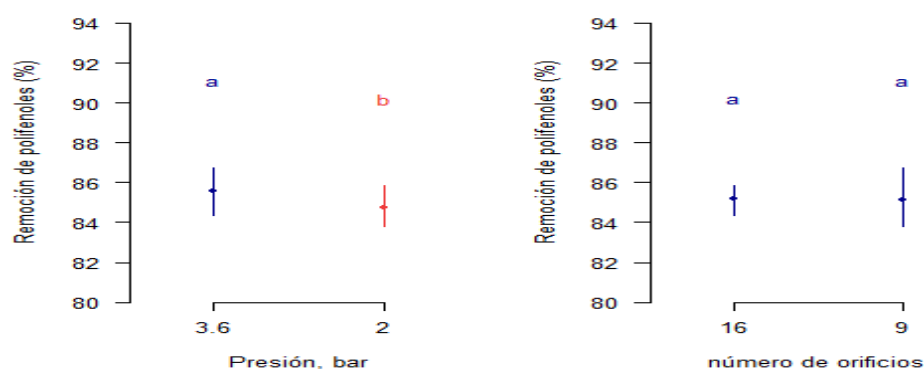
$\pm 0.31$  % mientras que con la placa de 16 orificios la remoción de fenoles disminuyó de  $85.640 \pm 0.211$  % a  $84.753 \pm 0.386$  %. Este comportamiento puede explicarse de diversas formas. En la placa de 9 orificios, el aumento de la presión mejora la remoción de fenoles debido a que, a un menor número de orificios, el flujo tiende a desacelerar rápidamente y la tasa de recuperación aumenta; esto provoca que acelere el colapso de burbujas, permitiendo la difusión de radicales OH (González & Londoño., 2014).

Por otro lado, en la placa de 16 orificios, el aumento de presión resulta en una menor eficiencia de remoción. Al aumentar el número de agujeros en la placa produce un mayor número de eventos de cavitación generando mayor cantidad de colapso de burbujas, que son efectivos para tratar contaminantes; pero la reducción de la eficiencia se ve asociada al aumento de la turbulencia, la turbulencia aumenta la resistencia del flujo y puede causar pérdidas de energía (Gonzales, 2022). Además, más orificios pueden causar una caída de presión, afectando negativamente la turbulencia y el tiempo de contacto, factores esenciales para la remoción de contaminantes; por lo tanto, de los resultados conlleva a que el aumento de la presión de entrada puede mejorar la remoción de fenoles en placas con menos orificios debido a mayor turbulencia y mejor mezcla. Sin embargo, en placas con más orificios, este aumento de presión puede reducir la eficiencia por la distribución menos uniforme del flujo y la caída de presión.

La figura 19 muestra el efecto de la presión y número de orificios en la remoción de fenoles.

**Figura 19**

*Efecto de la presión y número de orificios en la remoción de fenoles*



Fuente: Software R Studio.

### A. Efecto de la presión

Los valores etiquetados con las letras a y b indican diferencias estadísticamente significativas. La presión de 3.6 bar resulta ser más efectiva en la remoción de polifenoles en comparación con la presión de 2 bar.

### B. Efecto del número de orificios

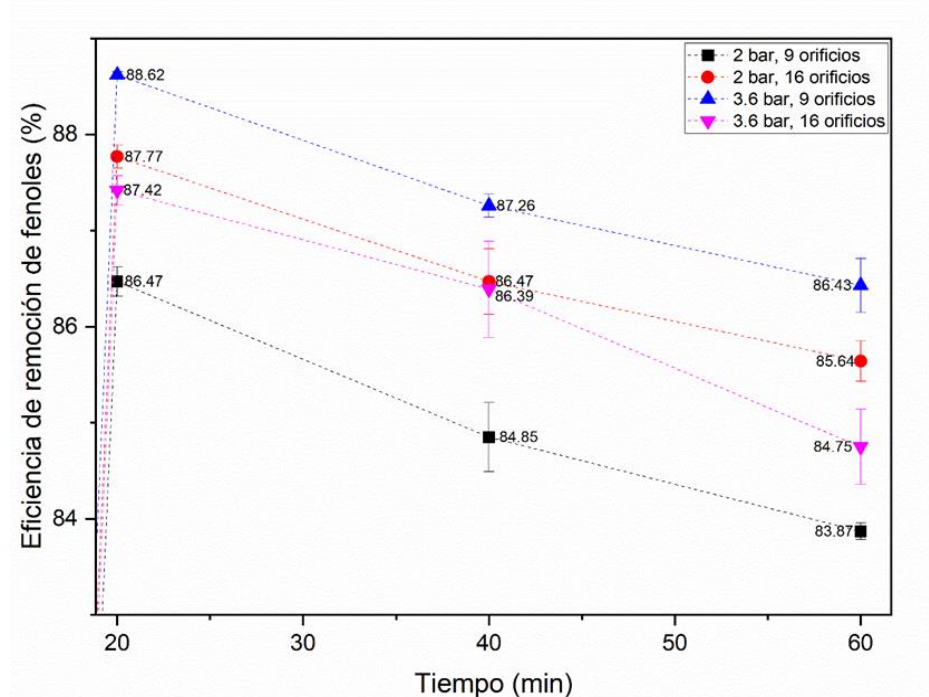
Los valores etiquetados con las mismas letras indican que no hay diferencias estadísticamente significativas. La placa con 16 agujeros no muestra una diferencia estadísticamente significativa en la remoción de polifenoles en comparación con la placa con 9 agujeros.

### C. Efecto del tiempo de cavitación en la remoción de fenoles de la vinaza de alcohol de caña de azúcar durante 1 hora:

La figura 20 muestra el efecto del tiempo de cavitación en la remoción de fenoles de las vinazas durante 1 hora

**Figura 20**

*Efecto del tiempo de cavitación en la remoción de fenoles durante 1 hora*



Elaboración propia

El análisis de los tiempos de contacto sugiere que después de 20 minutos, la presión de 3.6 bar tiende a mantener una remoción de fenoles más alta y más estable que a la presión de 2 bar. A los 20 minutos la remoción de fenoles con la presión de 3.6 bar y con 9 agujeros es más alta en comparación con las demás condiciones. También conforme transcurre el tiempo, la eficiencia de remoción disminuye. La remoción de fenoles tiende a estabilizarse o incluso disminuir después de un periodo inicial de contacto debido a la saturación del sistema y a la disminución de la actividad cavitacional con el tiempo (Mason & Peters, 2002).

#### D. Rendimiento de cavitación

En la tabla 12 se muestra el rendimiento de cavitación en la remoción de fenoles.

**Tabla 12**

*Rendimiento de cavitación y remoción de fenoles*

Parámetros		Rendimiento de cavitación, mg/J			remoción de fenoles, %		
Presión	número	20 min	40 min	60 min	20 min	40 min	60 min
2	9	0.01053	0.00530	0.00335	86.47	84.85	83.87
2	16	0.00863	0.00429	0.00270	87.77	86.47	85.64
3.6	9	0.00365	0.00184	0.00116	88.62	87.26	86.43
3.6	16	0.00298	0.00145	0.00096	87.42	86.39	84.75

Elaboración propia

El rendimiento de la cavitación disminuye con el tiempo de tratamiento en todas las combinaciones estudiadas. A presiones más altas (3.6 bar), se observa un rendimiento de cavitación menor en comparación con presiones más bajas (2 bar). Además, un mayor número de orificios (16 agujeros) tiende a reducir aún más el rendimiento de cavitación en comparación con un menor número de orificios (9 agujeros). Al presentar un aumento en la presión de entrada incrementa el caudal y por consiguiente la velocidad del flujo en la reducción del área también aumenta, esto es favorable en el proceso, pero al aumentar la presión también puede ocasionar la cavitación de choque donde el colapso total de las cavidades reduce la efectividad del tratamiento para la

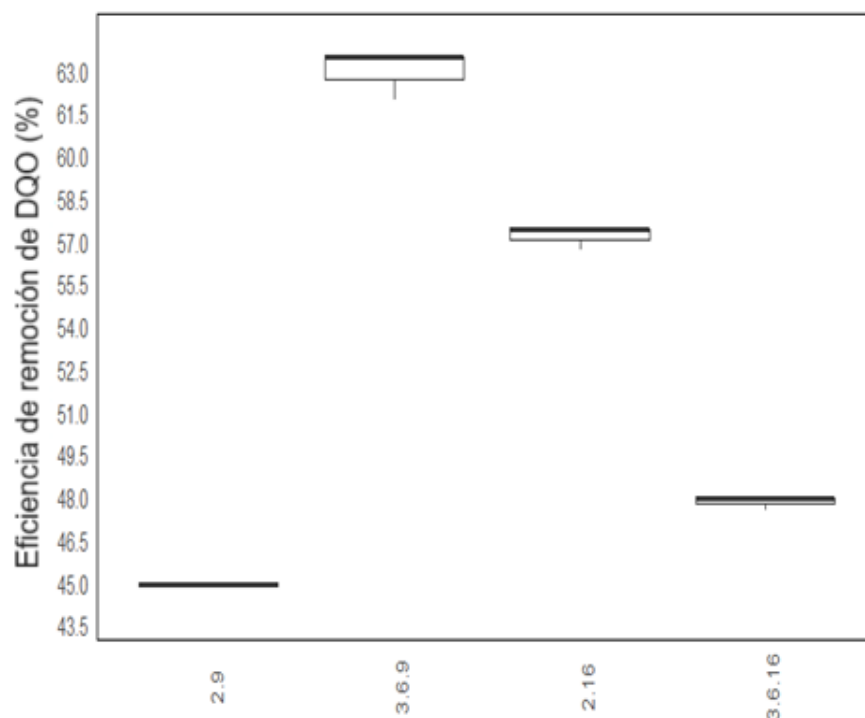
degradación de contaminantes (Agudelo et al. , 2022). Por otro lado, Gupta y Gogate (2020) reportaron una remoción del 85% de fenoles en 20 minutos a una presión de 2.5 bar, con un rendimiento de cavitación de 0.05 mg/J. Comparando con los resultados obtenidos, se evidencia consistencia en la eficiencia de remoción y el rendimiento de cavitación en la degradación de fenoles.

### 3.3.3. Efecto de la presión y el número de agujeros en la remoción de DQO

Se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, debido que los datos no cumplieron con el supuesto de normalidad ( $p < 0.05$ ). Se encontró una diferencia estadísticamente significativa ( $p < 0.05$ ) en la interacción entre la presión y el número de agujeros en la eficiencia de remoción de DQO, esto indica que al menos una de las combinaciones de la presión y el número de agujeros de las placas orificios afectan de manera eficiente en la remoción de DQO. En la figura 21 se muestra la interacción de la presión y número de agujeros en la remoción DQO.

**Figura 21**

*Efecto de la presión y número de agujeros en la remoción de DQO*



Elaboración propia

La cavitación es el proceso mediante el cual se forman burbujas en un líquido debido a la reducción en la presión. Estas burbujas implosionan violentamente, liberando energía y ondas de choque que pueden desintegrar contaminantes orgánicos presentes en la vinaza diluida, a mayor presión (3.6 bar) genera una cavitación más intensa lo que incrementa la energía liberada durante la implosión de las burbujas y con un menor número de agujeros en las placas de orificio (9 agujeros) esta energía se concentra en áreas específicas, aumentando la remoción de DQO de la vinaza diluida (Leighton, 1994).

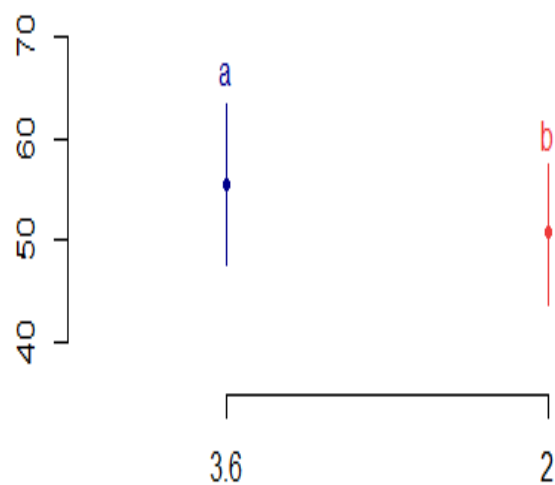
Al aumentar la presión de entrada a la placa de orificio de 2 bar a 3.6 bar, se observa que la remoción de DQO aumentó de  $44.48 \pm 0.81 \%$  a  $62.95 \pm 0.87 \%$  con una placa de 9 orificios, mientras que con la placa de 16 orificios la remoción de DQO disminuyó de  $57.16 \pm 0.44 \%$  a  $47.82 \pm 0.86$ . En el caso de la placa de 9 orificios, el aumento de la presión resulta en una mejora significativa en la remoción de DQO. Al aumentar el número de agujeros en la placa produce un mayor número de eventos de cavitación generando mayor cantidad de colapso de burbujas, que son efectivos para tratar contaminantes; pero la reducción de la eficiencia se ve asociada al aumento de la turbulencia, la turbulencia aumenta la resistencia del flujo y puede causar pérdidas de energía (Gonzales, 2022). Por lo tanto, el aumento de la presión de entrada mejora significativamente la remoción de DQO en placas de 9 orificios debido a una mayor turbulencia y mejor mezcla. Sin embargo, en placas de 16 orificios, el aumento de presión puede llevar a una disminución en la eficiencia de remoción debido a la distribución menos uniforme del flujo y la caída de presión. Esta distribución desigual del flujo provoca que la energía de cavitación se disperse reduciendo la intensidad en cada punto y por ende la eficacia del proceso.

#### **A. Efecto de la presión**

Los valores etiquetados con las letras a y b indican diferencias estadísticamente significativas. La presión de 3.6 bar resulta ser más efectiva en la remoción de DQO en comparación con la presión de 2 bar.

**Figura 22**

*Efecto de la presión en la remoción de DQO*



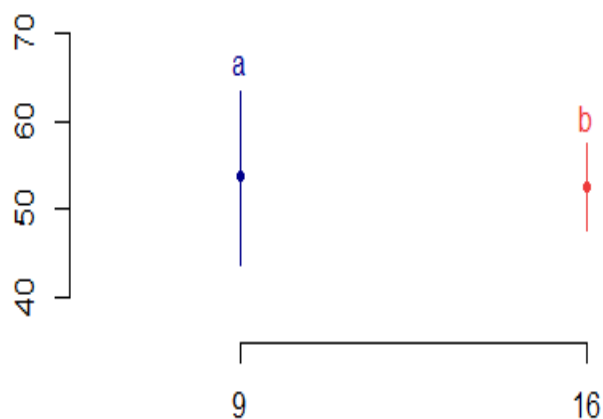
Fuente: Software R Studio

#### **B. Efecto del número de agujeros**

Los valores etiquetados con las letras a y b indican diferencias estadísticamente significativas. Aunque la placa con 9 agujeros resulta ser más efectiva en la remoción de DQO en comparación con la placa con 16 agujeros, la diferencia es mínima.

**Figura 23**

*Efecto del número de agujeros en la remoción de DQO*



Fuente: Software R Studio

#### **C. Rendimiento de cavitación de DQO**

En la tabla 13 se evaluó el rendimiento de cavitación en la remoción de DQO

**Tabla 13***Rendimiento de cavitación y remoción de DQO*

Parámetros		Rendimiento de cavitación, mg/J			remoción de DQO, %		
Presión	Número	20 min	40 min	60 min	20 min	40 min	60 min
2	9	0.091	0.053	0.039	34.67	40.08	44.48
2	16	0.087	0.051	0.035	46.95	54.63	57.16
3.6	9	0.045	0.024	0.018	53.67	57.28	62.95
3.6	16	0.021	0.012	0.0080	41.49	47.29	47.82

Elaboración propia

El rendimiento de cavitación disminuye con el tiempo de tratamiento en todas las combinaciones estudiadas. A presiones más altas, como 3.6 bar, se observa consistentemente un rendimiento de cavitación menor en comparación con presiones más bajas, como 2 bar. Por ejemplo, a 2 bar y 9 orificios, el rendimiento de cavitación es de 0.091 mg/J a los 20 minutos, reduciéndose a 0.039 mg /J a los 60 minutos. En contraste a 3.6 bar y 16 orificios, el rendimiento de cavitación es considerablemente menor, con valores de 0.021 mg/J a 20 minutos y 0.0080 mg/J a 60 minutos. Se ha demostrado que a presiones moderadas comprendidas entre 2 y 3.6 bar, se puede obtener rendimientos de cavitación que oscilan en 0.02 a 0.09 mg/J, dependiendo de las condiciones específicas de la prueba y el diseño del reactor. El análisis comparativo subraya la importancia de ajustar las condiciones operativas (presión de operación y el diseño del reactor) para controlar el número y el tamaño de las burbujas de cavitación es crucial para mejorar tanto la eficiencia de remoción como el rendimiento energético en la degradación de contaminantes mediante cavitación hidrodinámica.

## CAPITULO IV. CONCLUSIONES

- La vinaza cruda presenta un rango de pH de 4.62, lo que indica baja acidez. Además, contiene 27957 mg/L de sólidos totales volátiles y una alta concentración de sólidos totales de 85177mg/L. En cuanto a la conductividad eléctrica, esta es de 29.66 dS/m. Por otra parte, se detecta una carga significativa de materia orgánica, con un DQO de 106137 mg O<sub>2</sub>/L, así como una concentración de fenoles de 338.5 mg AG/L.
- La cavitación hidrodinámica es eficaz en el tratamiento de vinazas, especialmente al incrementar la presión de entrada a la placa de orificio de 2 bar a 3.6 bar. En particular, se obtuvo una remoción del 28.84 % del color utilizando una placa de 9 orificios y el 27.50% con una placa de 16 orificios. Para los fenoles, se logró una remoción del 86.43 % utilizando una placa de 9 orificios y del 84.75% con una placa de 16 orificios. Asimismo, en términos de demanda química de oxígeno (DQO), se alcanzó una remoción del 62.95 % utilizando una placa de 9 orificios, comparado con un 47.82% utilizando una placa de 16 orificios.
- Se observa que el rendimiento de cavitación de DQO disminuye consistentemente a presiones más altas. A la presión de 2 bar con 9 orificios, se alcanza un rendimiento de 0.091 mg/J a los 20 minutos, que desciende a 0.039 mg /J a los 60 minutos. En contraste a 3.6 bar y con 16 orificios, el rendimiento de cavitación es significativamente menor, con 0.021 mg/J a los 20 minutos y al cabo de los 60 min es 0.0080 mg/J. No obstante, a presiones moderadas, entre 2 bar y 3.6 bar, los rendimientos de cavitación varían entre 0.02 mg/J a 0.09 mg/J.

## **CAPITULO V. RECOMENDACIONES**

- Implementar el proceso de cavitación hidrodinámica a escala piloto para la remoción de color, DQO y fenoles en las vinazas. Este proceso debe de utilizar placas de 9 orificios, dado que se ha demostrado una mayor eficiencia bajo condiciones controladas.
- Realizar estudios para evaluar como los resultados a escala piloto se traducen a una escala industrial. esto incluye la evaluación de la capacidad del sistema para manejar mayores volúmenes de vinazas y mantener la eficiencia de la remoción de contaminantes.
- Desarrollar protocolos para la aplicación controlada de vinazas en tierras agrícolas, para evitar la contaminación del suelo y el agua.
- Implementar un sistema de monitoreo para evaluar el impacto del uso de vinazas como fertilizante en la calidad del suelo y en el rendimiento de cultivos.

## CAPITULO VI. BIBLIOGRAFÍA

- Abbas-Shiroodi, Z., Sadeghi, M.-T., & Baradaran, S. (2020). Design and optimization of a cavitating device for Congo red decolorization: Experimental investigation and CFD simulation. *Ultrasonics Sonochemistry*,. Recuperado de: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33232898/>
- Agudelo-Valencia, R. N., Camargo-Vargas, G. de J., Roja-Molano, H. F., Garcés-Polo, S. I., Arias-Sierra, S., & Agudelo-Carrascal, I. C. (2022). Cavitación ultrasónica para el tratamiento de aguas residuales: Una revisión. *Ingeniería y competitividad*, 26(2), 15-29. Recuperado de: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123-30332022000200029&script=sci\\_abstract&lng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123-30332022000200029&script=sci_abstract&lng=es)
- Agudelo Valencia, R. N., Ovalle González, D. P., Rodríguez Rodríguez, L. F., Camargo Vargas, G. D. J., & Almonacid Jiménez, L. Y. (2019). *Remoción de sulfuros presentes en el agua residual del proceso de curtido mediante cavitación hidrodinámica. Revista Ion Investigación Optimización y Nuevos procesos en Ingeniería*, 32(1), 21–33. <https://doi.org/10.18273/revion.v32n1-2019002>
- Alejandro Medina, C. (2019). *ESTUDIO DE LA OZONIZACIÓN DE LA VINAZA COMO TRATAMIENTO COMPLEMENTARIO PARA LA REDUCCIÓN DE LA CARGA AORGÁNICA*. San Miguel de Tucumán. Obtenido de: <https://www.studocu.com/pe/document/servicio-nacional-de-adiestramiento-en-trabajo-industrial/fisica-y-quimica/10-tesis-medina/98709925>
- Amaya Jordá, S. (2010). *Compuestos fenólicos para superar situaciones de estrés abiótico*. Aefa-agronutrientes.org. <https://aefa-agronutrientes.org/compuestos-fenolicos-para-superar-situaciones-de-estres-abiotico>
- Ariza Calvo, D., Rincón Ravelo, M., Paz Cadavid, C. A., & Gutiérrez-Montero, D. J. (2019). *Evaluación de producción de biogás y reducción de carga orgánica de vinazas mediante digestión anaerobia. Revista colombiana de biotecnología*, 21(2), 118–130. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v21n2.79555>
- Asociación de Técnicos Azucareros de México. (2022). ATAM. <https://atamexico.com.mx>
- Atayupanqui Dueñas, & R. E Cáceres Huaylla, K. M., (2022). *Evaluación del tratamiento de coagulación-floculación seguido de una tecnología de cavitación hidrodinámica con agente oxidante para la reducción de contaminantes en aguas residuales de curtiembres del parque industrial Río Seco, Arequipa, 2021*. <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/65f14da7-6cd2-4199-8951-f2e4beb82515>
- Aviña Ruelas, A. E. (2023). *Physicochemical properties, phenol and melanoidin content in a sotol vinasse from nombre de dios, Durango, Mexico. South Florida Journal*.

Obtenido

de:

[https://www.researchgate.net/publication/371843053\\_Propiedades\\_fisicoquimicas\\_contenido\\_de\\_fenoles\\_y\\_melanoidinas\\_en\\_una\\_vinaza\\_de\\_sotol\\_de\\_nombre\\_d\\_e\\_dios\\_Durango\\_Mexico](https://www.researchgate.net/publication/371843053_Propiedades_fisicoquimicas_contenido_de_fenoles_y_melanoidinas_en_una_vinaza_de_sotol_de_nombre_d_e_dios_Durango_Mexico)

- Barrera, J. A., Química, I., Sánchez, P. F., & Carrión, C.-A. M. H. (s/f). *Evaluación de la cascarilla de café como sustituto a las grasas utilizadas en la elaboración de Brownies*. Edu.co. Recuperado el 11 de abril de 2023, de <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/44612/u830763.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Bagal, M. V., & Gogate, P. R. "Wastewater treatment using hybrid treatment schemes based on cavitation and Fenton chemistry: A review." *\*Ultrasonics Sonochemistry\**, 2014. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350417713001624>
- Benito, S. Arrojo, "Tratamiento de efluentes industriales mediante cavitación hidrodinámica," Artículos técnicos, vol. 1, pp. 38-41, 2006. [http://www.bibliotecagbs.com/archivos/038-041\\_ATCAVITACION\\_TA279.pdf](http://www.bibliotecagbs.com/archivos/038-041_ATCAVITACION_TA279.pdf)
- Cadenas Castro, C. F., & Santos Padilla, B. M. (2020). *Ozono y cavitación hidrodinámica para disminución de la carga orgánica y nitrogenada en aguas residuales de camal*, 2020 [Universidad Cesar Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/56568>
- Castañeda Chavez, F. E., & Vargas Padilla, L. A. (2020). *Tratamiento de aguas industriales derivados de agregados de construcción (UNICOM) mediante el método de cavitación hidrodinámica* 2020 [Universidad Cesar Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/91138>
- Caputo, M. (2020). *Estudio de la composición orgánica de la vinaza y metodologías para eliminar sus efectos contaminantes*. Universidad Nacional de La Plata, Argentina. Obtenido de <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/111902>
- Cerón, V. Z., & Ayerbe, M. A. G. (2013). CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL DE LAS VINAZAS DE RESIDUOS DE CAÑA DE AZÚCAR RESULTANTES DE LA PRODUCCIÓN DE ETANOL. *Dyna*, 80(177), 124–131. <https://www.redalyc.org/pdf/496/49625661016.pdf>
- Collana, M., & Taumaturgo, J. (2021). *Cavitación hidrodinámica y procesos de membrana para la recuperación de salmuera de aguas residuales de procesado de aceituna* [Universidad Nacional del Callao]. <http://repositorio.unac.edu.pe/handle/20.500.12952/5888>
- Contreras, J. L. D., & Garavito, B. C. R. (2015). *Optimización y arranque del sistema primario de una planta de tratamiento de agua residual industrial proveniente de*

- una empresa de alimentos mediante la técnica de cavitación hidrodinámica [Universidad de La Salle].  
[https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_ambiental\\_sanitaria/151/](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/151/)
- COAZUCAR. (2022). Corporación Azucarera del Perú S.A. Recuperado el 11 de abril de 2023, de <https://www.aai.com.pe/wp-content/uploads/2022/05/Coazucar-dic2021.pdf>
- Delgado, A. M., Issaoui, M., & Chammem, N. (2019). Analysis of main and healthy phenolic compounds in foods. *Journal of AOAC International*, 102(5), 1356–1364.  
<https://doi.org/10.5740/jaoacint.19-0128>
- Dirección regional de agricultura de Tacna. (s/f). Gob.Pe. Recuperado el 11 de abril de 2023, de [https://www.agritacna.gob.pe/link\\_de\\_ol\\_estadi.php](https://www.agritacna.gob.pe/link_de_ol_estadi.php)
- D.S. 070-2013-PCM. (s/f). Gob.pe. Recuperado el 11 de abril de 2023, de <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2913113/rd%20104-2022-produce-dgaami.pdf.pdf>
- Durán Meneses, M. F., Sanabria Gómez, I. J., & Gutiérrez Guzmán, N. (2015). EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE METANO EN LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE VINAZAS PRETRATADAS CON OZONO. *Revista EIA*, 12(24), 167–177. <https://doi.org/10.24050/reia.v12i24.881>
- Dominguez Bazua, M. (2018). APROVECHAMIENTO DE LOS SUBPRODUCTOS DEL PROCESAMIENTO DE LA CAÑA DE AZÚCAR: BAGAZO, CACHAZA, VINAZAS, METANO, POLIFENÓLES, AGUAS RESIDUALES TRATADAS, ETC. *RD-ICUAP*, 8(23), 115–130. <http://rd.buap.mx/ojs-dm/index.php/rdicuap/article/view/812>
- Escobar Flores, C. (2020). *Impactos ambientales ocasionados por la empresa maple etanol s.a. y propuesta de un plan de mitigación* [Univerdidad Nacional Pedro Ruiz Gallo].  
[https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UPRG\\_37652a444da6d915c7ca70dd84b8576e/Details](https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UPRG_37652a444da6d915c7ca70dd84b8576e/Details)
- Estadísticas Ambientales. (2021). INEI.  
[https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1827/libro.pdf](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1827/libro.pdf)
- España-Gamboa E, Vicent T, Font X, Domínguez-Maldonado J, Canto-Canché B, Alzate-Gaviria L (2017) Pretreatment of vinasse from the sugar refinery industry under non-sterile conditions by *Trametes versicolor* in a fluidized bed bioreactor and its effect when coupled to an UASB reactor. *J Biol Eng* 11(6): 1-11;  
<https://jbioleng.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13036-016-0042-3>
- Fernandez Inca, M., & Quispe Machaca, L. J. (2021). *Aplicación del proceso electro-fenton en el tratamiento de aguas residuales industriales*. Lima. Obtenido de

- [https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/85317/Fernandez\\_I\\_MY-Quispe\\_MLJ-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/85317/Fernandez_I_MY-Quispe_MLJ-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Fernández Ramón, A. (2019). *Aplicación de técnicas de modelado para la optimización de la energía generada en pilas de combustible microbianas* [Repositorio Digital de la Universidad Politécnica de Cartagena]. <https://repositorio.upct.es/xmlui/handle/10317/8285>
- Gálvez Torres, E. (2020). Efecto de dosis de vinaza en el cultivo de rabanito (*Raphanus sativus* L.), para el control ecológico del gusano de tierra. *Revista Unasam*. Obtenido de [https://revistas.unasam.edu.pe/index.php/Aporte\\_Santiaguino/article/view/740/921](https://revistas.unasam.edu.pe/index.php/Aporte_Santiaguino/article/view/740/921)
- Gamboa, E. (2015). *Pretratamiento de vinaza de etanol hidratado por un microorganismo ligninolítico en un reactor de lecho fluidizado y su efecto al ser acoplado a un reactor UASB*. <http://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1003/459>
- Gandini Ayerbe, M., & Zúñiga Cerón, V. (12d. C.). CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL DE LAS VINAZAS DE RESIDUOS DE CAÑA DE AZÚCAR RESULTANTES DE LA PRODUCCIÓN DE ETANOL. *Dyna*, 177, 124–131. <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v80n177/v80n177a15.pdf>
- García, P., & Guerrero, S. (2016). *BIODEGRADACIÓN DE VINAZAS DE CAÑA DE AZÚCAR MEDIANTE EL HONGO DE PUDRICIÓN BLANCA Pleurotus ostreatus EN UN REACTOR DE LECHO EMPACADO*. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*,. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/939/93946928004.pdf>
- 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://www.researchgate.net/publication/8240821\\_A\\_review\\_and\\_assessment\\_of\\_hydrodynamic\\_cavitation\\_as\\_a\\_technology\\_for\\_the\\_future](https://www.researchgate.net/publication/8240821_A_review_and_assessment_of_hydrodynamic_cavitation_as_a_technology_for_the_future)
- González Ayahua Alcázar, V. (2022). *Diseño y evaluación de un sistema hidráulico para el tratamiento de aguas en la industria: Modelado y dinámica de cavitación en placas perforadas* (Tesis de maestría). Universidad Católica de Santa María, Arequipa, Perú. Recuperado de: <https://repositorio.ucsm.edu.pe/items/5881350d-bd0f-4052-a149-c1f47167466c>.
- González Carrillo, M. M., & Londoño Ramos, C. M. (2014). *DISEÑO DE UN CAVITADOR HIDRODINÁMICO A ESCALA PLANTA PILOTO* [UNIVERSIDAD DEL VALLE]. <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/handle/10893/16791/0516737.pdf?sequence=1>
- Gordo, D. A. M. (2018). Los Compuestos Fenólicos, Un Acercamiento A Su Biosíntesis, Síntesis Y Actividad Biológica. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 9(1), 4. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6383704>

- Gupta Chakinala, A., R Gogate, P., E. Burgess, A., Bremner, H., & David. (2008). *Treatment of industrial wastewater effluents using hydrodynamic cavitation and the advanced Fenton process* (pp. 49–54). <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2007.01.003>
- Gutiérrez Mosquera, A., & Cardona, N. (2019). *Cavitación Hidrodinámica: un Enfoque desde la Ingeniería y la Agroindustria*. <https://www.redalyc.org/journal/849/84961237015/html/>
- Hidalgo Flores, G. R., González Vásquez, Á. E., & Molina Betancourt, A. C. (2012). *Biodegradación anaeróbica de vinaza generada en la destilería Soderal y aprovechamiento energético del biogás como medio para bajar el impacto de gases de efecto invernadero* [Universidad Politécnica Salesiana]. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/2029>
- Ibarra-Camacho, R., León-Duarte, L., & Osoria-Leyva, A. (2018). *Caracterización físico-química de vinazas de destilería*. <https://www.redalyc.org/journal/4435/443559859007/html/>
- Jyoti, K. K., & Pandit, A. B. (2004). *Ozone and cavitation for water disinfection*. \*Biochemical Engineering Journal, 18\*(1), 9-19. Badve, [https://www.researchgate.net/publication/223527238\\_Ozone\\_and\\_cavitation\\_for\\_water\\_disinfection](https://www.researchgate.net/publication/223527238_Ozone_and_cavitation_for_water_disinfection)
- Kabata Kakama , N., Petrik, L., & Tunde, V. O. (2024). *The Optimization of Hydrodynamic Cavitation as an Advanced Oxidation Option for the Removal of Persistent Contaminants in Wastewater*. Obtenido de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-024-06924-w>
- Katiyar, J., Bhoi, RG y Saharan, VK, 2024, *Degradación mejorada del fosfato de oseltamivir, un fármaco antiviral, mediante procesos de oxidación avanzada híbridos basados en cavitación hidrodinámica: una perspectiva sobre la optimización de parámetros geométricos, Ingeniería química y procesamiento - Intensificación de procesos*, 200, 109796. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2024.109796>
- KUMAR, M. Suresh, S. H. SONAWANE y Aniruddha B. PANDIT (2017). *Degradation of methylene blue dye in aqueous solution using hydrodynamic cavitation-based hybrid advanced oxidation processes. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0255270117303963>
- LEAL, I.R., TABARELLI, M. & SILVA, J.M.C. da. 2003. *Ecologia e Conservação da Caatinga. EDUFPE, Recife.* <https://www.researchgate.net/deref/https%3A%2F%2Fdoi.org%2F10.1590%2F1676-0611-BN-2023->

- [1520?\\_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnNOUGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uliwicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uliwicHJldmldvXNQYWdlloicHVibGJiYXRpb24ifX0](https://doi.org/10.1520?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnNOUGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uliwicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uliwicHJldmldvXNQYWdlloicHVibGJiYXRpb24ifX0)
- Leighton, T. (1994). *The acoustic bubble*. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 96(4), 3315-3321.  
[https://www.researchgate.net/publication/224806016\\_The\\_Acoustic\\_Bubble](https://www.researchgate.net/publication/224806016_The_Acoustic_Bubble).
- Legua-Cárdenas, J. A., Cruz-Nieto, D. D., Nunja-García, J. V., & Caro-Soto, F. G. (2022). *La vinaza y trampa amarillo una alternativa en el control ecológico del rabanito*. *Journal of the Selva Andina Biosphere*, 10(1), 46–56.  
<https://doi.org/10.36610/j.jsab.2022.100100046>
- León Chimbolema, J. G., Medina Serrano, C. A., & Segovia Obando, E. N. (2020). Application of the Photo-fenton method for the treatment of wastewater in the milky industry. *Dominó de las Ciencias*, 785-801. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7539702.pdf>
- López Mejía, U. A. P., & Aguilar Gil, J. M. (2016). *Producción de fertilizante sólido a partir de vinazas de destilación de alcohol etílico*.  
[https://scholar.google.com.pe/citations?view\\_op=view\\_citation&hl=es&user=wGjHBh0AAAAJ&citation\\_for\\_view=wGjHBh0AAAAJ:Zph67rFs4hoC](https://scholar.google.com.pe/citations?view_op=view_citation&hl=es&user=wGjHBh0AAAAJ&citation_for_view=wGjHBh0AAAAJ:Zph67rFs4hoC)
- Lopez Morais, P. (2020-2021). *CARACTERIZACIÓN DEL FLUJO EN PLACA DE ORIFICIO*.  
[https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/30500/LopezMorais\\_Patricia\\_TFG\\_2021.pdf?sequence=2](https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/30500/LopezMorais_Patricia_TFG_2021.pdf?sequence=2)
- Lozano Morillo, Y. (2020). *Aplicación de la tecnología de cavitación hidrodinámica, ozono y oxígeno atmosférico para la mejora de la calidad de aguas residuales de la empresa de Curtiembre Lima 2020* [Universidad César Vallejo].  
<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/67566>
- Lyu, F., Tang, a., Faqi, Z. X., & Sai, Y. H. (2024). *Research on the Effect of Structural Parameters on Cavitation Performance of Shear Hydrodynamic Cavitation Generator*. Obtenido de <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/9/3676>
- Martín Vidaller, C. (2015). *Diseño y construcción de una instalación experimental para ensayos de cavitación hidrodinámica* [Universidad de Zaragoza].  
<https://zaguan.unizar.es/record/47558>
- Mason, T., & D., Peters. (2002). *ractical Sonochemistry: Power Ultrasound Uses and Applications* (Horwood Chemical Science) 2nd Edición. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/book/9781898563839/practical-sonochemistry>
- Medina Carlos, A. (2019). *Estudio de la ozonización de la vinaza, como tratamiento complementario para la reducción de la carga orgánica* [Universidad Tecnológica Nacional San Miguel de Tucuman].

- <https://www.studocu.com/pe/document/servicio-nacional-de-adiestramiento-en-trabajo-industrial/fisica-y-quimica/10-tesis-medina/98709925>
- Montaño, V. A. (2017). *Resistencia de hongos micorrízicos arbusculares a perturbaciones de pH y materia orgánica inducidos por la aplicación de vinazas tequileras al suelo*. <http://ciatej.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1023/377>
- Montenegro Gómez, S. P., Menjivar Flóres, J. C., & Riascos, D. (2014). Influencia de la aplicación de vinaza en la estructura de comunidades bacterianas en un Entic dystropept y un Fluventic haplustoll del Valle del Cauca, Colombia. *Dialet*, 5, Nº. 1, 2014, 223–230. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5344977>
- Muñoz Valero, O. (1987). *Técnica Y Aplicaciones Agrícolas De La Biometanización*. Todostuslibros.com. [https://www.todostuslibros.com/libros/tecnica-y-aplicaciones-agricolas-de-la-biometanizacion\\_978-84-7479-616-2](https://www.todostuslibros.com/libros/tecnica-y-aplicaciones-agricolas-de-la-biometanizacion_978-84-7479-616-2)
- Nieto, S., Alfaro, E. G. B., Gamarra, C., Zambrano, A., Flores, J. W. V., Olivera, C. C., & Ruiz-Vergaray, M., 2021, *Hydrodynamic Cavitation as a Clean Technology in Textile Industrial Wastewater Treatment*, *Chemical Engineering Transactions*, 86, 277-282. <https://doi.org/10.3303/CET2186047>
- Peñarrieta, J. M., Tejeda, L., Mollinedo, P., Vila, J. L., & Bravo, J. A. (2014). PHENOLIC COMPOUNDS IN FOOD. *Revista boliviana de química*, 31(2), 68–81. [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0250-54602014000200006](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0250-54602014000200006)
- Perbangkhem, T. & Polprasert, O. (2010). Biomass Production of Papyrus (Cyperus papyrus) in Constructed Wetland Treating Low-Strength Domestic Water. *Bioresource Technology*, 101, 833-835. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.062>
- Plazas Tuttle, J. G. (2022). *Inactivación de virus y degradación de compuestos orgánicos a través de cavitación hidrodinámica en microrreactores* [Universidad de los Andes]. <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/58746>
- Prazeres, A. R., Lelis, J., Alves-Ferreira, J., & Carvalho, F. (2019). Treatment of vinasse from sugarcane ethanol industry: H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NaOH and Ca(OH)<sub>2</sub> precipitations, FeCl<sub>3</sub> coagulation-flocculation and atmospheric CO<sub>2</sub> carbonation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(4), 103203. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213343719303264>
- Rajoriya, S., Bargole, S. y Saharan, VK, 2017, *Degradación del azul reactivo 13 mediante cavitación hidrodinámica: efecto de los parámetros geométricos y diferentes aditivos oxidantes*, *Ultrasonics Sonochemistry*, 37, 192-202. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.01.005>

- Ramos Alvariño, C. (2005). Residuos orgánicos de origen urbano e industrial que se incorporan al suelo como alternativa económica en la agricultura. *Revista CENIC*, 36(1), 45–53. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181620586010>
- Reyes-Lara, S., & Reyes-Mazzoco, R. (2009). EFECTO DE LAS CARGAS HIDRÁULICA Y ORGÁNICA SOBRE LA REMOCIÓN MASICA DE UN EMPAQUE ESTRUCTURADO EN UN FILTRO PERCOLADOR EFFECT OF HYDRAULIC AND ORGANIC LOADS ON THE MASS REMOVAL OF A STRUCTURED PACKING IN A TRICKLING FILTER. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 8, No. 1 (2009), 101–109. <https://www.scielo.org.mx/pdf/rmiq/v8n1/v8n1a10.pdf>
- Ruiz García, E. A., López Suarez, E. F., & Agudelo Valencia, R. N. (2023). *Evaluación del proceso de cavitación hidrodinámica para el tratamiento de los lixiviados generados en el almacenamiento de residuos orgánicos del municipio de Villa de San Diego de Ubaté*. Universidad de Bogotá. <https://expeditiorepositorio.utadeo.edu.co/handle/20.500.12010/31603>
- Saavedra, B. (2020, octubre 7). *Industria de alcohol en el Perú: ¿Cómo le ha ido durante la pandemia?* Google News logo. <https://infomercado.pe/industria-de-alcohol-en-el-peru-como-le-ha-ido-durante-la-pandemia-bs/>
- Sachez Vera, F. P. (2022). *Tratamiento de Aguas Residuales de Planta de Beneficio Bovino con Cavitación Hidrodinámica y Subsecuente Cultivo de Microalgas*. Universidad Católica de Santa María. Obtenido de <https://repositorio.ucsm.edu.pe/items/4146c296-31b0-4507-acad-4f43a9e3e14a>
- Saharan, V. K. et al. "Hydrodynamic cavitation as an advanced oxidation technique for the degradation of acid red 88 dye." *\*Ultrasonics Sonochemistry\**, 2011. [https://www.researchgate.net/publication/231377138\\_Hydrodynamic\\_Cavitation\\_as\\_an\\_Advanced\\_Oxidation\\_Technique\\_for\\_the\\_Degradation\\_of\\_Acid\\_Red\\_88\\_Dye](https://www.researchgate.net/publication/231377138_Hydrodynamic_Cavitation_as_an_Advanced_Oxidation_Technique_for_the_Degradation_of_Acid_Red_88_Dye)
- Salinas, C., & Carlos, J. (2015). *Evaluación del proceso de digestión anaeróbica de vinaza pretratada con procesos avanzados de oxidación como alternativa energética de implementación tecnológica en un proceso de producción de etanol a partir de caña de azúcar* [Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/53943>
- Sanjay, N., & Vivek Vinayak, R. (2020). *Pretratamiento Del Lavado Gastado de La Destilería (Vinaza) Con Cavitación A Base de Vórtice y Su Influencia en La Generación de Biogás*. Scribd. <https://es.scribd.com/document/472521816/Pretratamiento-del-lavado-gastado-de-la-destileria-vinaza-con-cavitacion-a-base-de-vortice-y-su-influencia-en-la-generacion-de-biogas-docx>

- Senatore, D., Queirolo, A., Wajswol, S., & Bajsa, N. (2017). Monitoring the application of vinasse as fertilizer of sugarcane with soil microbial indicators. *Redalyc*, 92-97. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/6061/606163820010/html/>
- Serpa, C., & Jeremías, V. (2016). *Determinación de la eficiencia de un biofiltro para remover el sulfuro de hidrogeno (H<sub>2</sub>S) contenido en el biogás generado por un reactor anaerobio tipo UASB - Lima* [Universidad Peruana Unión]. <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/425>
- Sierra, A. J. (2015). Los compuestos fenólicos como antioxidantes naturales para superar situaciones de estrés abiótico. *Terralia*, 102, 44–52. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5811449>
- Silva Pérez, S. (2013). *Evaluación del uso de la vinaza, subproducto de la elaboración del pisco, como acondicionador de suelo*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/149036>
- Singh, K., Tripathi, S., and Chandra, R. (2020). *Maillard reaction product and its complexation with environmental pollutants: A comprehensive review of their synthesis and impact*. *Bioresource Technol. Rep.* 15, 100779. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2589014X21001572>
- Smith, R. L. (2007). *Ecología*. España. <http://www.biocon.unam.mx/docencia/oceanografia-biologica/lecturas-libros/ecologia-smith--smith.pdf>
- Tapie, W., Prato, D. & Sánchez, H. (2016). *Biodegradación de vinazas de caña de azúcar mediante el hongo de pudrición blanca Pleurotus ostreatus en un reactor de lecho empacado*. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 19, 145-150. <https://www.redalyc.org/pdf/939/93946928004.pdf>
- Vilarroig Herrera, J. (2021). *Diseño y análisis de un sistema de cavitación hidrodinámica mediante el uso de técnicas CFD para su utilización en sistemas de pretratamiento de fangos en las estaciones de aguas residuales* [Universitat Jaume I]. <https://doi.org/10.6035/14107.2021.192015>
- Zuluaga Meza, A. (2019). *Evaluación del tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios mediante cavitación hidrodinámica*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/76583>

## CAPITULO VII. ANEXOS

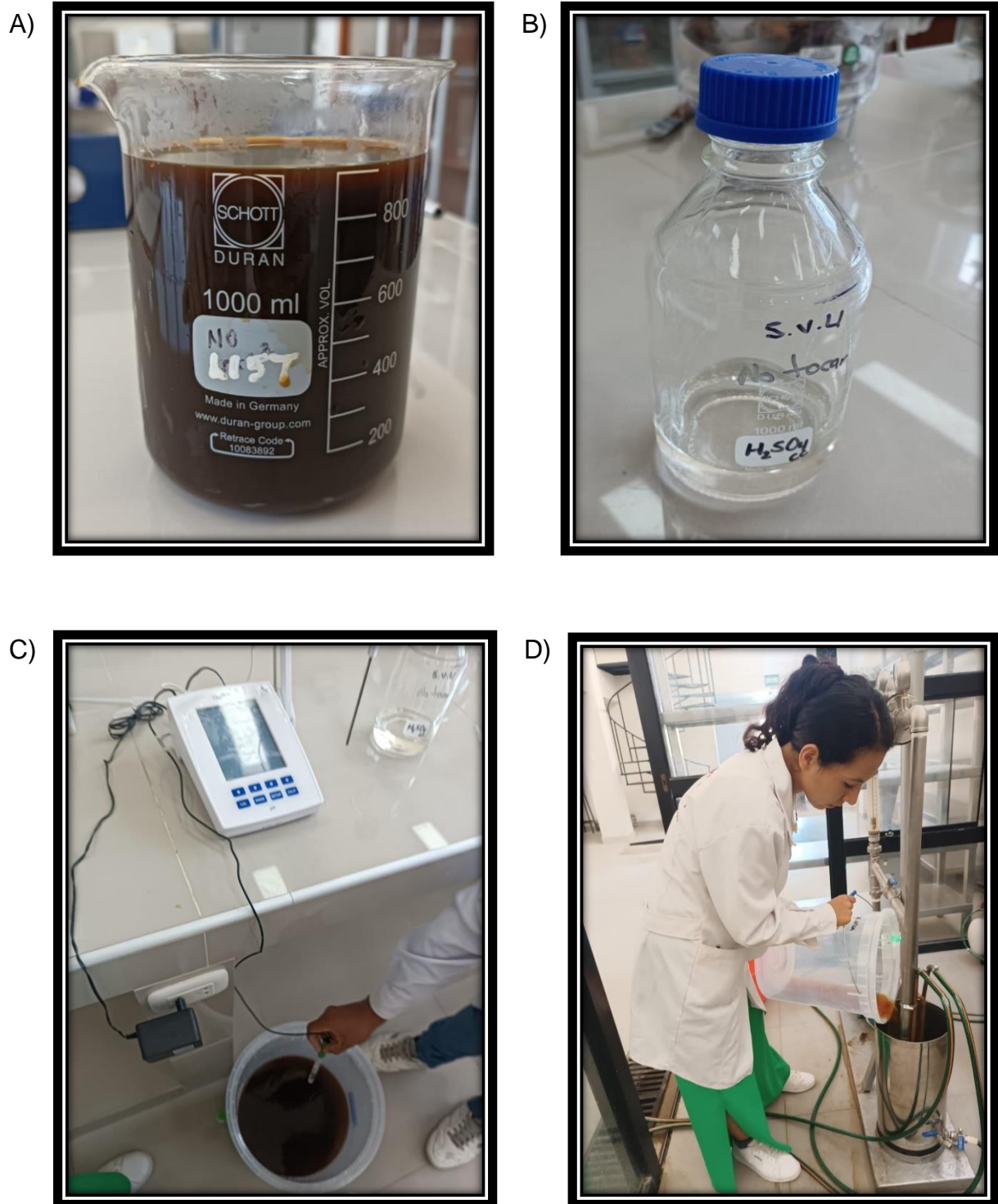


Figura 24: Acondicionamiento de la muestra a) Vinazas 1 L, b) Ac. Sulfúrico c) Regulación de pH d) Agregando muestra al cavitador.

**Figura 25**

*Control de Caudal y Temperatura*



Elaboración propia

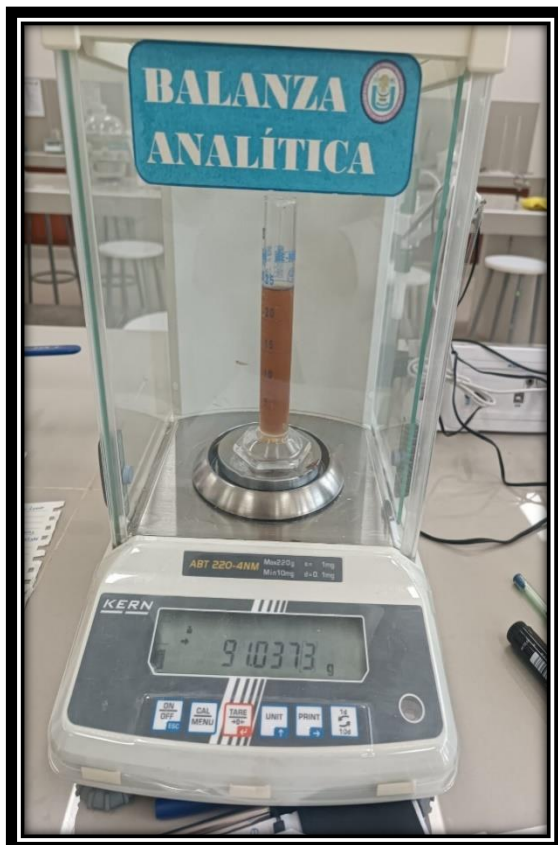
**Figura 26**

*Toma de muestra*



Elaboración propia.

E.



F.



G.



Figura 27: Caracterización de vinazas: E) Medición de densidad, F) Medición de Conductibilidad, G) Medición de color en Espectrofotómetro.

H.



I.



J.



K.

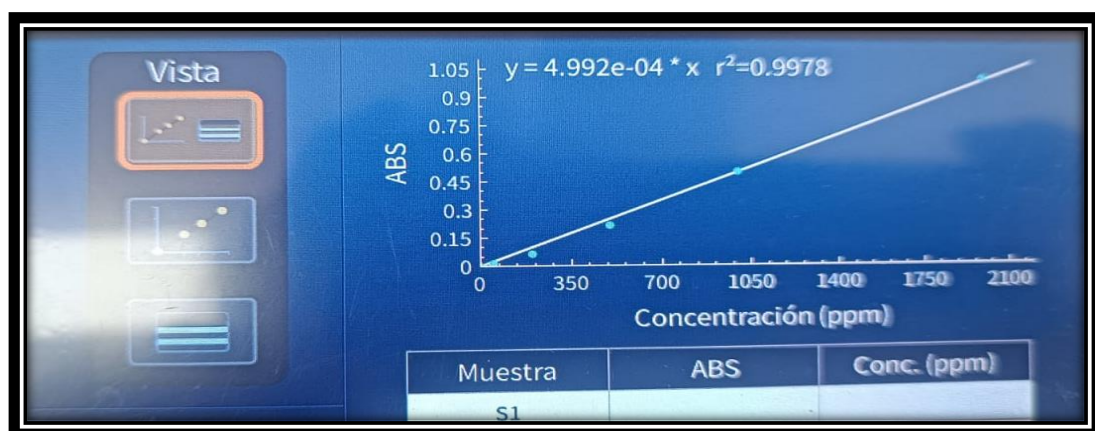


Figura 28: Cuantificación de fenoles, H: Rotulación de muestras, I: Adición NaOH, J: Muestras luego de reposo, K: Curva de calibración

L.



M.



L.



M.

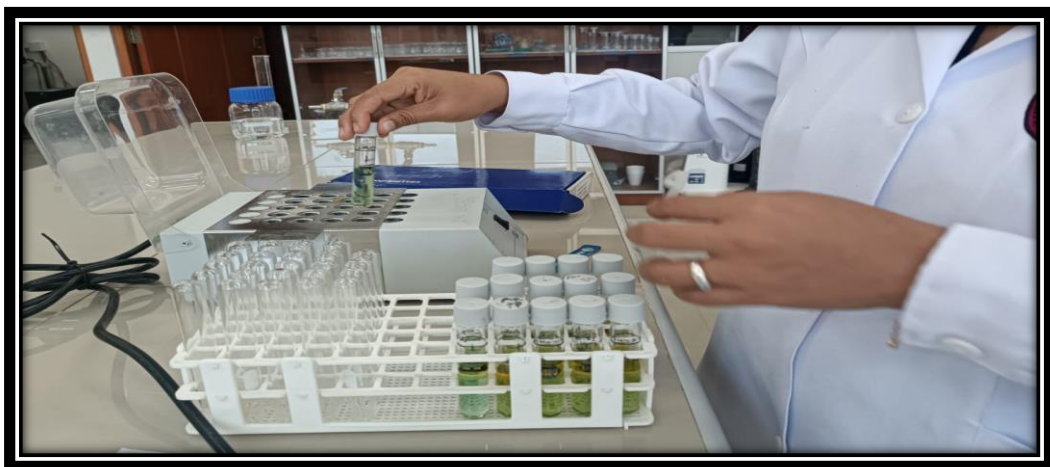


Figura 29: Cuantificación de DQO: L) Reactivo A y B , M) Adición de reactivos, N) Muestras listas para incubación, O) Muestras en Thermoreactor.

**Figura 30**

*Muestras por leer*



Elaboración propia

**Figura 31**

*Equipo de lectura de DQO*



Elaboración propia

**Figura 31**

*Ficha técnica del antiespumante*



**EXIQUIM S.A.C.**



## **DEFOAMER 605**

### **INFORMACIÓN TÉCNICA**

**ANTIESPUMANTE DE GRAN RENDIMIENTO  
PARA LA INDUSTRIA DEL ALCOHOL**

<b><u>DESCRIPCION</u></b>	:	Formulación líquida de color beige compuesta por ésteres grasos y polietilenglicoles, de bajo peso molecular, cuyas principales características son: Actividad : 100% Densidad : 0.86 gr/cc Acidez : < 10 Solubilidad : Completa con agua y alcoholes
<b><u>APLICACION</u></b>	:	El <b>DEFOAMER 605</b> es un antiespumante muy efectivo en la mayoría de los procesos de fabricación de alcohol. Para obtener el mejor resultado se debe agregar el <b>DEFOAMER 605</b> lo más cerca posible al lugar donde se forma la espuma. En algunos sistemas se recomienda aplicar el producto tal cual viene a la superficie de la espuma en forma directa o con duchas de aspersión en forma diluida.
<b><u>FORMA DE APLICACIÓN</u></b>	:	Usarlo tal cual viene o en dilución en concentraciones de 50 a 250 ppm.
<b><u>MANIPULACION</u></b>	:	No se requieren precauciones especiales.
<b><u>ALMACENAMIENTO</u></b>	:	Almacenar en lugar seco, en condiciones normales no se deteriora con el tiempo.
<b><u>ENVASE</u></b>	:	Cilindros de metal de 180 Kgs y Bidones de PVC de 25 Kgs.

**OF. TRUJILLO**  
Carretera Huanchaco S/N Sector Veldivia Alta  
Huanchaco - Trujillo - La Libertad  
Teléfono 044-659202 - Enel 99839 5684  
exiquimtar@gmail.com

**OF. LIMA**  
Av. Elmer Faucett N° 220 - Urb. La Colonial  
Prov. Const. del Callao - Prov. Const. del Callao  
Callao  
Telf. 01-451 3189 - Enel 955992771

**TÍTULO DEL PROYECTO: LA CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA COMO PRETRATAMIENTO DE LA VINAZA DE ALCOHOL PARA LA REMOCIÓN DE LA CARGA ORGÁNICA Y DE FENOLES**

AUTOR: Bach. Castillo Bocanegra Keyla Eilen

**Tabla 14**

Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIIMENSIONES	INDICADORES	INDICE
La influencia de la cavitación hidrodinámica en la remoción de la carga orgánica y fenoles presentes en la vinaza de alcohol	<b>OBJETIVO GENERAL</b>	La cavitación hidrodinámica como pretratamiento de la vinaza de las destilerías de alcohol en la región de Lambayeque reduciría significativamente la carga orgánica y los compuestos fenólicos presentes, facilitando su disposición final o reutilización	VARIABLE INDEPENDIENTE			
	Determinar la influencia de la cavitación hidrodinámica como pretratamiento de la vinaza de alcohol para la remoción de la carga orgánica y fenoles		Presión	Presión de entrada	X1: Presión	Bar
			N.º de Orificios de Placa	N.º de Orificios	X2: Placa de orificio	Orificios
	<b>OBJETIVO ESPECÍFICO</b>		VARIABLE DEPENDIENTE			
	Evaluar las características fisicoquímicas de la vinaza de alcohol y de la vinaza pretratada mediante la cavitación hidrodinámica. - analizar la influencia de la presión y el número de agujeros de la placa de orificio en la remoción de la carga orgánica y de fenoles. - evaluar la eficiencia de la cavitación hidrodinámica sobre la remoción de la carga orgánica y de los fenoles presentes en la vinaza.		Reducción de parámetros fisicoquímicos	Color	Y1: Color	-
				Demanda Química de Oxígeno	Y2: DQO	mgO2/L
				Fenoles	Y3: Fenoles	mg/L ácido gálico

*Elaboración propia.*



### ACTA DE SUSTENTACIÓN - 2024

Siendo las 12:30 m del día viernes 25 de octubre del 2024, se reunieron en la sala de sustentación de la Facultad de Ingeniería Química e Industrias Alimentarias los miembros del jurado evaluador de la Tesis Titulada: ***"La cavitación hidrodinámica como pretratamiento de la vinaza de alcohol para la remoción de la carga orgánica y de fenoles."***; designados con Res. N°178-2023-D-FIQIA-VIRTUAL de fecha 10 de julio del 2023 y aprobada con Res. N°250-2023-D-FIQIA-VIRTUAL de fecha 23 de octubre del 2023, con la finalidad de Evaluar y Calificar la sustentación de la tesis antes mencionada, conformados por los siguientes docentes:

- **Presidente:** Dr. Carlos Reinerio Arce Cruzado
- **Secretario:** Dr. Cesar Augusto Monteza Arbulu
- **Vocal:** M.Sc. Manuel Antonio Diaz Paredes

La tesis fue asesorada por el Dr. Segundo Alberto Vásquez Llanos, nombrado con Res. N°145-2023-D-FIQIA-VIRTUAL de fecha 19 de junio del 2023. El acto de sustentación es autorizado con Res. N°550-2024-D-FIQIA de fecha 14 de octubre del 2024.

La Tesis fue presentada y sustentada por la Bachiller: **KEYLA EILEN CASTILLO BOCANEGRA de la Escuela Profesional de Ingeniería Química**; y tuvo una duración de 30 minutos.

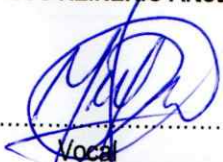
Después de la sustentación, y absueltas las preguntas y observaciones de los miembros del jurado; se procedió a la calificación respectiva, otorgándole el calificativo de 18 (Dieciocho) en la escala vigesimal, mención MUY BUENO.

Por lo que quedan APTO (s) para obtener el Título Profesional de **INGENIERA QUIMICA** de acuerdo con la Ley Universitaria 30220 y la normatividad vigente de la Facultad de Ingeniería Química e Industrias Alimentarias y la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Siendo las 1:40 p.m. se dio por concluido el presente acto académico, dándose conformidad al presente acto, con la firma de los miembros del jurado.

Firmas

  
.....  
Presidente  
Dr. CARLOS REINERIO ARCE CRUZADO

  
.....  
Vocal  
M.Sc. MANUEL ANTONIO DIAZ PAREDES

  
.....  
Secretario  
Dr. CESAR AUGUSTO MONTEZA ARBULU

  
.....  
Asesor  
Dr. SEGUNDO ALBERTO VASQUEZ LLANOS

## CONSTANCIA DE VERIFICACION DE ORIGINALIDAD

Yo, Segundo Alberto Vásquez Llanos usuario revisor de la Tesis titulada:

**“La cavitación hidrodinámica como pretratamiento de la vinaza de alcohol para la remoción de la carga orgánica y de fenoles”.**

Cuyo autor es, Bach. Castillo Bocanegra Keyla Eilen

Identificado con documento de identidad: DNI 75660238; declaro que la evaluación realizada por el Programa informático, ha arrojado un porcentaje de similitud 15%, verificables en el Resumen del Reporte automatizado de similitudes que se acompaña.

El suscrito analizó dicho reporte y concluyó que cada una de las coincidencias detectadas dentro del porcentaje de similitud permitido no constituyen plagio y que el documento cumple con la integridad científica y con las normas para el uso de citas y referencias establecidas en los protocolos respectivos.

Se cumple con adjuntar el Recibo Digital a efectos de la trazabilidad respectiva del proceso.

Lambayeque, 12 de septiembre del 2024



Asesor

Segundo Alberto Vásquez Llanos

DNI: 16748513

Se Adjunta:

\*Resumen de Reporte automatizado de similitudes

\*Recibo digital.



## Tesis\_Final

## INFORME DE ORIGINALIDAD

15%

INDICE DE SIMILITUD

15%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

5%

TRABAJOS DEL  
ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1

[tesis.ucsm.edu.pe](https://tesis.ucsm.edu.pe)

Fuente de Internet

2%

2

[hdl.handle.net](https://hdl.handle.net)

Fuente de Internet

2%

3

[bdigital.unal.edu.co](https://bdigital.unal.edu.co)

Fuente de Internet

1%

4

[expeditiorepositorio.utadeo.edu.co](https://expeditiorepositorio.utadeo.edu.co)

Fuente de Internet

1%

5

[ojs2.utp.edu.co](https://ojs2.utp.edu.co)

Fuente de Internet

1%

6

[repositorio.unprg.edu.pe](https://repositorio.unprg.edu.pe)

Fuente de Internet

1%

7

[dx.doi.org](https://dx.doi.org)

Fuente de Internet

&lt;1%

8

[ojs.southfloridapublishing.com](https://ojs.southfloridapublishing.com)

Fuente de Internet

&lt;1%

9

[repositorio.unicach.mx](https://repositorio.unicach.mx)

Fuente de Internet

&lt;1%



10

[ria.utn.edu.ar](http://ria.utn.edu.ar)

Fuente de Internet

<1 %

11

[repositorio.ucv.edu.pe](http://repositorio.ucv.edu.pe)

Fuente de Internet

<1 %

12

[revista.ibp.co.cu](http://revista.ibp.co.cu)

Fuente de Internet

<1 %

13

[es.scribd.com](http://es.scribd.com)

Fuente de Internet

<1 %

14

[revistaingenieria.univalle.edu.co](http://revistaingenieria.univalle.edu.co)

Fuente de Internet

<1 %

15

[dspace.unitru.edu.pe](http://dspace.unitru.edu.pe)

Fuente de Internet

<1 %

16

[repositorio.ug.edu.ec](http://repositorio.ug.edu.ec)

Fuente de Internet

<1 %

17

Submitted to UNIV DE LAS AMERICAS

Trabajo del estudiante

<1 %

18

[repositorio.unac.edu.pe](http://repositorio.unac.edu.pe)

Fuente de Internet

<1 %

19

[cienciaabierta.unison.mx](http://cienciaabierta.unison.mx)

Fuente de Internet

<1 %

20

Submitted to Universidad Tecnica De Ambato-  
Direccion de Investigacion y Desarrollo , DIDE

Trabajo del estudiante

<1 %

21

[bibdigital.epn.edu.ec](http://bibdigital.epn.edu.ec)



&lt;1 %

22

[www.eumed.net](http://www.eumed.net)

Fuente de Internet

&lt;1 %

23

[www.revista.ccba.uady.mx](http://www.revista.ccba.uady.mx)

Fuente de Internet

&lt;1 %

24

[repositorio.utc.edu.ec](http://repositorio.utc.edu.ec)

Fuente de Internet

&lt;1 %

25

[rinacional.tecnm.mx](http://rinacional.tecnm.mx)

Fuente de Internet

&lt;1 %

26

Submitted to ITESM: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey

Trabajo del estudiante

&lt;1 %

27

[d-nb.info](http://d-nb.info)

Fuente de Internet

&lt;1 %

28

[rd.buap.mx](http://rd.buap.mx)

Fuente de Internet

&lt;1 %

29

Submitted to Universidad Popular del César, UPC

Trabajo del estudiante

&lt;1 %

30

Submitted to Unviersidad de Granada

Trabajo del estudiante

&lt;1 %

31

[ciencia.lasalle.edu.co](http://ciencia.lasalle.edu.co)

Fuente de Internet

&lt;1 %



32

[www.scielo.org.co](http://www.scielo.org.co)

Fuente de Internet

<1 %

33

[www.tdx.cat](http://www.tdx.cat)

Fuente de Internet

<1 %

34

Forster Carneiro, Tania. "Dry thermophilic anaerobic digestion of municipal solid waste: Study of the variables of the process in the start up and stabilization of the bio-reactor", Proquest, 20111109

Publicación

<1 %

35

Submitted to Universidad Nacional del Centro del Peru

Trabajo del estudiante

<1 %

36

[cdigital.uv.mx](http://cdigital.uv.mx)

Fuente de Internet

<1 %

37

[repositorio.espe.edu.ec](http://repositorio.espe.edu.ec)

Fuente de Internet

<1 %

38

[avibert.blogspot.com](http://avibert.blogspot.com)

Fuente de Internet

<1 %

39

[repositorio.unfv.edu.pe](http://repositorio.unfv.edu.pe)

Fuente de Internet

<1 %

40

[1library.co](http://1library.co)

Fuente de Internet

<1 %

41

[alicia.concytec.gob.pe](http://alicia.concytec.gob.pe)

Fuente de Internet

<1 %

42	<a href="http://bibliotecadigital.univalle.edu.co">bibliotecadigital.univalle.edu.co</a> Fuente de Internet	<1 %
43	Submitted to Submitted on 1685502141701 Trabajo del estudiante	<1 %
44	<a href="http://core.ac.uk">core.ac.uk</a> Fuente de Internet	<1 %
45	<a href="http://renati.sunedu.gob.pe">renati.sunedu.gob.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
46	<a href="http://repositorio.urp.edu.pe">repositorio.urp.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
47	Submitted to Universidad Nacional Mayor de San Marcos Trabajo del estudiante	<1 %
48	<a href="http://doku.pub">doku.pub</a> Fuente de Internet	<1 %
49	<a href="http://repositorio.upn.edu.pe">repositorio.upn.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
50	<a href="http://www.unprg.edu.pe">www.unprg.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
51	<a href="http://cienciasmarinas.com.mx">cienciasmarinas.com.mx</a> Fuente de Internet	<1 %

Asesor: Segundo Alberto Vásquez Llanos






## Recibo digital


Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por **Turnitin**. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: Keyla Castillo  
Título del ejercicio: revision  
Título de la entrega: Tesis\_Final  
Nombre del archivo: TESIS-\_CASTILLO\_BOCANEGRA\_KEYLA\_FINAL.docx  
Tamaño del archivo: 4.82M  
Total páginas: 78  
Total de palabras: 15,986  
Total de caracteres: 90,109  
Fecha de entrega: 30-oct.-2024 10:26a. m. (UTC-0500)  
Identificador de la entrega... 2425665931



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
PEDRO RUIZ GALLO**  
FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA E  
INDUSTRIAS ALIMENTARIAS  
  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA  
  
**TESIS**  
  
La cavitación hidrodinámica como pretratamiento de la vinaza de  
alcohol para la remoción de la carga orgánica y de fenoles  
  
**PARA OBTENER EL TITULO PROFESIONAL DE  
INGENIERA QUÍMICA**  
  
**AUTOR**  
  
Bach. Keyla Eilen Castillo Bocanegra  
  
**ASESOR**  
  
Dr. Segundo Alberto Vásquez Llanos  
  
**CO-ASESOR(A)**  
  
Dra. Ada Patricia Barturén Quispe  
  
Lambayeque - Perú  
  
2024



Asesor: Segundo Alberto Vásquez Llanos