

## Universidad Católica de Santa María

Facultad de Ciencias Farmacéuticas, Bioquímicas y Biotecnológicas

Escuela Profesional de Ingeniería Biotecnológica



### “TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE PLANTA DE BENEFICIO BOVINO CON CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA Y SUBSECUENTE CULTIVO DE MICROALGAS”

Tesis presentada por el bachiller:

**Sánchez Vera, Fabio Patricio.**

Para optar el Título Profesional de

**Ingeniero Biotecnólogo**

Asesor:

**PhD. Terán Hilares, Ruly.**

Co-asesor:

**PhD. Cárdenas García, Jaime.**

**Arequipa – Perú**

**2022**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA**  
**INGENIERIA BIOTECNOLOGICA**  
**TITULACIÓN CON TESIS**  
**DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR**

Arequipa, 06 de Julio del 2022

**Dictamen: 006766-C-EPIB-2022**

Visto el borrador del expediente 006766, presentado por:

**2015244991 - SANCHEZ VERA FABIO PATRICIO**

Titulado:

**TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE PLANTA DE BENEFICIO BOVINO CON CAVITACIÓN  
HIDRODINÁMICA Y SUBSECUENTE CULTIVO DE MICROALGAS**

Nuestro dictamen es:

**APROBADO**

**2346 - MOLINA RODRIGUEZ FREDY NICOLAS  
DICTAMINADOR**

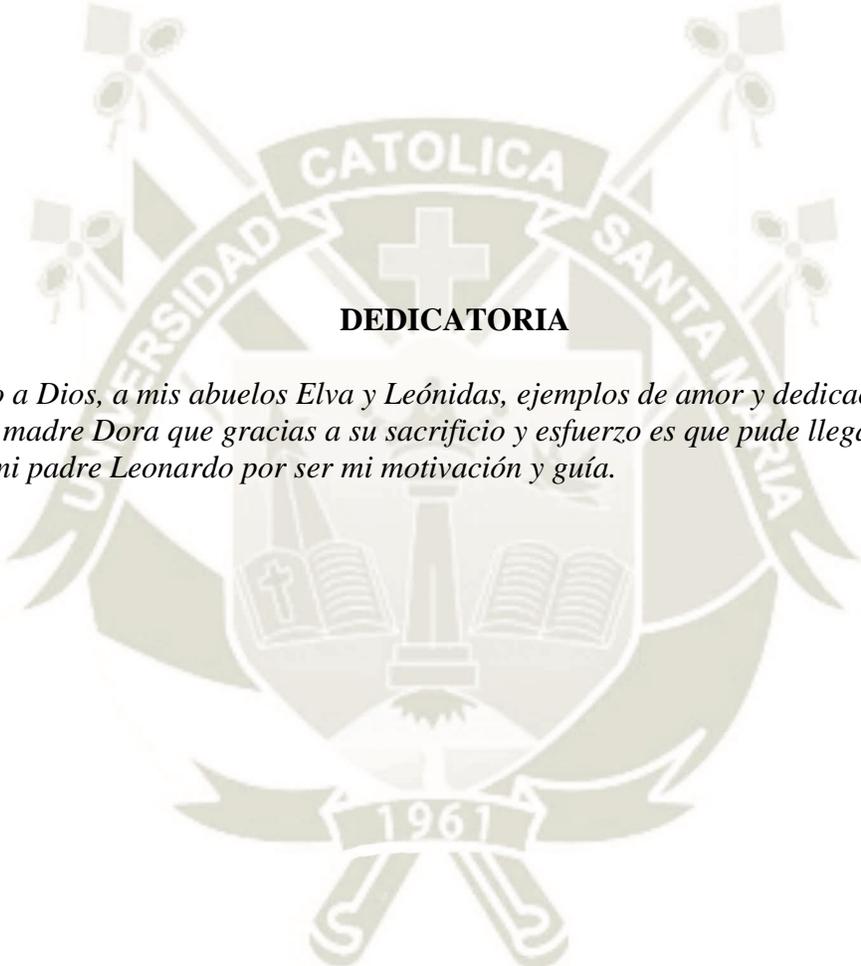


**2781 - BARREDA DEL CARPIO JAIME ERNESTO  
DICTAMINADOR**



**3319 - MEDINA CABRERA EDILBERTO VICENTE  
DICTAMINADOR**





## DEDICATORIA

*Agradezco a Dios, a mis abuelos Elva y Leónidas, ejemplos de amor y dedicación en mi vida, a mi madre Dora que gracias a su sacrificio y esfuerzo es que pude llegar donde estoy y a mi padre Leonardo por ser mi motivación y guía.*

## AGRADECIMIENTOS

Mi completo agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC) y al Fondo Nacional de Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación Tecnológica (FONDECYT) que brindó el financiamiento para el desarrollo del Proyecto 06-2019-FONDECYT-BM-INC.INV “Uso de la nanotecnología en el desarrollo de membranas para desalinización, purificación de agua, e industria alimentaria”, de esta forma, permitiéndome la realización de mi tesis. A todo el grupo de MEMTECH, por su consejo y compañerismo, especialmente al Dr. Ruly Terán Hilares por su constante guía, paciencia y dedicación.



Proyecto  
**Concytec**  
**Banco Mundial**



**CONCYTEC**  
CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA,  
TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN TECNOLÓGICA



**Pro**  
**CIENCIA**



**THE WORLD BANK**  
IBRD • IDA | WORLD BANK GROUP

## ÍNDICE

DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
ÍNDICE.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS .....	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT .....	xii
INTRODUCCIÓN.....	1
HIPÓTESIS .....	3
DEFINICIÓN OPERACIONAL Y CONCEPTUAL DE LAS VARIABLES .....	4
OBJETIVOS.....	5
Objetivo general .....	5
Objetivos específicos.....	5
CAPÍTULO I.....	6
1. MARCO TEÓRICO .....	6
1.1 Efluentes .....	6
1.1.1 Aguas residuales de plantas de beneficio .....	6
1.2 Tratamiento de aguas residuales .....	8
1.2.1 Tratamiento primario. ....	8
1.2.2 Tratamiento secundario.....	8
1.2.3 Tratamiento avanzado o terciario.....	8
1.2.4 Desinfección. ....	9
1.3 Precipitación ácida en efluentes industriales .....	9
1.4 Cavitación .....	10
1.4.1 La cavitación hidrodinámica .....	10
1.4.2 Implosión o colapso de la burbuja de vapor .....	11
1.4.3 Tecnologías para el procesamiento con cavitación hidrodinámica .....	12

1.4.4	Parámetros de importancia en la cavitación hidrodinámica .....	14
1.4.5	Inyección de aire.....	16
1.4.6	Aplicación en el tratamiento de efluentes y procesos oxidativos avanzados.	16
1.5	Tratamiento biológico de aguas residuales de planta de beneficio.....	17
1.5.1	Tratamiento anaeróbico .....	17
1.5.2	Tratamiento aeróbico .....	18
1.6	Tratamiento biológico utilizando microalgas .....	18
1.6.1	<i>Chlorella vulgaris</i> :.....	20
1.6.2	Sistemas de cultivo de microalgas .....	25
1.7	Tratamiento con membranas.....	26
1.8	Técnicas de análisis fisicoquímico y biológico-microbiológico.....	27
1.8.1	Técnicas basadas en una propiedad física.....	27
1.8.2	Técnicas espectroscópicas y ópticas .....	27
1.8.3	Técnicas no espectroscópicas .....	28
1.8.4	Métodos de separación.....	28
1.8.5	Métodos microbiológicos y biológicos.....	28
1.9	Parámetros importantes en el análisis de aguas .....	29
1.9.1	Parámetros organolépticos .....	29
1.9.2	Parámetros fisicoquímicos .....	29
1.9.3	Parámetros orgánicos .....	32
1.9.4	Parámetros microbiológicos .....	32
1.10	Fluidodinámica computacional (CFD) .....	32
CAPÍTULO II.....		34
2.	MATERIALES Y METODOLOGÍA .....	34
2.1	Lugar de ejecución.....	34
2.2	Materiales.....	34
2.2.1	Muestras y/o unidades biológicas.....	34
2.2.2	Material de laboratorio .....	34
2.2.3	Insumos y reactivos químicos .....	34
2.2.4	Equipos e instrumentación. ....	35
2.3	Metodología.....	37
2.3.1	Agua residual de planta de beneficio de ganado bovino .....	37
2.3.2	Sistema de cavitación hidrodinámica .....	38
2.3.3	Modelado de la dinámica computacional de fluidos (CFD).....	38

2.3.4	Tratamiento por cavitación hidrodinámica de aguas residuales de planta de beneficio de ganado bovino.....	39
2.3.5	Filtración por membranas de agua tratada con CH .....	39
2.3.6	Cultivo de microalgas en aguas residuales tratadas con CH. ....	40
2.3.7	Precipitación acida seguida del Cultivo de microalgas en aguas residuales a diferentes tiempos de CH. ....	40
CAPÍTULO III .....		42
1.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	42
1.1	Aguas residuales de planta de beneficio bovino (ARBV) .....	42
1.2	Tratamiento de cavitación hidrodinámica de ARBV .....	43
1.3	Filtración por membrana de CH- ARBV .....	47
1.4	Cultivo de microalgas en CH-CSW .....	50
1.5	Cultivo de microalgas en efluente sometido a precipitación acida posterior al tratamiento con cavitación hidrodinámica.....	51
CONCLUSIONES.....		53
RECOMENDACIONES .....		54
REFERENCIAS .....		55
ANEXOS .....		66

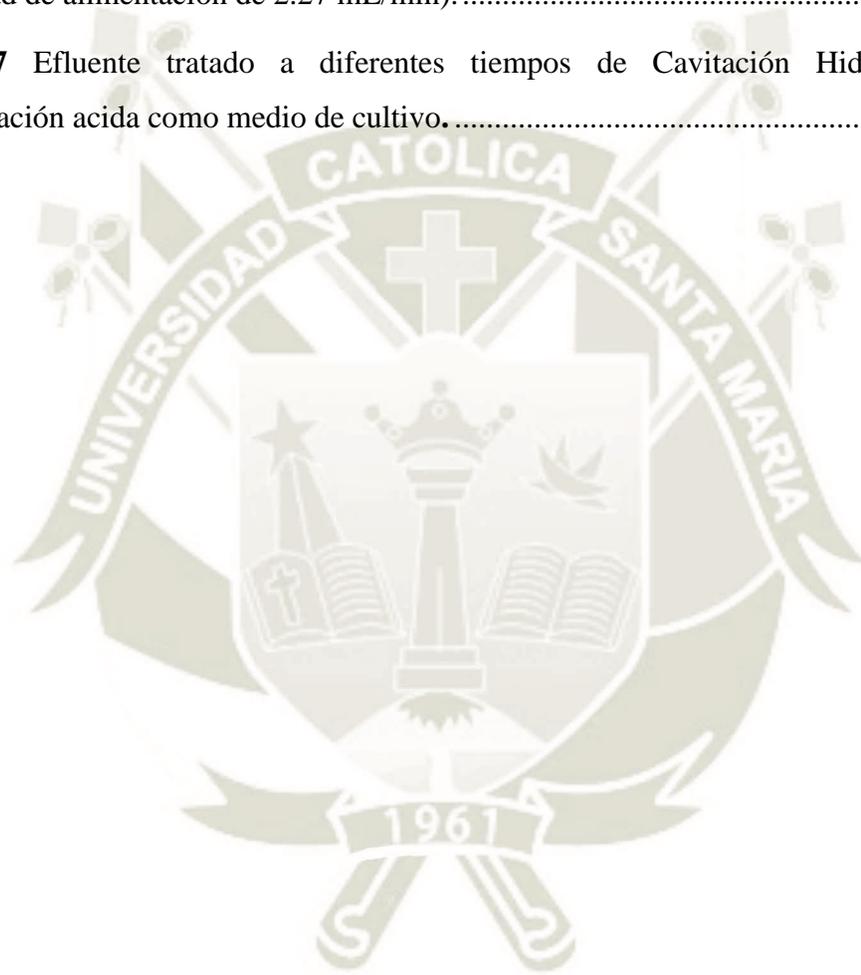
## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Diagrama de fases del agua. Adaptado de Blake jr <sup>35</sup> .	11
<b>Figura 2.</b> Esquemas para platos de múltiples orificios, con diferentes combinaciones de número y diámetro de perforaciones. Adaptado de Gogate et al <sup>41</sup> .	13
<b>Figura 3.</b> Representación general de un dispositivo Venturi. Los numerales corresponden a: 1. Ingreso del fluido. 2. Zona de convergencia. 3. Garganta o constricción. 4. Etapa de expansión y recuperación de presión. 5. Descarga Cv. Número de cavitación. Adaptado de Navarrete et al <sup>42</sup> .	14
<b>Figura 4.</b> Esquema del cultivo de microalgas para el tratamiento de aguas residuales. Adaptado de Zerrouki et al <sup>63</sup> .	19
<b>Figura 6.</b> Esquema de un fotobiorreactor de transporte aéreo (a) bucle interno, (b) bucle interno concéntrico, (c) bucle externo. Adaptado de Gupta et al <sup>89</sup> .	26
<b>Figura 7.</b> Representación esquemática de diferentes tamaños de membrana para el tratamiento de agua y aguas residuales. Adaptado de Rezakazemi et al <sup>93</sup> .	27
<b>Figura 8.</b> Pasos para el análisis de CFD. Adaptado de Malekjani N et al <sup>100</sup> .	33
<b>Figura 9.</b> Fotografía del fotobiorreactor de tubo concéntrico de bucle interno.	37
<b>Figura 10.</b> Esquema de la configuración experimental del reactor de cavitación hidrodinámica (A) y el dispositivo de cavitación - placa de orificio (B). A): 1- bomba, 2- dispositivo de cavitación (placa de orificio), 3- válvula en línea de by-pass, 4- manómetro, 5- zona de cavitación, 6- tanque de recirculación, 7- punto de muestreo.	38
<b>Figura 11.</b> Análisis CFD. a) Malla construida, b) Perfil de la presión manométrica, c) Velocidad a través del orificio y d) Fracción de vapor alcanzada at 400 kPa.	43
<b>Figura 12.</b> Alza de temperatura durante el proceso de CH debido a la emisión de “hot spots” en el sistema	44
<b>Figura 13.</b> Alza del pH debido a la degradación de elementos presentes en el efluente.	45
<b>Figura 14.</b> Cavitación hidrodinámica de ARBV con aireación	46
A) Proceso por lotes con y sin inyección de aire. b) Proceso continuo.	46

**Figure 15.** A) Filtración por membrana de CH- ARBV usando membranas tubulares de alúmina con tamaño de poro de 600 nm B) DQO residual después del tratamiento de CH y después de pasar consecutivamente por membranas tubulares de alúmina con diferentes tamaños de poro..... 47

**Figura 16.** Cultivo de microalga en ARBV tratada con CH en un proceso por lotes y continuo (Velocidad de alimentación de 2.27 mL/min)..... 51

**Figura.17** Efluente tratado a diferentes tiempos de Cavitación Hidrodinámica y Sedimentación acida como medio de cultivo..... 52



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Características Generales de aguas residuales de una planta de beneficio, <sup>a</sup> unidades de atenuación de formazina. ....	7
<b>Tabla 2:</b> Contenido potencial de pigmentos en <i>C. vulgaris</i> bajo diferentes condiciones de crecimiento. ....	23
<b>Tabla 3:</b> Perfil de minerales de <i>C. vulgaris</i> .....	24
<b>Tabla 4:</b> perfil de vitaminas de <i>C. vulgaris</i> . ....	24
<b>Tabla 5:</b> Principales parámetros del agua residual de planta de beneficio de ganado bovino usado en este estudio. ....	42
<b>Tabla 6:</b> Comparación de los parámetros principales de agua residual de planta de beneficio bovino después de tratamiento con cavitación hidrodinámica y filtrado utilizando una membrana cerámica (tamaño de poro 600 nm) .....	49

## RESUMEN

Las aguas residuales industriales son una de las principales fuentes de contaminación ambiental en los países en desarrollo. Las plantas de beneficio bovino producen grandes cantidades de aguas residuales (ARBV) que contienen una alta concentración de materia orgánica y nutrientes. Por lo tanto, ARBV requiere un tratamiento significativo antes de su eliminación o reutilización. En este trabajo se propone la cavitación hidrodinámica (CH) y la precipitación ácida seguida de filtración por membranas o tratamiento biológico (cultivo de microalgas). Se estudió la precipitación ácida empleando  $H_2SO_4$ , al reducir el pH del efluente (inicialmente alrededor de 7.5) a pH 4.5, se removió en forma de sedimentado alrededor del 80 % de la demanda química de oxígeno (DQO) en este primer tratamiento. La CH con inyección de aire redujo más de un 20% la demanda de oxígeno químico (DQO) que sin inyección de aire. En un proceso continuo de CH, el contenido de DQO en la línea de salida fue de 324 mg  $O_2$  / L, que es un 68% más bajo que el agua residual alimentada. Además, el 76% de la DQO residual se eliminó mediante filtración a través de una membrana tubular de alúmina (tamaño de poro de 600 nm). Por otro lado, el 85% de la DQO residual después del tratamiento con CH fue eliminado por microalgas en 24 h en modo discontinuo. En el cultivo continuo de microalgas, la concentración de DQO en la línea de salida fue de alrededor de 59 mg  $O_2$  / L. Por lo tanto, el proceso de CH combinado con el proceso biológico es un enfoque prometedor para el tratamiento de ARBV.

**Palabras clave:** Aguas residuales de planta de beneficio bovino, Cavitación Hidrodinámica, microalgas, membranas, tratamiento de aguas residuales.

## ABSTRACT

Industrial wastewater is one of the main sources of environmental pollution in developing countries. Bovine processing plants produce large amounts of wastewater (ARBV) that contain a high concentration of organic matter and nutrients. Therefore, ARBV requires significant treatment prior to disposal or reuse. In this work, hydrodynamic cavitation (CH) and acid precipitation followed by membrane filtration or biological treatment (microalgae culture) are proposed. Acid precipitation was studied using  $H_2SO_4$ , by reducing the pH of the effluent (initially around 7.5) to pH 4.5, about 80% of the chemical oxygen demand (COD) was removed in the form of sediment in this first treatment. CH with air injection reduced more than 20% the chemical oxygen demand (COD) than without air injection. In a continuous CH process, the COD content in the outlet line was 324 mg  $O_2/L$ , which is 68% lower than the feed wastewater. Furthermore, 76% of the residual COD was removed by filtration through a tubular alumina membrane (600 nm pore size). On the other hand, 85% of the residual COD after CH treatment was removed by microalgae in 24 h in discontinuous mode. In the continuous culture of microalgae, the COD concentration at the outlet line was around 59 mg  $O_2/L$ . Therefore, the CH process combined with the biological process is a promising approach for ARBV treatment.

**Keywords** Bovine processing plants wastewater, hydrodynamic cavitation, microalgae, membrane, wastewater treatment.

## INTRODUCCIÓN

Según el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), el consumo mundial de carne de res fue de 50,06 millones de toneladas y la expectativa para 2021 es de alrededor de 60 millones de toneladas equivalentes en canal. Las aguas residuales de planta de beneficio bovino ganado (ARBV), debido a su composición en materia orgánica, sólidos en suspensión, aceites y grasas, nutrientes (nitrógeno y fósforo) requieren un proceso de tratamiento eficiente antes de su disposición o reutilización. Por lo tanto, el desarrollo de tecnologías sostenibles, eficientes y de bajo costo para el tratamiento de ARBV es un desafío actual.

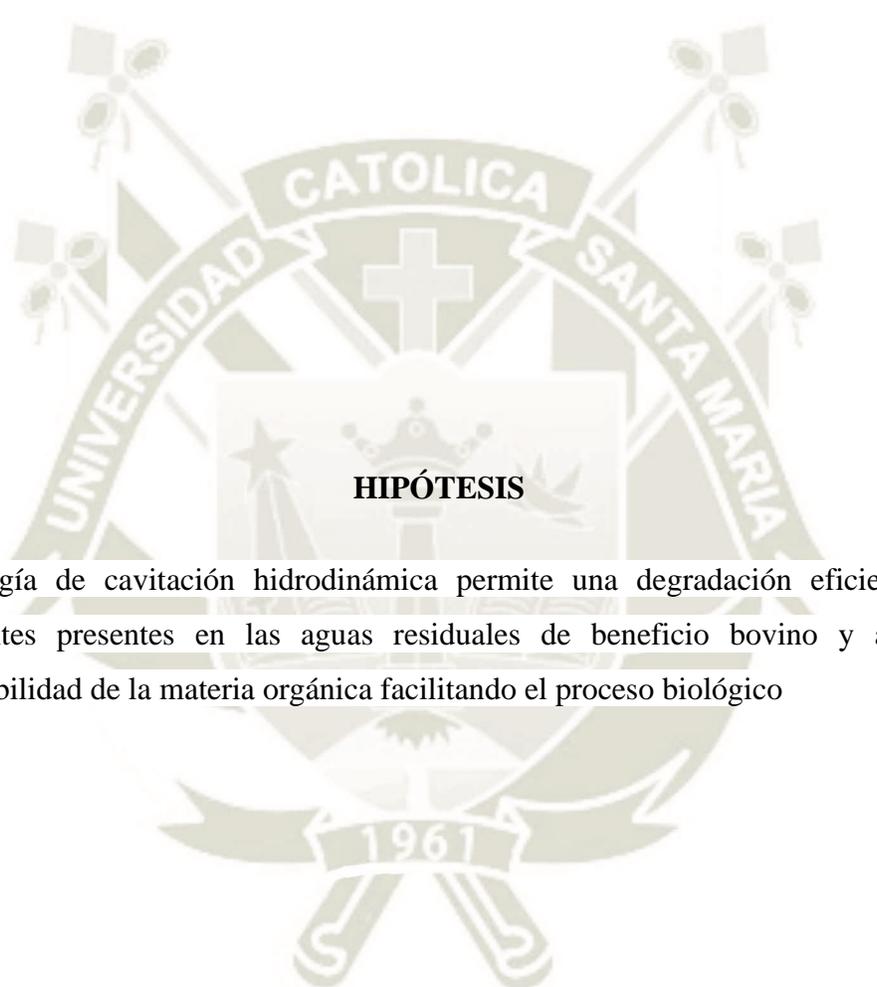
A la actualidad no existe un tratamiento consolidado para este tipo de efluentes; sin embargo, diversas actividades se vienen realizando a fin de conseguir un tratamiento adecuado. Por ejemplo, recientemente se informó de la precipitación ácida utilizando  $H_2SO_4$  para aguas residuales de planta de aprovechamiento de diferentes especies animales<sup>1,2</sup>. En este proceso, se disminuye el pH del efluente produciendo precipitados, los cuales atrapan y arrastran la materia orgánica en suspensión y coloidal, permitiendo la reducción de materia orgánica, turbidez, nutrientes y carga microbiana. Otra técnica que ha estado atrayendo el interés de la comunidad científica<sup>3</sup> es la tecnología de cavitación hidrodinámica (CH). En CH, se forman micro-nano-burbujas de vapor de agua a baja presión al hacer pasar el agua a través de placas con orificios y tubos Venturi<sup>4</sup>. La formación, el crecimiento y el colapso violento de burbujas da como resultado la liberación de grandes cantidades de energía, "puntos calientes", ondas de choque y micro-chorros que pueden degradar o romper la materia orgánica presente en el fluido. Además, los radicales hidroxilos altamente reactivos ( $OH^\cdot$ ) generados en el CH pueden degradar una amplia gama de contaminantes recalcitrantes<sup>5</sup>. La eficiencia de los HC aumenta cuando se combina con otros procesos, por ejemplo, aireación, oxigenación y fenton,<sup>6,7</sup> ultrasonido,<sup>8</sup> UV,<sup>9</sup> ozono<sup>10</sup> y plasma<sup>11</sup>. Algunas ventajas de HC son la simplicidad en la construcción, el bajo costo, la alta eficiencia energética y la fácil escalabilidad<sup>6,12</sup>. Sin embargo, todavía no se ha informado del tratamiento con HC de ARBV solo o en combinación con otras técnicas como la filtración por membranas y el proceso biológico.

De esta forma, el posterior tratamiento biológico con especies de microalgas puede ser una alternativa prometedora ya que la biomasa microalgal puede ser utilizada para la producción de varios productos como fertilizantes y/o biocombustibles en un contexto de biorrefinería <sup>13</sup>. Las microalgas tienen una alta tasa de actividades fotosintética que cuando se combinan con la generación de bioproductos, tienen la capacidad de convertirse en una ruta económica para obtener energía sostenible <sup>14</sup>.

A su vez la tecnología de membranas ha ganado una creciente importancia en los procesos de separación debido a sus ventajas de modularidad, baja huella, fácil escalado y su facilidad para integrarse con otro proceso <sup>15</sup>.

Una evidencia sobre el rendimiento del uso de membranas en el tratamiento de aguas residuales de aprovechamiento animal fue reportada por Yordanov <sup>16</sup> en donde la membrana de ultrafiltración (UF) mostró eficiencias de remoción de la demanda bioquímica (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO) cerca del 94.5 % al 97.9 %, mientras que SST y los aceites y grasas fueron reducidos en un 98 y 99% respectivamente.

El objetivo de este trabajo fue proponer un método de tratamiento de efluentes provenientes de la industria avícola a través de precipitación ácida con  $H_2SO_4$ , cavitación hidrodinámica y subsecuente tratamiento biológico con el cultivo de microalgas "*Chlorella vulgaris*" o la utilización de filtración por membranas. La eficiencia del proceso se evaluó en función de la eliminación de la demanda química de oxígeno (DQO). Además, también se determinaron algunos parámetros de las aguas residuales antes y después del tratamiento con el propósito de comparar la eficiencia del método propuesto.



## HIPÓTESIS

La tecnología de cavitación hidrodinámica permite una degradación eficiente de los contaminantes presentes en las aguas residuales de beneficio bovino y aumenta la biodegradabilidad de la materia orgánica facilitando el proceso biológico

## DEFINICIÓN OPERACIONAL Y CONCEPTUAL DE LAS VARIABLES

<i>Variables independientes</i>	<i>Indicadores</i>
Configuración geométrica del tubo Venturi	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Número de cavitación</li> <li>- Fracción de vapor de agua (%)</li> <li>- Velocidad del fluido (m/s)</li> </ul>
Condiciones operacionales- sistema de cavitación hidrodinámica (Temperatura, Presión, pH)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- DQO (mg O<sub>2</sub>/L)</li> <li>- Turbidez (UNT)</li> <li>- Distribución de tamaño de partícula (nm)</li> <li>- Concentración de P y N (mg/L)</li> <li>- Carga bacteriana total (UFC/mL)</li> </ul>
Proceso biológico (concentración de efluente, caudal de alimentación, pH)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- DQO (mg O<sub>2</sub>/L)</li> <li>- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), (mg O<sub>2</sub>/L)</li> <li>- Concentración de la biomasa (g/L)</li> </ul>
Porosidad de la membrana	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tamaño de poro (mm)</li> </ul>
<i>Variables dependientes</i>	<i>Indicadores</i>
Cambios fisicoquímicos en el efluente	<ul style="list-style-type: none"> <li>- DQO (mg O<sub>2</sub>/L)</li> <li>- Turbidez (UNT)</li> <li>- Distribución de tamaño de partícula (nm)</li> <li>- Concentración de P y N (mg/L)</li> <li>- Carga bacteriana total (UFC/mL)</li> </ul>
Biodegradabilidad del efluente	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Concentración de microalga (g/L)</li> <li>- Concentración de P y N (mg/L)</li> <li>- Concentración de DQO (mg O<sub>2</sub>/L)</li> </ul>

## OBJETIVOS

### Objetivo general

Tratar aguas residuales provenientes de una planta de beneficio bovino mediante cavitación hidrodinámica con el objetivo de mejorar la biodegradabilidad por microalgas y su purificación mediante tecnología de membranas.

### Objetivos específicos

1. Diseñar y construir un reactor de cavitación hidrodinámica para tratamiento de efluentes
2. Evaluar el comportamiento del fluido en el sistema de cavitación (Placa de orificios) mediante simulación por fluidodinámica computacional (CFD).
3. Evaluar el efecto de los dispositivos de cavitación (placa de orificios) en las propiedades fisicoquímicas del efluente.
4. Evaluar la biodegradabilidad por microalgas "*Chlorella vulgaris*" del efluente tratado en las mejores condiciones del proceso con cavitación hidrodinámica.
5. Evaluar el uso de la tecnología de membranas para la separación de la biomasa y purificación de agua en el biorreactor de cultivo de microalgas.

## CAPÍTULO I

### 1. MARCO TEÓRICO

#### 1.1 Efluentes

Los efluentes corresponden a residuos provenientes de la actividad humana, como los procesos industriales y actividades domésticas, los mismos que pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos. Los efluentes líquidos, pueden contener compuestos tóxicos en concentraciones variables, y su composición depende de la clase de efluente que los genera. Estos pueden ser de naturaleza química y/o biológica.

En términos generales, los principales componentes de los efluentes industriales según su origen son:

- Industria metalúrgica: metales tales como cobre, níquel, plomo, zinc, cromo, cobalto, cadmio; ácidos clorhídrico, sulfúrico y nítrico; detergentes.
- Industria papelera: sulfitos, sulfitos ácidos, materia orgánica, residuos fenólicos, cobre, zinc, mercurio.
- Industria petroquímica: hidrocarburos, plomo, mercurio, aceites, derivados fenólicos y nafténicos, residuos semisólidos.
- Industria de alimentos: nitritos, materia orgánica, ácidos, microorganismos.
- Industrias textiles: sulfuros, anilinas, ácidos, hidrocarburos, detergentes.
- Industria del cuero (curtiembres): cromo, sulfuros, compuestos nitrogenados, tinturas, microorganismos patógenos.
- Industria química (en general): amplia variedad de ácidos orgánicos e inorgánicos, sales, metales pesados.
- Instalaciones sanitarias: microorganismos, jabones, detergentes <sup>17</sup>.

#### 1.1.1 Aguas residuales de plantas de beneficio

El sector cárnico produce grandes volúmenes de aguas residuales provenientes de plantas de beneficio debido al sacrificio de animales y limpieza de las instalaciones, así como el procesamiento de carne en las plantas. La industria cárnica utiliza el 24% del total agua dulce consumida por la industria de alimentos y bebidas y hasta el 29% del agua consumida por el sector agrícola a nivel mundial <sup>18,19</sup>.

La producción mundial de carne se ha duplicado en las últimas tres décadas <sup>20</sup>. Bouwmann et al <sup>21</sup> han proyectado una duplicación constante del crecimiento de la producción de carne hasta el 2050. Como resultado, se puede inferir que el número de plantas de beneficio animal aumentará, dando un mayor volumen de aguas residuales de alta resistencia a tratar.

Las ARBV, por lo general contienen cantidades considerables de fósforo total (FT), nitrógeno total (NT), carbono orgánico total (COT), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos en suspensión (SS) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO). ARBV son consideradas perjudiciales en todo el mundo debido a su compleja composición de grasas, proteínas y fibras provenientes del proceso matanza <sup>22</sup>.

Sin embargo, la mayor parte su contaminación es causada por la sangre y por la mucosidad estomacal e intestinal. Además, ARBV contiene altos niveles de compuestos orgánicos, microorganismos patógenos y no patógenos, detergentes y desinfectantes utilizados para actividades de limpieza y en algunos casos productos farmacéuticos para uso veterinario <sup>23</sup>.

Las características comunes de ARBV han sido descritas en estudios anteriores y fueron resumidos en la Tabla 1.

**Tabla 1:** Características Generales de aguas residuales de una planta de beneficio, <sup>a</sup> unidades de atenuación de formazina.

Parámetro	Rango	Promedio
TOC (mg/L)	70-1200	546
BOD5 (mg/L)	150-4635	1209
COD (mg/L)	500- 15.900	4221
TN (mg/L)	50-841	427
TSS (mg/L)	270-6400	1164
pH	4.90-8.10	6.95
TP (mg/L)	25-200	50
Color (mg/L escala Pt)	175-400	290
Turbidity (FAU) <sup>a</sup>	200-300	275

*Fuente: Adaptado de Bustillo-Lecompte et al <sup>24</sup>.*

## 1.2 Tratamiento de aguas residuales

### 1.2.1 Tratamiento primario.

Tiene como objetivo la remoción por medios físicos o mecánicos de una parte sustancial del material sedimentable o flotante. Es decir, el tratamiento primario es capaz de remover no solamente la materia que incomoda, sino también una fracción importante de la carga orgánica y que puede representar entre el 25% y el 40% de la DBO y entre el 50% y el 65% de los sólidos suspendidos. Entre los tipos de tratamiento primario se citan:

- Sedimentación primaria.
- Flotación.
- Precipitación química.
- Filtros gruesos.
- Oxidación química.
- Coagulación, floculación, sedimentación y filtración <sup>25</sup>.

### 1.2.2 Tratamiento secundario.

La reducción de los compuestos orgánicos presente en el agua residual, acondicionada previamente mediante tratamiento primario, se realiza exclusivamente por procesos biológicos. Este proceso reduce o convierte la materia orgánica finamente dividida y/o disuelta, en sólidos sedimentables floculentos que puedan ser separados por sedimentación en tanques de decantación. Los procesos biológicos más utilizados son los lodos activados y filtros percoladores. Son muchas las modificaciones de estos procesos que se utilizan para hacer frente a los requerimientos específicos de cada tratamiento. Asimismo, dentro de este grupo se incluyen a las lagunas de estabilización y aeradas, así como el tratamiento biológico empleando oxígeno puro y el tratamiento anaeróbico. Los tratamientos biológicos de esta categoría tienen una eficiencia remocional de la DBO entre el 85 % al 95% <sup>26</sup>.

### 1.2.3 Tratamiento avanzado o terciario.

Tiene como objetivo complementar los procesos anteriormente indicados para lograr efluentes más puros, con menor carga contaminante y que pueda ser utilizado para diferentes. Las sustancias o compuestos comúnmente removidos son:

- Fosfatos y nitratos.

- Huevos y quistes de parásitos.
- Sustancias tóxicas.
- Algas.
- Bacterias y virus (desinfección).
- Radionuclidos.
- Sólidos totales y disueltos.
- Temperatura <sup>27</sup>.

#### **1.2.4 Desinfección.**

Se emplea para reducir principalmente el contenido de bacterias, virus y quistes amebianos en las aguas residuales tratadas, previo a su disposición final. La desinfección consiste en la destrucción selectiva de los organismos causantes de enfermedades <sup>28</sup>.

#### **1.3 Precipitación ácida en efluentes industriales**

Se ha estudiado extensivamente el tratamiento de aguas residuales con productos químicos, adaptando estrategias como las precipitaciones (coagulación / floculación) mediante el uso de compuestos inorgánicos (alumbre o sulfato de aluminio, cloruro férrico, cloruro de poli aluminio y aluminato de sodio e hidróxido de calcio) <sup>29</sup>. De hecho, el uso de compuestos inorgánicos resulta en una alta eficiencia para eliminar las partículas en suspensión de las aguas residuales. Sin embargo, estos procesos pueden llegar a producir lodos tóxicos; así mismo, la alta carga de coagulantes inorgánicos (como el aluminio) podrían incrementar la concentración de metales en el agua, lo que puede ser perjudicial para la salud humana. Además de esto, las características físicas (color) y químicas del agua pueden cambiar dificultando su eliminación <sup>12</sup>.

Como alternativa, un nuevo método basado en la precipitación ácida en aguas residuales de suero de queso <sup>30</sup> y lixiviados de vertedero <sup>31</sup> ha sido reportado. El cambio del pH origina precipitados, que atrapan y arrastran la materia en suspensión y coloidal, permitiendo la reducción de materia orgánica, turbidez, fósforo total y nitrógeno <sup>1</sup>.

En el trabajo de Terán et al <sup>2</sup> al reducir el valor de pH de aguas residuales de planta de beneficio avícola de 6-7 a 4, aproximadamente el 80 % de la demanda química total de oxígeno (DQOT) se eliminó como lodo.

## 1.4 Cavitación

El fenómeno de cavitación fue observado por primera vez hace unos cien años cuando comenzaron a desarrollarse los primeros buques torpedos potentes. Debido al giro a gran velocidad de los propulsores de los torpedos se formaban unas grandes burbujas o cavidades, cuyo colapso posterior venía acompañado de grandes turbulencias, calor y presión, que eran transmitidos a la superficie de los propulsores de los torpedos ocasionando su rápida erosión <sup>32</sup>. La cavitación es la formación, actividad y posterior colapso (bajo determinadas condiciones) de burbujas de vapor de un fluido. De acuerdo con la literatura, pueden ser de 4 tipos de cavitación:

- Cavitación hidrodinámica: producida por las variaciones de la presión de un fluido debidas a la geometría del sistema.
- Cavitación acústica: debida a la propagación de longitudes de onda que producen variaciones de la presión de un fluido.
- Cavitación óptica: producida por fotones de luz de alta intensidad que atraviesa un fluido.
- Cavitación de partícula: producida por cualquier tipo de partícula elemental.

Según lo señalado anteriormente el fenómeno de cavitación se clasifica en varios tipos de acuerdo con el modo en que se genera, aunque sólo la cavitación acústica (ultrasonidos) y la cavitación hidrodinámica han sido aplicadas eficientemente en procesos <sup>33</sup>.

### 1.4.1 La cavitación hidrodinámica

Es un fenómeno que se produce cuando, sin cambio de temperatura, el fluido se mueve a una región donde, su presión local se reduce a un valor menor al del vapor de agua (Figura.1), produciendo la ebullición local del fluido, dando lugar al surgimiento de cavidades (burbujas) de vapor en su seno, formándose una estructura bifásica (liquido-vapor) y la subsiguiente condensación y colapso de las burbujas al ser arrastradas con el fluido hacia regiones de presión más elevadas <sup>34</sup>.

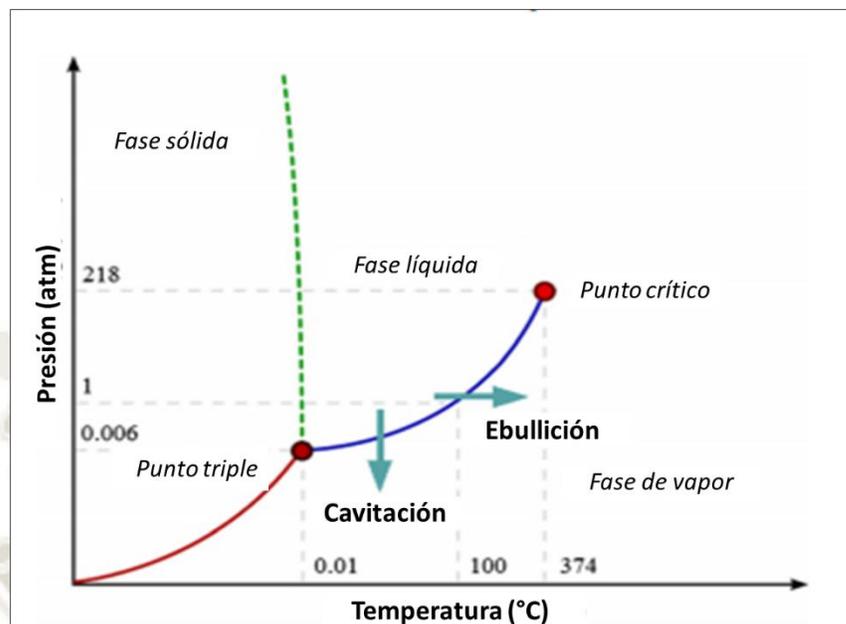


Figura 1. Diagrama de fases del agua. Adaptado de Blake jr <sup>35</sup>.

#### 1.4.2 Implosión o colapso de la burbuja de vapor

El proceso de cavitación es ampliamente conocido en la ingeniería y ha tratado de evitarse por su efecto especialmente nocivo en las máquinas hidráulicas (bombas, válvulas, etc.). Los dispositivos hidrodinámicos de cavitación se basan en la generación de flujos inestables y modos hidrodinámicos de impacto en el fluido que se hace pasar por ellos. Estos modos se caracterizan por una intensa turbulencia, formación de vórtices y desarrollo de cavitación <sup>33</sup>.

Al cambiar del estado gaseoso al líquido las burbujas de vapor colapsan súbitamente (implosionan), este momento se caracteriza por una intensa turbulencia, formación de vórtices y pulsaciones de velocidad, presión y temperatura, al colapsar las burbujas su tamaño puede alcanzar hasta 100 nm <sup>36</sup>.

El agua que rodea las burbujas se acelera hacia su interior, se crea un choque hidráulico con altas y locales emisiones de energía, experimentos realizados indican emisiones de energía capaces de crear presiones en el orden de los 100 MPa y temperaturas de 10000 K <sup>36</sup> pero en áreas muy delimitadas de un orden de 5nm a 10nm, este suceso no dura más de 10 nanosegundos. Tras el colapso de la primera burbuja, ésta se divide en nuevas burbujas de cavitación. Tales micros y nanos burbujas tienen unos destacables efectos:

ondas de choque a alta presión, micro jets o microcorrientes a alta velocidad, polarización y electrolización, escisión molecular y otros más.

Al pasar el fluido por una sección estrecha a alta velocidad se produce la formación y colapso de un gran número de burbujas, que implosionan simétrica y asimétricamente. Las superficies sólidas usualmente son afectadas por el fenómeno de cavitación generado en el dispositivo, siendo los *microjets* o microcorrientes de elevada los que producen la erosión del material <sup>33</sup>.

### 1.4.3 Tecnologías para el procesamiento con cavitación hidrodinámica

La cavitación hidrodinámica puede generarse simplemente por el uso de una constricción o estrechamiento en la trayectoria de flujo de un líquido. La energía cinética y la velocidad del fluido aumentan, con una consecuente disminución en la presión local del sistema. Si el estrangulamiento es suficiente para causar una reducción de la presión por debajo del límite de cavitación, correspondiente a la presión de vapor del medio a la temperatura de operación, se forman las cavidades <sup>37</sup>. Posteriormente, tras la fase de expansión, la presión se recupera, resultando en el colapso abrupto de las burbujas.

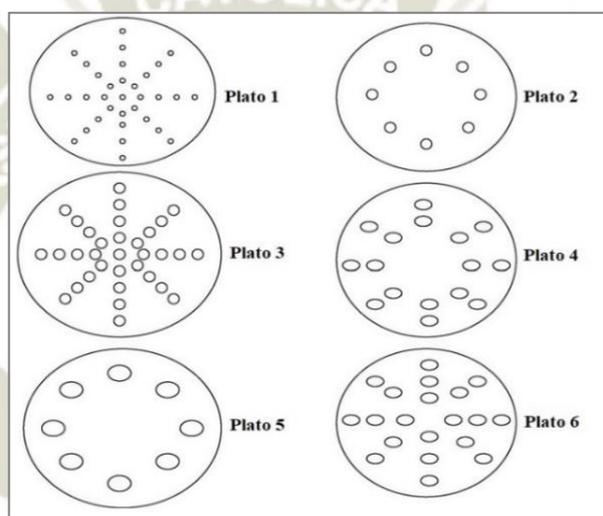
Usualmente, se produce una turbulencia intensa en el líquido tras pasar el dispositivo de estrangulamiento, cuya fuerza depende de la magnitud de la caída de presión y la tasa de restablecimiento de la presión. Estos dos parámetros están ligados a la geometría de la garganta y las condiciones de flujo del líquido. De esta manera, controlando la forma, el tamaño y las condiciones de operación del reactor, se puede generar la intensidad de cavitación que garantice los cambios físicos y/o químicos deseados <sup>38</sup>.

Las presiones y temperaturas alcanzadas durante la implosión de las burbujas, así como el número de radicales libres formados al final del proceso, dependen de la configuración y el tipo de tecnología utilizada <sup>39</sup>.

En un equipo para cavitación, el estrangulamiento se realiza utilizando dispositivos como platos perforados, tubos Venturi, rotores de alta velocidad, homogenizadores, entre otros. La presión de operación y las condiciones de flujo pueden variar de un mecanismo a otro, pero el fenómeno de generación de las cavidades es el mismo. Los reactores basados en plato - orificios y Venturi han sido los más estudiados en aplicaciones con cavitación, ya que son los más eficientes para la creación y el control de condiciones intensas de formación y colapso de burbujas <sup>40</sup>.

### Dispositivo de platos perforados

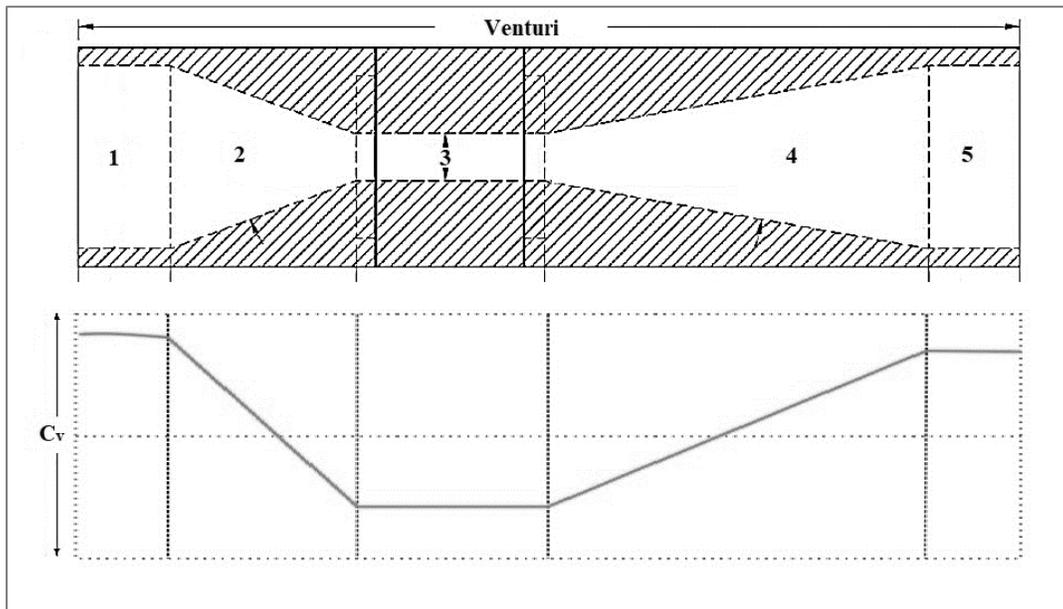
También llamados reactores de platos perforados, el flujo que circula a través de la línea principal atraviesa una constricción que puede estar formada por un solo orificio, o por un conjunto de ellos, alojados en un plato perforado (Figura 2). En este tipo de dispositivos es importante optimizar el diámetro y la cantidad de las aberturas, siguiendo los parámetros geométricos de la operación. La configuración ofrece flexibilidad en términos del diseño y control del proceso, pues permite utilizar diferentes tamaños y geometrías (circular, triangular, rectangular, etc), tanto para el plato como para los orificios que contiene <sup>38</sup>.



**Figura 2.** Esquemas para platos de múltiples orificios, con diferentes combinaciones de número y diámetro de perforaciones. Adaptado de Gogate et al <sup>41</sup>.

### Reactor basado en garganta tipo Venturi

Un Venturi es un arreglo que incluye una sección de convergencia, una garganta o constricción y una zona de divergencia; etapas en las cuales varía la dinámica del flujo (Figura. 3). Sin embargo, no ocurren contracciones y expansiones repentinas como en el caso de un reactor de platos perforados. El Venturi puede tener diferentes geometrías: rectangular, circular o elíptica. Los tamaños y formas marcan los principales criterios para lograr diferentes intensidades de cavitación en este tipo de equipos, pues determinan el número de eventos cavitantes, la magnitud de la presión de colapso y el tiempo de residencia de la burbuja en la región de baja presión <sup>40</sup>.



**Figura 3.** Representación general de un dispositivo Venturi. Los numerales corresponden a: 1. Ingreso del fluido. 2. Zona de convergencia. 3. Garganta o constricción. 4. Etapa de expansión y recuperación de presión. 5. Descarga  $C_v$ . Número de cavitación. Adaptado de Navarrete et al <sup>42</sup>.

La suave convergencia del arreglo tipo Venturi le permite generar un mayor número de eventos de cavitación antes de llegar a la garganta. El área interna de la sección divergente aumenta linealmente en la dirección del flujo, de acuerdo con un ángulo de divergencia. Este incremento suave en el área transversal del dispositivo previene la recuperación súbita de la presión, como ocurre en equipos que utilizan platos perforados. Lo anterior, permite que las burbujas se mantengan en la zona de baja presión durante el tiempo necesario para garantizar que se alcance el máximo tamaño posible en estas cavidades <sup>43,44</sup>.

#### 1.4.4 Parámetros de importancia en la cavitación hidrodinámica

El estudio de la cavitación hidrodinámica está fuertemente ligado al desarrollo del pulso de presión, el cual involucra cuatro parámetros específicos: el tipo y el diseño de la cámara de cavitación, la velocidad del fluido, las presiones de operación (de entrada, mínima y de descarga), y las escalas de tiempo en el descenso, mantenimiento y recuperación de la presión.

### **Velocidad de Flujo**

La velocidad de flujo es un parámetro que se ve afectado directamente por la cámara de cavitación. Los arreglos en el dispositivo de constricción ayudan a alcanzar diferentes velocidades y caídas de presión, que generan a su vez intensidades de cavitación específicas. Así, los reactores presentan una gran ventaja de flexibilidad en términos operacionales: control de la presión de entrada, manipulación del flujo, administración de temperaturas y manejo de condiciones geométricas <sup>45</sup>. El fluido que es impulsado por una bomba se acelera dentro de la cámara de cavitación debido al estrechamiento en la sección de paso de la misma; es decir, debido a la reducción del diámetro de flujo. Entonces, siguiendo la ley de Bernoulli, la presión disminuye con el aumento de la velocidad del líquido. Posteriormente, gracias a la desaceleración del flujo por el aumento en el área de la sección transversal del dispositivo, la presión externa a la burbuja aumenta generando su implosión y el correspondiente pulso de presión <sup>46</sup>.

### **Parámetros de presión**

Cuando se habla de la presión de operación como factor fundamental en la cavitación hidrodinámica, comúnmente se hace referencia a la presión de ingreso del fluido al sistema ( $P_1$ ). Se ha encontrado que la presión de admisión es una variable que afecta el colapso de las cavidades, debido a que una gran magnitud de  $P_1$  puede generar colapsos más violentos que conducen a la formación de fuertes pulsos de presión, aumentando así el grado de disociación de las moléculas de agua. Lo anterior, potencia los efectos químicos y oxidativos del proceso <sup>40</sup>. Sin embargo, la razón primordial para utilizar la presión de entrada como variable principal en la cavitación hidrodinámica tiene que ver con su fácil medición, manipulación y control.

### **Escalas de tiempo**

Las escalas no son más que los periodos de tiempo en los cuales tienen lugar el descenso de la presión, la rarefacción y la recuperación de la presión, que integran de manera conjunto el fenómeno de cavitación hidrodinámica. El tiempo de crecimiento de las burbujas debe ser suficiente para alcanzar el radio de la esfera que asegura una implosión de intensidad adecuada. El pequeño núcleo de gas debe superar el efecto de confinamiento ofrecido por la tensión superficial del líquido, fenómeno que normalmente es pausado y requiere de algunos milisegundos <sup>47</sup>.

#### 1.4.5 Inyección de aire

Una forma simple de intensificación del proceso de cavitación puede ser la aireación, debido a que las cavidades constituyen vapor, aire y otros gases que, por lo tanto, pueden influir en el comportamiento en términos de implosión u oxidación o ambos. La aireación en el método de cavitación puede causar:

- Comienzo temprano de la cavitación
- Mayor número de cavidades, lo que aumenta la probabilidad de reacción.
- Aumentar el número de radicales oxidantes (debido a una mayor disponibilidad de oxígeno) <sup>33</sup>.

En el trabajo de Pravin et al <sup>48</sup> obtuvieron una remoción muy alta de nitrógeno amoniacal (4 a 10 veces), por aireación que de otro modo no sería posible por cavitación normal. Obtuvieron aproximadamente 80 % de eliminación usando aireación a una concentración de 500 mg/L. A su vez Suryawanshi et al <sup>49</sup> informaron una mejora de 10 % en la reducción de DQO debido a la aireación para la eliminación de solventes y sugirieron que la naturaleza de las especies contaminantes puede ser importante en este sentido.

#### 1.4.6 Aplicación en el tratamiento de efluentes y procesos oxidativos avanzados.

En el campo del tratamiento de aguas residuales, la tecnología de cavitación hidrodinámica viene siendo utilizado para mejorar la eficiencia de diversos procesos incluyendo los procesos de oxidación avanzada (AOP). Por ejemplo, auxiliar procesos Fenton, en el trabajo de Chakinala et al <sup>50</sup> se utilizó la cavitación y Fenton para reducir el contenido de carbono orgánico total en un efluente industrial obteniéndose un porcentaje de remoción del 60-80%.

Mishra y Gogate <sup>51</sup> han investigado la eficacia de la combinación de cavitación hidrodinámica y química de Fenton para la degradación de la rodamina B usando  $\text{FeSO}_4$ :  $\text{H}_2\text{O}_2$  en una proporción de 1:5 para una concentración inicial de 10 ppm de la rodamina B a pH de 2.5 utilizando Venturi como dispositivo de cavitación e informó que se obtuvo una degradación del 99.9% de Rodamina B con una reducción de TOC del 57%.

La cavitación hidrodinámica como proceso de inactivación microbiana, se fundamenta en las altas y locales emisiones de energía producida por el colapso de la burbuja de vapor (micro jets), que son capaces, de destruir las membranas de los microorganismos contaminantes que se encuentran dentro del campo de acción de este efecto <sup>12</sup>.

Un micro-jet puede alcanzar velocidades del orden de 100 m/s, aumentando la turbulencia y el coeficiente de transporte de masa <sup>52</sup>. Debido a su alta velocidad, microchorros pueden contribuir a los cambios en el agua, en la aglomeración de fibras y moléculas lo cual produce una disrupción física en la materia orgánica presente. Durante la fase de colapso, es posible alcanzar temperaturas muy altas, del orden de miles de K, pero por un período muy corto (en el orden de microsegundos). Bajo estas condiciones, los vapores atrapados en las burbujas de cavitación se pueden disociar, con la consiguiente generación de radicales libres, como H<sup>•</sup> y OH<sup>•</sup>, que son especies oxidantes muy fuertes y no específicos <sup>53</sup> disminuyendo de esta manera el DQO del efluente contaminado.

Este efecto es la causa de que la cavitación hidrodinámica sea una de las tecnologías más prometedoras para un mayor desarrollo tecnológico en el campo de la desinfección de fluidos altamente contaminados, tales como: en la industria alimentaria y de bioprocesos, la industria medico farmacéutica, en la producción azucarera, la producción de alcoholes y aguardientes, el tratamiento de las aguas y de fluidos residuales, en la producción de alimentos para animales, así como en otros muchos procesos de producción en que sea necesaria la desinfección de fluidos <sup>12</sup>.

### **1.5 Tratamiento biológico de aguas residuales de planta de beneficio**

En el tratamiento de ARBV, se aplica tratamiento biológico como tratamiento secundario a reducir la concentración de DBO y otros compuestos solubles después del tratamiento primario <sup>54</sup>. Dependiendo de las características de ARBV se aplica el proceso biológico aerobia, anaeróticamente o ambos como sistemas combinados <sup>55</sup>. A diferencia del proceso fisicoquímico, el proceso de tratamiento biológico emplea el uso de microorganismos para eliminar los compuestos orgánicos de las ARBV.

Mittal <sup>56</sup> demostró que el si se aplica correctamente el método biológico aeróbico o anaeróbico en las ARBV podría eliminar aproximadamente el 90 % de la DBO del efluente. Existen diferentes sistemas biológicos, que incluyen lagunas anaeróbicas, aeróbicas, facultativas, el proceso de lodos activados, etc <sup>57</sup>.

#### **1.5.1 Tratamiento anaeróbico**

Durante el tratamiento anaeróbico, diferentes bacterias degradan los compuestos orgánicos en CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en ausencia de oxígeno. Los sistemas anaeróbicos tienen varias

ventajas, como una alta remoción de DQO, una baja producción de lodos (5-20 %) en comparación con los sistemas aeróbicos y menores requerimientos de energía con potencial de recuperación de nutrientes y biogás <sup>58</sup>.

Si bien el tratamiento anaerobio posee grandes ventajas, difícilmente produce efluentes que cumplan con los límites y estándares de descarga vigentes. En términos generales, aunque el tratamiento anaeróbico es un proceso eficiente, la fuerza orgánica del ARBV dificulta la estabilización completa de los compuestos orgánicos <sup>59</sup>. Los sistemas típicos de digestión anaeróbica incluyen laguna anaeróbica (LA), filtro anaeróbico (FA), reactor anaeróbico con deflectores (RAD) y reactor anaeróbico de manto de lodo de flujo ascendente (MLFA).

### **1.5.2 Tratamiento aeróbico**

En los sistemas aeróbicos, los microorganismos aeróbicos son responsables de la eliminación de materiales orgánicos en presencia de oxígeno. El tiempo de tratamiento y la cantidad de oxígeno requerido aumentan dependiendo de la carga de las ARBV. El tratamiento aeróbico se usa comúnmente para la descontaminación final y la eliminación de nutrientes después de usar técnicas fisicoquímicas o anaeróbicas <sup>60</sup>. Las configuraciones típicas para el tratamiento aeróbico de ARBV incluyen lodo activado (LA), contactores biológicos giratorios (CBG) y Reactores en secuencia batch aeróbicos.

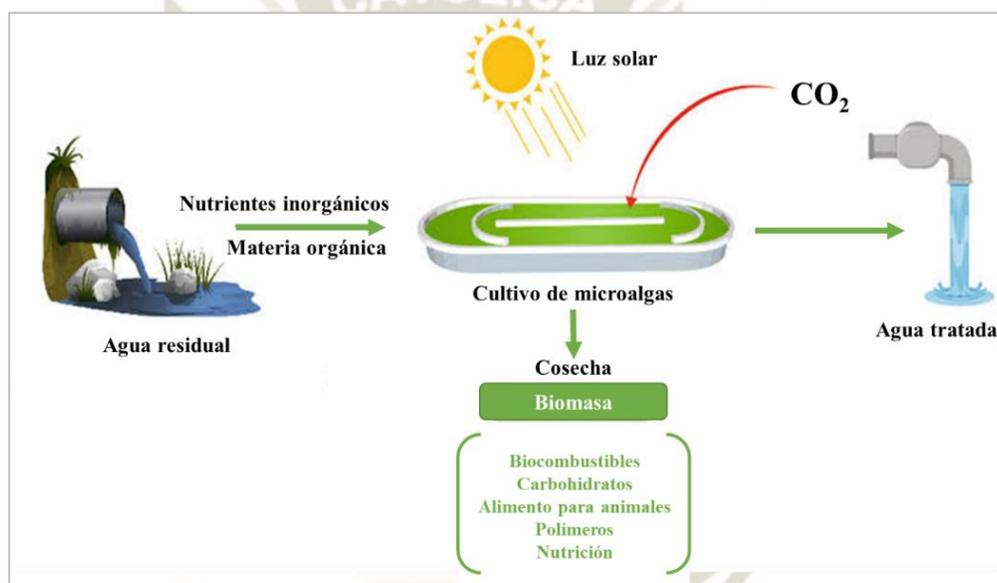
### **1.6 Tratamiento biológico utilizando microalgas**

Las microalgas son organismos acuáticos, microscópicos y unicelulares que viven en estado fresco, agua y ambientes marinos. Por lo tanto, están en la parte inferior de la cadena alimentaria con muchos seres vivos dependiendo de ellos. Con la reciente investigación e interés en el uso de algas para producir biodiesel, tienen el potencial de volverse aún más importantes <sup>14</sup>.

El objetivo fundamental de la aplicación de microalgas para el tratamiento de aguas residuales es la utilización y biotransformación de los nutrientes a biomasa. Este proceso presenta ventajas tan importantes como son: el mejoramiento de la calidad del efluente, el aprovechamiento de nutrientes que están siendo desechados, la producción de biomasa aprovechable (microalga) y la remoción de sales (amonio, nitritos, nitratos, ortofosfatos), el aumento del pH de los efluentes (proceso fotosintético), lo cual favorece la precipitación de ortofosfatos, la disminución de la demanda biológica de oxígeno, la

oxigenación del agua favoreciendo la oxidación continua de materia orgánica, la acción bactericida, reduciendo la sobrevivencia de organismos patógenos, la captura y utilización de CO<sub>2</sub>, por el proceso fotosintético, entre otros beneficios <sup>14</sup>.

El tratamiento de aguas residuales a base de microalgas (Figura.4), ha ganado recientemente interés a nivel global, principalmente porque, por un lado, las aguas residuales son tratadas y por otro lado, produce un valor en forma de biomasa de microalgas para la generación de biocombustibles u otros productos químicos en un contexto de biorrefinería <sup>61,62</sup>.



**Figura 4.** Esquema del cultivo de microalgas para el tratamiento de aguas residuales. Adaptado de Zerrouki et al <sup>63</sup>.

La historia del uso comercial de los cultivos de algas abarca alrededor de 75 años con la aplicación al tratamiento de aguas residuales y la producción en masa de diferentes cepas como *Chlorella* y *Dunaliella* <sup>64</sup>.

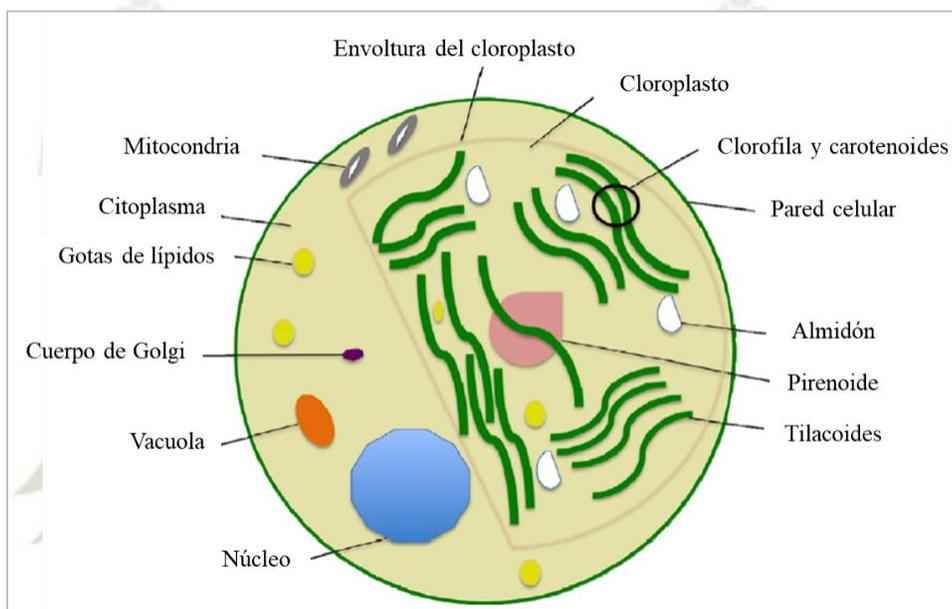
El bio-tratamiento con microalgas es particularmente atractivo debido a sus capacidades fotosintéticas, convirtiendo la energía solar en biomásas útiles e incorporando nutrientes como nitrógeno y fósforo que causan la eutrofización <sup>65</sup>. Las algas se pueden usar en el tratamiento de aguas residuales para una variedad de propósitos, algunos de los cuales se usan para la eliminación de bacterias coliformes, la reducción de la demanda química y

bioquímica de oxígeno, la eliminación de N y/o P, y también para la eliminación de metales pesados <sup>66</sup>.

### 1.6.1 *Chlorella vulgaris*:

#### Morfología:

*C. vulgaris* es una célula microscópica esférica de 2 a 10  $\mu\text{m}$  de diámetro<sup>67</sup> y tiene muchos elementos estructurales similares a las plantas (figura. 5):



**Figura 5.** Estructura morfológica de la *Chlorella vulgaris* adaptado de Safi et al <sup>68</sup>.

#### Pared celular:

La rigidez preserva la integridad de la celda y es básicamente una protección contra los invasores y el medio ambiente hostil. Varía según cada fase de crecimiento,<sup>67</sup> algunos informes explicaron la rigidez de la pared celular centrándose en la presencia de una capa de esporopolenina, <sup>69</sup> aunque generalmente se acepta que *C. vulgaris* tiene una pared celular unilaminar que carece de esporopolenina, que es un carotenoide polimerizado extremadamente resistente que se encuentra en la pared celular de *Haematococcus pluvialis* y *Chlorella fusca* <sup>70</sup>.

**Citoplasma:**

Es la sustancia gelatinosa confinada dentro de la barrera de la membrana celular y está compuesta por agua, proteínas solubles y minerales, Alberga los orgánulos internos de *C. vulgaris* como mitocondrias, un pequeño núcleo, vacuolas, un solo cloroplasto y el cuerpo de Golgi <sup>71</sup>.

**Mitocondria:**

Cada mitocondria contiene algunos materiales genéticos, el aparato respiratorio y tiene una membrana de doble capa; la membrana exterior rodea todo el orgánulo y se compone de una proporción igual de proteínas y fosfolípidos. Sin embargo, la membrana interna está compuesta por tres veces más proteínas que fosfolípidos que rodean el espacio interno llamado matriz donde se contiene la mayoría de las proteínas mitocondriales <sup>72</sup>.

**Cloroplasto:**

*C. vulgaris* tiene un solo cloroplasto con una doble envoltura membrana compuesta de fosfolípidos; la membrana externa es permeable a metabolitos e iones, pero la membrana interna tiene una función más específica en el transporte de proteínas. gránulos de almidón, compuesto de amilosa y amilopectina, puede formarse dentro del cloroplasto, especialmente durante condiciones de crecimiento desfavorables. Él pirenoide contiene altos niveles de ribulosa-1,5-bisfosfato carboxilasa oxigenasa (RuBisCO) y es el centro del dióxido de carbono fijación. El cloroplasto también almacena un grupo de tilacoides fusionados. donde se sintetiza el pigmento dominante clorofila que enmascara el color de otros pigmentos como la luteína. Durante el estrés por nitrógeno, Los glóbulos de lípidos se acumulan principalmente en el citoplasma y el cloroplasto <sup>73</sup>.

**Reproduccion:**

*C. vulgaris* es una célula reproductiva no móvil (autospora) que se reproducen asexual y rápidamente. Así, dentro de las 24 h, una célula de *C. vulgaris* cultivada en condiciones óptimas se multiplica por auto esporulación, que es la reproducción asexual más común en las algas <sup>74</sup>.

**Composición Primaria:****Proteínas**

El contenido total de proteínas en *C. vulgaris* maduro representa 42–58% de peso seco de biomasa, <sup>75</sup> y varía según el crecimiento condiciones. Las proteínas tienen múltiples

funciones, y casi el 20% de las proteínas totales están unidas a la pared celular, más del 50% están interno y el 30% migran dentro y fuera de la célula <sup>76</sup>. Su peso molecular revelado por SDS-PAGE comprende entre 12 y 120 kDa, con la mayoría entre 39 y 75 kDa después cultivar *C. vulgaris* en condiciones autótrofas o heterótrofas. Sin embargo, se observa un pico de mayor intensidad para las células cultivadas en condiciones autótrofas <sup>77</sup>.

### **Lípidos:**

Durante condiciones óptimas de crecimiento, *C. vulgaris* puede alcanzar el 5–40 % lípidos por peso seco de biomasa <sup>78</sup> y se componen principalmente de glicolípidos, ceras, hidrocarburos, fosfolípidos y pequeñas cantidades de ácidos grasos libres <sup>79</sup>. Estos componentes son sintetizados dimensionado por el cloroplasto y también ubicado en la pared celular y en membranas de orgánulos (cloroplastos y mitocondrias). Sin embargo, durante condiciones de crecimiento desfavorables, contenido de lípidos (compuestos principalmente por triacilgliceroles) puede alcanzar 58% <sup>80,81</sup>.

### **Carbohidratos:**

*C. vulgaris*. Generalmente se encuentra en el cloroplasto y se compone de amilosa y amilopectina, y junto con los azúcares sirven como almacenamiento de energía para las células. La celulosa es un polisacárido estructural de alta resistencia, que se encuentra en la pared celular de *C. vulgaris* como un protector fibroso barrera. Además, uno de los polisacáridos más importantes presente en *C. vulgaris* es el glucano  $\beta$ 1-3, <sup>82</sup> que tiene múltiples Beneficios nutricionales y para la salud.

Los carbohidratos totales generalmente se cuantifican por el método fenol-sulfúrico <sup>83</sup>, que produce azúcares simples después de la hidrólisis a 110 °C, luego cuantificación de este último por HPLC. La cuantificación del almidón es mucho mejor utilizando el método enzimático en comparación con el método ácido <sup>84</sup>. Durante la limitación de nitrógeno, los carbohidratos totales pueden alcanzar el 12-55% del peso seco <sup>85</sup>.

### **Pigmentos:**

El pigmento más abundante en *C. vulgaris* es la clorofila, que puede llegar al 1-2% del peso seco y está situado en los tilacoides. *C.vulgaris* también contiene cantidades importantes de carotenoides (Tabla 2) que actúan como pigmentos accesorios al captar la luz;  $\beta$ -caroteno para está asociado con las gotas de lípidos en el cloroplasto, y Los

carotenoides primarios están asociados con la clorofila en los tilacoides donde atrapan la energía de la luz y la transfieren al fotosistema. Sin embargo, al igual que en las plantas terrestres, algunos pigmentos actúan como foto-protectores a proteger las moléculas de clorofila de la degradación y blanqueamiento durante una fuerte exposición a la radiación y al oxígeno <sup>72</sup>.

**Tabla 2:** Contenido potencial de pigmentos en *C. vulgaris* bajo diferentes condiciones de crecimiento.

<b>Pigmentos</b>	<b>pg g<sup>-1</sup> (dw)</b>
β- caroteno	7- 12,000
Astaxantina	550,000
Cantaxantina	362,000
Luteina	52 - 3830
Chlorofila a	250- 9630
Chlorofila b	72- 5770
Feofitina a	2310- 5640
Feofitina b	N/A
Violoxantina	10 -37

*Fuente: Adaptado de safi et al* <sup>68</sup>.

### **Minerales y vitaminas:**

Los minerales se determinan después de incinerar la biomasa y luego análisis por espectrofotometría de absorción atómica (Tabla 3).

**Tabla 3:** Perfil de minerales de *C. vulgaris*.

Minerales	Contenido mineral (100 mg)
Microelementos	
Na	1.35
K	0.05- 2.15
Ca	0.16- 0.59
Mg	0.34 - 0.44
P	0.96- 1.76
Macroelementos	
Cr	trazas
Cu	0.19
Zn	0.55
Mn	0.4
Se	trazas
I	0.13
Fe	0.20 - 0.68

*Fuente: Adaptado de Safi et al*<sup>68</sup>.

*C. vulgaris* tiene un importante perfil vitamínico (tabla 4), el perfil de vitaminas es sensible a las condiciones de crecimiento; por lo tanto, la mejor concentración se logró después de 24 h de crecimiento autotrófico con 10% de CO<sub>2</sub>, pero durante condiciones heterótrofas el contenido de vitaminas fue mayor que autótrofa por la presencia de glucosa en el medio y utilizado como fuente de carbono para producir compuestos orgánicos<sup>86</sup>.

**Tabla 4:** perfil de vitaminas de *C. vulgaris*.

Vitaminas	Contenidos (100 mg)
B1 (Tiamina)	1.5 - 2.4
B2 (Rivoflavina)	4.8 - 6
B3 (Niacina)	23.8
B5 (ácido pantoténico)	1.3
B6 (Piridoxina)	1.1 - 1.7
B7 (Biotina)	191.6
B9 (Ácido fólico)	26.9
B12 (Cobalamina)	125.9
C (ácido ascórbico)	15.6- 100
E (Tocoferol)	20-2787
A (Retinol)	13.2

*Fuente: Adaptado de safi et al*<sup>68</sup>.

### 1.6.2 Sistemas de cultivo de microalgas

Los dos sistemas principales para el cultivo de microalgas son sistemas cerrados y abiertos. Los sistemas cerrados permiten un mayor control de las condiciones de crecimiento, mientras que los sistemas abiertos dependen en gran medida de factores externos y están en contacto al aire libre <sup>87</sup>.

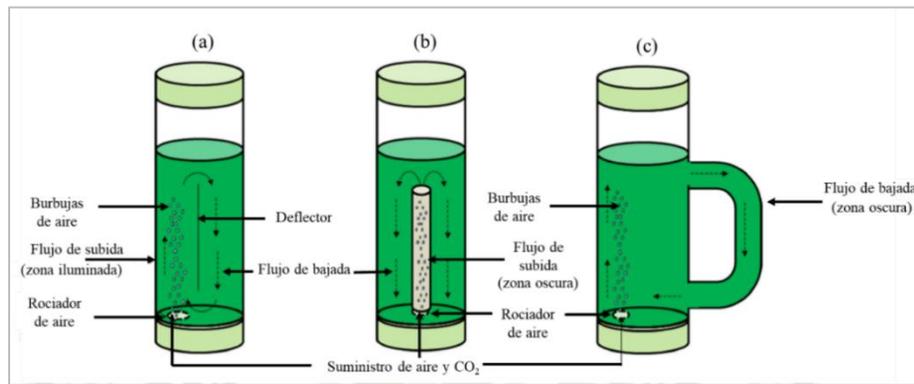
#### Fotobiorreactores cerrados

Los fotobiorreactores cerrados suelen tener mejores características para la penetración de la luz que los estanques abiertos, sin embargo, requieren más energía, por lo tanto, el costo operativo es mayor. Se pueden agrupar en dos clases principales: canales cubiertos y reactores tubulares <sup>88</sup>. En los reactores tubulares se usan tubos transparentes para el cultivo, minimizando el efecto de sombra entre las algas. La refracción de la luz creará áreas sombreadas en los tubos, y por lo tanto es necesaria una turbulencia para proporcionar luz a todas las células. Los fotobiorreactores tubulares verticales se clasifican en reactores de columna de burbujas (*column bubble*) y sistema de transporte aéreo (*airlift*), según su modo de flujo de líquido <sup>89</sup>.

#### Reactor de transporte aéreo (*Airlift*)

Los fotoreactores de transporte aéreo se diferencian de los fotoreactores columna de burbujas debido a la separación física de las dos zonas interconectadas, la corriente ascendente (flujo ascendente) y descendente (flujo descendente). El gas se burbujea a través de una canalización ascendente, lo que produce una retención de gas, reduciendo la densidad del fluido y finalmente, haciendo que el líquido del flujo ascendente se mueva hacia arriba. A medida que las burbujas de gas se desprenden del líquido en la parte superior del recipiente, se deja que un líquido más pesado sin burbujas recircule a través de la esquina inferior. Por lo tanto, la circulación de líquido en los reactores de transporte aéreo es el resultado de la diferencia de densidad entre el flujo ascendente y el descendente <sup>90</sup>. Los reactores de transporte aéreo tienen la ventaja característica de crear un patrón de mezcla circular en el que el cultivo líquido pasa continuamente a través de las fases oscura y clara dando un efecto de luz intermitente a las células de las algas <sup>91</sup>.

Las configuraciones de reactor de transporte aéreo más comunes son: bucle interno, bucle interno concéntrico y buques de bucle externo (Figura 6).

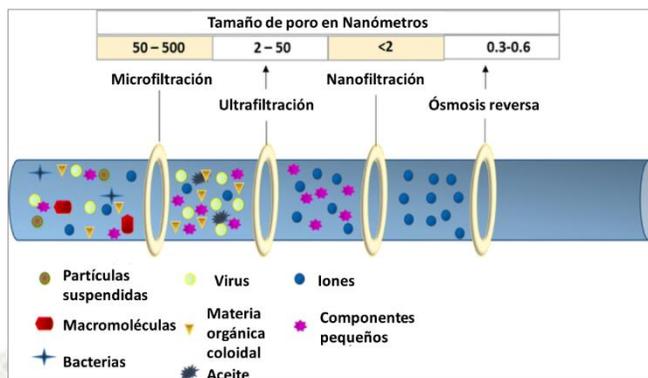


**Figura 6.** Esquema de un fotobiorreactor de transporte aéreo (a) bucle interno, (b) bucle interno concéntrico, (c) bucle externo. Adaptado de Gupta et al <sup>89</sup>.

### 1.7 Tratamiento con membranas

La tecnología de membranas se está volviendo más popular en el tratamiento de agua y aguas residuales debido a problemas regulatorios para cumplir con los estrictos requisitos de calidad del agua. A su vez ha ganado una creciente importancia en los procesos de separación debido a sus ventajas de modularidad, baja huella, fácil de escalar y fácil para integrarse con otro proceso <sup>15</sup>.

Microfiltración (MF), ultrafiltración (UF), nanofiltración (NF) y ósmosis inversa (OI) son las tecnologías de membrana comunes utilizadas para la purificación del agua. Dependiendo del tamaño de poro, las membranas pueden eliminar coloides, partículas y macromoléculas. (Figura 7) Esta tecnología se aplica cada vez más en el tratamiento de aguas residuales de plantas de beneficio para eliminar la materia orgánica y las bacterias <sup>92</sup>.



**Figura 7.** Representación esquemática de diferentes tamaños de membrana para el tratamiento de agua y aguas residuales. Adaptado de Rezakazemi et al <sup>93</sup>.

El desempeño de OI en el tratamiento de efluentes secundarios de aguas residuales de plantas de beneficio (lodos activados como tratamiento previo) fue informado por Bohdziewicz y Sroka <sup>94</sup>. El resultado de los parámetros como DBO, COD, NT y FT fueron reducidos 50, 85.8, 90 y 97.5%, respectivamente. Asimismo, el estudio de Yordanov <sup>16</sup> sobre el rendimiento de la membrana de UF en el tratamiento de ARBV mostró eficiencias de remoción de DBO y DQO cerca del 94.5 % al 97.9 %, mientras que SST y los aceites grasos fueron reducidos en un 98 y 99% respectivamente.

## 1.8 Técnicas de análisis fisicoquímico y biológico-microbiológico

### 1.8.1 Técnicas basadas en una propiedad física

Estas dan lugar al denominado análisis clásico y a las conocidas gravimetrías (medida de masa) y volumetrías (medida de volumen) empleadas, por ejemplo, en la determinación de sólidos en suspensión o cenizas <sup>95</sup>.

### 1.8.2 Técnicas espectroscópicas y ópticas

Basadas en la modificación de las propiedades espectroscópicas y ópticas de la materia, es decir, las ligadas a la radiación electromagnética. Y dentro de las espectroscópicas, las apoyadas en la absorción de luz bien por moléculas (espectrofotometría y colorimetría) bien por átomos o iones (absorción atómica). Como aplicaciones prácticas en aguas, se pueden mencionar la determinación de la Demanda Química de Oxígeno, la colorimétrica para fósforo total o la absorción atómica para metales. Con relación a las técnicas que hacen uso de las propiedades ópticas de la radiación electromagnética, existen varias, de

las que sin duda la turbidimetría, basada en la propiedad de la dispersión óptica, es la más empleada en aguas <sup>95</sup>.

### **1.8.3 Técnicas no espectroscópicas**

De ellas, un grupo se basan en propiedades fisicoquímicas de la disolución, en este caso del agua, tales como el potencial eléctrico (potenciometría, medida del pH), conductancia eléctrica (conductimetría, para cuantificar la conductividad o aproximación al contenido salino de un agua). A su vez las propiedades térmicas de la materia dan lugar, entre otras, a las termogravimetrías, que pueden ser aplicadas para el análisis del comportamiento térmico de los fangos de depuración <sup>95</sup>.

### **1.8.4 Métodos de separación**

Existen dos grandes grupos: los métodos químicos de separación y las técnicas cromatográficas. Con respecto a los primeros, cabe señalar que pueden basarse en propiedades mecánicas, físicas o químicas. Dentro de las separaciones mecánicas están las conocidas filtraciones y tamizados. Por su parte, las separaciones físicas emplean propiedades físicas de la materia, como los puntos de fusión, ebullición o propiedades magnéticas. Finalmente, dentro de las separaciones químicas están las conocidas de precipitación, destilación y extracción líquido-líquido, con algunos ejemplos de su empleo en análisis de aguas: determinación de sodio (técnica de precipitación ya en desuso) o extracción de grasas en aguas residuales y vertidos <sup>95</sup>.

### **1.8.5 Métodos microbiológicos y biológicos**

La investigación de organismos y microorganismos en aguas dispone de hasta cuatro tipologías de análisis. En primer lugar, la conocida observación microscópica, que en su aspecto de microscopía óptica muestra su utilidad en la identificación de protozoos y bacterias filamentosas del fango activo de depuración biológica de aguas. Las técnicas de cultivo son habituales en la determinación, por ejemplo, de coliformes totales, clostridium o aerobios en aguas de consumo o residuales <sup>95</sup>.

## 1.9 Parámetros importantes en el análisis de aguas

### 1.9.1 Parámetros organolépticos

#### Color

Las aguas superficiales pueden parecer altamente coloreadas debido a la presencia de materia pigmentada en suspensión, cuando en realidad el agua no tiene color. El material colorante resulta del contacto con detritus orgánicos como hojas, agujas de coníferas y madera, en diversos estados de descomposición, está formado por una considerable variedad de extractos vegetales. El color causado por la materia en suspensión es llamado color aparente y es diferente al color debido a extractos vegetales u orgánicos, que son coloidales, al que se llama color real <sup>96,97</sup>.

#### Olor

En su forma pura, el agua no produce sensaciones olfativas. El olor en el agua puede utilizarse de manera subjetiva para describir cualitativamente su calidad, estado, procedencia o contenido. El olor se reconoce como factor de calidad que afecta a la aceptabilidad del agua potable que pueda corromperse con la presencia, de peces y otros organismos acuáticos. Compuestos químicos presentes en el agua como los fenoles, diversos hidrocarburos, cloro, materias orgánicas en descomposición o esencias liberadas por diferentes algas u hongos pueden dar olores y sabores muy fuertes al agua, aunque estén en muy pequeñas concentraciones <sup>96,97</sup>.

### 1.9.2 Parámetros fisicoquímicos

#### pH

El pH es el valor que determina si una sustancia es ácida, neutra o básica, calculando el número iones hidrogeno presentes. Se mide en una escala a partir de 0 a 14, en la escala 7, la sustancia es neutra. Los valores de pH por debajo de 7 indican que una sustancia es ácida y los valores de pH por encima de 7 indican que es básica. Cuando una sustancia es neutra el número de los átomos de hidrógeno y de oxhidrilos son iguales. Cuando el número de átomos de hidrógeno ( $H^+$ ) excede el número de átomos del oxhidrilo ( $OH^-$ ), la sustancia es ácida.

Todas las fases del tratamiento del agua para suministro y residual, como la neutralización ácido-base, suavizado, precipitación, coagulación, desinfección y control de la corrosión, depende del pH. El agua residual con concentración de ion hidrógeno presenta elevadas dificultades de tratamiento con procesos biológicos y el efluente puede

modificar la concentración de ion hidrogeno en las aguas naturales si ésta no se modifica antes de la evacuación de las aguas <sup>96,97</sup>.

### **Temperatura**

La temperatura del agua es un parámetro muy importante dada su influencia, tanto sobre el desarrollo de la vida acuática como sobre las reacciones químicas y velocidades de reacción, así como la aptitud del agua para ciertos usos útiles. La temperatura es un indicador de la calidad del agua, que influye en el comportamiento de otros indicadores de la calidad del recurso hídrico, como el pH, el déficit de oxígeno, la conductividad eléctrica y otras variables fisicoquímicas <sup>97</sup>.

### **Oxígeno disuelto**

La oxigenación del agua se debe principalmente a la solubilización del oxígeno atmosférico y minoritariamente a su generación en la fotosíntesis, principalmente de algas. Luego de la muerte de las algas la degradación de esta biomasa consume oxígeno. El conjunto de residuos orgánicos producidos por los seres humanos, ganado, etc. incluyen heces y otros materiales que se vierten a los cuerpos de agua son descompuestos por bacterias aeróbicas, es decir en procesos con consumo de oxígeno. Cuando este tipo de desechos se encuentran en exceso, la proliferación de bacterias agota el oxígeno y no es posible la existencia de peces u otros organismos vivos. El indicador para medir la contaminación por desechos o residuos orgánicos es la cantidad de oxígeno disuelto (OD) en agua o demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) <sup>96</sup>.

### **Turbidez**

La turbidez del agua es producida por materias en suspensión, como arcillas, cieno o materias orgánicas e inorgánicas finamente divididas, compuestos orgánicos solubles coloreados, plancton, sedimentos procedentes de la erosión y microorganismos, el tamaño de estas partículas varía desde 0,1 a 1.000 nm (nanómetros) de diámetro. La turbidez se utiliza para indicar la calidad del agua y la eficiencia de la filtración para determinar si hay presencia de organismos que provocan enfermedades. La materia suspendida en el agua absorbe la luz, haciendo que el agua tenga un aspecto nublado. Esto se llama turbidez. La turbidez se puede medir con varias diversas técnicas, esto demuestra la resistencia a la transmisión de la luz en el agua <sup>96,97</sup>.

### **Demanda Química de Oxígeno**

Es la cantidad de oxígeno requerido para la oxidación química de la materia orgánica e inorgánica en el agua expresada en mg/L y se emplea un oxidante (dicromato potásico). En la mayoría de los casos, guarda una buena relación con la DBO por lo que es de gran utilidad al no necesitar los cinco días de la DBO. El valor de la DQO es siempre superior al de la DBO<sub>5</sub> porque muchas sustancias orgánicas pueden oxidarse químicamente, pero no biológicamente, y su contenido es de materia orgánica: carbohidratos, proteínas, grasas e inorgánico (hierro ferroso, nitritos, amoníaco, sulfuros y cloruros). El ensayo de la DQO se suele emplear para la medición de la materia orgánica presente en aguas residuales tanto industriales como municipales que tengan compuestos tóxicos para la vida biológica <sup>96</sup>.

### **Demanda bioquímica de oxígeno**

Dado que la materia orgánica no sólo son carbohidratos, una manera más práctica de analizar el consumo de oxígeno en la degradación de la materia orgánica en general, es medir los parámetros Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>). La DBO<sub>5</sub> es el parámetro de contaminación orgánica y es el resultado de la degradación de tres tipos de materiales: materiales orgánicos carbónicos, nitrógeno oxidable compuestos químicos reductores <sup>97</sup>.

### **Sólidos Suspendidos Totales**

Los sólidos suspendidos son generalmente responsables de impurezas visibles. La materia suspendida consiste en partículas muy pequeñas, que no se pueden quitar por medio de deposición. Pueden ser identificadas con la descripción de características visibles del agua, incluyendo turbidez y claridad, gusto, color y olor del agua. Los “sólidos totales” es la expresión que se aplica a los residuos de material que quedan en un recipiente después de la evaporización de una muestra y su consecutivo secado en estufa a temperatura definida <sup>96</sup>.

### **Fosfatos**

Los vertidos de fosfatos a las aguas naturales pueden causar eutrofización ya que que sirven de nutrientes generando el crecimiento acelerado de vegetales como algas, cianobacterias, lirios acuáticos y lenteja de agua, las cuales al morir y ser descompuestas por las bacterias aeróbicas provocan el agotamiento del oxígeno disuelto en la capa

superficial de agua y causan la muerte de los diferentes tipos de organismos acuáticos que consumen oxígeno, en las aguas de los lagos y ríos <sup>96</sup>.

### **Nitratos**

El uso excesivo de fertilizantes nitrogenados incluyendo el amoníaco, así como la contaminación causada por la acumulación de excretas humanos y animales puede contribuir a elevar la concentración de nitratos en el agua, estos son solubles y no adsorben a los componentes del suelo, por lo que son movilizados con facilidad por las aguas superficiales y subterráneas <sup>96,97</sup>.

### **1.9.3 Parámetros orgánicos**

#### **Aceites y grasas**

Los aceites y grasas se definen en los "Métodos Estándar" como "cualquier material recuperado en la forma de una sustancia soluble en el solvente". La vegetación en descomposición (terrestre o acuática) en estado avanzado liberará grasa y subproductos aceitosos que producirán un brillo aceitoso en el agua <sup>96</sup>.

### **1.9.4 Parámetros microbiológicos**

#### **Coliformes totales**

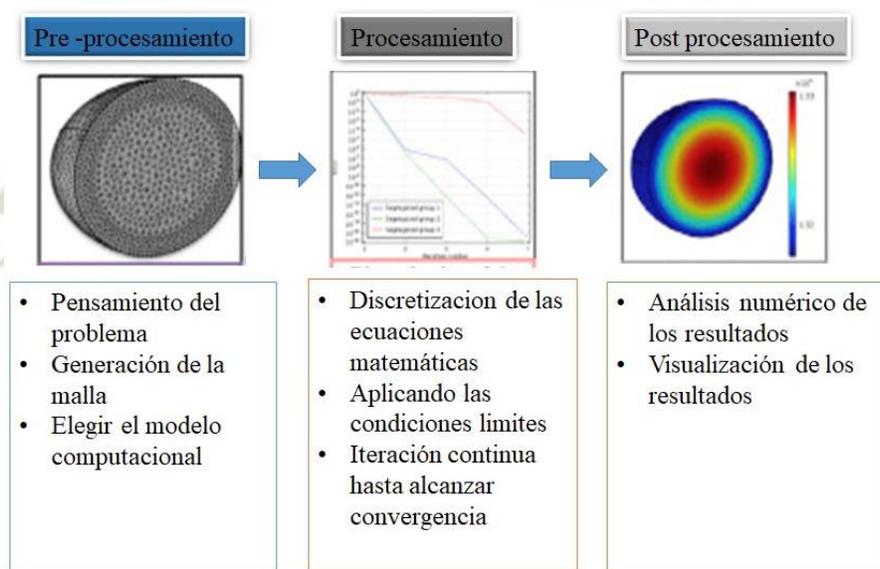
Pueden hallarse tanto en heces como en el medio ambiente, por ejemplo, aguas ricas en nutrientes, suelos, materias vegetales en descomposición. El grupo coniforme está formado por todas las bacterias Gram Negativas aerobias y anaerobias facultativas, no formadoras de esporas, con forma de bastón que fermentan la lactosa, produciendo gas y ácido en 48 horas a 35 °C y desarrollándose en presencia de sales biliares y otros agentes tensoactivos. Su presencia indicaría ineficiencia en el tratamiento de aguas y de la integridad del sistema de distribución <sup>97</sup>.

### **1.10 Fluidodinámica computacional (CFD)**

Los grandes avances tecnológicos observados desde finales del siglo XIX se han producido gracias a un aumento en el conocimiento de los fenómenos físicos y químicos involucrados en cada proceso. Con respecto al comportamiento de los fluidos en equipos industriales, los estudios de laboratorio, aunque útiles, permiten un conocimiento parcial de los fenómenos, limitando su análisis y dominio <sup>98</sup>. En este contexto, el uso de herramientas como la dinámica de fluidos computacional (CFD) da como resultado una

comprensión meticulosa y detallada del flujo, permitiendo el monitoreo de fenómenos de punto a punto en todo el sistema, ya que no se limita a las ubicaciones de instalación de sensores y medidores para obtener resultados, lo que permite modificar las variables de entrada y las configuraciones del sistema <sup>99</sup>.

El análisis de CFD requiere tres pasos principales (Figura 8). La primera etapa, llamada preprocesamiento, incluye la definición del problema, la geometría, el tamaño de partícula y la generación de un modelo computacional, con la ayuda de programas CAD. El segundo paso, llamado procesamiento, usa una computadora para resolver las ecuaciones matemáticas de flujo de fluido. Finalmente, el tercer paso, llamado post-procesamiento, evalúa y visualiza los datos generados por el análisis CFD, validando los resultados de la simulación con datos experimentales.



**Figura 8.** Pasos para el análisis de CFD. Adaptado de Malekjani N et al <sup>100</sup>.

## CAPÍTULO II

### 2. MATERIALES Y METODOLOGÍA

#### 2.1 Lugar de ejecución

La etapa de experimentación se realizó en los laboratorios de la Universidad Católica de Santa María pertenecientes al pabellón F, número 405 y 406, algunas pruebas como la determinación de la distribución del tamaño de partícula se llevaron a cabo en el laboratorio F-402.

#### 2.2 Materiales

##### 2.2.1 Muestras y/o unidades biológicas

- La microalga "*Chlorella vulgaris*" se obtuvo del banco de microalgas disponible en el laboratorio de biotecnología de la Universidad Católica de Santa María (Arequipa, Perú).
- Las aguas residuales de planta de beneficio bovino (ARBV) se obtuvieron de una empresa local.

##### 2.2.2 Material de laboratorio

Probetas, picetas, matraces, botellas de vidrio, placas petri, pinzas, tubos de ensayo, pipetas, micropipetas, tips para micropipetas y pipetas, fiolas, probetas, espátula, crisoles, motores de aireación, lámparas LED, tubos de vidrio, asa de kolle, asa de Drigalski, pera de decantación, bureta, soporte universal, botellas tipo Winkler,

##### 2.2.3 Insumos y reactivos químicos

Ácido sulfúrico (95- 97 %), hidróxido de sodio, ácido clorhídrico (37 %), medio BBM compuesto de  $\text{NaNO}_3$  (0.25 g/L),  $\text{MgSO}_4$  (0.075 g/L)  $\text{NaCl}$  (0.025 g/L),  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (0.025 g/L),  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  (0.075 g/L),  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  (0.175 g/L),  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (0.00882 g/L),  $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  (0.00144 g/L),  $\text{MoO}_3$  (0.00071 g/L),  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  (0.00157 g/L),  $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (0.00049 g/L),  $\text{H}_3\text{BO}_3$  (0.01142 g/L), EDTA (0.05 g/L), KOH (0.031 g/L),  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (0.00498 g/L),  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (0.001mL/L).

**2.2.4 Equipos e instrumentación.**

Equipo	Marca	Foto
Bombas peristálticas YZ1515x	Longer Pump	
Espectrofotómetro GENESYS™ 180 UV- Vis	Thermo Fisher Scientific	
Balanza analítica Adventurer	OHAUS	
Estufa de secado y esterilización Conterm, analógica	J.P. SELECTA	
Digestor TR 320	Spectroquant	
3510 pH metro	Jenway	

<p>Celdas rectangulares de vidrio 10 mm</p>	<p>Spectroquant</p>	
<p>Celdas rectangulares de cuarzo Spectrosil 10 mm</p>	<p>VWR</p>	
<p>Centrífuga PLC-05</p>	<p>Gemmy Industrial Corporation</p>	
<p>Analizador de tamaño de partícula</p>	<p>DLS 3690 Malvern analytical</p>	
<p>Autoclave Wisd WAC – 60</p>	<p>WITEG Labortechnik</p>	
<p>Cámara de extractora de gases, fabricación nacional</p>	<p>HNG</p>	

<p>Membrana tubular de un sólo canal (<math>\text{Al}_2\text{O}_3</math>) con (tamaño de poro <math>3 \mu\text{m}</math>)</p>	<p>Inopor</p>	
---	---------------	---

Adicionalmente, se utilizó el fotobiorreactor tipo *airlift* de tubo concéntrico de bucle interno (4.5L), el mismo que fue construido en el desarrollo de esta investigación (Figura 9).



*Figura 9. Fotografía del fotobiorreactor de tubo concéntrico de bucle interno.*

## 2.3 Metodología

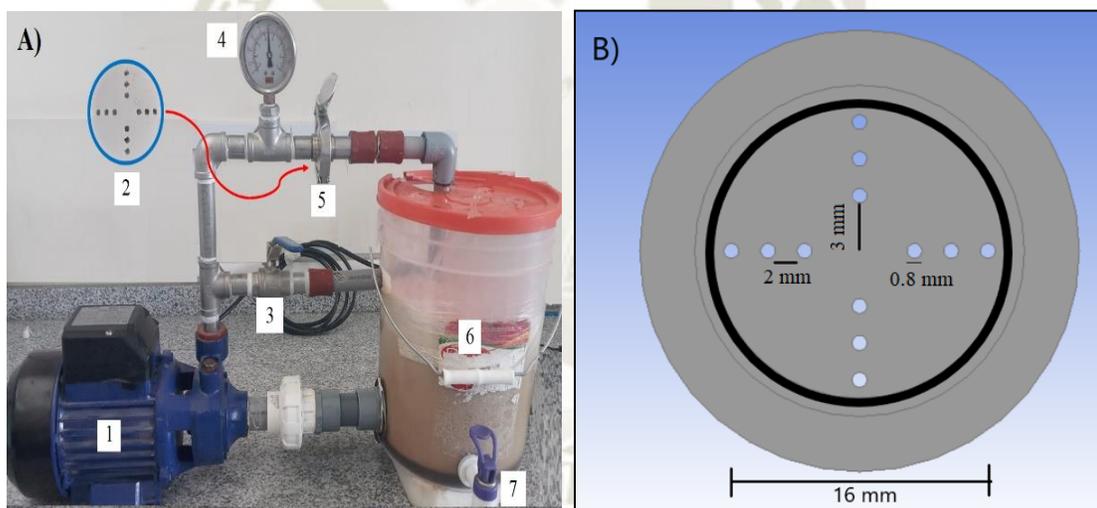
### 2.3.1 Agua residual de planta de beneficio de ganado bovino

Las aguas residuales de la planta de beneficio de bovinos (ARBV) se obtuvieron de una industria local en Arequipa-Perú. Después de la recolección, las ARBV se filtraron para eliminar las partículas gruesas. Las aguas residuales filtradas se caracterizaron por la demanda química total de oxígeno (DQO), la demanda bioquímica de oxígeno ( $\text{DBO}_5$ ), la alcalinidad total, la conductividad, la grasa y el aceite, la turbidez, el nitrógeno

(amoniaco y kjeldahl) y el fósforo total según un método estándar para la caracterización de aguas residuales APHA <sup>96</sup>.

### 2.3.2 Sistema de cavitación hidrodinámica

El sistema de cavitación hidrodinámica (CH) se diseñó usando el programa de Fluodinámica Computacional y posteriormente se construyó en el laboratorio utilizando materiales de bajo costo como el cloruro de polivinilo (PVC) con una configuración simple como se observa en la Fig. 10A. La configuración está dispuesta en forma de reciclado, by-pass cerrado, que incluye un tanque de recirculación (4L), bomba (1 HP), manómetros y válvulas. En el sistema, el dispositivo de cavitación (Figura 10B) era una placa perforada (12 orificios con 0,8 mm de diámetro). La presión requerida fue regulada por la línea de derivación.



**Figura 10.** Esquema de la configuración experimental del reactor de cavitación hidrodinámica (A) y el dispositivo de cavitación - placa de orificio (B). A): 1- bomba, 2- dispositivo de cavitación (placa de orificio), 3- válvula en línea de by-pass, 4- manómetro, 5- zona de cavitación, 6- tanque de recirculación, 7- punto de muestreo.

### 2.3.3 Modelado de la dinámica computacional de fluidos (CFD)

Se realizó un modelado CFD utilizando el software ANSYS FLUENT (ANSYS, Inc. EE.UU.) para definir las propiedades físicas del fluido (presión, velocidad y distribución de la fracción de volumen de vapor de agua) a lo largo del dispositivo de cavitación “placa de orificio” (Figura 10B). Para el proceso de modelado, la presión manométrica del agua

arriba fue de 400 kPa y se calculó la velocidad respectiva del fluido. Para el modelado se seleccionaron modelos multifásicos, k-épsilon y energéticos, y se aplicó la condición de pared sólida antideslizante. Se seleccionó el modelo de Schnerr y Sauer para cavitación. Se seleccionó un método acoplado para su solución. Las propiedades físicas a través del dispositivo de cavitación se estimaron mediante iteraciones sucesivas hasta la convergencia. El número de cavitación se calculó de acuerdo con la siguiente ecuación

$$C_v = \frac{(P_{min} - P_{vapor})}{\frac{1}{2} \rho v^2}$$

Donde:  $P_{min}$  es la presión mínima que se produce en las proximidades de la restricción, Pa;  $P_{vap}$  70 ° C = presión de vapor del líquido, 31.157 kPa;  $\rho$  = densidad del líquido a 70 ° C, 978 kg / m<sup>3</sup>;  $v$  = velocidad de flujo a través de la restricción, m/s.

#### **2.3.4 Tratamiento por cavitación hidrodinámica de aguas residuales de planta de beneficio de ganado bovino**

Las ARBV se trataron en el sistema de CH primero en un proceso por lotes con y sin inyección de aire en el tanque de recirculación que contenía 3 litros de líquido. En el experimento, la presión se mantuvo constante a 400 kPa, el pH inicial del ARBV fue 7.3 y el proceso se realizó sin control de temperatura, por lo que aumentó de 13 ° C a 65-70 ° C en 30 minutos. Durante el proceso, se recolectaron muestras periódicamente para el análisis de DQO. Después de 30 minutos del proceso discontinuo, se alimentó de forma continua con agua sin tratar a 100 mL/min (proceso continuo) que se determinó considerando la velocidad de dilución ( $D = 28.7 \text{ min}^{-1}$ ). Para mantener el volumen constante, la solución se eliminó mediante una bomba peristáltica; durante el proceso continuo, la presión fue de 400 kPa, la temperatura y el pH se controlaron continuamente. Se obtuvieron muestras para el análisis respectivo de DQO.

#### **2.3.5 Filtración por membranas de agua tratada con CH**

Las aguas residuales tratadas con CH (CH- ARBV) se sometieron a un proceso de filtración en una alúmina porosa asimétrica tubular (24 cm de largo x 1 cm de diámetro) con un tamaño de poro externo de 600 nm de Inopor® (Scheßlitz, Alemania) usando una

bomba peristáltica que suministra un flujo inicial en la permeación de 30 ml/min (0.41 ml/min.cm<sup>2</sup>) que fue disminuyendo gradualmente debido al *fouling* o ensuciamiento; cuando el fundente se redujo a aproximadamente un tercio del original, se restauró mediante lavado a contracorriente con agua destilada. Este ciclo se repitió cinco veces. Luego, el agua filtrada se sometió a nuevas filtraciones a través de membranas de 200 nm y 70 nm de tamaño de poro. El proceso de las muestras obtenidas se analizó con respecto a la DQO después de cada filtración.

### **2.3.6 Cultivo de microalgas en aguas residuales tratadas con CH.**

El agua residual tratada con CH (CH- ARBV) se utilizó como medio para el cultivo de microalgas (*Chlorella vulgaris*) en un fotobiorreactor de tubo concéntrico de circuito interno (350 mm x 150 mm, 5 L), que contenía 4,2 L de aguas residuales a un pH inicial de 8.1 y concentración de microalgas en el reactor de 150 mg/L. El experimento se realizó en proceso por lotes o discontinuo durante 55 h a 25-27 ° C con iluminación continua (440 μmol/m<sup>2</sup>. s) de densidad de flujo de fotones) y suministro constante de aire al reactor (0.2 vvm). Durante el proceso, se obtuvieron muestras periódicamente para analizar la concentración de microalgas, DQO y pH.

Después de 50 h del proceso por lotes, se inició el proceso continuo en dos pasos sucesivos con diferente concentración de DQO 391 y 856 mg O<sub>2</sub>/L para el primer y segundo paso, respectivamente; pero, usando el mismo caudal (2,27 mL/min). Para mantener constante el volumen, el medio fue retirado del reactor por la línea de salida, de donde se recolectaron muestras periódicamente para analizar la biomasa de microalgas, la demanda química de oxígeno (DQO) y el pH. Después de 63 h del proceso continuo, se inició el segundo paso.

### **2.3.7 Precipitación acida seguida del Cultivo de microalgas en aguas residuales a diferentes tiempos de CH.**

Las aguas residuales ARBV fueron sometidas a un tratamiento de CH a diferente tiempo de cavitación (10, 20, 30 minutos) a una presión constante de 4 bares e inyección de aire, seguidamente las aguas tratadas (CH- ARBV) se sedimentaron mediante precipitación acida aun pH de 4.5 por 1 hora <sup>2</sup> El sobrenadante fue utilizado como medio de cultivo

para microalga (*Chlorella vulgaris*), las microalgas fueron cultivadas en frascos con tapa rosca graduados (1 L) obteniendo 4 baterías de trabajo: control (solo sedimentación acida) 10, 20 y 30 minutos de CH seguida de sedimentación acida, el pH de las muestras se ajustaron a 6 mediante la adición de cantidades adecuadas de agua destilada, por último el medio de cultivo ( 510 ml agua + 60 ml ARBV -CH) fue inoculado con 30 ml de la microalga con una concentración inicial 100 y 120 mg/l, se obtuvieron muestras periódicamente hasta por 70 Horas para el análisis de pH y concentración de microalga,



## CAPÍTULO III

### 1. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 1.1 Aguas residuales de planta de beneficio bovino (ARBV)

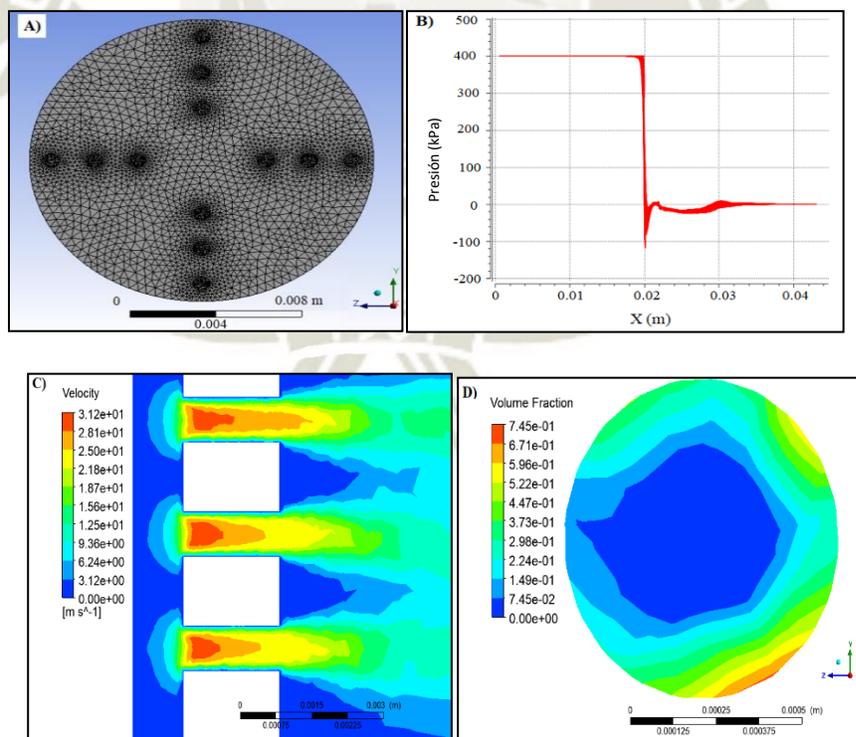
Los principales parámetros de la muestra de ARBV recolectada se enumeran en la Tabla 5. La ARBV utilizada en este estudio contiene alrededor de 3019 mg O<sub>2</sub>/L de DQO, lo que indica el alto contenido de contaminantes; sin embargo, en la literatura, se han informado valores más altos de DQO, por ejemplo, en el estudio de Musa Ma et al <sup>101</sup>, se reportó un valor de 32000 mg O<sub>2</sub>/L. La DBO<sub>5</sub> del efluente resultó en (1000 mg/L), lo que le confiere a la muestra un índice de biodegradabilidad bajo (IB= 0.3). También se informaron valores similares de índice de biodegradabilidad (IB) para ARBV de 0.28 <sup>102</sup> y 0.35 <sup>103</sup>. El bajo índice de biodegradabilidad sugiere la presencia de sustancias poco biodegradables que pueden ser tóxicas para los microbios e inhibir la actividad microbiana. Respecto al color verdadero fue de 2175 Pt-Co, menor que el informado por Musa et al <sup>101</sup> que fue de 16426 Pt-Co. Estos parámetros deben cambiar con el tiempo dependiendo del número de animales sacrificados.

**Tabla 5:** Principales parámetros del agua residual de planta de beneficio de ganado bovino usado en este estudio.

Parámetros	Unidad	Agua Residual de planta de beneficio de bovino (ARBV)
Color verdadero	Pt-Co	2175 ± 109
Turbidez	NTU	264 ± 5
Alcalinidad Total	mg CaCO <sub>3</sub> /L	1128 ± 62
Conductividad	μS/cm	3780 ± 255
Nitrógeno Amoniacal	mg NH <sub>3</sub> -N/L	125 ± 9
Nitrógeno Total de Kjeldahl	mg/L	296 ± 5
Fósforo Total	mg P/L	22 ± 0.4
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	mg/L	1000 ± 48
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Mg O <sub>2</sub> /L	3020 ± 20
Aceite y grasas	mg/L	24 ± 2
Cloruro	mg/L	329 ± 2
Nitrato	mg/L	0.9 ± 0.1

## 1.2 Tratamiento de cavitación hidrodinámica de ARBV

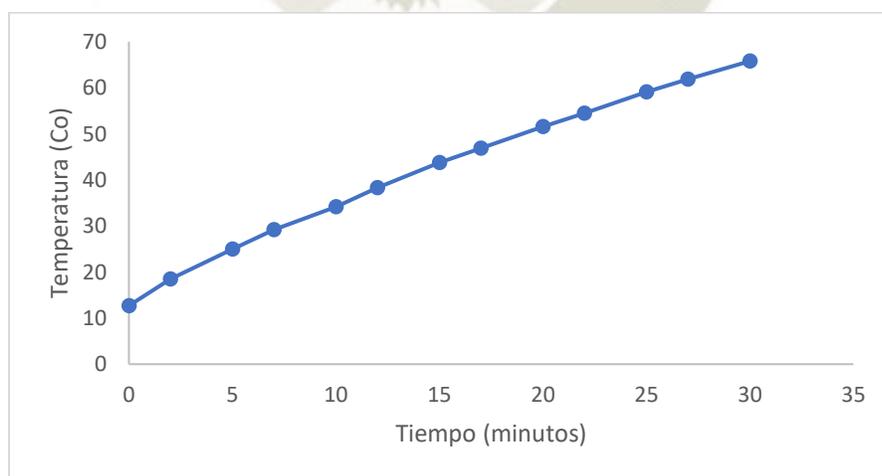
Los parámetros como la velocidad a través del dispositivo de cavitación, el número de cavitación y la fracción de volumen de vapor de agua formado a lo largo del dispositivo, se estimaron mediante modelamiento con fluidodinámica computacional (CFD). En el mallado del dispositivo de cavitación (Figura 11A), se obtuvieron 481607 células mixtas, y se verificó la calidad de la malla mediante el método estadístico de calidad ortogonal y asimetría arrojando un promedio de 0.77 y 0.23, respectivamente, estos valores se encuentran dentro de los establecidos como buenos de acuerdo a la guía del usuario de ANSYS Meshing (ANSYS, 2010). Como puede ser observado, en el dispositivo de cavitación (placa de orificio), la presión manométrica cae bruscamente (Figura.11B) y aumenta la velocidad del fluido (Figura 11C); además, la fracción de vapor máxima generada en el sistema fue 0,74 (Figura 11D). El número de cavitación ( $C_v$ ) calculado fue 0.16, que se encuentra entre 0.095-0.21 informado como óptimo para otras aplicaciones como por ejemplo para la decoloración del tinte naranja 4<sup>44</sup> o entre 0.1-1 informado para el tratamiento de aguas residuales<sup>104</sup>.



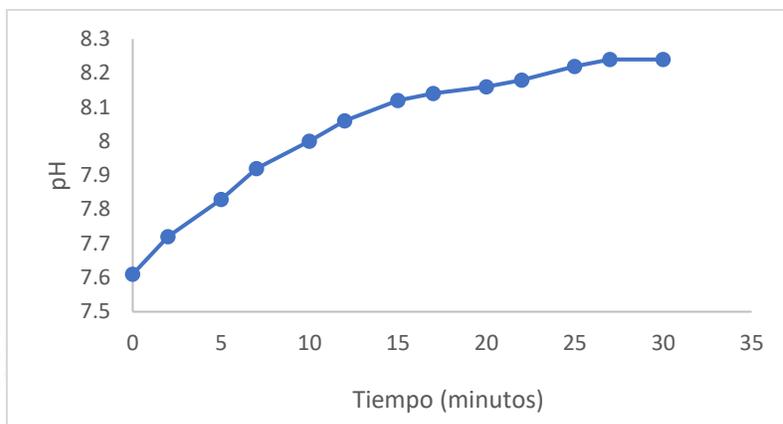
**Figura 11.** Análisis CFD. a) Malla construida, b) Perfil de la presión manométrica, c) Velocidad a través del orificio y d) Fracción de vapor alcanzada at 400 kPa.

Posterior al modelamiento con FCD, el agua residual de la planta de beneficio de bovino (ARBV) se trató en el sistema de cavitación hidrodinámica (CH) desarrollado en el laboratorio y los resultados se enumeran en la Figura 14A. El valor de DQO en el efluente disminuye levemente después de 30 minutos iniciado el proceso, alcanzando una concentración de 559 mg O<sub>2</sub>/L que corresponden al 38% de remoción con respecto al valor inicial. La eliminación de DQO se intensifica cuando se inyecta aire en el sistema y se logra un 65% de eliminación de DQO del efluente.

En ambos casos se observó la formación de una capa de espuma en la superficie y la remoción de olores, que se intensificaron con la inyección de aire. Durante el proceso, la temperatura aumentó de 17 °C a 65 °C conforme la figura mostrada (Figura 12), esto debido a la formación de “hot spots” o puntos calientes en el sistema; así mismo, el pH del fluido sube de 7.12 a un pH final de 8.24 (Figura 13), la cual se puede atribuir a la degradación de las proteínas y otros compuestos presentes en el efluente los cuales alterarían el pH final; además, ocurre una decoloración repentina, donde se inició el proceso continuo. Sin embargo, a la fecha aún no existe ningún reporte específicamente para este tipo de efluente aplicando la tecnología de cavitación hidrodinámica, pero si se utilizó para aguas residuales industriales (no especificadas)<sup>6</sup>, soluciones de colorantes de grado industrial y aguas residuales de tinta de impresión<sup>105</sup>, efluentes de refinerías de petróleo<sup>106</sup>.



**Figura 12.** Alza de temperatura durante el proceso de CH debido a la emisión de “hot spots” en el sistema



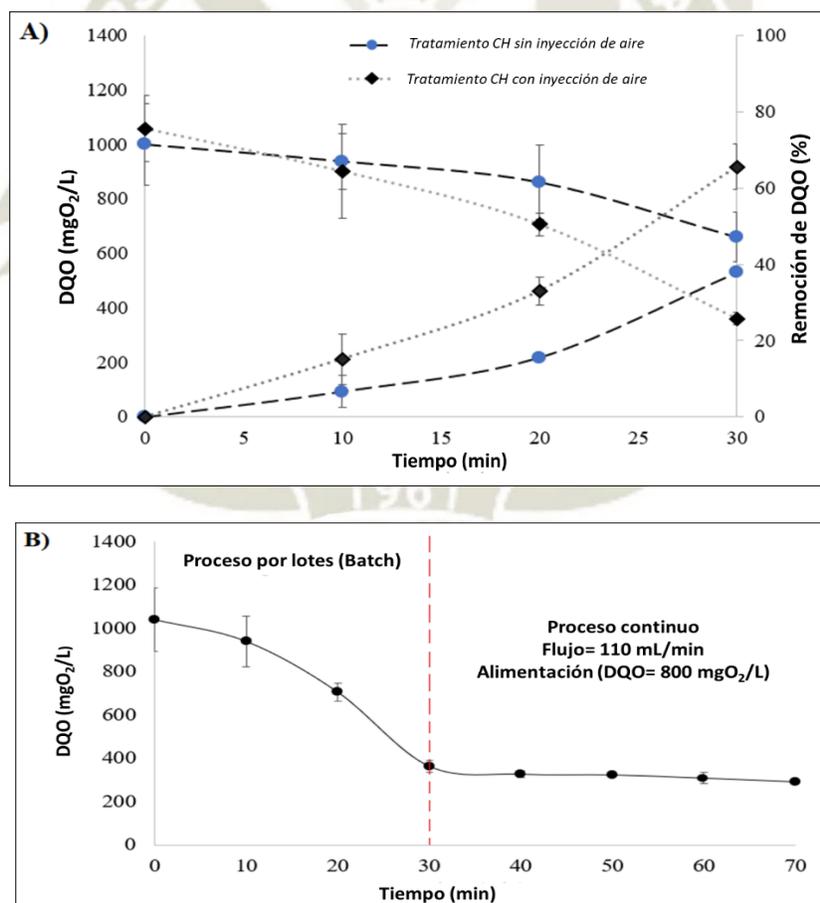
**Figura 13.** Alza del pH debido a la degradación de elementos presentes en el efluente.

Aunque la eficiencia del tratamiento con CH para la eliminación de contaminantes es baja, esto mejora cuando se combina con otros procesos como la inyección de aire. Por ejemplo, utilizando un agua residual industrial no especificada <sup>6</sup> la adición de aire y oxígeno al proceso permitió un incremento del 18% y un 45% de eliminación de DQO, respectivamente, comparado con el proceso sin inyección de aire. El beneficio de la inyección de aire en el proceso de CH también fue informado por Doltade et al. <sup>106</sup>, donde la reducción de DQO (52%) así como el recuento bacteriano total (59%) durante el tratamiento del efluente de refinería de petróleo fue mayor con inyección de aire que sin inyección de aire operada a 5 bar de presión. Por último, por efecto de la inyección de aire en el proceso de CH, la tasa de decoloración de RB13 fue de  $5,5 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ , que es superior a  $5,2 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$  informada para CH sola <sup>107</sup>. Por lo tanto, el aumento del efecto químico y físico de la cavitación por inyección de aire puede estar asociado a la presencia de oxígeno en el aire, lo que mejora la tasa de generación del radical  $\bullet \text{OH}$  <sup>107</sup>, una vez que el aire está compuesto por 78% de nitrógeno y 21% de oxígeno y 1% de otros gases. Además, la presencia de aire en el sistema también puede actuar como núcleo para la generación de cavidades y altas fuerzas de cizallamiento <sup>106</sup>. Finalmente, considerando la reducción del tamaño de partícula por efecto de cavitación, será más fácil el transporte de contaminantes por burbujas de aire a la superficie.

El tratamiento con CH de ARBV también se realizó en un proceso continuo y el resultado se muestra en la Figura 15B. Como puede ser observado, la remoción y concentración promedio de DQO en la línea de salida fue de 68% y 293  $\text{mgO}_2/\text{L}$ , respectivamente. El experimento se realizó alimentando 100 mL/min de ARBV (establecido por el índice de

dilución), siendo el método propuesto el primer informe de un proceso continuo de CH para aguas residuales de planta de beneficio de bovinos. Sin embargo, se informó un proceso continuo de CH para otras aplicaciones, por ejemplo, inactivación de patógenos en la leche con un resultado similar al proceso de larga duración a baja temperatura <sup>108</sup>. Además, se informó un proceso continuo de CH para el pretratamiento de la biomasa lignocelulósica y la intensificación del proceso heterogéneo tipo Fenton para la reducción de la contaminación del tinte <sup>109</sup>.

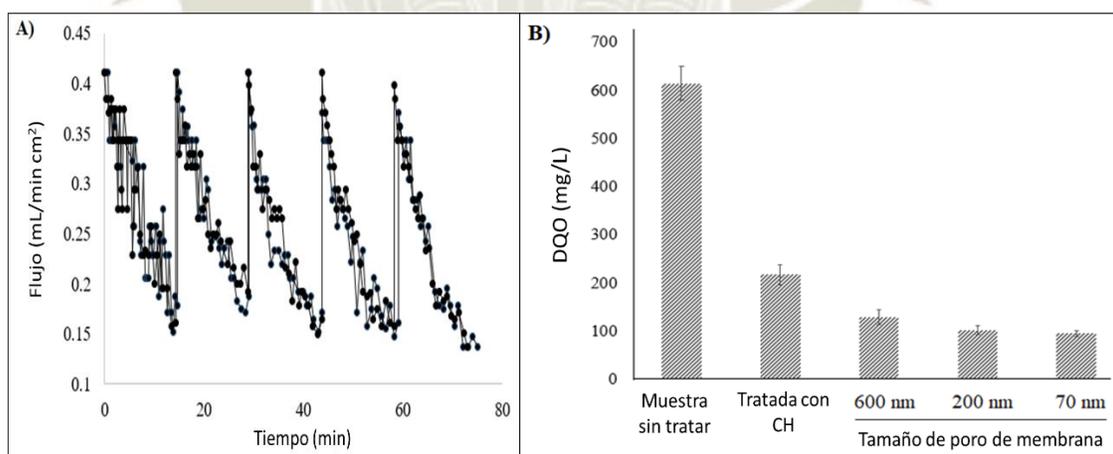
Por tanto, los esfuerzos deben centrarse en aplicar el proceso en situaciones reales. Algunos desafíos del proceso de CH podrían ser: a) aumentar el flujo de aguas residuales alimentadas en un proceso continuo, b) enfriar el agua procesada en la línea de salida una vez que el proceso de CH aumenta la temperatura del agua, c) eliminación constante de espuma de la superficie, d) reducir el tiempo de retención hidráulica (TRH).



**Figura 14.** Cavitación hidrodinámica de ARBV con aireación  
A) Proceso por lotes con y sin inyección de aire. b) Proceso continuo

### 1.3 Filtración por membrana de CH- ARBV

El efluente tratado con cavitación hidrodinámica se sometió a un proceso de filtración utilizando membranas tubulares cerámicas con tres tamaños de poro diferentes. Como se observa en la Figura 15A, el flujo máximo a través de la membrana (600 nm) fue de 0.43 mL/min.cm<sup>2</sup>, que disminuyó rápidamente a 0.15 mL/min.cm<sup>2</sup> en 15 min de proceso. La reducción en el flujo se debe a la formación de *fouling* y apelmazamiento por los contaminantes residuales presentes en el efluente tratado con CH, que tienen un impacto negativo en el rendimiento de la membrana requiriendo un proceso de limpieza. La membrana sucia se limpió mediante lavado a contracorriente con agua, luego se realizó un nuevo ciclo de filtración. El objetivo de este experimento fue solo evaluar el desempeño de las membranas para el tratamiento de CH- ARBV, lo que podría ser una opción interesante en el futuro. En otros estudios, la tecnología de membranas también fue utilizado, por ejemplo, se informó que las membranas cerámicas tubulares pueden eliminar completamente la DQO, los sólidos en suspensión totales y la turbidez de las aguas residuales de la planta de beneficio de aves de corral utilizando una membrana cerámica con 133 nm de tamaño de poro y 40.17% de porosidad <sup>110</sup>.



**Figure 15.** A) Filtración por membrana de CH- ARBV usando membranas tubulares de alúmina con tamaño de poro de 600 nm B) DQO residual después del tratamiento de CH y después de pasar consecutivamente por membranas tubulares de alúmina con diferentes tamaños de poro.

El tamaño de los poros de la membrana es importante para la retención de contaminantes. Por ejemplo, el 41% de la DQO residual se eliminó utilizando una membrana con un

tamaño de poro de 600 nm; luego, el permeado se pasó consecutivamente a través de membranas de 200 nm y 70 nm donde se eliminó el 20% y el 6,8% de DQO residual, respectivamente; la eliminación total de DQO de las tres membranas fue del 85%. Este resultado se acerca a lo informado por Kumar et al <sup>111</sup> que, mediante el uso de membrana cerámica tubular (309 nm y 53% de porosidad) para el tratamiento de aguas residuales lecheras, logró una reducción máxima de DQO de hasta 91% (135 mg O<sub>2</sub>/L) en la corriente de permeado con un flujo de  $2.59 \times 10^{-6}$  m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>s.

La Tabla 6 resume los parámetros de la muestra sin tratar (ARBV), después del tratamiento con CH y después de la filtración de CH- ARBV a través de una membrana de alúmina (600 nm). El tratamiento con CH reduce considerablemente casi todos los parámetros, principalmente en color verdadero, turbidez, DQO, turbidez, nitrógeno Kjeldahl total y DBO<sub>5</sub>. Sin embargo, hay un aumento de nitrógeno amoniacal (28%); esto probablemente se deba a la producción de amoníaco a partir de la destrucción de compuestos orgánicos que contienen grupos de nitrógeno como las proteínas y la hemoglobina, como se refleja en la disminución del nitrógeno de Kjeldahl. Después de pasar el CH- ARBV a través de una membrana con un tamaño de poro de 600 nm, todos los parámetros se reducen, principalmente el color verdadero, la turbidez y la DQO debido a la eliminación de compuestos coloidales con un diámetro superior a 600 nm.

**Tabla 6:** Comparación de los parámetros principales de agua residual de planta de beneficio bovino después de tratamiento con cavitación hidrodinámica y filtrado utilizando una membrana cerámica (tamaño de poro 600 nm)

Parámetros	Unidad	ARBV (diluida)	Después de tratamiento CH		Después de la membrana (600 nm)		Remoción total (%) ***
			Valor	Remoción (%)*	Valor	Remoción (%)**	
Color verdadero	UC	544 ± 109	98.1 ± 19.6	82	48.0 ± 9.6	51	92
Turbidez	NTU	66.0 ± 5.3	14.8 ± 1.2	78	8.2 ± 0.7	45	88
Alcalinidad total	mg CaCO <sub>3</sub> /L	282 ± 62	220 ± 49	22	211 ± 47	4	25
Conductividad	μS/cm	945 ± 255	883 ± 238	7	820 ± 221	7	13
Nitrógeno amoniaco	mg NH <sub>3</sub> - N/L	31.3 ± 8.5	40.0 ± 10.8	-	17.5 ± 4.7	56	44
Nitrógeno Total de Kjeldahl	mg/L	74.0 ± 0.0	24.0 ± 0.0	68	15.0 ± 0.0	38	80
Fosforo total	mg P/L	5.4 ± 0.4	3.6 ± 0.3	33	2.8 ± 0.2	22	48
Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO)	mg/L	250 ± 48	103 ± 20	59	82 ± 16	21	67
Demanda Química de oxígeno (DQO)	mg O <sub>2</sub> /L	755 ± 20	229 ± 14	70	157 ± 13	31	79
Aceites y grasas	mg/L	5.9 ± 1.7	1.0 ± 0.3	83	1.0 ± 0.3	0	83
Chloruros	mg/L	82.4 ± 2.1	85.9 ± 2.1	≈0	84.2 ± 2.1	≈0	≈0
Nitratos	mg/L	0.2 ± 0.1	<0.1		<0.1		

\*Remoción de agua sin tratamiento

\*\* Remoción de agua después de CH

\*\*\* Remoción total (CH + filtración) |

El valor de DQO es preocupante después de la filtración (157 mgO<sub>2</sub>/L), que es ligeramente superior a 125 mgO<sub>2</sub>/L establecido para la descarga segura de aguas

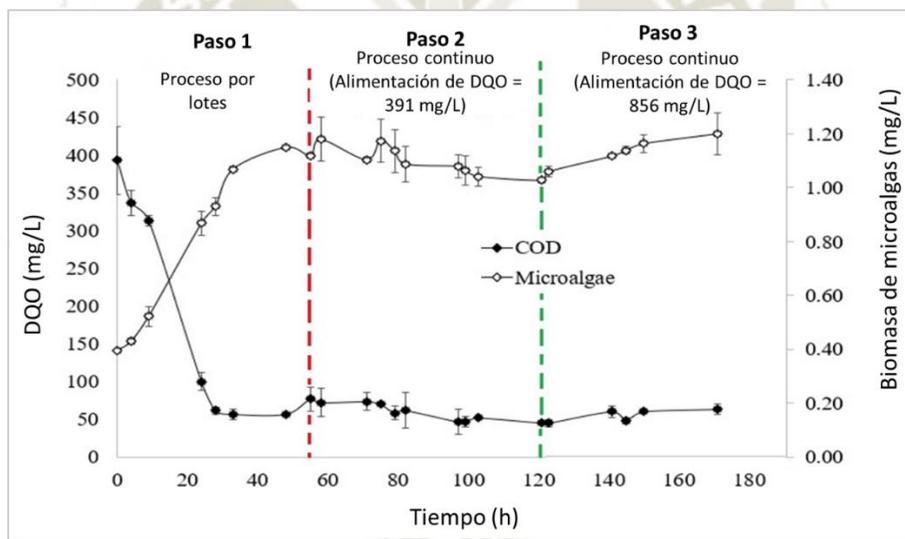
residuales de plantas de beneficio animal por diferentes jurisdicciones, incluida la IFC- Corporación Financiera Internacional (2007) del Grupo del Banco Mundial y el Consejo de las Comunidades Europeas (1991). Sin embargo, los valores alcanzados son inferiores a los establecidos en la legislación peruana para la industria cervecera y curtiduría o plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas / municipales.

#### 1.4 Cultivo de microalgas en CH-CSW

El CH- ARBV se usó como medio para el cultivo de microalgas en lotes (4.2L) durante 50 horas, y luego en proceso continuo, primero usando una muestra que contenía 391 mg O<sub>2</sub>/L (paso 2), y luego 856 mg O<sub>2</sub>/L (paso 3) ambos a una velocidad de alimentación de 2.27 ml/min, los resultados se observan en la Figura 16. El proceso por lotes se inició utilizando CH- ARBV diluido a 400 mgO<sub>2</sub>/L de concentración de DQO, que se redujo rápidamente a menos de 100 mgO<sub>2</sub>/L en 24h, alcanzando así un 85% de eliminación de DQO en 48 horas. Respecto a la biomasa de microalgas, aumentó alcanzando concentraciones de 870 mg/L y 1150 mg/L en 24 horas y 48 horas, respectivamente, con 0.78 d<sup>-1</sup> de tasa de crecimiento específico ( $\mu$ ); además, el pH aumentó levemente de 8.1 a 9.6 debido a la absorción de carbono inorgánico<sup>2,112</sup>. El buen comportamiento de las microalgas para la reducción de la DQO puede estar asociado al aumento del índice de biodegradabilidad (BO = 0.45) por el tratamiento con CH. La remoción de DQO obtenida en este estudio fue similar a la obtenida en aguas residuales de plantas de beneficio avícola usando *C. Vulgaris*<sup>2</sup> y superior a la remoción de DQO (20%) en 7 días reportada por Vadiveloo et al<sup>113</sup> utilizando microalgas *Chlorella* de efluentes de plantas de beneficio digeridos anaeróbicamente (ADAE) con 0.25 d<sup>-1</sup> de tasa de crecimiento específico de microalgas.

Después del proceso por lotes, el cultivo de microalgas también se realizó en proceso continuo en dos pasos (paso 2 y paso 3) utilizando la misma velocidad de alimentación (2.27 ml / min). En la Figura 16 (paso 2), la DQO residual se mantuvo alrededor de 58 mg O<sub>2</sub>/L, la biomasa de microalgas muestra una leve disminución y el pH del medio estuvo alrededor de 9.2. En el paso 3 (Figura 16), la concentración de DQO en la solución de alimentación se incrementó de 391 mg O<sub>2</sub>/L a 856 mg O<sub>2</sub>/L, la DQO residual en la salida en ambos procesos continuos fue de alrededor de 55 mg O<sub>2</sub>/L. Además, la biomasa

de microalgas aumentó ligeramente, lo que se asoció al aumento de nutrientes. La eliminación de DQO lograda en los pasos 2 y 3 fue de alrededor del 85% y 94%, respectivamente. El resultado obtenido muestra la efectividad de las microalgas para remover la DQO en proceso continuo (TRH = 1.28 día), que se acerca al 90% de la remoción de DQO por co-cultivo (*C. vulgaris* y *A. platensis*) en aguas residuales de bodegas industriales utilizando fotobiorreactor de membrana, pero con TRH de 4.6 días<sup>114</sup>. Por tanto, el tratamiento de aguas residuales de plantas de beneficio de ganado bovino sometidas previamente a tratamiento con CH es una alternativa adecuada y ecológica, ya que la biomasa producida tiene potencial para aplicaciones de biocombustibles (biodiesel, biohidrógeno, bioalcohol, metano y bioelectricidad) según lo informado por Bhatia et al <sup>115</sup>.

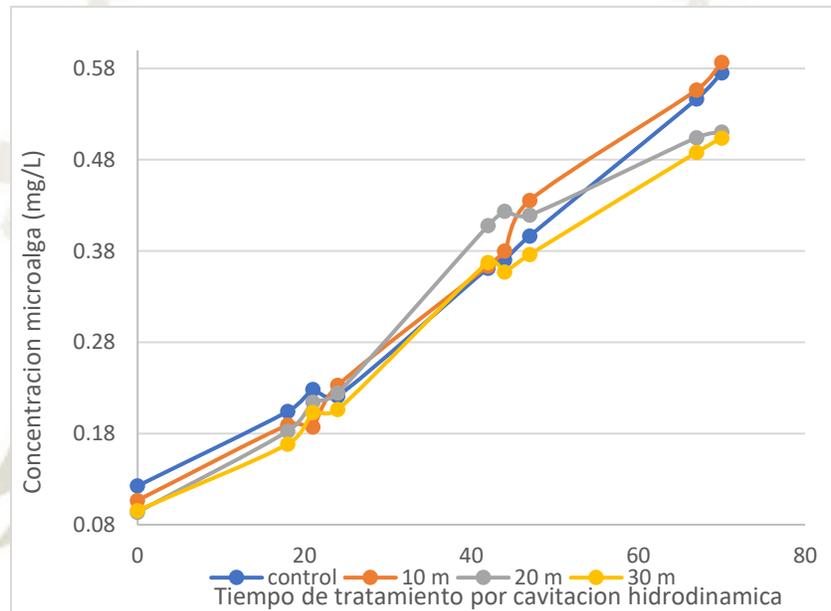


**Figura 16.** Cultivo de microalga en ARBV tratada con CH en un proceso por lotes y continuo (Velocidad de alimentación de 2.27 mL/min).

### 1.5 Cultivo de microalgas en efluente sometido a precipitación acida posterior al tratamiento con cavitación hidrodinámica

Los efluentes tratados a diferentes tiempos de cavitación y sedimentados con precipitación acida se utilizaron como medio de cultivo de microalgas con el objetivo de evaluar la biodegradabilidad del sobrenadante y su optimización como medio de crecimiento de microalgas en función al tiempo de cavitación utilizado, los mejores resultados se obtuvieron en las muestras cavitadas de 10 min con una concentración

inicial de 110mg/L y una concentración final de 590 mg/L de biomasa microalgal (Figura 17), sin embargo los valores obtenidos no presentan un diferencia significativa a los valores del control , esto debido a que al ser sometidos antes a un proceso de sedimentación acida es posible que gran parte de la materia orgánica degradable se haya removido limitando así la cantidad de nutrientes en el medio.



**Figura.17** Efluente tratado a diferentes tiempos de Cavitación Hidrodinámica y Sedimentación acida como medio de cultivo.

## CONCLUSIONES

1. Se diseño y construyo el reactor de cavitación hidrodinámica utilizando materiales de bajo costo (PVC) así como materiales de acero inoxidable utilizando la placa de orificios.
2. Se utilizo el sistema de fluido computacional (CFD) para evaluar el comportamiento del efluente en el sistema de cavitación, y se verificó la calidad de la malla mediante el método estadístico de calidad ortogonal y asimetría arrojando un promedio de 0.77 y 0.23, los cuales según la guía de ANSYS representan valores muy buenos.
3. La cavitación hidrodinámica se utilizó con éxito para ARBV en procesos por lotes y continuos, logrando una eliminación eficiente de DQO, color y turbidez.
4. El tratamiento biológico después del proceso con CH elimina con éxito la DQO residual a valores inferiores a 100 mg O<sub>2</sub>/L, y se produjo biomasa de microalgas que alcanzó más de 1000 mg/L. Por tanto, el proceso propuesto es una opción adecuada e interesante, una vez que se puede generar el proceso de cavitación mediante un sistema sencillo, así mismo Se evaluó la mejora en la biodegradabilidad por microalgas "*Chlorella vulgaris*" obteniendo que los mejores resultados se vieron en las muestras cavitadas de 10m con una concentración inicial de 110mg/L y una concentración final de 590mg/L de microalga.
5. Mediante el uso de membrana cerámica (600 nm) se eliminó la DQO residual, pero el parámetro es 26% superior al establecido para descarga segura de ARBV por diferentes jurisdicciones para su reutilización, requiriendo la aplicación de membranas con tamaño de poro menor.

## RECOMENDACIONES

1. Para la implementación del proceso de cavitación hidrodinámica como tratamiento se recomienda el estudio a un nivel piloto con un mayor volumen de efluente
2. Se recomienda realizar el estudio composicional de la biomasa micro algal generada en el proceso con el fin de darle una aplicación agroindustrial y un valor agregado
3. En función a los subproductos generados durante el proceso de cavitación hidrodinámica (espuma) se recomienda implementar un sistema de paletas que logre separar la parte de la espuma y dirigirla a otro contenedor con el fin de evitar derrames.
4. En relación con el uso de membranas se recomienda la experimentación con diferentes tamaños de poros más pequeños para buscar alcanzar los parámetros normativos según la ley peruana.
5. Finalmente se sugiere el estudio de la cavitación hidrodinámica frente a diferentes efluentes contaminantes para evaluar así su rendimiento y posible uso en el tratamiento de aguas residuales

## REFERENCIAS

1. Prazeres AR, Fernandes F, Madeira L, Luz S, Albuquerque A, Simões R, et al. Treatment of slaughterhouse wastewater by acid precipitation ( $H_2SO_4$ , HCl and  $HNO_3$ ) and oxidation ( $Ca(ClO)_2$ ,  $H_2O_2$  and  $CaO_2$ ). *Journal of Environmental Management*. 2019;250.
2. Terán Hilares R, Garcia Bustos KA, Sanchez Vera FP, Colina Andrade GJ, Pacheco Tanaka DA. Acid precipitation followed by microalgae (*Chlorella vulgaris*) cultivation as a new approach for poultry slaughterhouse wastewater treatment. *Bioresour Technol* [Internet]. 2021 Sep 1 [cited 2022 Feb 27];335. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34022477/>
3. Martín-Martín A, Thelwall M, Orduna-Malea E, Delgado López-Cózar E. Google Scholar, Microsoft Academic, Scopus, Dimensions, Web of Science, and OpenCitations' COCI: a multidisciplinary comparison of coverage via citations. *Scientometrics*. 2021 Jan 21;126(1):871–906.
4. Gogate PR, Pandit AB. A review of imperative technologies for wastewater treatment I: Oxidation technologies at ambient conditions. *Advances in Environmental Research*. 2004;8(3–4).
5. Badmus KO, Irakoze N, Adeniyi OR, Petrik L. Synergistic advance Fenton oxidation and hydrodynamic cavitation treatment of persistent organic dyes in textile wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2020;8(2).
6. Joshi SM, Gogate PR. Intensification of industrial wastewater treatment using hydrodynamic cavitation combined with advanced oxidation at operating capacity of 70 L. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2019;52.
7. Thanekar P, Gogate P. Application of hydrodynamic cavitation reactors for treatment of wastewater containing organic pollutants: Intensification using hybrid approaches. Vol. 3, *Fluids*. 2018.
8. Li DS, Lee YT, Xi Y, Pelivanov I, O'Donnell M, Pozzo LD. A small-angle scattering environment for: In situ ultrasound studies. *Soft Matter*. 2018;14(25).

9. Kovačič A, Škufca D, Zupanc M, Gostiša J, Bizjan B, Krištofelc N, et al. The removal of bisphenols and other contaminants of emerging concern by hydrodynamic cavitation: From lab-scale to pilot-scale. *Science of The Total Environment*. 2020 Nov 15;743:140724.
10. Wang J, Chen H, Yuan R, Wang F, Ma F, Zhou B. Intensified degradation of textile wastewater using a novel treatment of hydrodynamic cavitation with the combination of ozone. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2020;8(4).
11. Abramov VO, Abramova A v., Cravotto G, Nikonov R v., Fedulov IS, Ivanov VK. Flow-mode water treatment under simultaneous hydrodynamic cavitation and plasma. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021;70.
12. Hilares RT, Atoche-Garay DF, Pagaza DAP, Ahmed MA, Andrade GJC, Santos JC. Promising physicochemical technologies for poultry slaughterhouse wastewater treatment: A critical review. Vol. 9, *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021.
13. Hussain F, Shah SZ, Ahmad H, Abubshait SA, Abubshait HA, Laref A, et al. Microalgae an ecofriendly and sustainable wastewater treatment option: Biomass application in biofuel and bio-fertilizer production. A review. Vol. 137, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021.
14. Salazar González M. Aplicación e importancia de las microalgas en el tratamiento de aguas residuales. *ContactoS*. 2005;59.
15. Berkessa YW, Yan B, Li T, Jegatheesan V, Zhang Y. Treatment of anthraquinone dye textile wastewater using anaerobic dynamic membrane bioreactor: Performance and microbial dynamics. *Chemosphere*. 2020;238.
16. Yordanov D. Preliminary study of the efficiency of ultrafiltration treatment of poultry slaughterhouse wastewater. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2010;16(6).
17. Aguas subterráneas y cambios climáticos [Internet]. [cited 2022 Feb 27]. Available from: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/26956>
18. Mekonnen MM, Hoekstra AY. A Global Assessment of the Water Footprint of Farm Animal Products. *Ecosystems*. 2012;15(3).

19. Gerbens-Leenes PW, Mekonnen MM, Hoekstra AY. The water footprint of poultry, pork and beef: A comparative study in different countries and production systems. *Water Resources and Industry*. 2013;1–2.
20. FAO. Food Outlook- Biannual report on global food markets - November 2018. Global information and early warning system on food and agriculture. 2018.
21. Bouwman L, Goldewijk KK, van der Hoek KW, Beusen AHW, van Vuuren DP, Willems J, et al. Exploring global changes in nitrogen and phosphorus cycles in agriculture induced by livestock production over the 1900-2050 period. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2013;110(52).
22. Bustillo-Lecompte CF, Mehrvar M, Quiñones-Bolaños E. Cost-effectiveness analysis of TOC removal from slaughterhouse wastewater using combined anaerobic-aerobic and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> processes. *Journal of Environmental Management*. 2014;134.
23. Tritt WP, Schuchardt F. Materials flow and possibilities of treating liquid and solid wastes from slaughterhouses in Germany. A review. *Bioresource Technology*. 1992;41(3).
24. Bustillo-Lecompte CF, Mehrvar M. Slaughterhouse wastewater characteristics, treatment, and management in the meat processing industry: A review on trends and advances. Vol. 161, *Journal of Environmental Management*. 2015.
25. Patience GS. *Experimental Methods and Instrumentation for Chemical Engineers*. 2013.
26. Masters GM, Ela WP. *Introduction to Environmental Engineering and Science - Pearson Custom Library*. In: 2nd Edition, New Jersey: Prentice Hall. 2014.
27. Riffat R. *Fundamentals of Wastewater Treatment and Engineering*. 2012.
28. Alexander Franco. *Gestión Integral de Tratamiento de Aguas Residuales*. In Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente; 2002.
29. Kurup GG, Adhikari B, Zisu B. Treatment performance and recovery of organic components from high pH dairy wastewater using low-cost inorganic ferric chloride precipitant. *Journal of Water Process Engineering*. 2019;32.
30. Prazeres A, Carvalho F, Rivas J. Cheese whey wastewater treatment by acidic precipitation. . In: *Proceedings of XIV world water congress, international water*

- resources association and water and energy resources. Pernambuco State. Brazil; 2011.
31. Rivas FJ, Beltrán F, Carvalho F, Acedo B, Gimeno O. Stabilized leachates: Sequential coagulation-flocculation + chemical oxidation process. *Journal of Hazardous Materials*. 2004;116(1–2).
  32. Mason TJ. Sonochemistry — The chemical uses of cavitation. In 1994.
  33. Field JE. Cavitation. by f. ronald young. mcgraw-hill, 1989. 418pp. £45. Vol. 218, *Journal of Fluid Mechanics*. 1990.
  34. Mancuso G, Langone M, Andreottola G. A critical review of the current technologies in wastewater treatment plants by using hydrodynamic cavitation process: principles and applications. Vol. 18, *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 2020.
  35. Blake JR. Cavitation and Bubble Dynamics . By C. E. B RENNEN . Oxford University Press, 1995. 282 pp. ISBN 0 19 509409. £60 . *Journal of Fluid Mechanics*. 1996;316.
  36. Juan Alberto Domínguez Martínez. La cavitación hidrodinámica Parte II. *Anuario Ciencia en la UNAH*. 2018;16(1).
  37. Arias FJ, de las Heras S. Use of hydrodynamic cavitation for volatile removal compound. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2017;66.
  38. Gogate PR, Kabadi AM. A review of applications of cavitation in biochemical engineering/biotechnology. Vol. 44, *Biochemical Engineering Journal*. 2009.
  39. Dindar E. An Overview of the Application of Hydrodynamic Cavitation for the Intensification of Wastewater Treatment Applications: A Review. *Innovative Energy & Research*. 2016;5(1).
  40. Carpenter J, Badve M, Rajoriya S, George S, Saharan VK, Pandit AB. Hydrodynamic cavitation: An emerging technology for the intensification of various chemical and physical processes in a chemical process industry. *Reviews in Chemical Engineering*. 2017;33(5).
  41. Gogate PR. Hydrodynamic Cavitation for Food and Water Processing. *Food and Bioprocess Technology*. 2011;4(6).

42. Navarrete M, Vargas A, Esquivel D, Naude J, Méndez F, Villagrán-Muniz M, et al. Rompimiento de la viscosidad en líquidos por cavitación hidrodinámica y acústica. *somi.ccadet.unam.mx*. 2014.
43. Arrojo S, Benito Y, Martínez Tarifa A. A parametrical study of disinfection with hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2008;15(5).
44. Gore MM, Saharan VK, Pinjari D v., Chavan P v., Pandit AB. Degradation of reactive orange 4 dye using hydrodynamic cavitation based hybrid techniques. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2014;21(3).
45. Pankaj, Ashokkumar M. Theoretical and experimental sonochemistry involving inorganic systems. *Theoretical and Experimental Sonochemistry Involving Inorganic Systems*. 2011.
46. Benito Y, Arrojo S. Tratamiento de efluentes industriales mediante cavitación hidrodinámica. *Tecnología del Agua*. 2006;26(279).
47. Ozonk J. Application of hydrodynamic cavitation in environmental engineering. *Application of Hydrodynamic Cavitation in Environmental Engineering*. 2012.
48. Patil PB, Bhandari VM, Ranade V v. Improving efficiency for removal of ammoniacal nitrogen from wastewaters using hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021;70.
49. Suryawanshi PG, Bhandari VM, Sorokhaibam LG, Ruparelia JP, Ranade V v. Solvent degradation studies using hydrodynamic cavitation. *Environmental Progress and Sustainable Energy*. 2018;37(1).
50. Chakinala AG, Gogate PR, Burgess AE, Bremner DH. Treatment of industrial wastewater effluents using hydrodynamic cavitation and the advanced Fenton process. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2008;15(1).
51. Mishra KP, Gogate PR. Intensification of degradation of Rhodamine B using hydrodynamic cavitation in the presence of additives. *Separation and Purification Technology*. 2010;75(3).
52. Didenko YT, McNamara WB, Suslick KS. Hot spot conditions during cavitation in water. *J Am Chem Soc*. 1999;121(24).

53. Adewuyi YG. Sonochemistry in environmental remediation. 1. Combinative and hybrid sonophotocatalytic oxidation processes for the treatment of pollutants in water. Vol. 39, Environmental Science and Technology. 2005.
54. Pierson JA, Pavlostathis SG. Real-Time Monitoring and Control of Sequencing Batch Reactors for Secondary Treatment of a Poultry Processing Wastewater. Water Environment Research. 2000;72(5).
55. Martínez SL, Torretta V, Minguela JV, Siñeriz F, Raboni M, Copelli S, et al. Treatment of slaughterhouse wastewaters using anaerobic filters. Environmental Technology (United Kingdom). 2014;35(3).
56. Mittal GS. Treatment of wastewater from abattoirs before land application - A review. Vol. 97, Bioresource Technology. 2006.
57. Massé DI, Masse L. Characterization of wastewater from hog slaughterhouses in Eastern Canada and evaluation of their in-plant wastewater treatment systems. Canadian Biosystems Engineering / Le Genie des biosystems au Canada. 2000;42(3).
58. Bustillo-Lecompte CF, Mehrvar M, Quiñones-Bolaños E. Cost-effectiveness analysis of TOC removal from slaughterhouse wastewater using combined anaerobic-aerobic and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> processes. Journal of Environmental Management. 2014 Feb;134:145–52.
59. Chan YJ, Chong MF, Law CL, Hassell DG. A review on anaerobic-aerobic treatment of industrial and municipal wastewater. Chemical Engineering Journal. 2009 Dec;155(1–2):1–18.
60. Chernicharo CAL. Post-treatment options for the anaerobic treatment of domestic wastewater. Vol. 5, Reviews in Environmental Science and Biotechnology. 2006.
61. Zeng X, Guo X, Su G, Danquah MK, Zhang S, Lu Y, et al. Bioprocess considerations for microalgal-based wastewater treatment and biomass production. Vol. 42, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015.
62. Dickinson KE, Bjornsson WJ, Garrison LL, Whitney CG, Park KC, Banskota AH, et al. Simultaneous remediation of nutrients from liquid anaerobic digestate and municipal wastewater by the microalga *Scenedesmus* sp. AMDD grown in continuous chemostats. Journal of Applied Microbiology. 2015;118(1).

63. Zerrouki D, Henni A. Outdoor Microalgae Cultivation for Wastewater Treatment. In: Application of Microalgae in Wastewater Treatment. 2019.
64. de la Noue J, de Pauw N. The potential of microalgal biotechnology: A review of production and uses of microalgae. Vol. 6, Biotechnology Advances. 1988.
65. Abdel-Raouf N, Al-Homaidan AA, Ibraheem IBM. Microalgae and wastewater treatment. Saudi Journal of Biological Sciences. 2012 Jul 1;19(3):257–75.
66. Burlew JS. Current status of the large-scale culture of algae. Algal culture from laboratory to pilot plant Carnegie Institute of Washington Publication. 1953;600:3–23.
67. Yamamoto M, Fujishita M, Hirata A, Kawano S. Regeneration and maturation of daughter cell walls in the autospore-forming green alga *Chlorella vulgaris* (Chlorophyta, Trebouxiophyceae). Journal of Plant Research. 2004 Aug 24;117(4).
68. Safi C, Zebib B, Merah O, Pontalier PY, Vaca-Garcia C. Morphology, composition, production, processing and applications of *Chlorella vulgaris*: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014 Jul;35:265–78.
69. Burczyk J, Hesse M. The ultrastructure of the outer cell wall-layer of *Chlorella* mutants with and without sporopollenin. Plant Systematics and Evolution. 1981;138(1–2):121–37.
70. Biedlingmaier S, Wanner G, Schmidt A. A Correlation between Detergent Tolerance and Cell Wall Structure in Green Algae. Zeitschrift für Naturforschung C. 1987 Mar 1;42(3):245–50.
71. Kuchitsu K, Oh-hama T, Tsuzuki M, Miyachi S. Detection and characterization of acidic compartments (vacuoles) in *Chlorella vulgaris* 11h cells by <sup>31</sup>P-in vivo NMR spectroscopy and cytochemical techniques. Archives of Microbiology. 1987 Jul;148(2):83–7.
72. E.P. Solomon LRB and DWM. Biology (5th ed.),. Saunders College Publishing Fort Worth; 1999.
73. Guiry MD. C. VAN DEN HOEK, D. G. MANN and H. M. JAHNS. Algae. An Introduction to Phycology. Cambridge University Press, Cambridge. 1995, pp. xiv+623. ISBN: 0 521 30419 9 (hardback); 0 051 31687 1 (paperback). Price: £70.00

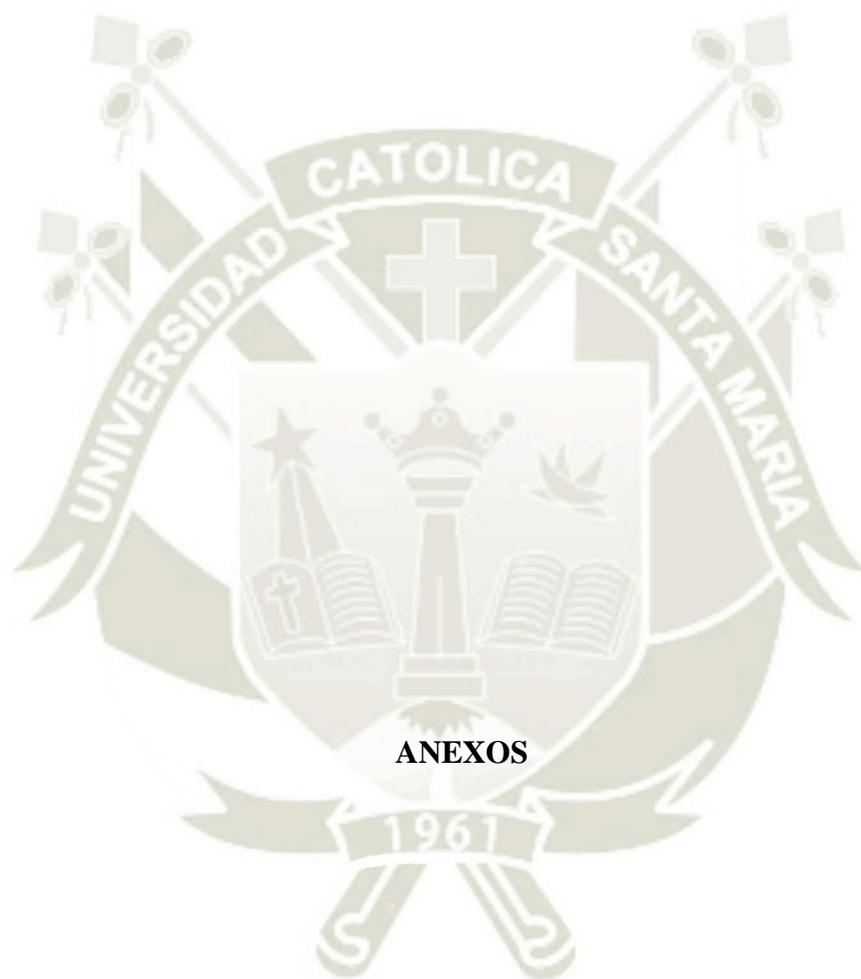
- (hard); £24.95 (soft). European Journal of Phycology. 1997 May;32(2):S096702629621100X.
74. Yamamoto M, Fujishita M, Hirata A, Kawano S. Regeneration and maturation of daughter cell walls in the autospore-forming green alga *Chlorella vulgaris* (Chlorophyta, Trebouxiophyceae). *Journal of Plant Research*. 2004 Aug 24;117(4).
  75. Servaites JC, Faeth JL, Sidhu SS. A dye binding method for measurement of total protein in microalgae. *Analytical Biochemistry*. 2012 Feb;421(1):75–80.
  76. Berliner M.D. Proteins in *Chlorella vulgaris*. *Microbios*. 1986;Volume 46:199–203.
  77. Morris HJ, Almarales A, Carrillo O, Bermúdez RC. Utilisation of *Chlorellavulgaris* cell biomass for the production of enzymatic protein hydrolysates. *Bioresource Technology*. 2008 Nov;99(16):7723–9.
  78. E.W. Becker. *Microalgae: biotechnology and microbiology*. New York: Cambridge University Press; 1994.
  79. Hu Q, Sommerfeld M, Jarvis E, Ghirardi M, Posewitz M, Seibert M, et al. Microalgal triacylglycerols as feedstocks for biofuel production: perspectives and advances. *The Plant Journal*. 2008 May;54(4):621–39.
  80. Mata TM, Martins AA, Caetano NidiaS. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010 Jan;14(1):217–32.
  81. Stephenson AL, Dennis JS, Howe CJ, Scott SA, Smith AG. Influence of nitrogen-limitation regime on the production by *Chlorella vulgaris* of lipids for biodiesel feedstocks. *Biofuels*. 2010 Jan 9;1(1):47–58.
  82. Lordan S, Ross RP, Stanton C. Marine Bioactives as Functional Food Ingredients: Potential to Reduce the Incidence of Chronic Diseases. *Marine Drugs*. 2011 Jun 14;9(6):1056–100.
  83. Shi Y, Sheng J, Yang F, Hu Q. Purification and identification of polysaccharide derived from *Chlorella pyrenoidosa*. *Food Chemistry*. 2007 Jan;103(1):101–5.
  84. Fernandes B, Dragone G, Abreu AP, Geada P, Teixeira J, Vicente A. Starch determination in *Chlorella vulgaris*—a comparison between acid and enzymatic methods. *Journal of Applied Phycology*. 2012 Oct 4;24(5):1203–8.

85. Brányiková I, Maršáľková B, Doucha J, Brányik T, Bišová K, Zachleder V, et al. Microalgae-novel highly efficient starch producers. *Biotechnology and Bioengineering*. 2011 Apr;108(4):766–76.
86. Hanan M. Khairy. Comparative effects of autotrophic and heterotrophic growth on some vitamins, 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) free radical scavenging activity, amino acids and protein profile of *Chlorella vulgaris* Beijerinck. *African Journal of Biotechnology*. 2011 Oct 12;10(62).
87. Grobbelaar JU. Open semi-defined systems for outdoor mass culture of algae in Wastewater for aquaculture. University of the OFS, Bloemfontein: University of the OFS Publication, Series C. 1981;(3).
88. Borowitzka LJ. Algal biomass and its commercial utilisation. 1991;
89. Gupta PL, Lee SM, Choi HJ. A mini review: photobioreactors for large scale algal cultivation. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2015;31(9).
90. Doran PM. *Bioprocess Engineering Principles - Fluid Flow and Mixing*. Vol. 9, Technology. 2013.
91. Barbosa MJ, Janssen M, Ham N, Tramper J, Wijffels RH. Microalgae cultivation in air-lift reactors: Modeling biomass yield and growth rate as a function of mixing frequency. *Biotechnology and Bioengineering*. 2003;82(2).
92. Almandoz MC, Pagliero CL, Ochoa NA, Marchese J. Composite ceramic membranes from natural aluminosilicates for microfiltration applications. *Ceramics International*. 2015;41(4).
93. Rezakazemi M, Khajeh A, Mesbah M. Membrane filtration of wastewater from gas and oil production. Vol. 16, *Environmental Chemistry Letters*. 2018.
94. Bohdziewicz J, Sroka E. Integrated system of activated sludge-reverse osmosis in the treatment of the wastewater from the meat industry. *Process Biochemistry*. 2005;40(5).
95. Marín R. Control de calidad en las aguas residuales y regeneradas: parámetros a controlar en función de las normativas aplicables y nuevas tendencias. Quality control in wastewater and reclaimed water: parameters to control according to the applicable regulations and new trends. 2014;(5).

96. APHA-AWWA-WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Public Health. 1999;(1).
97. DIGESA-MINSA. PARÁMETROS ORGANOLÉPTICOS [Internet]. [cited 2022 May 11]. Available from: [http://www.digesa.minsa.gob.pe/DEPA/informes\\_tecnicos/GRUPO%20DE%20USO%201.pdf](http://www.digesa.minsa.gob.pe/DEPA/informes_tecnicos/GRUPO%20DE%20USO%201.pdf)
98. Ban ZH, Lau KK, Shariff AM. Prediction of the bubble nucleation rate in a quasi-stable cavitating nozzle using 2D computational fluid dynamics and enhanced classical nucleation theory. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2015;9(1).
99. Kaushal P, HK S. Concept of Computational Fluid Dynamics (CFD) and its Applications in Food Processing Equipment Design. *Journal of Food Processing & Technology*. 2011;03(01).
100. Malekjani N, Jafari SM. Simulation of food drying processes by Computational Fluid Dynamics (CFD); recent advances and approaches. Vol. 78, *Trends in Food Science and Technology*. 2018.
101. Musa MA, Idrus S, Man HC, Daud NNN. Performance comparison of conventional and modified upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors treating high-strength cattle slaughterhouse wastewater. *Water (Switzerland)*. 2019;11(4).
102. Wu PF, Mittal GS. Characterization of provincially inspected slaughterhouse wastewater in Ontario, Canada. *Canadian Biosystems Engineering / Le Genie des biosystems au Canada*. 2012;54.
103. Ziara RMM, Li S, Subbiah J, Dvorak BI. Characterization of wastewater in two US cattle slaughterhouses. *Water Environment Research*. 2018;90(9):851–63.
104. Bagal M v., Gogate PR. Wastewater treatment using hybrid treatment schemes based on cavitation and Fenton chemistry: A review. Vol. 21, *Ultrasonics Sonochemistry*. 2014.
105. Zampeta C, Bertaki K, Triantaphyllidou IE, Frontistis Z, Vayenas D v. Treatment of real industrial-grade dye solutions and printing ink wastewater using a novel pilot-

- scale hydrodynamic cavitation reactor. *Journal of Environmental Management*. 2021;297.
106. Doltade SB, Dastane GG, Jadhav NL, Pandit AB, Pinjari D v., Somkuwar N, et al. Hydrodynamic cavitation as an imperative technology for the treatment of petroleum refinery effluent. *Journal of Water Process Engineering*. 2019;29.
  107. Rajoriya S, Bargole S, Saharan VK. Degradation of reactive blue 13 using hydrodynamic cavitation: Effect of geometrical parameters and different oxidizing additives. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2017;37.
  108. Sun X, Xuan X, Ji L, Chen S, Liu J, Zhao S, et al. A novel continuous hydrodynamic cavitation technology for the inactivation of pathogens in milk. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021;71.
  109. Salierno G, Napoleone S, Maisterrena MA, Cassanello M, Pellasio M, Doumic L, et al. Continuous Heterogeneous Fenton-Type Process for Dye Pollution Abatement Intensified by Hydrodynamic Cavitation. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2021;60(46).
  110. Goswami KP, Pugazhenth G. Credibility of polymeric and ceramic membrane filtration in the removal of bacteria and virus from water: A review. Vol. 268, *Journal of environmental management*. 2020.
  111. Kumar RV, Goswami L, Pakshirajan K, Pugazhenth G. Dairy wastewater treatment using a novel low cost tubular ceramic membrane and membrane fouling mechanism using pore blocking models. *Journal of Water Process Engineering*. 2016;13.
  112. Song C, Liu Q, Qi Y, Chen G, Song Y, Kansha Y, et al. Absorption-microalgae hybrid CO<sub>2</sub> capture and biotransformation strategy—A review. Vol. 88, *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2019.
  113. Vadiveloo A, Foster L, Kwambai C, Bahri PA, Moheimani NR. Microalgae cultivation for the treatment of anaerobically digested municipal centrate (ADMC) and anaerobically digested abattoir effluent (ADAE). *Science of the Total Environment*. 2021;775.
  114. Spennati E, Mirizadeh S, Casazza AA, Solisio C, Converti A. *Chlorella vulgaris* and *Arthrospira platensis* growth in a continuous membrane photobioreactor using industrial winery wastewater. *Algal Research*. 2021 Dec;60:102519.

115. Bhatia SK, Mehariya S, Bhatia RK, Kumar M, Pugazhendhi A, Awasthi MK, et al. Wastewater based microalgal biorefinery for bioenergy production: Progress and challenges. *Science of The Total Environment*. 2021 Jan;751:141599.



**ANEXO 1** : ARTICULO CIENTIFICO “*Continuous Cultivation of Microalgae in Cattle Slaughterhouse Wastewater Treated with Hydrodynamic Cavitation*” publicado en la revista “*Water*”. Factor de Impacto: 3.010



Article

# Continuous Cultivation of Microalgae in Cattle Slaughterhouse Wastewater Treated with Hydrodynamic Cavitation

Ruly Terán Hilares <sup>\*</sup>, Fabio P. Sánchez Vera, Gilberto J. Colina Andrade, Kevin Tejada Meza, Jaime Cárdenas García and David Alfredo Pacheco Tanaka

Departamento de Ciencias e Ingenierías Biológicas y Químicas, Universidad Católica de Santa María—UCSM, Urb. San José s/n—Umacollo, Arequipa 04000, Peru; 75770225@ucsm.edu.pe (F.P.S.V.); gcolina@ucsm.edu.pe (G.J.C.A.); ktejada@ucsm.edu.pe (K.T.M.); jcardenas@ucsm.edu.pe (J.C.G.); tanakaalfredo@yahoo.com (D.A.P.T.)

\* Correspondence: rteran@ucsm.edu.pe; Tel: +51-054-382038

**Abstract:** Cattle slaughtering produce large amounts of wastewater containing high concentrations of organic matter and nutrients and requires significant treatment before disposal or reutilization. However, the nutrients contained can be valued as a medium for microalgal biomass generation. In this work, hydrodynamic cavitation (HC) followed by membrane filtration or biological (microalgae cultivation) treatment in continuous mode were performed. From cattle slaughterhouse wastewater (CSW), by the effect of HC treatment with air injection in batch mode, more than 20% of the chemical oxygen demand (COD) was removed. In a continuous HC process, the COD content in output was 324 mg O<sub>2</sub>/L, which is 68% lower than the supplied CSW. After that, 76% of residual COD was removed by filtration through a tubular alumina membrane (600 nm). Finally, 85% of residual COD after HC treatment in 24 h in a batch mode was removed by microalgae. On the other hand, the COD concentration in the output was around 59 mg O<sub>2</sub>/L in continuous mode, which represents 85–93% COD removal. The process involving HC and microalgae growing looks promising since in addition to water treatment, the microalgae produced could be valued in a biorefinery concept.

**Keywords:** hydrodynamic cavitation; wastewater treatment; slaughterhouse wastewater; membrane filtration; microalgae cultivation



**Citation:** Terán Hilares, R.; Sánchez Vera, F.P.; Colina Andrade, G.J.; Tejada Meza, K.; García, J.C.; Pacheco Tanaka, D.A. Continuous Cultivation of Microalgae in Cattle Slaughterhouse Wastewater Treated with Hydrodynamic Cavitation. *Water* **2022**, *14*, 1288. <https://doi.org/10.3390/w14081288>

Academic Editor: Christos S. Akrotos

Received: 19 March 2022

Accepted: 13 April 2022

Published: 15 April 2022

**Publisher's Note:** MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



**Copyright:** © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Introduction

According to the United States Department of Agriculture (USDA), the world consumption of beef in 2020 was 50.06 million tons and the expectation for 2021 is around 60 million tons in carcass equivalent [1]. Due to its composition in organic matter, suspended solids, oil and fat, and nutrients (nitrogen and phosphorus), the cattle slaughterhouse wastewater (CSW) requires an efficient treatment process before disposal or reutilization. The CSW represents a significant problem because the water consumption is between 700 L and 3000 L of water per animal [2,3]. Therefore, the development of sustainable, efficient, and low-cost technologies for CSW treatment is a current challenge.

Hydrodynamic cavitation (HC) technology has been attracting the interest of the scientific community for water treatment [2]. In HC, micro-nano bubbles of water vapor at low pressure are formed by passing the water through plates with orifices and Venturi tubes [3]. The formation, growth, and violent collapse of bubbles result in the release of large amounts of energy “hot spots”, shock waves and microjets that can degrade or break up organic matter present in the fluid. Furthermore, the highly reactive hydroxyl radicals (OH•) generated in HC can degrade a wide range of recalcitrant pollutants [4]. The HC efficiency increases when it is combined with other processes, e.g., aeration, oxygenation and Fenton [5–7], ultrasound [8], UV [9], ozone [10], and plasma [11]. Some advantages of HC are the simplicity in construction, low-cost, high-energy efficiency, and easy scalability [6,12,13]. However, HC treatment of CSW

has not been reported yet, alone or in combination with other techniques; such as membrane filtration and biological processes.

Wastewater treatment using membrane filtration is carried out mainly in a tertiary step, and the use of ceramic membrane (CMs) has increased in recent years. Some advantages of CMs with respect to polymeric membranes are the fouling resistance, operation at high temperatures, and allowing longer filtration cycles [14]; however, they are more expensive. Moreover, membranes allow for the efficient removal of the COD and total suspended solids (TSS), e.g., as reported for slaughterhouse wastewater using 0.13  $\mu\text{m}$  pore size inorganic membrane [15]. Membrane technology can also be integrated to biological processes for simultaneous microalgae cultivation and wastewater treatment in submerged membrane photobioreactors [16,17].

Biological processes using microalgae are a suitable and ecofriendly option for wastewater treatment, allowing for the nutrient recovery in the form of valuable biomass, energy savings, and  $\text{CO}_2$  emissions reduction [18]. Several algae strains have been used for wastewater treatment, but *Chlorella vulgaris* is one of the best microalgae for bioremediation, due to its high capability of nutrients (N and P) and COD removal [17,19], and capacity to adapt to several wastewater types [20]. *C. vulgaris* has been used for several wastewater treatments in batch processes; however, specific information for CSW is not available, the existing information being limited to poultry slaughterhouse wastewater [17], aquaculture wastewater [21], and dairy wastewater treated with activated sludge [22]. Moreover, considering the potential of microalgae as a source to obtain several bioproducts, cultivation of microalgae in CSW is a suitable option to consider.

Therefore, the combined process including HC, membrane technology, and biological processes can be an interesting and promising alternative for efficient CSW treatment. In this way, hydrodynamic cavitation was evaluated as a new approach for the treatment of cattle slaughterhouse wastewater in batch and continuous processes with/without air injection. Then, the HC-treated water was submitted to filtration across ceramic membranes or used as a medium for microalgae (*Chlorella vulgaris*) cultivation in batch and continuous processes in an internal-loop concentric tube photobioreactor in order to produce microalgae biomass for subsequent bioenergy or biomolecule production.

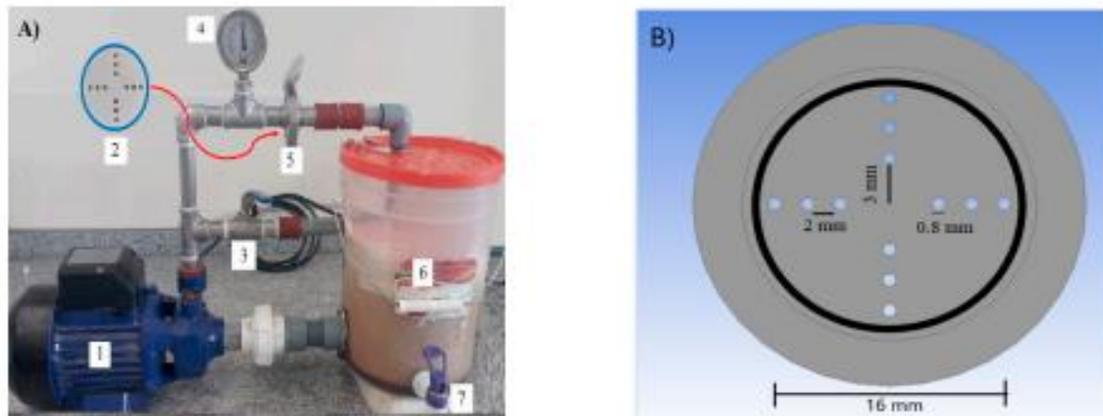
## 2. Materials and Method

### 2.1. Slaughterhouse Wastewater

Cattle slaughterhouse wastewater (CSW) was obtained from a local industry in Arequipa, Peru. After collection, the CSW was filtered in order to remove coarse particles. The filtered wastewater was characterized by total chemical oxygen demand (COD), biochemical oxygen demand ( $\text{BOD}_5$ ), total alkalinity, conductivity, fat and oil, turbidity, nitrogen (ammoniacal and kjeldahl), and total phosphorous according to the standard method for wastewater characterization APHA [23].

### 2.2. Hydrodynamic Cavitation System

The hydrodynamic cavitation (HC) system was constructed in the laboratory using low-cost materials, such as polyvinyl chloride (PVC) with a simple configuration, as observed in Figure 1A. The setup was arranged in a recycled, by-pass close manner, including a recirculation tank (4 L), pump (1 HP), pressure gauges, and valves. In the system, the cavitation device (Figure 1B) was a perforated plate (12 holes of 0.8 mm diameter). The required pressure was regulated by the bypass line.



**Figure 1.** Schematic experimental setup of hydrodynamic cavitation reactor (A) and cavitation device—orifice plate (B). (A): 1—pump, 2—cavitation device (orifice plate), 3—valve in by-pass line, 4—manometer, 5—cavitation zone, 6—recirculation tank, 7—sampling point.

### 2.3. Computational Fluid Dynamics (CFD) Modeling

CFD modeling in the cavitation device was performed using water and the software ANSYS FLUENT 2021 R2 (ANSYS, Inc., Canonsburg, PA, USA) with the purpose of defining the physical properties of fluid (pressure, velocity, and water vapor volume fraction distribution) along the cavitation device “orifice plate” (Figure 1B). The mixture model was used to model liquid and vapor phases by solving continuity and momentum equations. Moreover, the Schnerr and Sauer model was selected from available models in the ANSYS Fluent, to determinate the mass transference from water–liquid to water–vapor due to a decrease in pressure below the vapor pressure of the fluid [24].

The continuity equation of the mixture:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{mix}) + \nabla \cdot (\rho_{mix} \vec{v}_{mix}) = 0 \quad (1)$$

The momentum equation of the mixture:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{mix} \vec{\mu}_{mix}) + \nabla \cdot (\rho_{mix} \vec{v}_{mix} \vec{v}_{mix}) = -\nabla P + \nabla \cdot [\mu_{mix}(\nabla \vec{v}_{mix} + \nabla \vec{v}_{mix}^T)] + \rho_{mix} \vec{g} \quad (2)$$

In the above expressions,  $\rho_{mix}$  is the mixture density,  $\vec{v}_{mix}$  is the mixture velocity vector, and  $\mu_{mix}$  is the mixture viscosity.

The Schnerr–Sauer model for the vapor phase:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_v a_v) + \nabla \cdot (\rho_v a_v \vec{v}_{mix}) = R \quad (3)$$

R is given by:

$$R = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho_{mix}} \frac{\partial a_v}{\partial t} \quad (4)$$

The relation of vapor volume fraction to the number of bubbles per unit volume of liquid can be expressed by the following expression:

$$a_v = \frac{n_b \frac{4}{3} \pi r_B^3}{1 + n_b \frac{4}{3} \pi r_B^3} \quad (5)$$

where:  $n_b$  is bubble number density,  $r_B$  is the bubble radius, and  $a_v$  is vapor fraction.

For modeling, a coupled method was selected for solution. Physical properties through the cavitation device were estimated by successive iterations until convergence. For the modeling process, the upstream manometric pressure considered was 400 kPa and the corresponding velocity of the fluid was calculated.

The cavitation number was calculated according to the following equation:

$$C_v = \frac{(P_{min} - P_{vap})}{\frac{1}{2}\rho v^2} \quad (6)$$

where:  $P_{min}$  is the minimum pressure occurring in the vicinity of the restriction, kPa;  $P_{vap}$  is vapor pressure of water (at 70 °C is 31.16 kPa);  $\rho$  = density of the liquid (at 70 °C, 978 kg/m<sup>3</sup>); and  $v$  the flow velocity through the restriction, m·s<sup>-1</sup>.

#### 2.4. Hydrodynamic Cavitation Treatment of Cattle Slaughterhouse Wastewater

The CSW was treated in the HC system, first in batch process with and without air injection in the recirculation tank containing 3 L liquid. In the experiment, the pressure was maintained constant at 400 kPa. The initial pH of CSW was 7.3 and the process was performed without temperature control, thus, it increased from 13 °C to 65–70 °C in 30 min. During the process, samples were collected periodically for COD analysis. After 30 min of the batch process, untreated water was fed continuously at 100 mL/min (continuous process). This was determined by considering the dilution rate ( $D = 28.7 \text{ min}^{-1}$ ). To keep the volume constant, the solution was removed using a peristaltic pump. During the continuous process, the pressure was 400 kPa, the temperature and pH were continuously monitored. Samples were obtained for the respective COD analysis.

#### 2.5. Membrane Filtration of HC Treated Water

The HC-treated wastewater (HC-CSW) was submitted to filtration process in a tubular asymmetric porous alumina (24 cm long × 1 cm diameter) with outer pore size of 600 nm from Inopor<sup>®</sup> (Scheßlitz, Germany), using a peristaltic pump delivering an initial 30 mL/min (0.41 mL/min·cm<sup>2</sup>) flux in the permeation, which was gradually decreasing because of fouling. When the flux reduced to approximately one third of the original, this flux was restored by backwashing using distilled water. This cycle was repeated five times. Then, the filtered water was submitted to new filtrations through 200 nm and 70 nm pore size membranes. The obtained sample process was analyzed with respect to COD after each filtration.

#### 2.6. Microalgae Cultivation in HC Treated Wastewater

The HC-treated wastewater (HC-CSW) was used as a medium for microalgae (*Chlorella vulgaris*) cultivation in an internal-loop concentric tube photobioreactor (350 mm × 150 mm, 5 L), containing 4.2 L of wastewater at an initial pH of 8.1 and 150 mg/L of microalgae concentration in the reactor. The experiment was carried out in a batch process during 55 h at 25–27 °C with continuous illumination (440 μmol/(m<sup>2</sup>·s) photon flux density) and constant air supply into the reactor (0.2 vvm). During the process, samples were obtained periodically in order to analyze the microalgae concentration, COD, and pH.

After 50 h of the batch process, the continuous process was initiated in two continuous steps with different COD concentration 391 and 856 mg/L for the first and second step, respectively, using the same flow rate (2.27 mL/min). To keep the volume constant, the medium was removed from the reactor by the output line, from where samples were collected periodically to analyze the microalgae biomass, COD, and pH. After 63 h of the continuous process, the second step was initiated.

### 3. Results and Discussion

#### 3.1. Cattle Slaughterhouse Wastewater (CSW)

The main parameters of the collected CSW sample are listed in Table 1. The CSW used in this study contains 3019 mg/L of COD, indicating high pollutant content; however, higher COD values have been reported, e.g., 32,000 mg O<sub>2</sub>/L [25]. The low BOD<sub>5</sub> (1000 mg/L) confer a low biodegradability index to the used sample (BI = 0.3). Similar BI values have also been reported for CSW: 0.28 [26] and 0.35 [27]. The low BI values suggest the presence of poorly biodegradable substances that may be toxic to microbes and inhibit microbial activity. With respect to true color 2175 Pt-Co, this is lower than the 16,426 Pt-Co reported by Musa et al. [25]. These parameters should change in time depending on the number of slaughtered animals.

**Table 1.** Main parameters of cattle slaughterhouse used in this study.

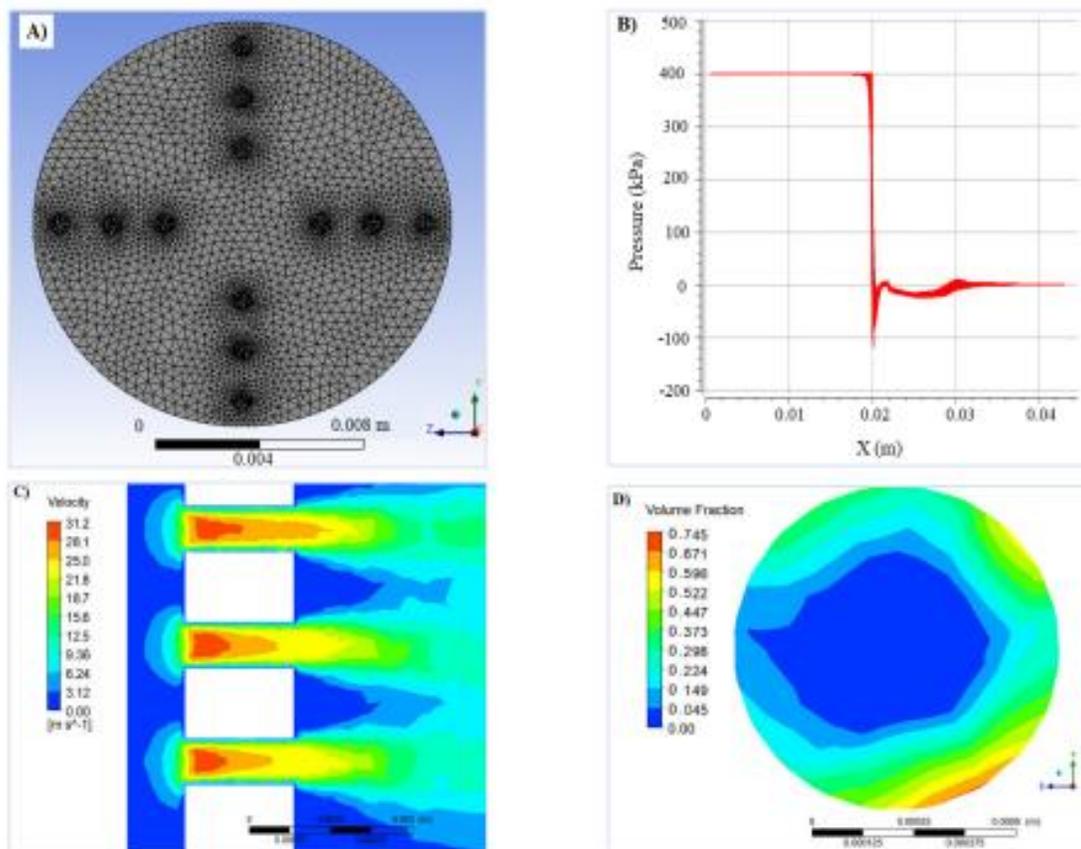
Parameters	Unit	Cattle Slaughterhouse Wastewater (SCW)
True color	Pt-Co	2175 ± 109
Turbidity	NTU	264 ± 5
Total alkalinity	mg CaCO <sub>3</sub> /L	1128 ± 62
Conductivity	µS/cm	3780 ± 255
Ammoniacal nitrogen	mg NH <sub>3</sub> -N/L	125 ± 9
Total Kjeldahl nitrogen	mg/L	296 ± 5
Total phosphorous	mg P-PO <sub>4</sub> /L	22 ± 0.4
Biochemical oxygen demand (BOD)	mg/L	1000 ± 48
Chemical oxygen demand (COD)	mg O <sub>2</sub> /L	3020 ± 20
Oil and fat	mg/L	24 ± 2
Chloride	mg/L	329 ± 2
Nitrate	mg/L	0.9 ± 0.1

#### 3.2. CFD Modelling and CSW Treatment Using HC

Parameters, such as throat velocity, cavitation number, and water vapor volume fraction along the device, were estimated by CFD modeling. In the cavitation device meshing (Figure 2A), 481,607 mixed cells were obtained, and the mesh quality was verified by orthogonal quality and skewness statistic which results in 0.77 and 0.23 average, respectively. These values are according to the ANSYS Meshing User's Guide (ANSYS, 2010) and correspond to very good values for orthogonal quality and skewness within their respective spectra. In the cavitation device (orifice plate), the manometric pressure sharply drops (Figure 2B) and the fluid velocity increases (Figure 2C). This behavior is similar to that observed in several cavitation devices [28]. Moreover, the maximal vapor fraction generated in the system was 0.74 (Figure 2D) and the (Cv) calculated cavitation number was 0.16. Generally, the cavitation inception occurs at Cv = 1, which becomes significant at Cv values less than 1, exactly 0.1 to 0.4 [29]. The Cv obtained is between 0.095–0.21 according to the one previously reported as optimum for orange 4 dye decolorization [30] or between 0.1–1 reported for wastewater treatment [31].

The CSW was treated in the HC system and results are listed in Figure 3A. The COD value decreases lightly in a 30 min process, achieving 559 mg O<sub>2</sub>/L, which corresponds to 38% removal with respect to the initial value. The COD removal is intensified when air is injected in the system attaining 65% COD removal. This behavior can be given by the fact that gaseous species present in air, such as nitrogen and oxygen, could enhance OH radical formation [32], as previously observed for benzene degradation [7]. However, the foam layer formation on the surface and odor removal were observed in both processes, but the foam formation was enhanced with air injection. During the process, the temperature increased from 17 °C to 65 °C, where a sudden discoloration occurred; this point was the starting point of the continuous process. The HC process for CSW has not been previously reported; however, for industrial wastewater (not specified) [6], industrial-grade dye

solutions, and printing ink wastewater [33], petroleum refinery effluent [34] and others have been reported.

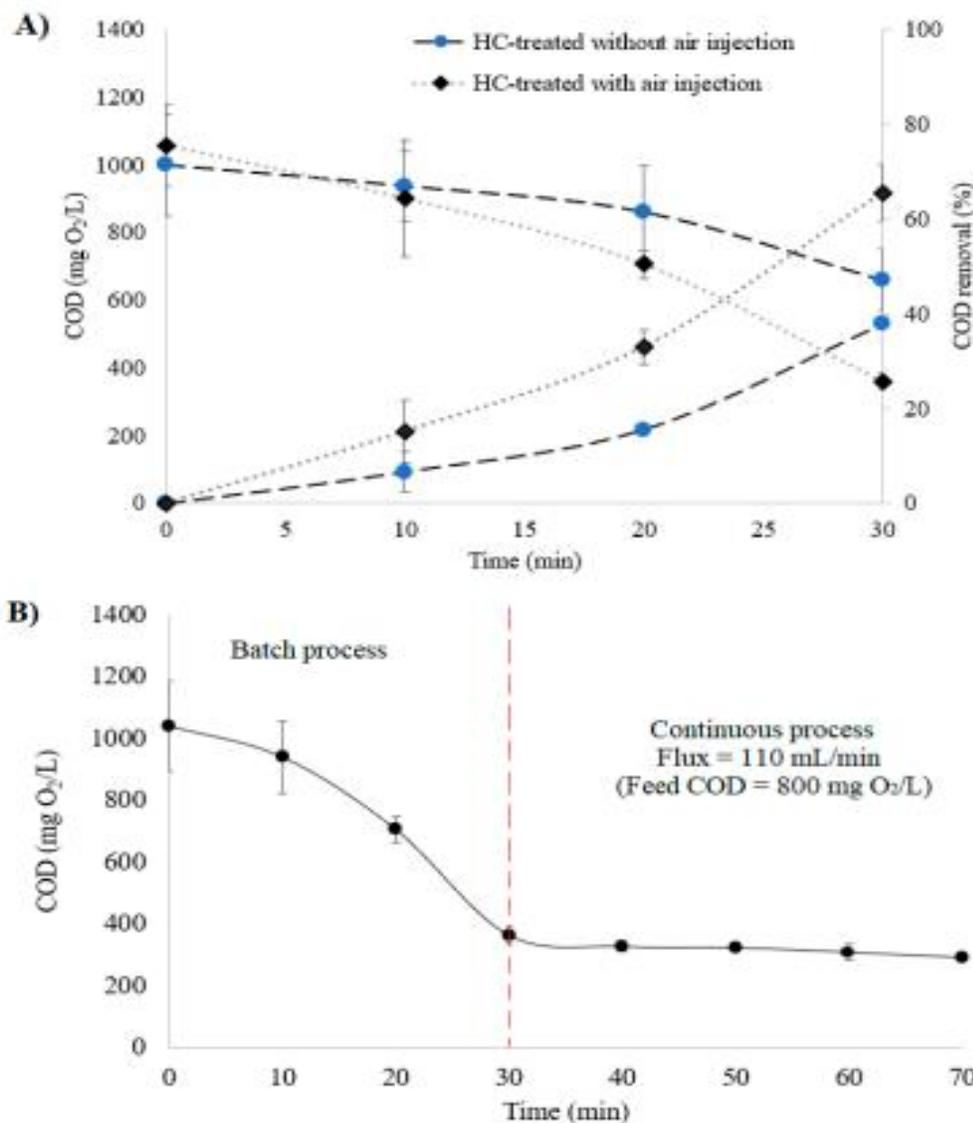


**Figure 2.** CFD analysis. (A) Constructed mesh, (B) manometric pressure profile, (C) velocity through the orifice, and (D) vapor fraction achieved at 400 kPa.

Although the HC treatment efficiency for pollutant removal is low, it is improved when it is combined with other processes such as air injection. For example, using non-specified industrial wastewater [6], the addition of air and oxygen to the process has been shown to allow 18% and 45% COD removal, respectively. The benefit of air injection in the HC process was also reported by Doltade et al. [34], where the COD reduction (52%) as well as total bacterial count (59%) during the treatment of a petroleum refinery effluent were higher with air injection than without air injection operated at 5 bar pressure. Finally, by the effect of air injection in the HC process, the RB13 decolorization rate was  $5.5 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ , which is higher than the  $5.2 \times 10^{-3} / \text{min}$  reported for HC alone [35]. Therefore, the increase in the chemical and physical effect of cavitation by air injection can be associated with the presence of oxygen in air which enhances the  $\bullet\text{OH}$  radical generation rate [35]. The presence of air in the system can also act as nuclei for cavity generation and high shear forces [34]. Moreover, considering the particle size reduction by cavitation effect, the transport of pollutants by air bubbles to the surface will be easier.

The HC treatment of CSW was also performed in a continuous process and the result is shown in Figure 3B. As observed, the average COD removal and concentration in the output line are 68% and 293 mg  $\text{O}_2/\text{L}$ , respectively; the experiment was performed feeding 100 mL/min of CSW (established by dilution rate). This is the first report of a

continuous HC process for wastewater. However, a continuous HC process has been reported for other applications, e.g., inactivation of pathogens in milk [36] with results similar to long-time low-temperature (LTLT) processes. Additionally, a continuous HC process has been reported for pretreatment lignocellulosic biomass [13] and intensification of the heterogeneous Fenton-type process for dye pollution abatement [37].

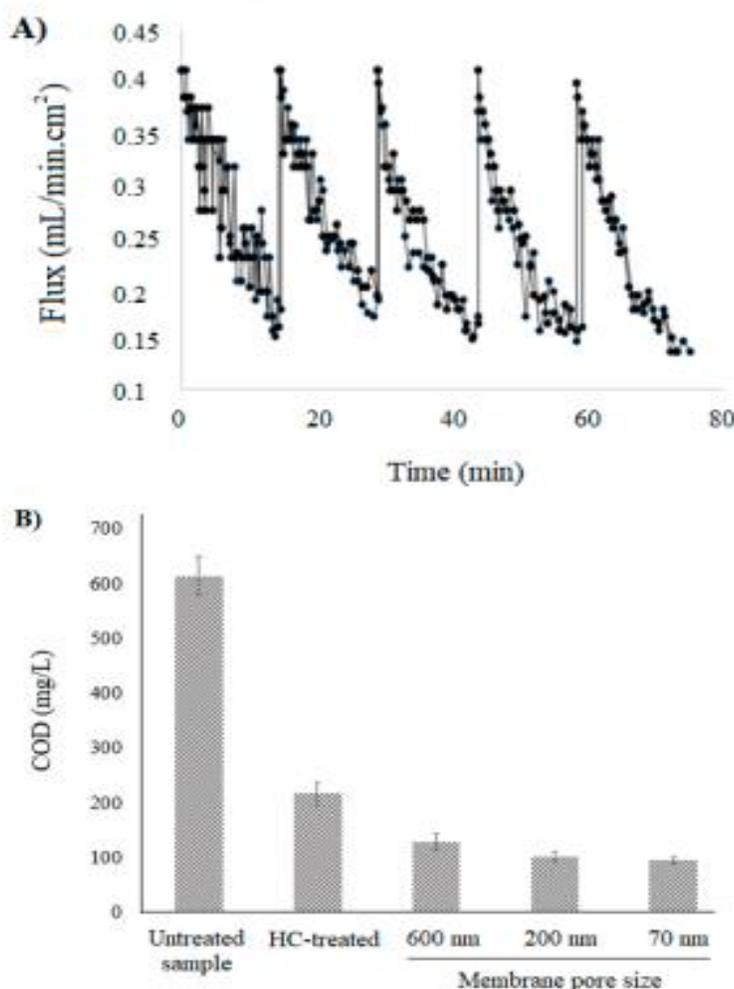


**Figure 3.** Hydrodynamic cavitation of CSW with aeration. (A) Batch process with and without air injection and (B) continuous process after batch process.

Therefore, efforts must be focused on applying the process in real situations. Some challenges for the HC process could be: (a) increasing the flux of fed wastewater in a continuous process, (b) cooling the processed water in an output line once the HC process increases the water temperature, (c) constant foam removal from the surface, and (d) reducing the hydraulic retention time (HRT).

### 3.3. Membrane Filtration of HC-CSW

The HC-CSW was submitted to filtration using alumina tubular membranes with three different pore sizes. As observed in Figure 4A, the maximal flux across the membrane (600 nm) was 0.43 mL/(min·cm<sup>2</sup>), which decreases quickly to 0.15 mL/(min·cm<sup>2</sup>) in a 15 min of process. The reduction in the flux is due to fouling and cake formation by the residual pollutants present in HC-treated CSW, which have a negative impact on the membrane performance, requiring cleaning. The fouled membrane was cleaned by backwashing with water, then, a new cycle of filtration was performed. The objective of this experiment was just to evaluate the performance of the membranes for the HC-CSW, which could be an interesting option in the future. It has been reported that tubular ceramic membranes can completely remove the COD, total suspended solids, and turbidity from poultry slaughterhouse wastewater [15], using a ceramic membrane with 133 nm of pore size and 40.17% porosity.



**Figure 4.** (A) Membrane filtration of HC-treated CSW using tubular alumina membranes with 600 nm of pore size and (B) residual COD after HC treatment and after passed consecutively through tubular alumina membranes with different pore sizes.

The membrane pore size is important in the retention of pollutants. In total, 41% of residual COD was removed using a membrane with 600 nm pore size; then, the permeated COD passed consecutively through 200 nm and 70 nm membranes, where 20% and 6.8% of residual COD was removed, respectively; the COD removal turns higher as the membrane pore size decreases. At the same time; the organic compounds remain in the water among them and soluble proteins, such as albumin (66.5 kDa), require <3 nm pore size membranes to be removed.

The total COD removal using three membranes was 85%. This result is close to the one reported by Kumar et al. [38], by using tubular ceramic membranes (309 nm and 53% porosity) for dairy wastewater treatment, achieving a maximum 91% (135 mg O<sub>2</sub>/L) reduction in COD in the permeate stream with a flux of  $2.59 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ s}$ .

Table 2 summarizes the parameters of untreated samples (CSW), after HC treatment and after the filtration of the HC-CSW through an alumina membrane (600 nm). The HC treatment considerably reduces almost all the parameters, mainly true color, turbidity, COD, turbidity, total Kjeldahl nitrogen, and BOD<sub>5</sub>. However, there is an increase in ammoniacal nitrogen (28%); this is probably due to the production of ammonia from the destruction of organic compounds containing nitrogen groups such as proteins and hemoglobin as it is reflected in the decrease in the Kjeldahl nitrogen. After passing the HC-CSW through the 600 nm pore size membrane, all the parameters are reduced, mainly true color, turbidity, and COD because of the removal of colloidal compounds with more than a 600 nm diameter.

**Table 2.** Comparison in the main parameters of cattle slaughterhouse wastewater after HC treatment and filtered through ceramic membrane (600 nm of pore size).

Parameters	Unit	Untreated Sample (Diluted)	After HC Treatment		After Membrane (600 nm)		Total Removal (%) ***
			Value	Removal * (%)	Value	Removal ** (%)	
True color	UC	544 ± 109	98.1 ± 19.6	82	48.0 ± 9.6	51	92
Turbidity	NTU	66.0 ± 5.3	14.8 ± 1.2	78	8.2 ± 0.7	45	88
Total alkalinity	mg CaCO <sub>3</sub> /L	282 ± 62	220 ± 49	22	211 ± 47	4	25
Conductivity	µS/cm	945 ± 255	883 ± 258	7	820 ± 221	7	13
Ammoniacal nitrogen	mg NH <sub>3</sub> -N/L	31.3 ± 8.5	40.0 ± 10.8	-	17.5 ± 4.7	56	44
Total Kjeldahl nitrogen	mg/L	74.0 ± 0.0	24.0 ± 0.0	68	15.0 ± 0.0	38	80
Total phosphorus	mg P/L	5.4 ± 0.4	3.6 ± 0.3	33	2.8 ± 0.2	22	48
Biochemical oxygen demand (BOD)	mg/L	250 ± 48	103 ± 20	59	82 ± 16	21	67
Chemical oxygen demand (COD)	mg O <sub>2</sub> /L	755 ± 20	229 ± 14	70	157 ± 13	31	79
Oil and fat	mg/L	5.9 ± 1.7	1.0 ± 0.3	83	1.0 ± 0.3	0	83
Chloride	mg/L	82.4 ± 2.1	85.9 ± 2.1	<0	84.2 ± 2.1	<0	<0
Nitrate	mg/L	0.2 ± 0.1	<0.1	<0.1	<0.1	-	-

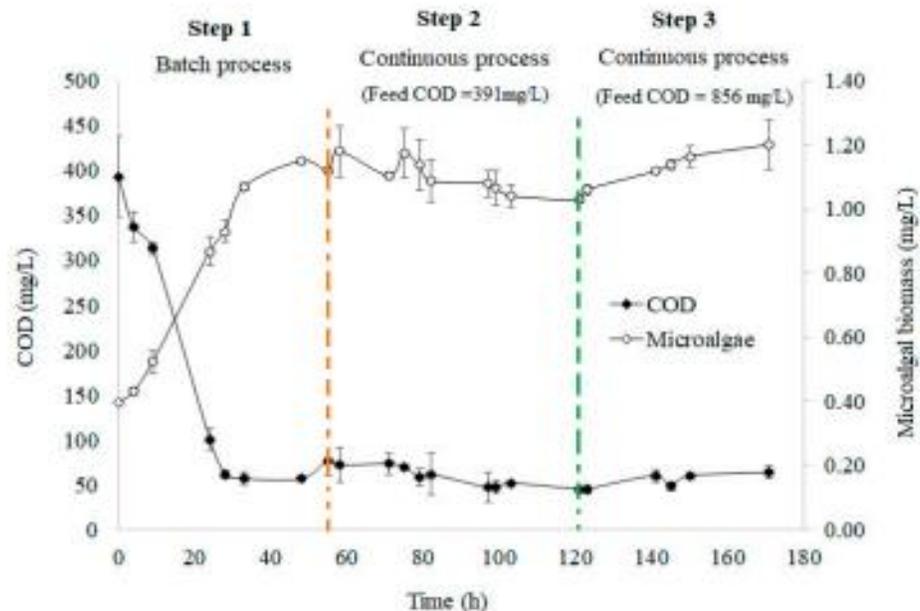
\* Removal from untreated water. \*\* Removal from the water after HC. \*\*\* Total removal (HC + filtration).

As the COD value is concerned, after filtration, it was 157 mg O<sub>2</sub>/L, which is slightly higher than the 125 mg O<sub>2</sub>/L established to safe discharge slaughterhouse wastewater by different jurisdictions, including the International Finance Corporation [39] of the World Bank Group (IFC) and the Council of European Communities [40]. However, the achieved values are lower than those established in the Peruvian legislation for the beer and tannery industry or domestic/municipal wastewater treatment plants.

#### 3.4. Microalgae Cultivation in HC-CSW

The HC-CSW was used as a medium for microalgae cultivation in batch (4.2 L) for 50 h, and then in a continuous process, first using a sample containing 391 mg O<sub>2</sub>/L (step 2), and afterwards, 856 mg O<sub>2</sub>/L (step 3), both at 2.27 mL/min feed rate; the results are observed in Figure 5. The batch process was initiated using diluted HC-CSW at 400 mg O<sub>2</sub>/L of COD, which was fast reduced to lower than 100 mg O<sub>2</sub>/L in 24 h, the COD value is almost constant (85% of COD removal). The microalgae biomass increased, reaching to 870 mg/L and 1150 mg/L in 24 h and 48 h, respectively, with a 0.78 d<sup>-1</sup> specific growth rate (µ). Moreover, the pH increased slightly from 8.1 to 9.6 due to the uptake of inorganic carbon [17]. The good microalgae performance for COD reduction can be associated with the increase in biodegradability index (BI = 0.45) using HC treatment as previously reported for other

wastewaters [41,42]. The COD removal obtained in this study was similar to that obtained in poultry slaughterhouse wastewater using *C. vulgaris* [17] and higher than the COD removal (20%) in the 7 days reported by Vadiveloo et al. [43] who used microalgae *Chlorella* from anaerobically digested abattoir effluent (ADAE) with  $0.25 \text{ d}^{-1}$  microalgae specific growth rate.



**Figure 5.** Microalgae cultivation in HC-treated CSW in a batch and continuous process (feed rate 2.27 mL/min).

After the batch process, microalgae cultivation was also performed in two steps in a continuous process (step 2 and step 3) using the same feed rate (2.27 mL/min) but different COD concentrations (391 and 845 mg/L). In Figure 5 (step 2), the residual COD in the outline was maintained around 58 mg O<sub>2</sub>/L. In the process, the medium pH was around 9.2, caused by photosynthetic CO<sub>2</sub> depletion [43,44]. In step 3 (Figure 5), the COD concentration in the feeding solution was increased to 856 mg O<sub>2</sub>/L. The residual COD in the output in both continuous processes was around 55 mg O<sub>2</sub>/L. Moreover, the microalgae biomass mg slightly increased. This was related to the increase in nutrients. The COD removal achieved in steps 2 and 3 was around 85% and 94%, respectively. The obtained result shows the effectivity of microalgae to remove COD in continuous processes (HRT = 1.28 day), which is close to 90% COD removal by co-culture (*C. vulgaris* and *A. platensis*) in industrial winery wastewater using a continuous membrane photobioreactor at 4.6 days HRT [44]. Therefore, the treated cattle slaughterhouse wastewater previously submitted to HC treatment is a suitable and ecofriendly alternative since the produced biomass has potential applications for biofuel (biodiesel, biohydrogen, bio-alcohol, methane, and bioelectricity) as reported by Bhatia et al. [45].

#### 4. Conclusions

Hydrodynamic cavitation with air injection was successfully used for CSW in batch and continuous processes, achieving an efficient COD, color, and turbidity removal. Moreover, by using a ceramic membrane, the residual COD was removed; however, the COD was 26% higher than the one established for safe CSW discharge in different jurisdictions for reutilization, requiring application of membranes with minor pore size. On the other hand, the microalgae-based treatment after the HC process was successfully performed,

reducing the COD to below 100 mg O<sub>2</sub>/L. Finally, the cattle slaughterhouse wastewater was an excellent medium for microalgae cultivation, reaching more than 1000 mg/L. Therefore, the proposed process is a suitable and interesting option, once the cavitation process can be generated using a simple system.

**Author Contributions:** Conceptualization, R.T.H.; methodology, R.T.H., F.P.S.V. and D.A.P.T.; investigation, R.T.H., F.P.S.V. and K.T.M.; validation, R.T.H. and G.J.C.A.; formal analysis, R.T.H. and D.A.P.T.; resources, R.T.H., J.C.G. and D.A.P.T.; data curation, R.T.H. and K.T.M.; writing—original draft preparation, R.T.H., G.J.C.A. and D.A.P.T.; writing—review and editing, R.T.H., K.T.M. and D.A.P.T.; visualization, R.T.H. and G.J.C.A.; funding acquisition, R.T.H., D.A.P.T. and J.C.G. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This research was funded by Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC); Programa Nacional de Investigación Científica y Estudios Avanzados (PROCIENCIA)—Grant N° 06-2019-FONDECYT-BM-INC.INV; Universidad Católica de Santa María (UCSM)—Grant N° 28048-R-2021.

**Institutional Review Board Statement:** Not applicable.

**Informed Consent Statement:** Not applicable.

**Data Availability Statement:** Not applicable.

**Acknowledgments:** The authors would like to express a special acknowledgment to the Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC-Perú); Programa Nacional de Investigación Científica y Estudios Avanzados (PROCIENCIA-Perú); and Universidad Católica de Santa María (UCSM)—Perú.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

## References

1. USDA Foreign Agricultural Service. Livestock and Poultry: World Markets and Trade. Available online: <https://www.fas.usda.gov/data/livestock-and-poultry-world-markets-and-trade> (accessed on 6 December 2021).
2. Scopus. Analyze Search Results. Available online: <https://www.scopus.com/term/analyzer.uri?sid=c99b618064d3edbb14619296c58c664b&origin=resultslist&src=s&es=TITLE-ABS-KEY%28hydrodynamic+cavitation%29&sort=plf-f&sd=b&esot=b&esl=38&count=3624&analyzeResults=Analyze+results&txGid=01abb3754889fb68786b52042dac66> (accessed on 6 December 2021).
3. Gogate, P.R.; Pandit, A.B. A Review and Assessment of Hydrodynamic Cavitation as a Technology for the Future. *Ultrason. Sonochem.* **2005**, *12*, 21–27. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
4. Badmus, K.O.; Irakoze, N.; Adeniyi, O.R.; Petrik, L. Synergistic Advance Fenton Oxidation and Hydrodynamic Cavitation Treatment of Persistent Organic Dyes in Textile Wastewater. *J. Environ. Chem. Eng.* **2020**, *8*, 103521. [[CrossRef](#)]
5. Thanekar, P.; Panda, M.; Gogate, P.R. Degradation of Carbamazepine Using Hydrodynamic Cavitation Combined with Advanced Oxidation Processes. *Ultrason. Sonochem.* **2018**, *40*, 567–576. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
6. Joshi, S.M.; Gogate, P.R. Intensification of Industrial Wastewater Treatment Using Hydrodynamic Cavitation Combined with Advanced Oxidation at Operating Capacity of 70 L. *Ultrason. Sonochem.* **2019**, *52*, 375–381. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
7. Thanekar, P.; Gogate, P.R.; Znak, Z.; Sukhatskiy, Y.; Mnykh, R. Degradation of Benzene Present in Wastewater Using Hydrodynamic Cavitation in Combination with Air. *Ultrason. Sonochem.* **2021**, *70*, 105296. [[CrossRef](#)]
8. Yi, C.; Lu, Q.; Wang, Y.; Wang, Y.; Yang, B. Degradation of Organic Wastewater by Hydrodynamic Cavitation Combined with Acoustic Cavitation. *Ultrason. Sonochem.* **2018**, *43*, 156–165. [[CrossRef](#)]
9. Kovačič, A.; Škufca, D.; Zupanc, M.; Gostiša, J.; Bizjan, B.; Kristofelc, N.; Dolenc, M.S.; Heath, E. The Removal of Bisphenols and Other Contaminants of Emerging Concern by Hydrodynamic Cavitation: From Lab-Scale to Pilot-Scale. *Sci. Total Environ.* **2020**, *743*, 140724. [[CrossRef](#)]
10. Wang, J.; Chen, H.; Yuan, R.; Wang, F.; Ma, F.; Zhou, B. Intensified Degradation of Textile Wastewater Using a Novel Treatment of Hydrodynamic Cavitation with the Combination of Ozone. *J. Environ. Chem. Eng.* **2020**, *8*, 103959. [[CrossRef](#)]
11. Abramov, V.O.; Abramova, A.V.; Cravotto, G.; Nikonov, R.V.; Fedulov, I.S.; Ivanov, V.K. Flow-Mode Water Treatment under Simultaneous Hydrodynamic Cavitation and Plasma. *Ultrason. Sonochem.* **2021**, *70*, 105323. [[CrossRef](#)]
12. Wang, B.; Su, H.; Zhang, B. Hydrodynamic Cavitation as a Promising Route for Wastewater Treatment—A Review. *Chem. Eng. J.* **2021**, *412*, 128685. [[CrossRef](#)]
13. Terán, H.R.; Medeiros, D.R.; Sánchez, M.S.; Aline, P.C.; de Sousa Júnior, R.; da Silva, S.S.; Santos, J.C. Hydrodynamic Cavitation-Assisted Continuous Pre-Treatment of Sugarcane Bagasse for Ethanol Production: Effects of Geometric Parameters of the Cavitation Device. *Ultrason. Sonochem.* **2020**, *63*, 104931. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

14. Zsirai, T.; Al-Jaml, A.K.; Qiblawey, H.; Al-Marri, M.; Ahmed, A.; Bach, S.; Watson, S.; Judd, S. Ceramic Membrane Filtration of Produced Water: Impact of Membrane Module. *Sep. Purif. Technol.* **2016**, *165*, 214–221. [\[CrossRef\]](#)
15. Goswami, K.P.; Pugazhenthii, G. Treatment of Poultry Slaughterhouse Wastewater Using Tubular Microfiltration Membrane with Fly Ash as Key Precursor. *J. Water Process Eng.* **2020**, *37*, 101361. [\[CrossRef\]](#)
16. Solmaz, A.; Işık, M. Optimization of Membrane Photobioreactor; the Effect of Hydraulic Retention Time on Biomass Production and Nutrient Removal by Mixed Microalgae Culture. *Biomass Bioenergy* **2020**, *142*, 105809. [\[CrossRef\]](#)
17. Terán Hilares, R.; Garcia Bustos, K.A.; Sanchez Vera, F.P.; Colina Andrade, G.J.; Pacheco Tanaka, D.A. Acid Precipitation Followed by Microalgae (*Chlorella vulgaris*) Cultivation as a New Approach for Poultry Slaughterhouse Wastewater Treatment. *Bioresour. Technol.* **2021**, *335*, 125284. [\[CrossRef\]](#)
18. Molinuevo-Salces, B.; Riaño, B.; Hernández, D.; Cruz Garcia-González, M. Microalgae and Wastewater Treatment: Advantages and Disadvantages. In *Microalgae Biotechnology for Development of Biofuel and Wastewater Treatment*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2019; pp. 505–533.
19. Saravanan, A.; Kumar, P.S.; Varjani, S.; Jeevanantham, S.; Yaashikaa, P.R.; Thamarai, P.; Abirami, B.; George, C.S. A Review on Algal-Bacterial Symbiotic System for Effective Treatment of Wastewater. *Chemosphere* **2021**, *271*, 129540. [\[CrossRef\]](#)
20. Salgueiro, J.L.; Pérez, L.; Maceiras, R.; Sánchez, Á.; Cancela, Á. Semicontinuous Culture of *Chlorella Vulgaris* Microalgae for Wastewater Treatment. *Int. J. Environ. Res.* **2018**, *12*, 765–772. [\[CrossRef\]](#)
21. Gao, F.; Li, C.; Yang, Z.-H.; Zeng, G.-M.; Feng, L.-J.; Liu, J.; Liu, M.; Cai, H. Continuous Microalgae Cultivation in Aquaculture Wastewater by a Membrane Photobioreactor for Biomass Production and Nutrients Removal. *Ecol. Eng.* **2016**, *92*, 55–61. [\[CrossRef\]](#)
22. De Mendonça, H.V.; Otenio, M.H.; Marchão, L.; Lomeu, A.; de Souza, D.S.; Reis, A. Biofuel Recovery from Microalgae Biomass Grown in Dairy Wastewater Treated with Activated Sludge: The next Step in Sustainable Production. *Sci. Total Environ.* **2022**, *824*, 153838. [\[CrossRef\]](#)
23. American Public Health Association; WPCF, A.; Greenberg, W.E.F.I.A.E.; Clesceri, L.S.; Eaton, A. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*; American Public Health Association: Denver, CO, USA, 2017; Volume 2.
24. Mali, C.R.; Patwardhan, A.W.; Pandey, G.K.; Banerjee, I.; Vinod, V. CFD Study on the Effect of Various Geometrical Parameters of the Honeycomb Type Orifices on Pressure Drop and Cavitation Characteristics. *Nucl. Eng. Des.* **2020**, *370*, 110880. [\[CrossRef\]](#)
25. Musa, M.A.; Idrus, S.; Che Man, H.; Nik Daud, N.N. Performance Comparison of Conventional and Modified Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Reactors Treating High-Strength Cattle Slaughterhouse Wastewater. *Water* **2019**, *11*, 806. [\[CrossRef\]](#)
26. Wu, P.F.; Mittal, G.S. Characterization of Provincially Inspected Slaughterhouse Wastewater in Ontario, Canada. *Can. Biosyst. Eng.* **2012**, *54*, 9–18. [\[CrossRef\]](#)
27. Ziara, R.M.M.; Li, S.; Subbiah, J.; Dvorak, B.I. Characterization of Wastewater in Two US Cattle Slaughterhouses. *Water Environ. Res.* **2018**, *90*, 851–863. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
28. Osman, H.; Sedrak, M.; Hosseini, S.H.; Elsayed, K. A Comprehensive Study of Hole-to-Hole Interaction for Multi-Hole Orifice (MHO) in Hydrodynamic Cavitation Process. *Flow Meas. Instrum.* **2022**, *85*, 102163. [\[CrossRef\]](#)
29. Das, S.; Bhat, A.P.; Gogate, P.R. Degradation of Dyes Using Hydrodynamic Cavitation: Process Overview and Cost Estimation. *J. Water Process Eng.* **2021**, *42*, 102126. [\[CrossRef\]](#)
30. Gore, M.M.; Saharan, V.K.; Pinjari, D.V.; Chavan, P.V.; Pandit, A.B. Degradation of Reactive Orange 4 Dye Using Hydrodynamic Cavitation Based Hybrid Techniques. *Ultrason. Sonochem.* **2014**, *21*, 1075–1082. [\[CrossRef\]](#)
31. Bagal, M.V.; Gogate, P.R. Wastewater Treatment Using Hybrid Treatment Schemes Based on Cavitation and Fenton Chemistry: A Review. *Ultrason. Sonochem.* **2014**, *21*, 1–14. [\[CrossRef\]](#)
32. Innocenzi, V.; Prisciandaro, M.; Centofanti, M.; Vegliò, F. Comparison of Performances of Hydrodynamic Cavitation in Combined Treatments Based on Hybrid Induced Advanced Fenton Process for Degradation of Azo-Dyes. *J. Environ. Chem. Eng.* **2019**, *7*, 103171. [\[CrossRef\]](#)
33. Zampeta, C.; Bertaki, K.; Triantaphyllidou, L.-E.; Frontistis, Z.; Vayenas, D.V. Treatment of Real Industrial-Grade Dye Solutions and Printing Ink Wastewater Using a Novel Pilot-Scale Hydrodynamic Cavitation Reactor. *J. Environ. Manag.* **2021**, *297*, 113301. [\[CrossRef\]](#)
34. Doltade, S.B.; Dastane, G.G.; Jadhav, N.L.; Pandit, A.B.; Pinjari, D.V.; Somkuwar, N.; Paswan, R. Hydrodynamic Cavitation as an Imperative Technology for the Treatment of Petroleum Refinery Effluent. *J. Water Process Eng.* **2019**, *29*, 100768. [\[CrossRef\]](#)
35. Rajoriya, S.; Bargole, S.; Saharan, V.K. Degradation of Reactive Blue 13 Using Hydrodynamic Cavitation: Effect of Geometrical Parameters and Different Oxidizing Additives. *Ultrason. Sonochem.* **2017**, *37*, 192–202. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
36. Sun, X.; Xuan, X.; Ji, L.; Chen, S.; Liu, J.; Zhao, S.; Park, S.; Yoon, J.Y.; Om, A.S. A Novel Continuous Hydrodynamic Cavitation Technology for the Inactivation of Pathogens in Milk. *Ultrason. Sonochem.* **2021**, *71*, 105382. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
37. Salierno, G.; Napoleone, S.; Maisterrena, M.A.; Cassanello, M.; Pellasio, M.; Doumic, L.; Ayude, M.A. Continuous Heterogeneous Fenton-Type Process for Dye Pollution Abatement Intensified by Hydrodynamic Cavitation. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2021**, *60*, 16653–16664. [\[CrossRef\]](#)
38. Kumar, R.V.; Goswami, L.; Pakshirajan, K.; Pugazhenthii, G. Dairy Wastewater Treatment Using a Novel Low Cost Tubular Ceramic Membrane and Membrane Fouling Mechanism Using Pore Blocking Models. *J. Water Process Eng.* **2016**, *13*, 168–175. [\[CrossRef\]](#)

39. IFC. General Health and Safety Guidelines. Available online: [https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/topics\\_ext\\_content/ifc\\_external\\_corporate\\_site/sustainability-at-ifc/publications/publications\\_policy\\_ehs-general](https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/topics_ext_content/ifc_external_corporate_site/sustainability-at-ifc/publications/publications_policy_ehs-general) (accessed on 26 November 2021).
40. FAO. Council Directive of 21 May 1991 Concerning Urban Waste Water Treatment (91/271/EEC). Available online: <https://www.ecollex.org/details/legislation/council-directive-91271eec-concerning-urban-waste-water-treatment-lex-fao013224/> (accessed on 10 February 2022).
41. Gutiérrez-Mosquera, L.F.; Arias-Giraldo, S.; Zuluaga-Meza, A. Landfill Leachate Treatment Using Hydrodynamic Cavitation: Exploratory Evaluation. *Heliyon* **2022**, *8*, e09019. [CrossRef]
42. Bhat, A.P.; Gogate, P.R. Cavitation-Based Pre-Treatment of Wastewater and Waste Sludge for Improvement in the Performance of Biological Processes: A Review. *J. Environ. Chem. Eng.* **2021**, *9*, 104743. [CrossRef]
43. Vadiveloo, A.; Foster, L.; Kwambai, C.; Bahri, P.A.; Moheimani, N.R. Microalgae Cultivation for the Treatment of Anaerobically Digested Municipal Centrate (ADMC) and Anaerobically Digested Abattoir Effluent (ADAE). *Sci. Total Environ.* **2021**, *775*, 145853. [CrossRef]
44. Spennati, E.; Mirizadeh, S.; Casazza, A.A.; Solisio, C.; Converti, A. *Chlorella Vulgaris* and *Arthrospira Platensis* Growth in a Continuous Membrane Photobioreactor Using Industrial Winery Wastewater. *Algal Res.* **2021**, *60*, 102519. [CrossRef]
45. Bhatia, S.K.; Mehariya, S.; Bhatia, R.K.; Kumar, M.; Pugazhendhi, A.; Awasthi, M.K.; Atabani, A.E.; Kumar, G.; Kim, W.; Seo, S.-O.; et al. Wastewater Based Microalgal Biorefinery for Bioenergy Production: Progress and Challenges. *Sci. Total Environ.* **2021**, *751*, 141599. [CrossRef]

