

ANÁLISIS DEL EFECTO DE LOS PARAMETROS CARACTERÍSTICOS DE LAS  
MICROBURBUJAS MEDIANTE VISION ARTIFICIAL EN EL TRATAMIENTO DE  
AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS



Propuesta de Trabajo de Grado

Jeimmy Adriana Muñoz Alegría

Director:

M.Sc. Elena Muñoz España

Co director:

M.Sc. Juan Fernando Flórez

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Maestría en Automática

Popayán, Agosto, 2022

ANÁLISIS DEL EFECTO DE LOS PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LAS  
MICROBURBUJAS MEDIANTE VISIÓN ARTIFICIAL EN EL TRATAMIENTO DE  
AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

Proyecto de grado presentado a la Facultad de Ingeniería  
Electrónica y Telecomunicaciones de la  
Universidad del Cauca para la obtención del  
Título de:

Magíster en Automática

Presentado por:

Jeimmy Adriana Muñoz Alegría

Directora:  
Elena Muñoz España  
Magíster en Electrónica y Telecomunicaciones

Co director:  
Juan Fernando Flórez Marulanda  
Magíster en Electrónica y Telecomunicaciones

Popayán, Agosto, 2022

# Índice general

<b>Introducción</b> .....	1
1.1 Planteamiento del problema .....	2
1.1.1 Árbol del problema.....	3
1.1.2 Pregunta de investigación.....	6
1.2 Objetivos .....	6
1.2.1 Objetivo general .....	6
1.2.2 Objetivos específicos.....	6
1.3 Publicaciones.....	6
1.4 Organización del trabajo .....	7
<b>Revisión de la literatura</b> .....	9
2.1 Metodología para la revisión de la literatura.....	9
2.1.1 Planteamiento de las preguntas de indagación y definición de cadenas de búsqueda.....	10
2.1.2 Aplicación de criterios de exclusión e inclusión .....	10
2.1.3 Extracción de los datos.....	11
2.2 Análisis de datos .....	11
2.2.1 Antecedentes de las aguas residuales domésticas .....	11
2.2.2 Parámetros fisicoquímicos de limpieza.....	14
2.2.3 Métodos de uso frecuente en los tratamientos de aguas residuales domesticas .....	16
2.2.4 Antecedentes de los sistemas de flotación por aire disuelto DAF.....	17
2.2.5 Parámetros de diseño y operación DAF.....	19
2.2.6 Física de las microburbujas .....	22
2.2.7 Revisión del estado de la tecnología .....	31
2.2.8 Aplicación de DAF en el Tratamiento de aguas residuales.....	36
2.2.9 Tendencia DAF en el tratamiento de aguas residuales.....	39
<b>Materiales y métodos</b> .....	43
3.1 Ambientes de experimentación .....	43
3.2 Sistema de adquisición de imágenes .....	45
3.3 Calibración de la cámara.....	46
3.4 Relación píxel-unidad de longitud .....	48
3.5 Diseño del algoritmo de visión artificial .....	49
3.5.1 Diagrama de flujo del código para caracterización de MBs.....	50

3.5.2 Desarrollo del algoritmo de visión artificial.....	53
3.5.3 Seguimiento de microburbujas.....	56
3.6 Generación de MBs mediante el sistema DAF .....	57
3.7 Diseño experimental para la generación de MBs.....	58
3.8 Prueba del algoritmo con MBs en azul de metileno.....	58
3.9 Caracterización del agua residual doméstica sintética .....	59
3.9.1 Medición de los parámetros fisicoquímicos del agua residual.....	60
3.9.2 Medición de pH, conductividad y oxígeno disuelto.....	61
3.9.3 Medición de Turbidez .....	61
3.9.4 Medición de Color.....	62
3.9.5 Medición de SST.....	62
3.9.6 Parámetros fisicoquímicos del agua residual doméstica sintética.....	63
<b>Resultados y discusión .....</b>	<b>64</b>
4.1 Caracterización de las MBs generadas.....	64
4.2 Selección de los parámetros de generación de busbujas DAF .....	67
4.3 Estimación de las poblaciones de MBs detectadas por video .....	67
4.4 Pruebas de limpieza mediante la técnica DAF.....	69
4.5 Caracterización del agua tratada .....	70
4.6 Análisis del efecto de los parámetros característicos de las burbujas en el tratamiento del agua .....	73
4.7 Discusión.....	78
<b>Conclusiones y trabajos futuros.....</b>	<b>81</b>
5.1 Conclusiones .....	81
5.2 Trabajos futuros .....	82
<b>Referencias.....</b>	<b>84</b>

# Resumen

La UNESCO indica que el déficit de agua a nivel mundial se incrementará en un 40% para el año 2030, como consecuencia de la generación de aguas residuales por parte de diferentes sectores como la industria, la agricultura y el sector doméstico/municipal. En general, diversos estudios muestran que las aguas residuales domésticas se componen principalmente de micropartículas y aceites & grasas, es decir se consideran estos los agentes que generan mayor contaminación, afectando el medio ambiente, el sistema de alcantarillado y el funcionamiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales. Por lo anterior, se han desarrollado estudios relacionados con la implementación de distintas técnicas que permitan reducir las concentraciones de estos agentes contaminantes.

Los sistemas DAF, convencionalmente se basan en la tecnología de microburbujas para la limpieza de aguas residuales especialmente las producidas en la industria, sector en el cual se han obtenido resultados positivos en la remoción de diversos agentes contaminantes; por tal motivo, la aplicación de microburbujas es una técnica sólida y de gran potencial en la limpieza de aguas residuales domésticas. Partiendo de lo anterior, el objetivo principal de este trabajo consiste en determinar mediante un sistema de visión artificial, la relación entre los parámetros característicos de las microburbujas y la eficiencia en la remoción de aceites y grasas de aguas residuales domésticas utilizando un sistema DAF.

Las microburbujas son generadas por cavitación hidrodinámica utilizando un tubo Venturi. Por otra parte, la medición de sus parámetros característicos (diámetros y velocidad de ascenso) se lleva a cabo utilizando un sistema de visión artificial el cual consiste en un celular Huawei P30 ELE-L04 para la adquisición de imágenes y se implementó un algoritmo diseñado en la plataforma Matlab para medir dichos parámetros. Por otra parte, se miden los parámetros fisicoquímicos del agua como turbidez, color, pH, conductividad, oxígeno disuelto y sólidos suspendidos totales, tanto del agua residual como del agua tratada.

El desarrollo de este trabajo parte de la revisión de literatura y del estado de la tecnología, compuesta por tres etapas: 1. Definición de las preguntas de indagación, Definición de las cadenas de búsqueda y búsqueda en las bases de datos; 2. Aplicación de criterios de inclusión/exclusión y selección de artículos y patentes; 3. Extracción de los datos.

Con base en los resultados obtenidos, en la limpieza de aguas residuales domésticas sintéticas mediante DAF, la incidencia significativa entre los parámetros característicos de las microburbujas y la eficiencia en la remoción de aceites & grasas se encuentran en un 89.22% a 34 psi y 0.1L/min de inyección de aire; SST 91,6 % a 36 psi y 0.1L/min de inyección de aire.

# Capítulo 1

Este capítulo aborda el contexto y los antecedentes de la presente investigación, fundamentados en el análisis del efecto de los parámetros característicos de las microburbujas mediante visión artificial en el tratamiento de las aguas residuales domésticas. Proporciona el planteamiento del problema, la pregunta y los objetivos de investigación que se estudiarán a fin de alcanzar el propósito de este trabajo. También, se presenta la publicación del artículo de revisión de la literatura y la organización del documento.

## Introducción

Se estima que el déficit de agua en el mundo para el año 2030 será del 40 % de acuerdo a los estudios realizados por la UNESCO, e incrementará en un 55 % para el 2050 según los informes por *The Organization for Economic Co-operation and Development*, debido al desequilibrio ambiental y a la generación descontrolada de aguas residuales consecuentes del desarrollo tecnológico, industrial y el crecimiento urbano. Un sector influyente en el consumo de agua es el industrial puesto que representa el 19 % del consumo dirigido a industrias de alimentos, química, farmacéutica, textil, refinería de petróleo & gas, industria metálica y papelera entre otras, no obstante, en la mayoría de las regiones del mundo más del 70 % del agua dulce es utilizada por el sector agrícola y el 11 % restante para el uso doméstico. De acuerdo a esto, organizaciones como la Directiva de Emisiones Industriales en Europa y la Agencia de Protección Ambiental, en Estados Unidos regulan los límites de emisión de aguas residuales industriales y los niveles de aceites y grasas en los afluentes de desechos, puesto que exhiben altas concentraciones de contaminantes tóxicos como el amoníaco, plomo, agentes químicos, hidrocarburos policíclicos, entre otros agentes que a su vez pueden provocar afecciones en la salud comunitaria [1]–[4].

En efecto, numerosos estudios han comprobado que en la caracterización de aguas residuales tanto de tipo industrial, doméstico y municipal como también en el de uso agrícola, se encuentran considerables porcentajes de aceites y grasas destacándose como los agentes contaminantes más frecuentes en las aguas residuales [4]–[7]. Por otra parte, un fluido contaminante de componentes grasos en las aguas residuales urbanas son los líquidos lixiviados derivados de la descomposición de residuos municipales almacenados y la filtración del agua de lluvia [8]. No obstante, las concentraciones de aceites & grasas (O&G, por sus siglas en inglés *Oil and Grease*) y emulsiones orgánicas en el agua constituyen una problemática no solo porque afectan el medio ambiente sino también porque ocasionan deterioro en el sistema de alcantarillado y en las instalaciones afectando de este modo el funcionamiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) [9]–[12]. En Colombia según el Sistema de Información Ambiental para el año 2012 se registró un

consumo de aproximadamente 174 L de agua por persona al día. Por consiguiente, las aguas residuales domésticas representan no solo una amenaza ecológica sino también un grave problema a la salud pública cuando se descargan sin previo tratamiento [13].

Existen diversos métodos para eliminar los contenidos de aceites & grasas de las aguas residuales como los tratamientos químicos, físicos y biológicos se destacan la separación por gravedad, la coagulación/floculación, filtración por membrana, adsorción y la electrocoagulación [9], [14], [15]. No obstante, una técnica promisoría en el tratamiento de aguas residuales es la tecnología de las micro y nano burbujas mediante flotación por aire disuelto (DAF, por sus siglas en inglés *Dissolved Air Flotation*), puesto que sus propiedades físico-químicas como la coalescencia, flotabilidad y la capacidad de generar radicales libres permiten la eficiencia en la remoción de partículas contaminantes y la separación de aceites & grasas del agua residual a tratar [7], [16]–[19].

## 1.1 Planteamiento del problema

Las aguas residuales producidas por el uso doméstico e industrias de procesamiento de alimentos, incrementan la descarga de diversos contaminantes en el sistema de alcantarillado urbano especialmente concentraciones de O&G, alterando los niveles de oxígeno en los efluentes de descarga debido a la disminución de la infiltración de la luz y de la biodegradación, afectando la flora y fauna, además, de adherirse en el transcurso del tratamiento a los tanques de almacenamiento, canales y tuberías, ocasionando bloqueo en los filtros, corrosión, averías, fuertes olores y bacterias patógenas en los desagües municipales e instalaciones de las PTAR [9], [10].

Las aguas residuales domésticas se caracterizan generalmente por contener sólidos orgánicos, inorgánicos, sedimentables, nitrógeno, fósforo, O&G, químicos de origen farmacéutico o de productos de cuidado personal, gases disueltos y microorganismos, [15], [20] como también hidrocarburos, ácidos grasos, detergentes, lípidos, ceras [4], aceites de cocina usado (UCO por sus siglas en inglés *Used Cooking Oil*), salsas y productos lácteos como las cremas de helado y cafés [11]. El proyecto RecOil en Europa, estima que alrededor del 60 % de los 1.7 millones de toneladas de UCO producidos al año terminan en las plantas de tratamiento.

Estudios han comprobado que el proceso de eliminación de O&G del agua, es un trabajo arduo de realizar puesto que sus elementos constituyentes presentan una naturaleza compleja de tratar. En consecuencia, métodos como las trampas de grasas no son suficientes en el proceso de remoción ya que después de las etapas de limpieza, residuos de estos contaminantes continúan presentes en las aguas que desembocan en los efluentes [13], [21], [22]. De lo anterior numerosas investigaciones se han realizado encaminados a la eliminación de estos contaminantes en el agua, frecuentemente se destacan técnicas como la adsorción, coagulación, tratamientos anaerobios, ultrafiltración, floculación, flotación, tratamientos químicos, ósmosis inversa y procesos de membranas de los cuales han surgido numerosas

ventajas y desventajas en cuanto a costos, durabilidad y tiempos de operación [23], [24]. Sin embargo, la combinación de algunos métodos de limpieza ha arrojado resultados más eficientes en el tratamiento de aguas que cuando se implementan por sí solos [25]–[27].

La tecnología de las micro y nano burbujas es una técnica prominente que está siendo ampliamente estudiada en actividades del sector industrial dado que sus propiedades físico-químicas como flotabilidad, generación de radicales libres y propiedades coloidales permiten una separación eficiente de contaminantes en el tratamiento de aguas residuales [16], [18], [28]. Sin embargo, aunque no se encontraron estudios de la aplicación del sistema DAF en el tratamiento de aguas residuales domésticas algunos trabajos evidencian la importancia de la tecnología de microburbujas (MB) bajo el principio de flotación como método de limpieza de aguas residuales. En [29] se estudió la eficiencia del sistema DAF para el tratamiento de aguas residuales de la industria de leche sintética obteniendo una remoción de 97,8 (turbidez) y el 87.5 % en DQO (Demanda Química de Oxígeno).

También en el sector industrial principalmente en la remoción de aguas oleosas por su eficiencia en la eliminación de aceites de alta densidad [30]–[33], y la eliminación de micropartículas, contaminantes como el hidróxido férrico, residuos de Batik, fibras de carbono, reduciendo tanto los niveles de sólidos suspendidos como los riesgos toxicológicos ambientales y turbidez [12], [34]–[36]. Por otra parte, las MB degradan de forma efectiva productos farmacéuticos antivirales, antibacterianos, anticancerosos, psicotrópicos, antihipertensivos, analgésicos y antipiréticos mezclados en agua aumentando las tasas de remoción reduciendo así la descarga de estos productos en entornos fluviales [37] mejorando por ejemplo la calidad de ríos y aguas subterráneas contaminadas con sustancias orgánicas [38]–[40].

Por tal motivo, los resultados obtenidos sobre la aplicación de MB en los trabajos anteriormente mencionados, hacen de esta tecnología una alternativa de gran potencial en la limpieza de aguas residuales domésticas, permitiendo el desarrollo de nuevas investigaciones que aporten en eficiencia a las tecnologías de flotación convencionales.

Este trabajo propone el análisis comparativo de los indicadores de limpieza con el fin de determinar la eficiencia de remoción de O&G de las aguas residuales con la tecnología DAF a escala de laboratorio. Se aclara que el estudio se desarrolló mediante el uso de aguas sintéticas que simulan las características reales de las aguas residuales domésticas, estableciendo una relación de los indicadores de limpieza con los parámetros físicos de las MB como el diámetro y la velocidad de ascenso determinados mediante técnicas de visión artificial, ya que influyen en la efectividad de la remoción de contaminantes en el tratamiento del agua residual [41]–[48].

### **1.1.1 Árbol del problema**

Es posible visualizar de manera gráfica el planteamiento del problema, con el fin de observar de forma más práctica la problemática central, las causas, sus efectos e identificar el aporte



del presente proyecto de investigación, por tanto, se muestra a continuación el árbol del problema.

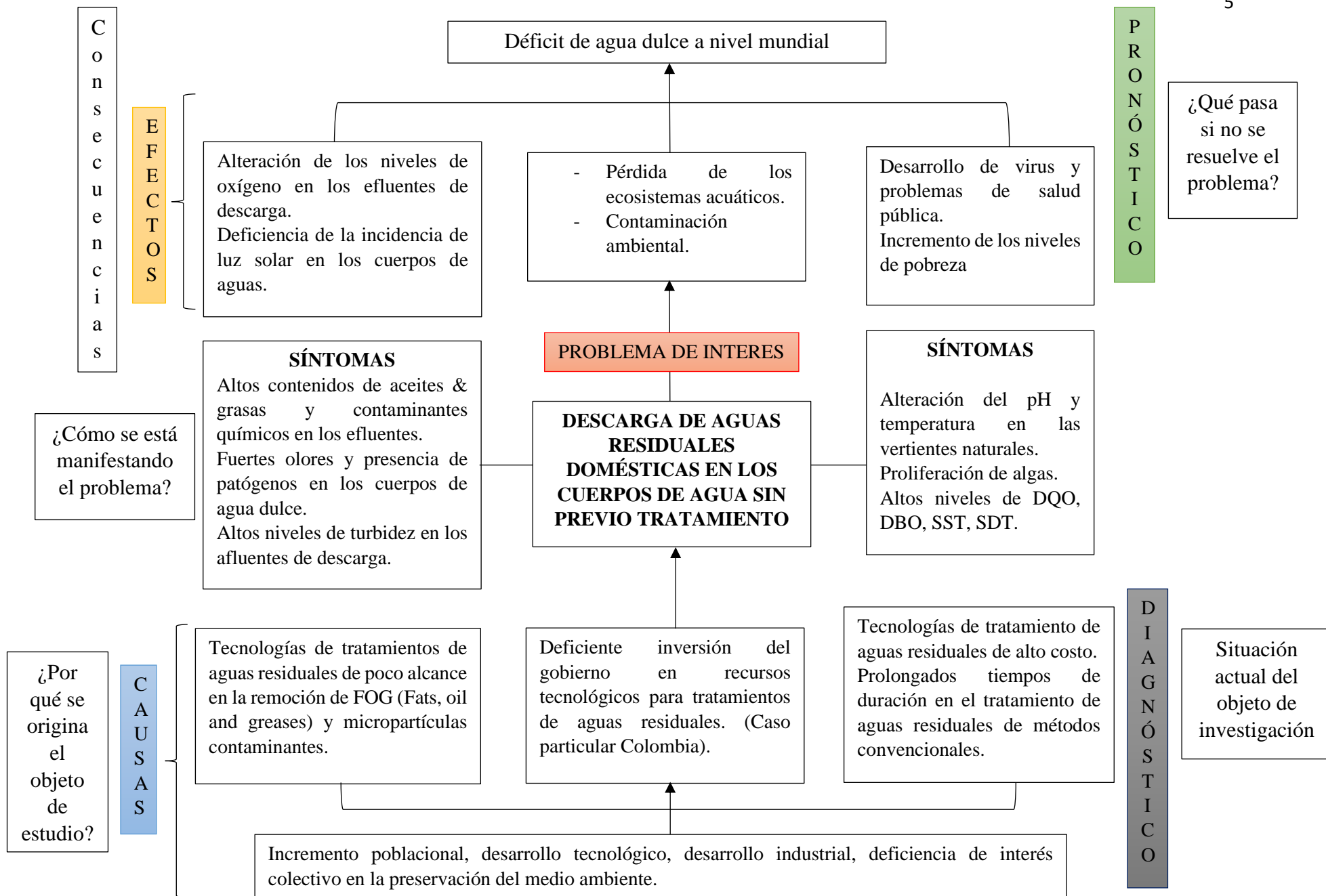


Figura 1. Árbol del problema proyecto de investigación

## 1.1.2 Pregunta de investigación

En vista de que la tecnología de microburbujas está emergiendo en los procesos de limpieza de aguas residuales, surge el siguiente interrogante:

*¿Cuál es la incidencia de los parámetros característicos de las microburbujas en los indicadores de limpieza de las aguas residuales domésticas?*

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo general

Determinar mediante un sistema de visión artificial la relación entre los parámetros característicos de las microburbujas y la eficiencia en la remoción de aceites & grasas de acuerdo a los indicadores de limpieza establecidos en el tratamiento de aguas residuales domésticas a través de la tecnología frotación por aire disuelto.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Establecer los parámetros característicos de las microburbujas que inciden en el proceso de limpieza de las aguas residuales domésticas en el sistema de flotación por aire disuelto.
- Desarrollar un algoritmo de visión artificial que permita determinar los parámetros característicos de las microburbujas.
- Evaluar de forma experimental y mediante análisis estadístico la eficiencia en la remoción de aceites, grasas y partículas contaminantes.

## 1.3 Publicaciones

El desarrollo de este trabajo permitió la siguiente publicación:

J. A Muñoz-Alegría, E. Muñoz-España, J. F Flórez-Marulanda, “Dissolved Air Flotation: A review from the perspective of system parameters and uses in wastewater treatment”, *TecnoLógicas*, vol. 24, nro. 52, Pag. e2111, December 2021. <https://doi.org/10.22430/22565337.2111>. [Anexo digital, folder A].

## 1.4 Organización del trabajo

La estructura del presente trabajo se organiza de la siguiente manera:

**Capítulo 1.** Se presenta la temática del trabajo desarrollado, aborda el planteamiento del problema, el objetivo general, objetivos específicos y la publicación alcanzada en el transcurso de la investigación, con el fin de contextualizar el propósito de la investigación.

**Capítulo 2.** Describe la metodología usada en la revisión de la literatura, por consiguiente, muestra los antecedentes de las aguas residuales domésticas en el contexto nacional e internacional como también la revisión de la fórmula sintética, los antecedentes de los sistemas de flotación por aire disuelto por sus siglas en inglés DAF la revisión del estado de la tecnología, las aplicaciones en el tratamiento de las aguas residuales y la descripción de su funcionalidad. En este aspecto, se revisa la física de las microburbujas y los parámetros de incidencia. Finalmente, se revisan las técnicas de visión artificial para la caracterización de las microburbujas y los respectivos sistemas de adquisición de imagen.

**Capítulo 3.** Describe la metodología y los experimentos desarrollados en este trabajo de investigación. Inicialmente describe la configuración del sistema de adquisición de imágenes usado para la detección de las microburbujas, la respectiva calibración de la cámara y la determinación del píxel en unidad de longitud. A continuación, presenta la estrategia de diseño del algoritmo de visión artificial, el algoritmo de detección, seguimiento y caracterización de las microburbujas, y la respectiva validación del algoritmo de visión artificial.

También, se presenta el diseño experimental usado para la generación de las microburbujas con agua potable, a fin de obtener los parámetros operativos óptimos del sistema que permitirán seleccionar el rango de diámetros pertinentes para el tratamiento de las aguas residuales domésticas sintéticas de acuerdo a la revisión de la literatura. En este aspecto, se realiza el experimento de generación de microburbujas variando los valores de presión de recirculación e inyección de aire. Finalmente, se presenta la caracterización de las aguas residuales domésticas sintéticas para proceder a las pruebas de limpieza mediante la técnica DAF.

**Capítulo 4.** Este capítulo describe los resultados obtenidos de los experimentos realizados para el tratamiento de las aguas residuales domésticas sintéticas mediante la técnica DAF. En primer lugar, se caracteriza la población de microburbujas detectadas para cada experimento de generación. Posteriormente, se eligen los parámetros operativos del sistema de limpieza prototipo de laboratorio con base a la literatura revisada para proceder a las pruebas de limpieza. Finalmente, se caracteriza el agua tratada y se discuten los resultados obtenidos.

**Capítulo 5.** En este capítulo se consignan las conclusiones del proyecto de investigación, así como también las limitaciones y recomendaciones para trabajos futuros.

## **Anexos.**

Se incluyen 8 anexos digitales que complementan toda la información obtenida en el desarrollo del trabajo:

Anexo A – Artículo publicado

Anexo B – Artículos y patentes DAF consultadas

Anexo C – Código calibración de cámara

Anexo D - Relación píxel-unidad de longitud

Anexo E – Prueba en azul de metileno

Anexo F – Métodos de análisis USEPA

Anexo G – Resultados de los cuatro experimentos desarrollados

Anexo H – Datos pruebas de limpieza

Los anteriores anexos se pueden consultar accediendo al siguiente enlace de Google Drive:

<https://drive.google.com/drive/folders/1IBCHxvf2QfUnX6Oov5t9FqMV3rnoCZWo?usp=sharing>

# Capítulo 2

## Revisión de la literatura

Este capítulo proporciona la metodología y los resultados de la revisión de la literatura en cuanto a los antecedentes de las aguas residuales domésticas para establecer la fórmula sintética y los parámetros fisicoquímicos de limpieza que serán objeto de estudio en este trabajo, los antecedentes de los sistemas DAF, en cuanto a los parámetros de diseño y operación, la física de las MBs y sus principales parámetros de incidencia en los procesos DAF, como también los métodos de medición de los parámetros característicos de las MBs y las técnicas de visión artificial para la caracterización de las mismas. Finalmente, se proporciona la revisión del estado de la tecnología, la aplicación de DAF en el tratamiento de aguas residuales y la tendencia de los sistemas DAF en la última década.

### 2.1 Metodología para la revisión de la literatura

La revisión de la literatura de este trabajo de investigación se fundamenta en el método de búsqueda sistemática [49], [50], constituida principalmente por tres etapas: Planteamiento de las preguntas de investigación y definición de cadenas de búsqueda; aplicación de criterios de exclusión; y extracción de los datos, resumidas en la Figura 2.1. Las cuales permitieron obtener publicaciones recientes que evidencian la tendencia de la investigación con respecto al tratamiento de aguas residuales mediante DAF y el uso de técnicas de visión artificial para la identificación de los parámetros característicos de las microburbujas, así como también de los sistemas de adquisición de imágenes.

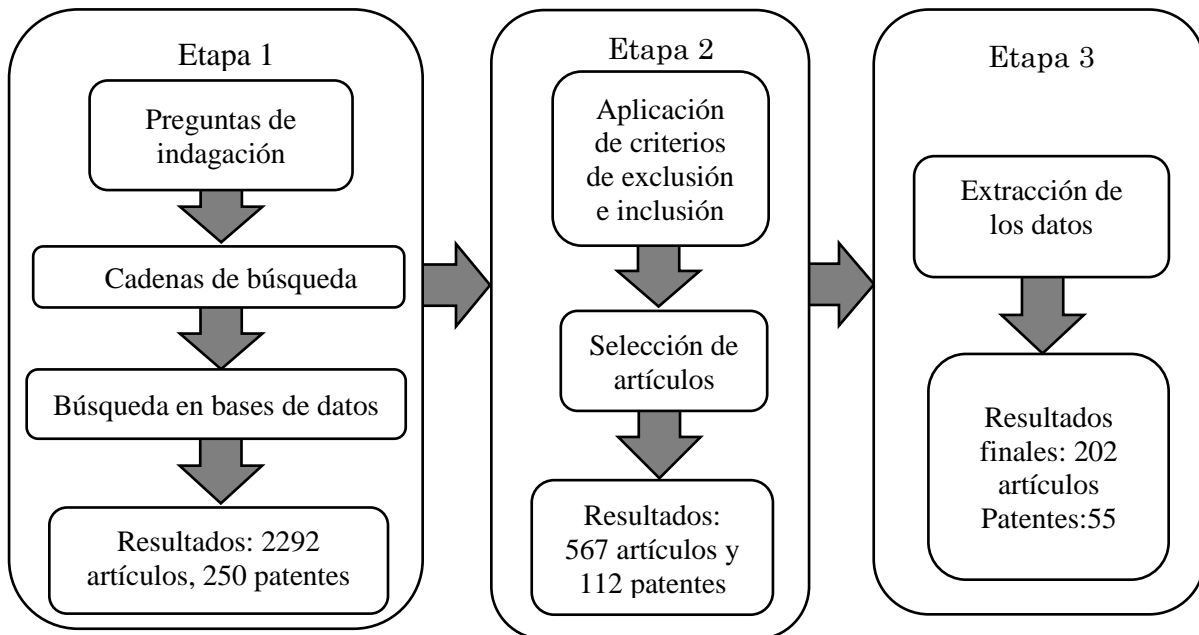


Figura 2.1 Metodología revisión de la literatura

### 2.1.1 Planteamiento de las preguntas de indagación y definición de cadenas de búsqueda

Se plantearon las siguientes preguntas de investigación para dar inicio a la búsqueda sistemática en relación al tratamiento de las aguas residuales mediante microburbujas y por consiguiente encontrar las respectivas respuestas.

P1 ¿Cuáles son los métodos más utilizados en el tratamiento de aguas residuales domésticas?

P2 ¿Qué estudios se han realizado en el tratamiento de aguas grasas mediante microburbujas?

P3 ¿Qué áreas de investigación han realizado mediciones de microburbujas?

P4 ¿Cuáles son los métodos utilizados en la caracterización de microburbujas?

A continuación, se formularon las siguientes cadenas de búsqueda relacionadas con los tratamientos de aguas residuales mediante la tecnología DAF, la vigilancia tecnológica y las técnicas de medición de los parámetros físicos de las microburbujas.

CB1 methods AND treatment AND wastewater

CB2 treatment AND wastewater AND greasy

CB3 microbubble AND treatment AND wastewater

CB4 microbubble AND treatment AND oil AND water

CB5 dissolved AND air AND flotation

CB6 system AND measurement AND microbubbles

CB7 technology AND measurement AND microbubble AND size

CB8 measurement AND microbubbles AND image AND analysis

CB9 characterization AND vision AND artificial AND microbubbles

Por tanto, las principales palabras clave utilizadas fueron: *wastewater*, *dissolved air flotation*, *DAF patents*, *bubbles measurement and image analysis*. Se realizó una búsqueda exhaustiva en seis bases de datos (ScienceDirect, Scopus, Springer, Web of Science, IWA Publishing y SciELO, Googlepatents, Patentscope) e informes estadísticos gubernamentales de los sitios web de las Naciones Unidas. Para la búsqueda de patentes DAF se usaron las bases de datos Patentscope, Google Patents y la Web of Science. En esta fase se encontraron 2292 artículos y 250 patentes en total.

### 2.1.2 Aplicación de criterios de exclusión e inclusión

La extracción de la información se llevó a cabo teniendo en cuenta el título y el resumen de las publicaciones. En la selección de los estudios más relevantes se tuvieron en cuenta los siguientes criterios: i) Se incluyeron artículos de investigación publicados en los últimos 5 años y de revisión publicados en los últimos 10 años, 2i) Se incluyeron las patentes

publicadas en los últimos 10 años, 3i) Se excluyeron las publicaciones de artículos que no están escritas en idioma inglés y 4i) Se excluyeron documentos como conferencias, libros o tesis de investigación. Aplicando los criterios se obtuvieron 228 artículos y 112 patentes.

### **2.1.3 Extracción de los datos**

Se obtuvieron 202 artículos sobre aplicaciones de recuperación de aguas residuales mediante DAF, generación de MB y medición de MB mediante visión artificial, como también 55 patentes relacionados al tratamiento de aguas residuales con flotación por aire disuelto (DAF) [Anexo digital, folder B].

## **2.2 Análisis de datos**

Esta sección analiza los artículos finales que se consolidaron para la investigación del presente trabajo en relación al tratamiento de las aguas residuales domésticas mediante la tecnología DAF, las técnicas para la caracterización de las mismas y los sistemas de adquisición de imágenes.

### **2.2.1 Antecedentes de las aguas residuales domésticas**

Las aguas residuales domésticas generalmente se constituyen de las aguas descargadas de los inodoros también llamadas aguas negras y de las aguas grises generadas de las actividades de limpieza caracterizadas por el alto contenido de detergentes, entre otros productos de la línea farmacéutica y cosmetológica. Además, contienen organismos biológicos como bacterias, virus, parásitos, etc, concentraciones elevadas de nitratos, fosfatos y materia orgánica los cuales son un riesgo inminente para los ecosistemas debido al efecto de la eutrofización [51].

La concentración de contaminantes de las aguas residuales domésticas varía de acuerdo a los factores socioeconómicos, culturales y geográficos de una región. La caracterización de las aguas negras ha mostrado mayor concentración en contaminantes orgánicos, como la demanda química de oxígeno DQO, patógenos y nutrientes en comparación con las aguas residuales grises [52].

#### **2.2.1.1 Contexto nacional**

Según el Sistema de Información Ambiental de Colombia, del Ministerio de Vivienda en Colombia cerca del 96% de las aguas residuales generadas por actividades domésticas no son tratadas correctamente. Se estima que más del 50% de las cargas contaminantes son provenientes del sector doméstico. Se destacan como zonas críticas: Bogotá-Soacha; Cali-Yumbo; Medellín- Valle de Aburrá; Bucaramanga-Floridablanca; Pereira-Dosquebradas; Barranquilla; Santa Marta entre otros. En efecto, alrededor de 1300 cuerpos de agua están siendo contaminados, entre los afectados se encuentran los ríos Cauca, Bogotá, Medellín, Magdalena, Otún-Consota, la bahía de Cartagena y Barranquilla entre otros [53]. Sin tener en cuenta las zonas rurales que no cuentan con servicios de saneamiento básico.



Las aguas residuales domésticas en el país se caracterizan por los altos contenidos de compuestos farmacéuticos, destacándose las ciudades de Bogotá, Medellín, Cali, Florencia y Tumaco. Un estudio realizado en Cali, Valle del Cauca mostró que las aguas residuales contienen paracetamol, naproxeno, ibuprofeno, diclofenaco, gemfibrozilo, ácido fenofibrico, gabapentina, carbamazepina y CBZ-Diol [54]. Por otra parte, el estudio [55] demostró que en la ciudad de Cali las aguas residuales domésticas alcanzan concentraciones de  $411 \pm 124$  mg/L, (promedio  $\pm$  desviación estándar)  $275 \pm 33$  mg/L,  $162 \pm 90$  mg/L y  $121 \pm 59$  mg/L en DQO, Demanda bioquímica de Oxígeno (DBO), Sólidos Suspendidos Totales (SST), y Sólidos Suspendidos Volátiles SSV respectivamente con un pH de 6.1-7.7 .

### **2.2.1.2 Contexto internacional**

Se estima que el sector doméstico municipal consume el 12 % del agua dulce a nivel mundial, de las cuales el 44% de las aguas residuales domésticas no se trata de forma correcta según el reporte de las Naciones Unidas [56]. En efecto, la descarga de aguas residuales domésticas sin ningún tipo de tratamiento o tratadas incorrectamente son las responsables de la pérdida de los ecosistemas hidrológicos de agua dulce en el mundo. Un caso particular se observa en China, en el cual un estudio indicó que más del 80% de los cuerpos de agua han sido afectados por la eutrofización [57].

Un estudio en China detalló que las aguas residuales domésticas de la provincia de Hunan contenían una concentración de  $346,50 \pm 93,97$  mg/L y  $45,23 \pm 10,67$  mg /L en DQO y  $\text{NH}_4^+ -\text{N}$  respectivamente [58]. En este aspecto, [59] estudia la concentración de nutrientes de las aguas residuales domésticas y de acuerdo a los resultados de la revisión de la literatura reporta que, la concentración de nitrógeno total está en 35–100 mg/L y fósforo total está en el rango de 18–29 mg/L. También, que la dieta natural contribuye con el 40 %, los aditivos alimentarios con el 29 %, el lavado de platos con el 9 %, la ropa doméstica con el 14 %, los productos de cuidado personal con el 1 %, los desechos de alimentos el 1 % y otras fuentes misceláneas con el 6 % del total de las cargas de nutrientes domésticos. Finalmente, las concentraciones de PT en los productos de limpieza varían en el rango de  $<0,001$  g–7,4 g por kg de producto, de 0 a 78,5 g/kg de producto en productos de cuidado personal, en el rango de 0,002–53 g/kg en productos para lavavajillas y 0,005–54 g/kg en productos de lavandería.

### **2.2.1.3 Selección de la fórmula de agua residual doméstica sintética**

En este trabajo de investigación se realizan los estudios sobre muestras de agua residual simulada, las cuales mediante formula química se preparan y reproducen con seguridad las características fisicoquímicas de las aguas reales. Son útiles debido a que se garantiza la reproducibilidad de los datos en los experimentos al disponer siempre de agua con las mismas características fisicoquímicas.

Sin embargo, las aguas residuales sintéticas no contienen parámetros microbiológicos por lo que es necesario agregarlos una vez han sido preparadas. Por efectos de seguridad en la manipulación de patógenos, parásitos entre otros organismos microbiológicos en esta investigación se trabajó únicamente con aguas residuales domésticas sintéticas con características fisicoquímicas. Por tanto, se revisa en la literatura las distintas fórmulas

químicas que los investigadores han planteado para establecer el agua residual doméstica sintética de trabajo.

Las aguas residuales sintéticas según [60] se basaron en Acetato de sodio ( $C_2H_3NaO_2$ ), Cloruro de amonio ( $NH_4Cl$ ), Fosfato monopotásico ( $KH_2PO_4$ ), Sulfato de Hierro (II) – ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ), Cloruro de calcio ( $CaCl_2$ ), sulfato de magnesio ( $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ ). Las características de estas aguas sintéticas presentaron DQO entre 800-1000 mg/L,  $NH_4^+-N$  (50-55 mg/L), Fósforo Total (FT) entre (10-15 mg/L) y Materia orgánica particulada (0%).

En [61] se prepararon las aguas residuales domésticas sintéticas considerando DQO y el amonio. Las fuentes de carbono, como la levadura, la leche en polvo y la peptona (derivada de la carne), se agregaron al agua del grifo para alcanzar una DQO de 150 mg/L. Se disolvió cloruro de amoníaco ( $NH_4Cl$ ) en agua de grifo. La concentración de amoníaco en las aguas residuales sintéticas se estableció en 120 mg/L. La concentración inicial de DQO y amoníaco fue de 150 mg /L y 120 mg/L, respectivamente.

En el estudio [62] el extracto vegetal y el extracto de carne sirvieron como base de los medios sintéticos, ya que incorporan el contenido de proteínas, carbohidratos y grasas. El resto de los componentes incluían cloruro de sodio, fosfato de potasio, urea, cloruro de amonio, sulfato de hierro, sulfato de magnesio y glucosa. En [63] las aguas residuales se constituyeron de acuerdo a la literatura en:  $H_3BO_4$  300g/L,  $CuCl_2$  40g/L, KI 60g/L,  $MnSO_4 \cdot H_2O$  320g/L,  $NaMoO_4 \cdot 2H_2O$  120g/L,  $ZnCl_2 \cdot 2H_2O$  140g/L and  $CoCl_2 \cdot 6H_2O$  300g/L.

En [64] la composición del agua residual sintética era la siguiente: 384 mg/L de acetato de sodio (300 mg/L en base a DQO), 200 mg/L de  $NH_4Cl$  (50 mg/L en base a  $NH_4^+-N$ ), 17,72 mg/L de  $KH_2PO_4$  (4 mg/L en base a  $PO_4^{3-}-P$ ), 90 mg/L de  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ , 10 mg/L de  $CaCl_2$  y 1 mL/L de elementos traza. La solución de traza estaba formada por los siguientes compuestos 1,5 g/L de  $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ , 0,15 g/L de  $H_3BO_3$ , 0,03 g/L de  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ , 0,03 g/L de KI, 0,12 g/L de  $MnCl_2 \cdot 4H_2O$ , 0,06 g/L de  $NaMoO_4 \cdot 2H_2O$ , 0,12 g/L de  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ , 0,15 g/L de  $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ , 10 g/L de EDTA y 2 g/L de extracto de levadura.

En [65] la composición se constituyó de peptone 160 mg/L, meat extract 110 mg/L, urea 30 mg/L,  $KH_2PO_4$  28 mg/L, NaCl 7 mg/L,  $CaCl_2 \cdot 2H_2O$  4 mg/L y  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$  2 mg/L. En [66], se constituye de glucosa 0.2 mg/L,  $NH_4Cl$  0.11 mg/L, NaCl 0,1 mg/L,  $MgSO_4$  0.003 mg/L,  $CaCl_2$  0.004 mg/L,  $NaCHO_3$  0.02 mg/L, NaOH 0.1 mg/L, trace elements 0.4 mg/L, y  $K_2HPO_4$  0.028 mg/L. De acuerdo a la Norma Alemana DIN 38412 para preparar agua residual sintética, el estudio [67] propone la siguiente fórmula de agua residual doméstica: Peptona 160 mg/L, extracto de carne 110 mg/L, urea 30 mg/L,  $KH_2PO_4$  28 mg/L,  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$  2 mg/L,  $CaCl_2 \cdot H_2O$  4 mg/L, NaCl 7 mg/L.

Por otra parte, en el estudio [1], las características de la preparación se modificaron a partir de la norma ISO 11733 según lo propuesto por [68] leche descremada en polvo (135 mg/L), almidón soluble (65 mg/L), acetato de sodio ( $C_2H_3NaO_2$ ) (40 mg/L), extracto de levadura (10 mg/L), cloruro de amonio ( $NH_4Cl$ ) (38 mg/L), urea (21,5 mg/L) y fosfato potásico monobásico fosfato monobásico ( $KH_2PO_4$ ) (22 mg/L) se disolvieron en agua del grifo para obtener una DQO de 200 mg/L. Finalmente en [69], el agua residual sintética se hizo a partir de agua del grifo y contenía 100 mg/L de DQO , 10 mg/L de  $NH_4^+-N$ , 5 mg/L de nitrógeno

orgánico total (TON) y 4 mg/L de fósforo total (PT) mediante la adición de glucosa,  $\text{NH}_4\text{Cl}$ , carbamida y  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , respectivamente, con trazas de  $\text{CaCl}_2$  y  $\text{MgSO}_4$ .

Por tanto, de acuerdo a la revisión de la literatura, la fórmula residual doméstica sintética para este trabajo de investigación (Tabla 1) se adopta del estudio [1] debido a que contiene los compuestos químicos descritos en las anteriores fórmulas y son de fácil adquisición y manipulación, adicionalmente se agregaron 15 gotas de aceite de cocina por cada litro de agua para evaluar la efectividad del sistema DAF en la remoción de O&G.

**Tabla 1.** Componentes de las aguas residuales domésticas sintéticas.

Compuesto	Cantidad (mg/L)
Leche en polvo sin grasa	135
Almidón soluble	65
Acetato de sodio	40
Extracto de levadura	10
Cloruro de amonio	38
Urea	21.5
Fosfato de potasio monobásico	22
Aceite de cocina	0,75

### 2.2.2 Parámetros fisicoquímicos de limpieza

De acuerdo a la resolución 631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia [70], establece los parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de Aguas Residuales Domésticas, (ARD) y de las Aguas Residuales no Domésticas (ARnD), de los prestadores del servicio público de alcantarillado a cumplir (Tabla 2).

La norma define a las ARD como las procedentes de los hogares, así como las de las instalaciones en las cuales se desarrollan actividades industriales, comerciales o de servicios y que correspondan a: Descargas de los retretes y servicios sanitarios; Descargas de los sistemas de aseo personal (duchas y lavamanos), de las áreas de cocinas y cocinetas, de las pocetas de lavado de elementos de aseo y lavado de paredes y pisos y del lavado de ropa (No se incluyen las de los servicios de lavandería industrial).

Por otra parte, las ARnD se definen como las procedentes de las actividades industriales, comerciales o de servicios distintas a las que constituyen aguas residuales domésticas, (ARD). Igualmente, se establecen los parámetros objeto de análisis y reporte por parte de las actividades industriales, comerciales o servicios, de conformidad con el artículo 18, los cuales se definen para los vertimientos puntuales a los cuerpos de agua superficiales y al alcantarillado público, deberá suministrarla el responsable de la actividad a la Autoridad Ambiental competente.

Como caso particular en el ámbito internacional, la Directiva 91/271/CEE del Gobierno de España, modificada por la Directiva 98/15/CE, define los sistemas de recogida, tratamiento y vertido de las aguas residuales urbanas establece los parámetros PT en 2 mg/L con un porcentaje mínimo de remoción en 80 % y el NT 10-15 mg/L con un porcentaje de remoción

de 70-80 %, como requisitos para los vertidos procedentes de instalaciones de depuración de aguas residuales urbanas mediante tratamiento más riguroso [71].

**Tabla 2.** Parámetros fisicoquímicos establecidos por la resolución 631 de 2015.

Parámetro	Unidades	ARD, y (ARD – ARnD) de los prestadores del servicio público de alcantarillado a cuerpos de aguas superficiales, con una carga menor o igual a 625,00 kg/DÍA DBO <sub>5</sub>
<b>Generales</b>		
DQO	mg/L O <sub>2</sub>	180
DBO <sub>5</sub>	mg/L O <sub>2</sub>	90
SST	mg/L	90
SSED	mg/L	5
Grasas & aceites	mg/L	20
SAAM	mg/L	Análisis y reporte
pH		6-9
<b>Hidrocarburos</b>		
HTP	mg/L	Análisis y reporte
<b>Compuestos de fósforo</b>		
Ortofosfatos	mg/L	Análisis y reporte
PT	mg/L	Análisis y reporte
<b>Compuestos de nitrógeno</b>		
Nitratos	mg/L	Análisis y reporte
Nitritos	mg/L	Análisis y reporte
Nitrógeno amoniacal	mg/L	Análisis y reporte
NT	mg/L	Análisis y reporte

\* DBO<sub>5</sub> es la Demanda bioquímica de oxígeno; SST son los Sólidos suspendidos totales; SSED son los Sólidos sedimentables; SAAM son las Sustancias activas al azul de metileno; HTP son los Hidrocarburos totales.

Por otra parte, de acuerdo a la revisión de la literatura, los parámetros de limpieza más estudiados en los tratamientos de aguas residuales domésticas usando distintos métodos de limpieza son los que se consignan en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Parámetros fisicoquímicos de remoción en el tratamiento de agua residual doméstica sintética.

Método de tratamiento	Eficiencias de remoción (%)						Referencias
	DQO	DBO	SST	NT	PT	Turbidez (NTU)	
Humedales artificiales	90.22	-	-	25.87	18.49	-	[69][72]
Lodos activados-DAF	63±14	-	78±12	-	-	-	[73]
Microalgas	99	-	-	88	91	-	[74]
Microalgas-bacterias	100	-	-	85.90	73.75	-	[57]
Tratamiento biológico	80.3	76.4	-	50	-	-	[75]
Electrocoagulación-electrooxidación	90.2	-	-	73.6	88.2	96	[76]
Micro-nano burbujas	> 80	-	-	-	-	84.56	[17][77][16]
Plantas	79,9-98,9		79,3-97,4	65,3-90,5	93,8-98,9	-	[78]

Reactor biológico de membranas	> 80	-	-	-	-	> 90	[79]
Lodos activados	-	-	-	12,45	46,66	-	[80]

Es importante resaltar, que de acuerdo a la resolución 631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia se deben tener en cuenta los parámetros de limpieza enmarcados en la Tabla 2, sin embargo, debido a que los sistemas DAF son eficientes en la eliminación de O&G [81], turbidez y SST se establecen en la Tabla 4 los parámetros de limpieza objeto de estudio para evaluar el efecto de los parámetros característicos de las MBs sobre estos. Debido a la aireación en el proceso DAF se evalúa el incremento del Oxígeno Disuelto (OD), aunque no es considerado un parámetro de remoción, su análisis es importante ya que es un indicador para determinar la calidad del agua, pues generalmente las bacterias presentes en esta tienden a consumir el OD para realizar los procesos metabólicos de degradación de contaminantes.

**Tabla 4.** Parámetros fisicoquímicos de remoción en el tratamiento de agua residual doméstica sintética.

Parámetro de estudio	Unidad
O&G	mg/L
Conductividad	$\mu$ S/cm
OD	mg/L
Turbidez	NTU
Color	Pt-Co
SST	mg/L
pH	-

### 2.2.3 Métodos de uso frecuente en los tratamientos de aguas residuales domesticas

De acuerdo a los estudios consignados en la Tabla 3 se infiere de la revisión de la literatura que los métodos más usados en los tratamientos de aguas residuales domésticas es el de lodos activados y el método del reactor biológico de membranas. Sin embargo, la implementación de estas tecnologías representa un alto costo en capital y también operativo particularmente en países en desarrollo [59].

Por otro lado, el estudio [17] hace una revisión crítica de los desarrollos recientes en aplicaciones de micro y nano burbujas para el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales. Este método evidencia la remoción eficiente de parámetros como la DQO, turbidez, entre otros indicadores de remoción que son complejos de tratar en los procesos de limpieza. Como lo son los aceites & grasas, micro plásticos, carbono orgánico, tintes, metaloides y metales pesados, patógenos fitopatógenos, coliformes fecales y totales de las aguas residuales. En este aspecto, en los últimos años, la tecnología de micro y nano burbujas se ha integrado para la eliminación de partículas finas [82], [83] en los tratamientos de aguas residuales [84]–[87] así como en procesos de flotación, aireación, desinfección y oxidación avanzada [16], [18], [88], [89], generalmente con una amplia aplicación en la industria petrolera [30], [90].

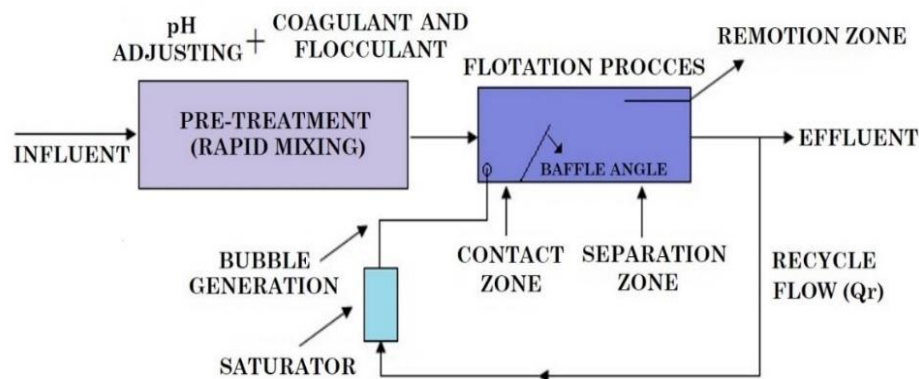
## 2.2.4 Antecedentes de los sistemas de flotación por aire disuelto DAF

En la década de 1970, el método DAF ya se utilizaba en el tratamiento de agua potable y residual en Finlandia, Suecia y Sudáfrica [91]. Actualmente, DAF tiene un rendimiento superior en la recuperación de agua en los sectores industrial, agrícola y doméstico-municipal.

DAF separa las partículas finas del flujo mediante MBs. El sistema convencional implica cuatro procesos: Generación de MB, pretratamiento químico de las aguas residuales, flotación y eliminación de lodos. Estructuralmente, la técnica consiste en un tanque de flotación dividido en dos zonas (contacto y separación) por un deflector. La zona de contacto garantiza la colisión y la adhesión de las partículas a los MB, que pasan a la zona de separación. Esta aglomeración de partículas-MB sube a la superficie por la fuerza de flotación, formando lodos o una capa de espuma.

Las MBs se generan por la precipitación causada por la despresurización repentina a altas presiones (normalmente 300-700 kPa) de una mezcla de agua y aire en un saturador (un tanque o tubo Venturi). Las burbujas generadas son conducidas a la zona de contacto [92]. En general, la cantidad total de aire transportado a la zona de contacto depende de la presión del saturador y el flujo de reciclaje ( $Q_r$ ) [91].

En muchos casos, dependiendo del agua residual a tratar, se utiliza un proceso de coagulación-floculación antes del tanque de flotación para asegurar una mejor adhesión de las micropartículas a las burbujas [93]–[95]. Por último, la etapa de eliminación de lodos suele estar compuesta por un sistema de paletas o desnatadoras que extraen los residuos para su posterior tratamiento [96], véase la Figura 2.2.



**Figura 2.2.** Diagrama del proceso de DAF convencional. Tomada de [97].

DAF es un método sólido para el tratamiento de aguas residuales de distinta composición de contaminantes, hasta en los tratamientos de agua potable [86], [98]–[101]. Su eficacia ha fomentado la integración de tecnologías híbridas con resultados positivos en la eliminación de contaminantes, cumpliendo las normas de vertido ambiental de turbidez, color, SST, DQO

y DBO. También se ha utilizado para la eliminación de aceites, grasas y partículas finas [73], [102], [103]. Las aplicaciones de la DAF en tratamiento de aguas residuales han permitido su avance tecnológico en los últimos años [104], [105].

DAF es eficaz en la eliminación de componentes de baja densidad presentes en elementos y químicos, compuestos vegetales, microorganismos y parásitos. En aguas eutróficas, ha mantenido eficiencias de eliminación estables en la remoción de turbidez, fósforo total, clorofila y DQO del 80%, 72%, 71% y 61%, respectivamente. Además, el oxígeno disuelto, en los ríos urbanos contaminados podría aumentar de 0,2 a 2 mg/L y de 3 a 3,5 mg/L gracias al aire disuelto en el agua, mitigando el impacto negativo en el medio ambiente [106].

Otro estudio mostró una eficiencia de entre el 11,1% y el 77,7% en la eliminación de la DQO mediante DAF y coagulantes a base de aluminio de las aguas residuales generadas por una fábrica de cosméticos. Sin embargo, las aguas residuales de la producción de cremas con filtro UV fue resistente al tratamiento DAF, independientemente del coagulante [107]. La eficiencia de DAF en la eliminación de antibióticos se ha evaluado en aguas residuales del sector farmacéutico, mostrando porcentajes de eliminación de DQO y penicilina G potásica del 70,41 % y 67,45 %, respectivamente, en condiciones óptimas de funcionamiento del sistema [108]. En Colombia, un importante estudio de ECOPETROL S.A. condujo al diseño de un nuevo sistema de flotación para el tratamiento de aguas en la industria petrolera. Se obtuvo una eficiencia de separación del 75 % en aguas de producción utilizando DAF en comparación con la flotación por aire inducido (IAF) [109], [110].

Los métodos de tratamiento híbridos combinados con procesos de tratamiento biológico y fisicoquímico se han adoptado con gran eficacia en las PTAR [103]. En general, comprenden la precipitación rápida, los hidrociclones y la DAF como etapa final complementaria. Debido a las propiedades fisicoquímicas de los MB, la técnica DAF puede eliminar ventajosamente las micropartículas y el material no sedimentado de las PTAR con bajos costes de operación y cortos tiempos de retención hidráulica [111].

DAF es una excelente etapa complementaria. Un estudio probó la eficacia de la DAF junto con un sistema de lodos activados de alta velocidad a escala piloto de la planta municipal de tratamiento de aguas de Aartselaar (Bélgica). Primero se eliminó la arena por sedimentación y, a continuación, las partículas grandes (tamaño de 1 mm) se eliminaron mediante un filtro de tambor. Por último, el líquido se transfirió a la unidad DAF, donde se utilizaron condiciones especiales para limpiar aún más el agua. Los resultados mostraron una eliminación del 78% del SST y del 68% de la DQO [73].

Otro estudio evaluó recientemente la capacidad de la DAF como posible nuevo mecanismo para diagnosticar parásitos intestinales en las heces. Los resultados mostraron eficiencias de recuperación de parásitos de 73,27 %, 58,12 %, 37,85 % y 91,89 % para *Ascaris lumbricoides*, *Hymenolepis diminuta*, *Giardia duodenalis* y *Strongyloides stercoralis*, respectivamente. Esto revela una línea de investigación prometedora de investigación para el DAF, ya que la parasitosis intestinal es un grave problema de salud pública en todo el mundo [112].

## 2.2.5 Parámetros de diseño y operación DAF

La identificación de los parámetros de los sistemas DAF requiere una comprensión de las etapas del proceso de limpieza. En el caso de los sistemas DAF convencionales, hay tres procesos importantes: pretratamiento químico (coagulación/floculación), generación de MB y flotación. Estos presentan una gran variedad de parámetros de funcionamiento y diseño. Se propone una selección de los principales parámetros DAF para destacar su relevancia a la hora de evaluar la eficacia del tratamiento de las aguas residuales.

El fundamento de los sistemas DAF se centra en el proceso de flotación, que en esencia utiliza el aire MB para capturar micropartículas, y luego separa las emulsiones producidas en función de sus propiedades fisicoquímicas [105]. Se ha demostrado que la reducción del tamaño de las burbujas aumenta el ángulo de contacto y la fuerza de unión entre las partículas; esto, a su vez, aumenta las oportunidades de formación de flóculos [113], [114]. El tamaño óptimo de las burbujas suele estar entre 20  $\mu\text{m}$  y 100  $\mu\text{m}$  [33] (véase la tabla 5).

De hecho, el estudio de las características del MB en el proceso de flotación ayuda a asegurar la estabilidad del MB y la eficiencia de la eliminación [115]–[117]. Cuanto mayor sea el diámetro de la burbuja, mayor será su velocidad de ascenso y, por tanto, menor será su vida útil [44], [118], [119]. Por ello, la importancia de los factores físicos: presión, flujo de aire disuelto y temperatura en la generación de MB. Dentro del proceso de flotación se presentan diferentes parámetros que dependen de la generación óptima de MB, del contacto entre las burbujas y de las características del agua residual [92], [120].

Los parámetros de la DAF están directamente relacionados con la configuración de los procesos de DAF y por ello varían cuando se utiliza la coagulación o la floculación [121]. Según la bibliografía, hay una serie de parámetros que pueden afectar a la generación óptima de MB, en términos de número, diámetro y velocidad de subida, así como a la eficacia de la eliminación de residuos [46], [118], [122]. Por ejemplo, estos incluyen la presión del aire, el caudal de entrada de agua, el caudal de aire inyectado [123], [124] (oxígeno disuelto (DO, generalmente 0,5-5,5 mg/l), que son determinantes para la generación óptima de MB [86], así como el caudal de reciclado o la tasa de recirculación (% R, siendo el 10% típico en DAF) [113]. Los parámetros de funcionamiento más reportados o principales se identifican a partir de lo anterior y se enumeran en la Tabla 5.

La coagulación y la floculación son procesos químicos de pretratamiento que afectan al rendimiento de la DAF ya que intervienen en las propiedades del agua residual. El uso de floculantes, coagulantes, tensioactivos y otros compuestos químicos son necesarios en las plantas de tratamiento de aguas residuales para obtener un tratamiento eficiente [125].



**Tabla 5.** Parámetros operativos convencionales DAF.

No.	Referencia	Diámetro MB ( $\mu\text{m}$ )	Presión (psi)	% R	Eficiencia de Remoción (%)
1	[126] Analytical and CFD models	40-50	65.27-87.02	5-20	-
2	[125]	-	72.52	20	100 (algal cells), 99.99 (adenosine triphosphate (ATP))
3	[127]	-	72.52	-	70 (DQO)
4	[121]	40	72.52	20	98( <i>Chlorella Sorokiniana</i> )
5	[94]	-	87.02	20-25	89-96 (Particles < 44 $\mu\text{m}$ )
6	[128]	40-80	Patm	-	52 (Particle removal)
7	Analytical and CFD models	45	14.50-58.02	20-29	76.6 (Oil droplets)
8	[129]	-	116.03	20	91.5 (Turbidity in dairy wastewater)
9	[130]	-	145.04	20	> 90 (Turbidity in dairy wastewater)
10	[29]	-	58.02-145.04	20-100	97.8 (Turbidity in dairy wastewater)
11	[95]	40-60	89.92	40	99 (Ni, Cu, Cr, Pb liquid radioactive waste)

\* % R: Tasa de Recirculación

Normalmente, en los sistemas DAF se integran dos unidades de coagulación-floculación como pretratamiento de las aguas residuales antes de aplicar el proceso de flotación [131], [132]. Durante la flotación, estos pretratamientos alteran el pH y el potencial Zeta en particular, lo que puede afectar la interacción partícula-MB y a la formación de flóculos [18], [133]. Por esta razón, es esencial conocer el tipo de coagulante, el floculante, su dosis óptima, su pH, el tiempo de mezcla, la velocidad y el tiempo de reacción (Tabla 6).

Los parámetros de diseño de DAF varían en función de la hidrodinámica del tanque de flotación, es decir, de su geometría [92], [134], del ángulo de los deflectores [135], de la cinética de flotación y salinidad [123], de la tasa de entrada de agua [136], de las características del dispositivo generador de MB [120], [137], de la tensión superficial, de la densidad del agua residual, disolución de aire, del número de MB y de la velocidad de subida de los MB [101].

**Tabla 6.** Parámetros de DAF floculación-coagulación.

No.	Coagulante	Floculante	pH	Mixing velocity [rpm]	Mixing Time [min]	Floc. Time [min]	Removal Efficiency (%)	Reference
1	Ferrous sulfate (FeSO <sub>4</sub> )	Cationic polymer TanFloc	4	120	5	-	97.8 (turbidity)	[29]
2	Chitosan/ polyaluminum ferric chloride (PAFC)	-	6	50-200	15-5	-	64.3 (Organic pollutants)	[100]
3	Aluminum sulphate, ferric chloride, Tanfloc SG and Zetag 8185	-	7	-	-	15-30	89.4–90.9 (Total phosphorus) 90.2–92.6 (Total Kjeldahl nitrogenTKN )	[121]
4	Combined polyacrylamide (PAM)	Tanfloc	7.6	120	5	5	> 90 (Turbidity)	[130]
5	Liquid ferrate / Ferric chloride	-	(8 ± 0.20)	100	2	20	92 (Organic matter)	[125]
6	Ripe Okra (Abelmoschus esculentus) / passion fruit (Passiflora edulis)	-	9 / 5	200	1	15	91.1 (Turbidity)	[129]
7	Ferric chloride (FeCl <sub>3</sub> )	PACl	2.5-3	-	-	-	98.9 (Total petroleum hydrocarbon)	[102]
8	-	Dismulgan V3377	7	144000-9000	1-5	-	> 99 (Oil removal)	[31]
9	Ferric chloride (FeCl <sub>3</sub> )	PACl	7.48	-	1	-	95 (COD and oil)	[138]
10	Polyaluminum chloride (PACl)	Cationic Polyacrylamide (C-PAM)	6.9	80-20	2-20	15	98.1 (TSS, wastepaper)	[131]
11	-	Polyacrylamide	4.5	120	1-3	5	80-82 (Sulfate-sodium salts)	[139]
12	FeCl <sub>3</sub> and PACl	-	7/6	-	0.25	20	96.38/95.38 ( <i>E. coli</i> )	[140]

Otro parámetro de diseño es la relación aire/sólidos (A/S), que está directamente relacionada con la eficiencia de eliminación requerida e indica la masa de aire necesaria en el mecanismo de presurización por unidad de masa de partículas [95], [141]. Este parámetro, a su vez, está asociado al % R y a la cantidad de oxígeno disuelto o de aire inyectado [86]. La ecuación correspondiente para un sistema con sólo reciclaje presurizado es (1):

$$\frac{A}{S} = \frac{1.3C_S(fP - 1)R}{X_f Q} \quad (1)$$

$C_S$  es la solubilidad teórica del aire (mg/L);  $P_a$  es la presión absoluta de saturación, atm absoluta;  $f$  es la fracción de aire disuelto a la presión  $P$ , normalmente 0,5;  $R$  es la tasa de recirculación;  $X_f$  es la concentración de sólidos a eliminar y  $Q$  es el caudal que entra en la celda de flotación (L/s). En el diseño de DAF, la cantidad de aire necesaria se determina por la concentración y el tamaño de las partículas en suspensión [123]. La concentración de partículas transportadas por las burbujas depende de su tamaño, y el grado de capacidad de carga está controlado por la disponibilidad de la superficie total [94], [111].

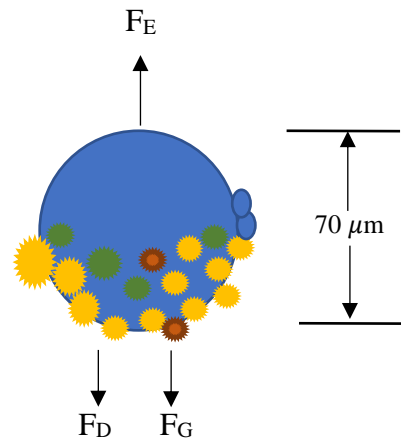
También intervienen otros parámetros, como la capacidad de carga hidráulica HLC (5-15m/h en los DAF convencionales) [91], la temperatura, la retención de gas [142], la tasa de recirculación (% R), la presión de aire, la tasa de carga superficial (SLR: 15-30 m/h para los equipos DAF de alto rendimiento) [132] y el tiempo de retención hidráulica (HRT) [95], [137].

## 2.2.6 Física de las microburbujas

Según la norma ISO / TC 281 las burbujas se clasifican en macroburbujas para diámetros entre (2-5) mm, en microburbujas (MB) para diámetros entre (1-100)  $\mu\text{m}$  y nanoburbujas (NB) o burbujas ultrafinas con diámetros  $< 1 \mu\text{m}$  [16], [143], [144]. Las MB presentan propiedades únicas que permiten una mejor transferencia de masa debido al aumento del área de transferencia de masa, mayor tiempo de residencia y menor potencial de coalescencia [32], [143], [144].

Estas propiedades proporcionan un contacto efectivo entre las partículas y las MB en el proceso de flotación [113], [114], [145]. Por el contrario, las macroburbujas tienden a flotar rápidamente obteniéndose una baja eficiencia de remoción [116], [119]. Las MBs se generan por la precipitación causada por la despresurización repentina a altas presiones (normalmente 300-700 kPa) de una mezcla de agua y aire en un saturador (un tanque o tubo Venturi).

Las burbujas generadas son conducidas a la zona de contacto del tanque DAF [92]. En general, la cantidad total de aire transportada a la zona de contacto depende de la presión del saturador y del flujo de reciclaje ( $Q_r$ ) [91]. Las burbujas de flotación, se caracterizan por tener un movimiento ascendente. Sobre una burbuja básicamente actúan tres fuerzas: la fuerza de empuje ( $F_E$ ), la fuerza de arrastre ( $F_D$ ) y la fuerza de gravedad ( $F_G$ ) ( Figura 2.3) [146].



**Figura 2.3.** Principales fuerzas que actúan sobre una MB ascendente en la flotación

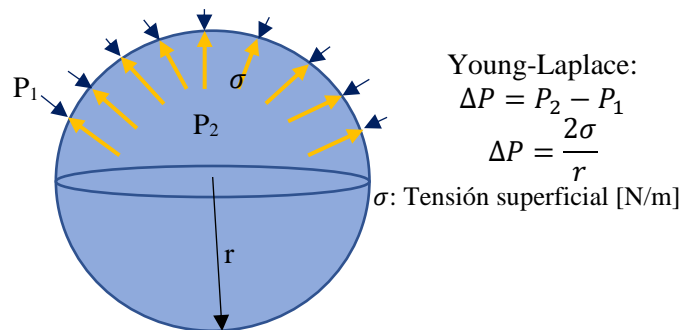
Matemáticamente se definen a continuación [146], donde  $V_b$  es el volumen de la burbuja,  $v$  es la velocidad de la burbuja con respecto al fluido circundante, y  $\rho_b$  indica la densidad de la burbuja:

$$F_E = \frac{4\pi R_b^3 \rho g}{3} \quad (2)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 C_D (\pi R_b^2) \quad (3)$$

$$F_G = \rho_b V_b g \quad (4)$$

En general, el principio físico de generación de MB implica reducción de la presión el más frecuente es el de la cavitación. En este aspecto, la generación de una burbuja evidencia una diferencia de presiones que actúan sobre su capa superficial. Young-Laplace demostró que la presión en el interior de una superficie esférica es siempre mayor que en el exterior, y que dicha diferencia de presión se incrementa cuando disminuye el radio de su superficie (Figura 2.4).



**Figura 2.4.** Diferencias de presión actuando sobre una MB, según la teoría de Young-Laplace.

El estudio [16] afirma que este fenómeno se diferencia de la ebullición en que el mecanismo impulsor no es un cambio de temperatura sino un cambio de presión, es decir, debido a la reducción de la presión por debajo de un determinado valor crítico a temperatura constante.

Básicamente se clasifica en: cavitación acústica, hidrodinámica, óptica y cavitación de partículas [17].

En las técnicas de tratamiento de agua por flotación se usa con frecuencia la generación de burbujas mediante cavitación hidrodinámica y saturación presurizada. En este aspecto, los dispositivos generadores de MB más usados son aquellos de flujo de líquido y gas, en el cual la presión se reduce por debajo de la presión de vapor por efecto de la alta velocidad dentro de la trayectoria del flujo. El Tubo Venturi, el tipo de eyector y el tipo de disolución a presión, son dispositivos que se basan en el flujo de líquido y gas [16].

En particular el dispositivo tubo Venturi es muy utilizado debido a que tiene una potencia de bombeo baja, genera MB de alta densidad menores a 100  $\mu\text{m}$  y no requieren de un tanque para la presurización lo que evita el incremento de costos operativos. Su funcionamiento se basa en la corriente de líquido que fluye desde la entrada del tubo hasta la garganta en la cual se acelera el flujo en dos fases. El cambio repentino de presión genera las MB por efecto de la cavitación hidrodinámica [17].

Por otra parte, la interacción MB-partícula es fundamental en la técnica DAF y depende principalmente del tamaño de las MB y de los flóculos contaminantes, por tanto la probabilidad de interacción flóculos-MBs es directamente proporcional al tamaño de los flóculos pero inversamente proporcional al tamaño de las burbujas [91]. Un estudio importante, analizó la distribución del número y tamaño de las burbujas que se adhieren a los flóculos en la zona de separación, añadiendo que la adhesión de partículas a las MBs requiere un ángulo de contacto lo suficientemente amplio. Es decir, la reducción del tamaño de los flóculos y las burbujas puede aumentar el ángulo de contacto y en efecto mejorar la eficiencia de adhesión [99].

### **2.2.6.1 Principales parámetros que inciden en las microburbujas DAF**

Los parámetros principales de las MB en los sistemas DAF son el diámetro y la velocidad de ascenso, debido a su efecto inminente en la efectividad del tratamiento de aguas residuales. Como se observó en la anterior sección, la disminución en el tamaño de las MBs aumenta el ángulo de contacto y la fuerza de unión de la partícula [114]. En consecuencia, permite más oportunidades de colisión con partículas suspendidas y una mayor remoción de agentes contaminantes incrementando la efectividad del proceso de flotación [18], [113], [114], [145]. Sin embargo, en los procesos de limpieza de agua residual, existen diversos factores que afectan el tamaño y la velocidad de ascenso de las MB, como por ejemplo el uso de surfactantes, coagulantes o aditivos químicos que facilitan la remoción de contaminantes [147].

Algunos fenómenos fisicoquímicos pueden incidir en la hidrodinámica de las MBs, como es el caso de las fuerzas de empuje, arrastre y gravedad, que pueden afectar la velocidad de ascenso debido al equilibrio de las fuerzas. En otras palabras, los surfactantes pueden reducir la velocidad terminal de las MBs porque reducen el diámetro de la burbuja y porque

aumentan la fricción entre la superficie de la burbuja y la fase líquida [147]. El método utilizado para la generación de burbujas también afecta sus propiedades y en efecto la efectividad del tratamiento del agua [28].

Finalmente, las características únicas de los MBs, como los tamaños más reducidos, velocidades de ascenso más bajas, área interfacial más grande, mayor presión interna y mayor tiempo de residencia, han estimulado los estudios sobre sus posibles aplicaciones en el campo de la ingeniería ambiental. Es esencial realizar un análisis completo para determinar el tamaño de la burbuja, la distribución del tamaño, la velocidad de ascenso, la transferencia de masa del gas, los potenciales zeta y la generación de radicales libres de los generadores [17]. En este aspecto, los parámetros característicos de las burbujas seleccionados en esta investigación son la velocidad de ascenso y el diámetro debido a su importante efecto en los tratamientos DAF.

### **2.2.6.2 Métodos de medición de los parámetros característicos de las MBs**

Se observó de la revisión de la literatura que la disminución en el tamaño de las burbujas aumenta el ángulo de contacto y la fuerza de unión de la partícula. En consecuencia, permite más oportunidades de colisión con partículas suspendidas en el proceso de flotación y una mayor remoción de agentes contaminantes [113], [114], [145] lo que influye en la efectividad del proceso de flotación [18]. Generalmente el rango del tamaño de las MB en la zona de contacto se define entre 40–80  $\mu\text{m}$  y 50–150  $\mu\text{m}$  en la zona de separación[92].

Cuanto mayor es el diámetro de la burbuja, mayor es su velocidad de ascenso y por ende menor su tiempo de vida [116], [119], de ahí la importancia de los factores físicos como la presión, flujo de aire disuelto y temperatura en la generación de MB [44], [118]. Por esta razón, se revisan los métodos para estimar los parámetros característicos de las burbujas (P. Ej., el diámetro y la velocidad de ascenso), así como la instrumentación requerida en la adquisición de imágenes y las técnicas de procesamiento de imágenes (Tabla 7).

Se han utilizado diferentes técnicas de análisis de imágenes (fotografías y videos digitales) para estimar los parámetros físicos de la MB en el proceso de flotación. Principalmente constan de un sistema de captura de imágenes y un software para el procesamiento de las mismas. En primera medida se encuentran las cámaras de alta velocidad equipadas con lentes de alta resolución [119], [148]. Por otra parte, el uso de equipos de medición de tamaño de partículas como el *Laser particle size analyzer* (LPSA) [16], [42], [44], microscopio óptico [123], [149], o métodos como *Monofiber optical probe* [150], y la *Electrical Impedance Tomography* (EIT) [151], [152] entre otros, también han sido utilizados en el estudio de los parámetros de las MB. Sin embargo, mediante el cálculo también es posible estimar los parámetros de interés de las burbujas, por ejemplo, la ley de Stokes para la medición de las velocidades de subida [92]. Finalmente, en la línea de procesamiento de imágenes, la visión artificial o visión por computador ha permitido detectar objetos a partir del análisis de imagen para posterior estudio o clasificación [149], [153]–[155].

**Tabla 7.** Métodos para medición de MBs.

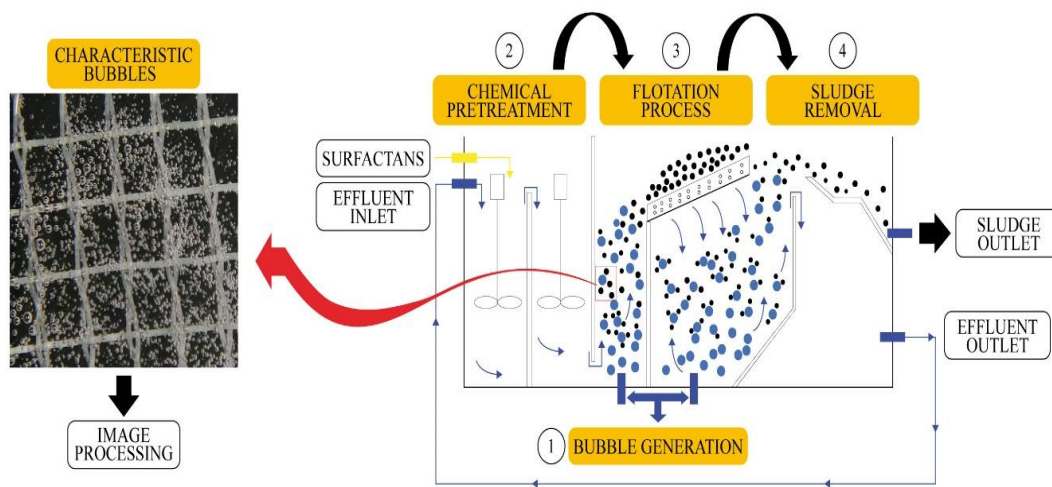
No	Image Acquisition System	Resolution (pixels)	Image processing Technique	Diameter ( $\mu\text{m}$ )	Ref.
1	Camera PCO model Pixelfly-USB	1360 $\times$ 1024	DIP Software Image J	25-30	[18]
2	Camera D5500 Nikon	4928 $\times$ 3264	DIP Software Image J	75.9	[156]
3	Camera FASTCAM Mini UX100	1280 $\times$ 248	Otsu-Canny algorithm	330-530	[157], [158]
4	Spraytec system Malvern Instrument UK	-	Spraytec software	28.46-267.63	[144]
5	Camera Phantom Miro M310	1200 $\times$ 800	Distance Transform- Watershed algorithm	100	[116]
6	MotionBLITZ EoSenseCube 7	1696 $\times$ 1710	Multi-layer background subtraction	100-180	[148]
7	Camera FASTCAM SA5	1024 $\times$ 1024	algorithm- Transform CHT	900-1500	[87]
8	Camera Phantom Miro C110,	1280 $\times$ 1024	Canny algorithm	288.4	[119]
9	Camera FASTCAM Mini UX100	1280 $\times$ 248	-	35-500	[93]
10	Camera FASTCAM Mini UX100	1280 $\times$ 248	-	260-380	[84]
11	Camera SpeedSense M320 (PIV) technique	853 $\times$ 533	Otsu-Canny algorithm Analysis operations	1660	[159]
12	Camera Sony XC-HR70- MLH-10X (Moritex® Corporation lens	1024 $\times$ 768	Watershed algorithm	1370-2660	[160]
13	LPSA Mastersizer 2000 SM	-		31-58	[42]
14	LPSA Mastersizer 2000 SM - Camera Canon 5D Mark II	-	ImagePro Plus 6.0 software DIP	100-727	[44]
15	Camera Photron APX	512 $\times$ 512	First version algorithm	100-200pixel*	[85]
16	Camera Panasonic LX7	2048 $\times$ 2048	Watershed algorithm - Canny algorithm	700-1000	[161]
17	High-speed camera	2048 $\times$ 2048	Transform CHT	10-800	[162]
18	Camera CCD-lens (NIKON AF 85 mm/F1.4)	4000 $\times$ 2672	Concave point extraction algorithm	Elliptical*	[163]
19	Camera UI-2250SE-M-GL, <i>IDS</i>	1600 $\times$ 1200	Transform CHT- Single Bubble Algorithm	60-131	[113]
20	AVT Industrial video camera	600 $\times$ 800	CCN	Elliptical*	[153]
21	Camera AVT-Piked-F-145	692 $\times$ 518	Watershed algorithm	Elliptical*	[154]
22	Camera QImaging Micropublisher 3.3 RTV, BC - Optical microscope Olympus CX41	925 $\times$ 694	Watershed algorithm- Transform CHT	20-50	[149]
23	McGill bubble size analyser (MBSA)	4096 $\times$ 2048	DFT-Otsu algorithm	500	[114]
24	Camera, Phantom v641	2560 $\times$ 1600	ASM	1000-4000*	[164]
25	A2 Photonic Sensors' monofiber optical probe	-	DIP	1000	[150]
26	Camera (Phantom V1210	1280 $\times$ 800	Analysis operations of image	22-220	[165]
27	Pixelink PL742 camera- Photron FastCam SA3	1024 $\times$ 1024	Analysis operations of image	< 1000	[166]
28	Digital microscope MSP-3080	960 $\times$ 720	-	197	[90]
29	Camera Photron FASTCAM SA5	1024 $\times$ 1024	Watershed algorithm	500-1000	[167]
30	Camera Motion Pro X3, REDLAKE	1280 $\times$ 1024	Otsu -Canny algorithm	830	[43]
31	High-speed camera	1.1 MPixel	GSC	230-250*	[168]
32	CCD camera Speed sense 1040 -microscope Questar QM-1	2320 $\times$ 1726	Shadow tracking algorithm	20-250	[123]
33	Camera Kappa CF112	-	Watershed algorithm	166	[145]
34	EIT	-	Image reconstruction algorithm	2300	[151]

\*Burbujas con geometría distinta a la esférica

Cada método de adquisición de imágenes presenta sus ventajas y limitaciones en cuanto a eficiencia, uso, costos y rangos de distribuciones de tamaño. Por ejemplo, la técnica de medición intrusiva no es tan eficiente debido a que tiende a influir en la estructura del fluido y alterar las mediciones [42], [113], [164], mientras que el método no intrusivo no afecta la dinámica del fluido en el sistema [113], [151]. Por esta razón, la técnica fotográfica (no intrusiva) ha ganado interés en los investigadores en los últimos años [115], [145]. Por otro lado, equipos como los microscopios electrónicos, equipos de difracción laser como el *Spraytec* o los *LPSA* no son recomendados para usos industriales ya que están diseñados para ambientes de laboratorio además de sus elevados costos en comparación con las cámaras fotográficas.

### 2.2.6.3 Técnicas de visión artificial para la caracterización de las MBs

El Procesamiento Digital de Imágenes (DIP) es un método que se usa a menudo para estimar los parámetros característicos de las burbujas en los procesos de flotación [115]. Generalmente incluyen una etapa de preprocesamiento, seguida de segmentación de imágenes para detectar las posiciones de las burbujas e identificar su forma (único, superpuesto, parcialmente borrado) y finalmente la extracción de características como los diámetros de las MBs y sus respectivas posiciones. Los algoritmos de visión por ordenador y de aprendizaje automático [148], [168] son muy útiles para estimar los parámetros característicos de las burbujas, como la forma [115], el tamaño [113], [114] y la velocidad de ascenso [143]. También pueden utilizarse para supervisar de cerca el proceso de flotación [18] (véase la Figura 2.5).



**Figura 2.5.** Principales pasos de un sistema DAF convencional. Tomada de [97].

Actualmente se encuentran diferentes técnicas DIP con algoritmos de operaciones básicas como la binarización, umbralización, eliminación de ruido [84], [87], [113], [159] y otros algoritmos un poco más laboriosos como *Convolutional Neural Networks* (CNN) [169], [170] entre otros. Por ejemplo, en [87] se llevaron a cabo seis operaciones principales para



el análisis de burbujas: 1) Enfoque de la imagen para aclarar el borde de la burbuja; 2) Recorte de la(s) burbuja(s) y borrado del fondo; 3) Detección del borde de la(s) burbuja(s) con el detector de bordes Canny; 4) Relleno de la(s) burbuja(s) con un límite cerrado; 5) Eliminación de los límites no cerrados; 6) Salida de los parámetros de las imágenes de burbuja.

En [114], se propone una técnica que se basa en la Transformada Discreta de Fourier para estimar el diámetro medio *Sauter*, de una población de burbujas, un poco diferente al DIP convencional con eficientes resultados. Por otro lado, en algunos estudios la caracterización de las burbujas se logra con programas especializados para procesar los datos que no describen las técnicas DIP, por ejemplo, en [144] se usó el software *Spraytec* del equipo de difracción laser y el software *ImagePro Plus* del LPSA en [42], [82].

En general en el DIP cada una de las imágenes digitales se trata como una matriz de datos (procesamiento de filas y columnas) en píxeles [171]. Se implementa un preprocesamiento el cual consiste generalmente en las siguientes operaciones: se ajusta el contraste de la imagen, se convierte la imagen RGB a escala de grises, se realiza una resta entre las imágenes en escala de grises y los nuevos fondos [148]. Luego, se implementa un método de filtrado para reducir el ruido y la distorsión de la imagen, generalmente se usa el filtro de la mediana, *The top-hat*, *The bottom-hat filter* [43], [84], [87], [116], [158], como paso siguiente se efectúa umbralización- binarización mediante el algoritmo de Otsu [43], [84], [114], [158], y finalmente los procesos ajuste de brillo, *Fill the black in the holes*, antes de aplicar el proceso de segmentación [43], [84], [156], [159], [160], [165], [168].

A continuación, se procede a segmentar, seguido de las operaciones detección de bordes generalmente mediante algoritmo de Canny [84], [87], [113], [164] relleno de bordes, eliminación de burbujas aisladas del plano focal, eliminación de los objetos que se tocan (se eliminan los objetos que tocan el borde) y extracción de características. Finalmente, los datos recopilados de las imágenes binarias se analizan cuantitativamente para obtener los parámetros de la burbuja [113], [116], [145], [159], [160]. Estas operaciones se realizan generalmente con una gran cantidad de imágenes escogidas al azar para obtener resultados confiables, por ejemplo, en [18] el software examinó un total de 150-200 imágenes de burbujas para su respectivo análisis.

La superposición de burbujas en los procesos de flotación se presenta con frecuencia [85], [90], [164], lo que dificulta el proceso de reconocimiento de burbujas, por tanto, técnicas de procesamiento de imágenes como el algoritmo *Watershed*, la *Transformada de Hough* entre otros permiten segmentar burbujas superpuestas para extraer información de sus características. Sin embargo, antes del proceso de segmentación en el procesamiento de imágenes es necesario identificar la geometría de las burbujas, ya que en la aplicación práctica las burbujas no siempre son perfectamente esféricas o de geometría precisa [85], [153], [157], [164], [168].

La segmentación mediante el algoritmo *Watershed* se usa a menudo para determinar con precisión las características de las burbujas como su velocidad y diámetro [85], [145], [149], [160], [161], [167]. En algunos estudios, el algoritmo de las transformaciones de distancia se

lleva a cabo seguido del proceso de este tipo de segmentación ya que permite distinguir las burbujas superpuestas y en contacto [116], [145], [149], pero cuando la forma del objeto no es convexa, la imagen de la superficie topográfica basada en la transformada de la distancia podría conducir a una segmentación excesiva [154]. En este aspecto, la sobre-segmentación es una dificultad que se presenta con frecuencia en el algoritmo *Watershed* [85], [116], [149].

Aunque la sobre-segmentación es una limitación del algoritmo *Watershed* se han desarrollado distintos métodos para resolver esta dificultad [153]. Por ejemplo, un algoritmo *Watershed* basado en un marcador óptimo para la medición del tamaño de la burbuja en una planta de flotación de plomo y zinc se propone en [154]. En este trabajo los autores consideraron que *The marker-based Watershed segmentation* es una buena opción para evitar la sobre-segmentación de las imágenes de burbujas entre métodos como *The hierarchical Watershed segmentation* y *Post-merging Watershed segmentation* que los autores también proponen para solucionar esta dificultad.

La detección de objetos esféricos generalmente se realiza utilizando algoritmos basados en la *Transformada de Hough* [162], ya que permite calcular el centro del círculo y su radio. Aunque este método es muy interesante para la detección de objetos, es conocido por ser costoso en tiempo y memoria [85], [149], además ha demostrado ser eficiente solo para burbujas esféricas [114], [172]. Los algoritmos Detección de burbujas mediante sustracción de fondo multicapa y sustracción de fondo personalizada seguida de detección circular basada en la *Transformada Circular de Hough* (CHT, del inglés *Circular Hough Transform*) se utilizaron en [148] para estimar las características de las burbujas como el diámetro con eficientes resultados.

En [113], se desarrolló una técnica de análisis de tamaño de burbuja en línea basada en DIP para evaluar el rendimiento de un dispositivo DAF de laboratorio. El procesamiento de la imagen se basó en el procedimiento: *Antishading image, Binarization threshold, Background threshold, Reject particle, Edge gradient interpolation, Canny edge filter, Circularity, Fill hole, Hough transformation, Single Bubble Algorithm* y *Anti-double count filter*. En este estudio el algoritmo de la Transformada de Hough permitió el reconocimiento de burbujas superpuestas, pero presentó debilidades en la búsqueda de pequeñas burbujas individuales, por lo tanto, se complementó con el algoritmo para una sola burbuja

En el caso de burbujas con geometría elíptica se propone en [168] el algoritmo *Global Segments Combinations*, un método robusto y eficiente para reconocer burbujas altamente superpuestas. En [85] se estudió una nueva técnica basada en *The first version algorithm* para mejorar la medición de burbujas elipsoidales. El desafío para los autores fue modificar este algoritmo para determinar si el objeto detectado era una burbuja única, truncada o superpuesta. Las burbujas superpuestas se lograron separar mediante el algoritmo *Watershed*, el cual implementó una técnica para identificar los puntos de inflexión en los contornos de los objetos con el fin de evitar la sobre-segmentación y verificar la veracidad de la segmentación.

En [164] se estudió una nueva técnica DIP para calcular el volumen de la burbuja y el área de superficie basada en el método de segmentación para burbujas grandes con geometría

deformada. El método de segmentación adaptativa tiene la capacidad de identificar el eje de simetría de la burbuja y cortar la burbuja en una dirección de segmentación adecuada. Por otra parte, en [163], se planteó un nuevo algoritmo de extracción de puntos cóncavos para segmentar burbujas superpuestas de diferentes formas y determinar sus parámetros. El procesamiento de imágenes se dividió principalmente en Preprocesamiento de imágenes, segmentación (división de contornos) y reconstrucción de burbujas segmentadas. El método de reconstrucción propuesto logró resolver efectivamente la falta de precisión del método convencional debido a las diversas formas de las burbujas.

La detección de burbujas se torna aún más tediosa cuando se superponen en áreas críticas de procesos tecnológicos y energéticos, como el procesamiento de petróleo, productos químicos entre otros, en los cuales factores como la iluminación de las máquinas de proceso y el entorno de trabajo entorpecen las mediciones [163], [170]. Por ejemplo, los estudios de flotación de espuma de oro y antimonio en [153] se efectuaron mediante CNN y se utilizaron tres métodos diferentes para realizar el reconocimiento: *Clustering de k-means*, ajuste de la función *Kernel* y el *Algoritmo de Desplazamiento de la Media Ponderada* basado en el conocimiento previo demostrando alta precisión y velocidad de cálculo del método propuesto.

En [172] se estudió un método para la detección de objetos transparentes como burbujas en medio líquido. El método basado en la detección de *Concentric Circular Arrangements* probó su rendimiento en imágenes de dispersión de aceite en un entorno industrial con resultados satisfactorios. Por otra parte, en los últimos años la necesidad de optimizar los tiempos de procesamiento de imágenes de burbujas ha incursionado en el desarrollo de algoritmos en línea ya que el análisis manual de imágenes o también llamados algoritmos fuera de línea (*Offline*) son generalmente costosos en tiempo (Tabla 8).

**Tabla 8.** Métodos para medición de MBs.

No	Técnicas	Algoritmo Off-On line	Parámetro de la burbuja	Processing time (s)	Año	Ref
1	First version algorithm	Offline	BSD- velocity-trayectory	-	2019	[85]
2	Concave point extraction algorithm	Offline	BSD-diameter	-	2016	[163]
3	Transform CHT-Single Bubble Algorithm	Online	BSD-diameter	60-300	2018	[113]
4	CHT-CCN-CCA-WaldBoost+LBP-WaldBoost+Trees	Online	BSD-diameter	-	2018	[170]
5	CCN	Online	Bubble detection	120-180	2018	[153]
6	Watershed algorithm	Offline	Bubble detection	-	2019	[154]

7	Watershed algorithm- Transform CHT	Online	BSD-diameter	-	2018	[149]
8	DFT-Otsu algorithm	Online	BSD-diameter	0.18-0.03	2018	[114]
9	GSC	Online	Bubble detection	120	2018	[168]
10	CCA	Online	Bubble detection	40	2016	[172]

Aunque se han obtenido avances significativos en algoritmos de visión artificial y aprendizaje automático para resolver de forma eficiente las dificultades en cuanto a la segmentación y detección de burbujas superpuestas, es posible afirmar (de acuerdo a la literatura revisada en este trabajo) que, una directriz futura de investigación podría ser optimizar los algoritmos en línea en cuanto a la medición de los parámetros de burbujas. Es decir, las velocidades de ascenso, volúmenes, trayectorias entre otros, que también son importantes para la eficiencia del proceso de flotación en los sistemas DAF, ya que en la literatura generalmente solo se reportan algoritmos en línea de mediciones de diámetros [43], [73], [85], [92], [164].

### 2.2.7 Revisión del estado de la tecnología

La amplia trayectoria de la tecnología DAF ha dado apertura al desarrollo de diversas patentes logrando en algunos casos que el sistema sea más compacto y óptimo en su funcionamiento. La tecnología DAF aún se mantiene vigente y a la espera de mejoras en las dificultades que se han identificado de su larga experiencia. Por lo tanto, se revisan 55 patentes de los sistemas DAF en los últimos diez años, con el objetivo de proporcionar información pertinente sobre el estado actual de la tecnología y estimar sus directrices futuras como sistemas potenciales en el tratamiento de aguas residuales.

Se presenta el listado de las patentes consolidadas con su respectivo número de publicación y se definen las categorías I Tanque de flotación, II Generación e inyección de las MBs, III Remoción de lodo y IV Pretratamiento químico [Anexo digital, folder B patentes]. Como se revisó en la sección el diseño convencional de un sistema DAF consta principalmente de una etapa de pretratamiento del fluido residual, una etapa de flotación representada por un tanque ensamblado con un sistema de generación e inyección de burbujas y finalmente una etapa de remoción de lodo conformada en general por un sistema de desnatadores.

Un diseño novedoso a comienzos de la década de los 90s fue el sistema CocoDAFF (*Comparison of Counter-current Dissolved Air Flotation/Filtration*) con número de publicación GB2263694A, patentado por *Thames Water Utilities*. Esta invención rompió el esquema convencional de los sistemas DAF modificando la hidráulica del proceso, lo cual logró un sistema compacto, con tiempos de floculación a 15 min, las tasas de carga superficial de 10-15 m/h, y las tasas de reciclaje del 10%. Los cambios fueron significativos para los investigadores ya que se superaron las tasas de carga convencionales inferiores a 8 m/h y tiempos de floculación de hasta 45 min [132].

La optimización de la etapa coagulación-floculación, que es previa al proceso de flotación, ha sido de interés para muchos investigadores en el transcurso del avance tecnológico DAF, debido a que el pretratamiento del efluente facilita las interacciones entre burbujas y partículas. Además, la efectividad del proceso de flotación depende en gran manera de la formación de aglomerados de burbujas-partículas que determinan la remoción de las sustancias contaminantes.

Es decir, convencionalmente el tanque de flotación se divide en tres zonas que se identifican como zona de coagulación-floculación (separadas por paredes divisorias con sus respectivos agitadores), zona de contacto y zona de flotación (ambas zonas separadas por un deflector de características especiales que permite la distribución uniforme de las burbujas). Estas patentes cuentan con sistemas convencionales de inyección de burbujas en la zona de contacto ya sea mediante boquillas, burbujeadores, aireadores o tubos Venturi CO6560176A1.

Sin embargo, la patente con números de publicación KR101990771B1/KR102016049B1, hace referencia a un sistema conformado por un cono vertical de distribución de MB para evitar el uso de dispositivos de alto consumo energético, como bombas de presurización, compresores y tanques de presurización, así como boquillas ramificadas y/o múltiples. Lo que caracteriza la invención como un sistema de bajo costo en mantenimiento de acuerdo con el costo de instalación y los requisitos de potencia.

Otros diseños de patentes DAF como en KR20190042250A, incluyen un tanque de coagulación-floculación externo al tanque de flotación. De igual forma ocurre en la patente KR101808813B1, aunque este diseño es diferente al convencional ya que incluye: un tanque de tratamiento químico, una unidad de ciclón, un tanque DAF circular y un deshidratador. No obstante, patentes como WO2016050802, CN107176643, CN106145232A, CN105481039A, CN106587244A, CN209721640U, ES2591033T3 no requieren unidades externas o zonas de floculación-coagulación dispuestas en el tanque de flotación. Sin embargo, algunas patentes hacen uso de floculantes/coagulantes que son inyectados en el agua presurizada o directamente en la zona de mezcla.

Los sistemas DAF han operado en conjunto con otros métodos de tratamiento de aguas residuales, en particular con los métodos biológicos [86], [94], [102], [141]. En efecto, se ha dado apertura al desarrollo de novedosos equipos DAF híbridos a fin de alcanzar con eficiencia los estándares de descarga exigidos por la normatividad ambiental. Un sistema BIO-DAF para tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales se desarrolló en la invención WO2019046705A1. El equipo integra múltiples procesos de tratamiento fisicoquímico y biológico en una sola unidad para eliminar eficazmente los parámetros de remoción BOD, TSS, amoníaco, nitrógeno total y fósforo total de las aguas residuales. Este sistema incluyó una unidad DAF primaria con zonas de tratamiento de medios biológicos y una unidad DAF secundaria.

Aunque el avance tecnológico DAF ha logrado desarrollar dispositivos eficientes y rápidos, no son tan frecuentes los avances en cuanto a la operatividad del sistema con bajos consumos de energía. Por ejemplo, la invención CN105481039A promete en el proceso de tratamiento

un tiempo de retención hidráulica de 5-10 segundos, presión de trabajo normal de 0.25 MPa, además una tasa de saturación de gas disuelto a 80% o más. Sin embargo, el sistema está conformado por elementos de alto consumo energético como el compresor de aire, agitador mecánico, motores y bombas de agua que aumentan los costos de operación del sistema.

La invención CN105457985A describe una máquina DAF eficiente para la eliminación de residuos domésticos de la ciudad. La máquina está provista de un tanque, una bomba de agua, un recipiente de aire disuelto a presión y un compresor de aire. Los residuos recolectados se tratan y se utilizan como materia prima para producir fertilizantes orgánicos y materiales de aislamiento térmico para la construcción, de modo que se logre la recuperación de los recursos de la basura. Aunque esta invención promete reducción de costos en cuanto a mano de obra y recursos, no garantiza la reducción del consumo energético que provocan los dispositivos que la accionan.

El proceso de remoción de lodo en los sistemas DAF es otro factor que se debe tener en cuenta para la reducción del consumo energético del sistema. En forma convencional este proceso se hace mediante el uso de una máquina raspadora CN208471591U, en los cuales el consumo de energía podría elevarse debido al funcionamiento de estos sistemas a través de motores. En KR101636693B1 se desarrolló un equipo DAF con un sistema de remoción de lodos no metálico, conformado por un conjunto de raspadores en paralelo accionados por un motor. El lodo es removido y depositado en la zona de recolección ubicada en el tanque de flotación separada por una pared divisoria. La invención CN104671316A, en el proceso de remoción de lodo también hace uso de raspador machine con la salvedad de que la cadena está hecha en acero inoxidable para evitar dificultades como la corrosión entre otros factores por efecto del entorno ambiental.

La automatización y el control de los sistemas DAF han aportado notablemente al desarrollo tecnológico en los sistemas DAF optimizando los procesos de tratamiento de aguas residuales con alta efectividad en sus resultados CN208471591U, JP2017503649A. Por ejemplo, la patente CN204490556U promete un dispositivo DAF eficiente provisto de un medidor de flujo de entrada de aire y una válvula de ajuste. El tanque de disolución de aire está equipado de un dispositivo de escape automático con fines de mejorar la eficiencia de la disolución del aire.

En CN107176643 se hace referencia a un sistema DAF de separación por lotes con sensor de nivel para óptimos resultados en el tratamiento de aguas residuales. La invención CN106587244A proporciona un dispositivo DAF circular de funcionamiento controlado automático, eficiente, adecuado para eliminar materia acuática suspendida, sustancias coloidales, aceitosas y materia orgánica macromolecular en el proceso de tratamiento de agua con bajo consumo de energía.

Los años de término de algunas patentes DAF (Tabla 9) permite estimar el estado de la tecnología actual con el fin de buscar directrices futuras. La patente US20130256221A1, se conoce en el medio comercial como EquaCel® proporciona un sistema compacto de tratamiento de lodos activados de una o dos etapas de alta velocidad.

**Tabla 9.** Patentes actuales del sistema DAF. I Tanque de flotación, II Generación de microburbujas, III Eliminación de sólidos en suspensión y lodos, IV Pretratamiento químico.

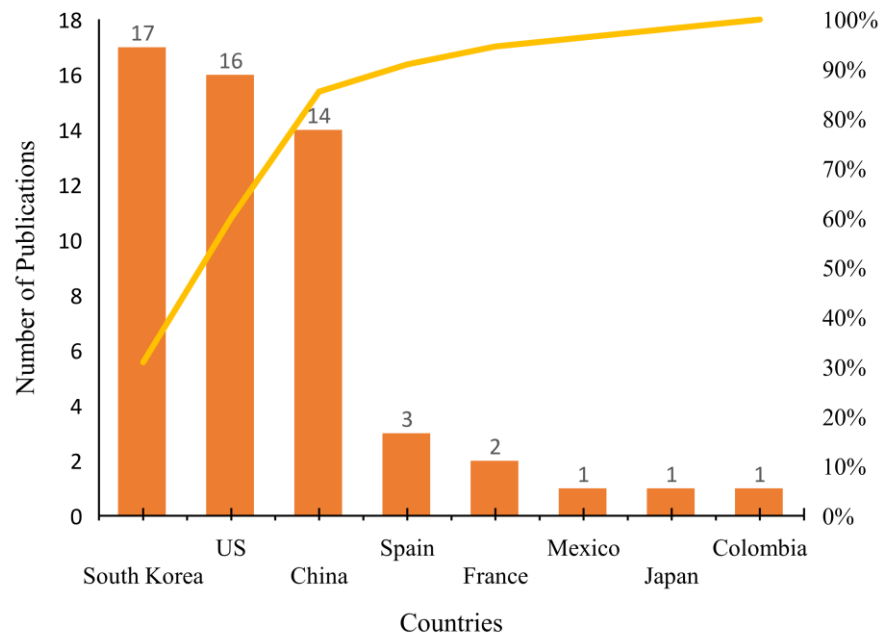
No	Publication/year	Claim	Categories				Country	Expiration Year
			I	II	III	IV		
1	US20130256221A1 (2013)	Equalization reactor wastewater treatment tank	X	-	X	X	US	2034
2	US20150291445A1 (2018)	DAF system and method	X	-	X	-	US	2035
3	US20120006732A1 (2013)	A modular dual vessel dissolved aeration flotation treatment system	X	X	X	X	US	2030
4	EP2707332B1 (2014)	Rapid Dissolved Air Flotation Device	X	X	X	-	France	2032
5	US8632685B2 (2014)	Multi-stage DAF and advanced oxidation (MDAF-AO)	X	X	X	X	US	2032
6	US9422168B2 (2016)	DAF with collection channels	X	X	X	-	US	2034
7	EP3162766B1 (2020)	DAF system	X	X	X	x	France	2036
8	WO2016099243A1 (2016)	Artificial vision system	-	-	-	-	Mexico	Pending
9	US20140014562A1 (2016)	DAF with filtering system	X	X	X	X	US	2031
10	JP2017503649A (2017)	Automatic control valves	X	X	X	X	Japan	2034
11	ES2591033 (2017)	Filter system	X	-	X	-	Spain	2028
12	US8431027B2 (2013)	DAF system	X	X	X	X	USA	2031
13	ES2606102B1 (2018)	Flotation tank	X	X	X	X	Spain	2035
14	US9278360B2 (2016)	Air-assisted separation system	X	X	X	X	USA	2034
15	US8440076B2 (2007)	Water treatment unit with aeration device	X	X	X	X	USA	2030

Los tanques de flotación circulares o en forma cónica KR101921655B1 han resultado eficientes para la separación de lodo en el tratamiento de aguas residuales, debido a que son sistemas más compactos, no hacen uso de agitadores mecánicos, desnatadoras o raspadoras. La invención US9278360B2 conocida comercialmente como HydroFloat® hace referencia a un sistema de separación de sólidos suspendidos difíciles de eliminar, ideal para los procesos de la industria minera. Representa una diferencia significativa con respecto al sistema DAF convencional en que no hay ninguna agitación mecánica dentro de la unidad. La flotación tiene lugar en un lecho fluidizado con dos fases, una densa en el fondo cónico y otra en la parte superior del tanque. La remoción del lodo de flotación se desarrolla a través del elemento freeboard un sistema que se encarga de conducirlos al depósito de concentrados. La alta densidad de partículas y burbujas dentro del lecho fluidizado, crea una mejor cinética

de flotación (por la ley de acción de masas) aumentando la tasa de flotación en la interacción burbuja-partícula.

En el caso de la articulación de los sistemas DAF con la tecnología de visión artificial, la patente WO2016099243 hace referencia a un sistema de visión artificial para mejorar la recuperación de minerales en celdas de flotación. De forma general, el sistema está conformado por una cámara que captura las imágenes de las MB para enviarlas a un sistema embebido de procesamiento de imágenes. Las MBs son observadas en tiempo real para estimar parámetros como la BSD, velocidad y dirección. Esta información se envía a un sistema de control externo por medio de comunicación Ethernet/IP. Posteriormente los resultados adquiridos se utilizan para las acciones de control como inyección de aire, nivel de agua, adición de reactivos entre otros parámetros que son significativos en la monitorización del sistema.

En general, el desarrollo de la tecnología DAF en la última década (Figura 2.6) ha buscado ser más eficiente en cuanto al control y automatización de sus procesos como también en los sistemas de generación de MB KR101990771B1. Algunas patentes han desarrollado sistemas híbridos DAF, lo que ha demostrado la capacidad de los sistemas DAF para tratar aguas residuales de compleja composición. Particularmente, en la remoción de grasas y aceites, separación de partículas finas, eliminación de turbidez y reducción de los niveles de COD y BOD debido a las propiedades fisicoquímicas de las burbujas que permiten eliminar contaminantes de difícil remoción. La tendencia centra su interés en la automatización y control de procesos para aumentar la efectividad del equipo y optimizar los tiempos de operación, observándose mayor interés en los países.



**Figura 2.6.** Patentes de tecnología DAF publicadas en los últimos 10 años por países.



El desarrollo de las distintas patentes ha permitido mejorar particularmente la carga hidráulica superficial, especialmente para nuevas aplicaciones como en la minería [94]. Se requieren nuevos diseños de sistemas de remoción de lodo que no incrementen el consumo energético y que mejoren la estabilidad del lodo flotante evitando el arrastre de partículas finas hacia la corriente de agua tratada. Por tanto, la tecnología DAF en la actualidad es una alternativa promisoriosa para la recuperación de agua con amplio campo de aplicación tanto en el sector agro, industrial y municipal, como también en los procesos de potabilización de agua y desalación de agua marina. Su articulación con la visión artificial podría proporcionar mayor robustez a los sistemas DAF optimizándolos en cuanto a eficiencia y costos de operación.

## 2.2.8 Aplicación de DAF en el Tratamiento de aguas residuales

Esta subsección describe las aplicaciones de DAF en los tratamientos de aguas residuales clasificadas por sectores: agrícola, industrial y doméstico y municipal.

### Sector agrícola

Múltiples publicaciones han estudiado la eficacia de la DAF en el tratamiento de las aguas residuales de las industrias láctea, de mataderos y avícola. Las aguas residuales lácteas se caracterizan por su alto contenido en FOG, DQO y DBO, así como por la formación de lodos con un fuerte olor a ácido butírico atribuido a la descomposición de la caseína [29]. El vertido de efluentes lácteos sin tratamiento previo en las masas de agua puede tener un impacto negativo en los ecosistemas debido a los altos niveles de SST y turbidez [121]. La Tabla 10 detalla estos estudios junto con los principales parámetros de eliminación que reportaron.

**Tabla 10.** Aplicación de la DAF en aguas residuales agrícolas.

No.	Tipo de agua residual	Principales parámetros fisicoquímicos						Referencia
		Eficiencia de eliminación (%)						
		Aceites & grasas	TSS	COD	BOD	Color	Turbidez	
1	Dairy	-	-	87.5	-	83.1	97.8	[29]
2	Dairy	-	62.5	87.8	91.4	-	-	[173]
3	Slaughterhouses	-	-	90	90	-	-	[174]
4	Poultry	-	-	97.9	98.6	-	-	[175]
5	Poultry	(91.1 ± 5.2)	-	97.9 ± 1	98.6 ± 1	-	-	[6]
6	Harvesting of <i>Chlorella Sorokiniana</i>	-	88.6–92.5	-	-	91.7–92.3	93.7–96.2	[121]
7	Dairy	66.1	95	54.2	76.2	83.2	88	[130]
8	Dairy	-	-	48.3–50.3	-	-	91.1–91.5	[129]

Las aguas residuales de la industria de los mataderos se caracterizan por sus altos niveles de materia orgánica (MO), nutrientes, patógenos, detergentes, FOG y, en ocasiones, antibióticos y metales pesados [174], [175]. DAF también se ha destacado como una de las tecnologías avanzadas más prometedoras para el tratamiento de aguas residuales en el sector avícola [6]. En esta industria, los efluentes se caracterizan por sus altos niveles de proteínas, grasas, fosfatos orgánicos e inorgánicos y carbohidratos [175].

### Sector industrial

DAF se ha aplicado en el tratamiento de aguas residuales en la industria papelera [131], minera [94] y metalúrgica [19], [102]. Asimismo, también se ha utilizado en la desalinización [176], la recuperación de aceites y la eliminación de aceites y grasas [127], [177], [178]. En la Tabla 11 se indican los parámetros de eliminación representativos de varios efluentes industriales. En algunos casos, DAF como tratamiento primario es insuficiente para alcanzar los parámetros de eliminación establecidos por la normativa medioambiental, por lo que es necesario incorporar otros métodos, entre los que suelen estar los tratamientos biológicos [179].

**Tabla 11.** Aplicación de la DAF en las aguas residuales industriales.

No.	Tipo de agua residual	Parámetros fisicoquímicos						Referencia
		Eficiencia de eliminación (%)						
		O&G	TSS	COD	BOD	Color	TPH	
1	Biodiésel	98-99.6	98-100	80-90	80-90	No color	-	[180]
2	Industria metalúrgica	-	-	99.85	-	-	98.9	[102]
3	Aceite emulsionado	>90	-	-	-	-	-	[31], [178]
4	Plantas petroquímicas	99.7	-	95	-	-	> 90	[138]
5	Industria del papel	-	98.1	39 ± 10	-	33 ± 20	-	[93]
6	Metalurgia	99.77	-	98.5	61	-	70	[19]
7	Emulsiones	-	-	100	-	-	-	[127]
8	Yacimientos petrolíferos	96.6	88.8	95.7	-	-	-	[179]

\*TPH es

Otros parámetros de eliminación importantes para las aguas residuales industriales son los metales pesados, los residuos radiactivos y la materia orgánica. La eliminación de metales pesados y otros compuestos químicos en las aguas residuales es un problema que se plantea en las industrias metalúrgica [102] y minera [181]. DAF ha demostrado resultados eficaces de eliminación de estos elementos y otros componentes químicos (Tabla 12).

En algunos casos, las partículas metálicas ultrafinas son difíciles de eliminar en el proceso de limpieza, por lo que es necesario utilizar floculantes y/o coagulantes que faciliten la adhesión de las partículas a las burbujas [19]. En un estudio [98], se investigaron diferentes polímeros (alcohol polivinílico, polietilenglicol y quitosano) como colectores para eliminar metales pesados (cloruro de zinc, nitrato de plomo, cloruro de manganeso, cloruro de níquel

y cloruro de cadmio) de las aguas residuales mediante DAF. Los resultados mostraron una mayor eficacia de eliminación del quitosano que de los otros candidatos.

**Tabla 12.** Aplicación de DAF en la eliminación de metales y compuestos químicos.

No.	Elemento	Eficiencia de eliminación (%)	Referencia
1	Sulfate ions	82	[139]
2	Fe (OH) <sub>3</sub>	99	[88]
3	Amina	80	[182]
4	Lead and zinc sulfide (particles < 44 μm)	89-96	[94]
5	Fe ions	95	[94]
6	Cd, Ni, Mn y Pb	29, 27, 31 y 29	[98]
7	Sodium oleate (NaOL)	97.6	[133]
8	Cu, Cd y Zn	>95	[138]
9	Icrylonitrile-butadiene-styrene	>90	[183]
10	Nanoparticles of TiO <sub>2</sub>	95-100	[184]

La industria nuclear genera residuos radiactivos gaseosos, líquidos y sólidos que requieren un tratamiento especializado debido a su alto grado de toxicidad y contaminación [185], [186]. En un estudio [95] se examinó el tratamiento de residuos líquidos radiactivos mediante un sistema DAF móvil. Los resultados mostraron altos niveles de eliminación del 95% para las concentraciones de residuos petrolíferos, SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-3</sup>, PO<sub>3</sub><sup>-3</sup>, Ni y Cr, así como niveles de eliminación de aproximadamente el 94% para el Co total y el 75% para el <sup>60</sup>Co.

Finalmente, otro parámetro importante de eliminación es la materia orgánica [187]. Se ha demostrado que DAF puede eliminar más del 98% de la MO [102], presente en las aguas residuales dulces y salinas [125] y en los sistemas de pretratamiento de desalinización [176]. Este último bajo condiciones específicas de coagulación. Los biopolímeros y las sustancias húmicas fueron las principales fracciones orgánicas eliminadas, entre el 38-84% y el 20-61%, respectivamente.

### Sector doméstico y municipal

DAF se ha utilizado en el tratamiento de diversos tipos de aguas residuales generadas por el sector doméstico y municipal (Tabla 13), con resultados eficientes demostrados en combinación con otros métodos [73], [86], [103], [188]. Los principales contaminantes de estas aguas residuales son la MO, el nitrógeno, el carbono orgánico, el fósforo y los FOG [11], [111] además de los microorganismos [140] y las partículas biodegradables [141].

En general, los parámetros de eliminación fisicoquímica como la materia orgánica, el nitrógeno, el carbono orgánico, el fósforo y los FOG que se derivan del uso de productos de limpieza o farmacéuticos y otras actividades domésticas se tratan con cultivos bacterianos en sistemas de lodos activados [11], [74]. Sin embargo, en [73] se examinó la eficacia de los sistemas de lodos activados de alta tasa combinados con DAF para ver si mejoraban la separación sólido-líquido. A este respecto, se obtuvo la eliminación del 78% de los SST y del 68% de la DQO en condiciones específicas de coagulación.

**Tabla 13.** Aplicación de DAF en diferentes tipos de aguas residuales del sector doméstico y municipal.

No.	Tipo de agua residual	Eficiencia de eliminación (%)	Referencia
1	Fosforo y materia orgánica	82 (Fosforo Total)	[111]
2	Productos farmacéuticos	71 (Diclofenaco)	[103]
3	Compuestos orgánicos (Aguas residuales domésticas)	78 (TSS)	[73]
4	Aguas residenciales/municipales	-	[86], [121], [141], [188], [189]
5	Restaurantes	92.4 (FOG)	[7]
6	<i>Giardia</i> y <i>Cryptosporidium</i> protozoa	95.38-99.81 (Coliformes Totales y <i>E. coli</i> )	[140], [190]

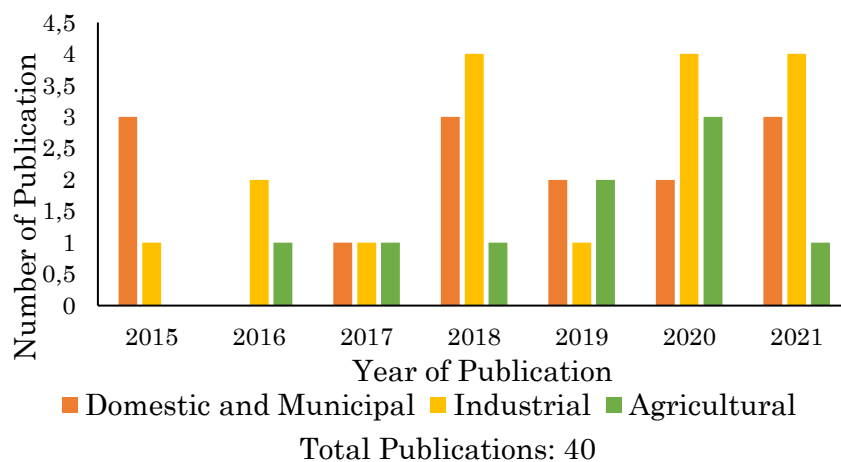
Las aguas residuales municipales y domésticas también contienen microorganismos que pueden ser altamente infecciosos. Se estudió el efecto de DAF en presencia de coagulantes para eliminar *Giardia* y *Cryptosporidium* [140], [190]. Se demostró que DAF es un proceso de tratamiento potencial para eliminar los quistes de *Giardia* de los efluentes, proporcionando una baja concentración de protozoos y turbidez. Se empleó un proceso combinado de coagulación-DAF para reducir los genes de resistencia a los antibióticos (ARG) en el afluente de una planta de tratamiento de aguas residuales utilizando tres tipos de coagulantes (PACl, FeCl<sub>3</sub> y Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>) [189]. Los resultados mostraron que este es un medio más eficiente para eliminar SST y DQO, así como ARG.

Cuando se trata de agua potable, no hay estudios recientes que refuercen el uso de DAF. Sin embargo, la literatura informa de la aplicación de DAF como clarificador para el agua potable en los años 60 [91]. Desde entonces, Crossley y Valade han realizado una revisión de la tecnología DAF, en particular en la producción de agua potable [132], mientras que más recientemente se ha estudiado la optimización del diseño de una planta de tratamiento mediante la tecnología DAF en Kluizen (Bélgica) [101].

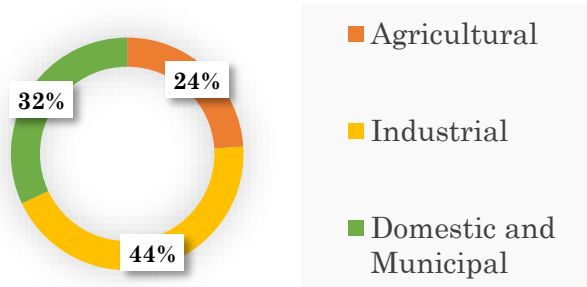
### 2.2.9 Tendencia DAF en el tratamiento de aguas residuales

La revisión de la literatura demuestra la capacidad de DAF para eliminar altas cargas de MO, especialmente en la separación de emulsiones de aceites y grasas y FOG [31], [127], [178], [191] y partículas finas en suspensión. En general, DAF tiene potencial en el tratamiento de aguas residuales procedentes de la agricultura, la industria y los sectores doméstico y municipal. La recuperación de materias primas como aceites, nutrientes y minerales [192] y la generación de lodos del proceso de flotación, podrían constituir la fuente de materia prima para productos como el biodiésel [96], y el biogás [191], lo que a su vez ayudaría a aliviar el vertido de residuos.

El número de publicaciones durante el período 2015-2021 (véase la Figura 2.7 a)) que examinan el uso de DAF para las aguas residuales sugiere que su aplicación es menos frecuente en el sector agrícola, que representa el 24% del total de publicaciones. Esto podría deberse a que los tipos de residuos agrícolas no representan un problema complejo en el tratamiento del agua, ya que pueden convertirse en fuentes orgánicas para la coagulación, siendo una alternativa a los coagulantes metálicos convencionales [129].



a)



b)

**Figure. 2.7** a) Aplicación de la técnica DAF en el tratamiento de aguas residuales de los sectores agrícola, industrial y doméstico y municipal. b) Representación del sector en porcentaje.

Por el contrario, el sector más representado fue la industria, con el 44% de todas las publicaciones. Esto se debe probablemente a las elevadas cantidades de aceites y grasas y micropartículas en las aguas residuales industriales, cuya eliminación se ve facilitada por las MBs debido a la hidrofobicidad del medio y a la diferencia de densidad entre el fluido residual (aceite y grasa en otras sustancias químicas) y el agua [30], [31], [127], [177].

La aplicación de DAF en aguas residuales municipales y domésticas es relativamente escasa porque exige un pretratamiento estricto con coagulantes o floculantes, debido a la composición fisicoquímica y microbiológica de estas aguas residuales [86], [189]. Sin

embargo, este sector sigue representando el 32% de las publicaciones revisadas en el periodo 2015-2021 (Figura 2.7 b)).

El aumento en el interés por la tecnología DAF durante la última década se observa a partir del aumento en el número de publicaciones y ha demostrado ser eficaz en combinación con otras técnicas de limpieza [73], [100]. DAF es una técnica clave que se tiene en cuenta en las proyecciones futuras para mejorar la eficacia en el tratamiento tanto de las aguas residuales como del agua potable. Algunas publicaciones del año 2022 más citadas (Tabla 14) indican que la tendencia de DAF continúa estudiando su eficiencia con otros métodos de limpieza y también en la investigación del efecto de los parámetros característicos de las MBs en la eficiencia de remoción de contaminantes.

**Tabla 14.** Publicaciones destacadas DAF 2022.

No.	Ventajas	Referencia
1	Efectos de las características fisicoquímicas de los afluentes sobre la disolución del aire, el tamaño de las burbujas y la velocidad de ascenso en la flotación por aire disuelto: una revisión.	[193]
2	Evaluación de la flotación por aire disuelto para la separación de agua y aceite usando un coagulante hibridado de cloruro férrico y quitosano.	[81]
3	Eliminación de sólidos suspendidos elevados del agua de drenaje de la India con una flotación de aire disuelto (DAF) reducida para la recuperación de agua. Evaluación de la dependencia del tipo de agua en las variables de control del proceso.	[194]
4	Proceso avanzado de tratamiento de aguas residuales utilizando foto-biorreactor de algas asociado con un sistema de flotación por aire disuelto: una demostración a escala piloto.	[195]
5	Recolección de <i>Microcystis flos-aquae</i> usando flotación de aire disuelto: el efecto inhibitorio de los grupos carboxilo en carbohidratos que contienen ácido urónico.	[196]

Por lo tanto, es importante destacar las ventajas [94], [106], [126], [132], [197] y desventajas [120], [138], [183] de DAF según los autores identificados (Tabla 15), en comparación con otras tecnologías de tratamiento de aguas residuales.

**Tabla 15.** Ventajas y desventajas de DAF.

No.	Ventajas	Desventajas
1	Eliminación eficaz de MO, algas, aceites y grasas, FOG, micropartículas y microorganismos de las aguas residuales	El tanque de flotación debe estar protegido de las bajas y altas temperaturas
2	Rápida puesta en marcha del sistema, alta eficiencia de separación y versatilidad operativa	Alto consumo de energía y aumento de los costes de explotación
3	Generación de lodos más espesos	Generación de espuma DAF
4	Sistema compacto, bajo HRT, menores costes de construcción, bajo coste de funcionamiento y altos índices de carga	Uso de coagulantes y floculantes

Una particularidad de DAF es que, en climas muy fríos, el sistema debe protegerse de las bajas temperaturas para evitar que el flotador se congele y provoque la sedimentación de los sólidos que ya han sido conducidos a la superficie por el efecto de las burbujas. Esto se debe a que el aumento o la disminución de la temperatura en el tanque de flotación puede afectar

a la retención de gas y a la estabilidad de las MBs. En el caso de un aumento de la temperatura, las MBs más grandes se rompen en burbujas más pequeñas y la viscosidad del líquido se reduce, lo que resulta en una disminución de la estabilidad debido a la reducción del oxígeno [18], [137].

Los avances tecnológicos en los sistemas DAF han abierto nuevas investigaciones sobre formas de optimizar el control, la automatización, los tiempos de funcionamiento, el tamaño del sistema y los costes energéticos, mejorando así la eficiencia del proceso global [92], [123]. Por ejemplo, [104] analizaron el control y la automatización de una planta piloto de DAF, en la que se desarrolló un SCADA utilizando comunicación OPC y Ethernet, para monitorizar la presión de saturación, los niveles de líquido y los controles de turbidez. El experimento consiguió un ahorro de energía y una mejora del rendimiento en términos de funcionamiento y operatividad de la planta. En otro estudio [198] se realizó el control de la turbidez en DAF mediante lógica difusa, lo que permitió mejorar el control de este parámetro y evitar el uso excesivo de agua limpia en la corriente de reciclado.

Los modelos matemáticos y la simulación del flujo de los DAF mediante CFD han reducido sus limitaciones y han permitido avanzar en su funcionamiento y diseño en favor de una operación más eficiente. Por esta razón, los diseños modernos de sistemas DAF tienden a ser más rápidos, más compactos y menos costosos en su operación [102], [141], en comparación con las plantas de coagulación-sedimentación-filtración [94], [131], [135]. También se destaca la considerable reducción de los tiempos de floculación y el aumento de las cargas hidráulicas [91], [132]. El estudio de las características hidrodinámicas del sistema de flotación es fundamental para el diseño, control, análisis, optimización, operación y modelado del sistema. Estos factores afectan significativamente a la eficiencia del proceso [33], [123], [124]. En consecuencia, el CFD permite a los investigadores predecir el diseño y la construcción del sistema DAF e identificar los parámetros necesarios para establecer las condiciones óptimas de los procesos de limpieza de aguas residuales [126], [135].

La utilización de los lodos del DAF es una vía interesante para la investigación futura, con el objetivo de impulsar el desarrollo sostenible y una energía más limpia. En un estudio [96] se demostró la viabilidad del uso de lodos DAF obtenidos de una planta de procesamiento de carne como materia prima para biodiésel. En otro [191] se evaluó el potencial de los residuos DAF procedentes del procesado de alimentos y del estiércol avícola para la producción optimizada de biogás. Los resultados del estudio representan una oportunidad para mejorar la economía de los sistemas de digestores anaeróbicos basados en los residuos orgánicos de las granjas como materia prima que también puede ser reciclada como fertilizante después de la digestión.

Por último, otra aplicación interesante de DAF es la recolección de microalgas [199], [200], que se considera un método rentable para la producción de biocombustibles [121], [201], mejorando así la calidad del efluente. Se estudió la eficacia de DAF en la recuperación de lípidos de las microalgas. Los resultados mostraron una alta recuperación de lípidos. La utilización de los lodos de DAF es un tema de investigación innovador para impulsar el desarrollo sostenible con energía limpia [192].

# Capítulo 3

## Materiales y métodos

Este capítulo aborda la metodología de experimentación para la generación de las MBs de un DAF prototipo de laboratorio a fin de caracterizarlas y establecer los parámetros operativos del sistema para las pruebas de limpieza del agua residual doméstica sintética. La caracterización se fundamenta en el desarrollo de un algoritmo de visión artificial para la estimación del diámetro y la velocidad de ascenso, mediante procesamiento de video basado en el seguimiento fotograma a fotograma de los centroides de las burbujas y las mínimas distancias entre sus coordenadas. También se presentan las pruebas de limpieza que permitirán evaluar el efecto de los parámetros característicos de las MBs en los parámetros de remoción establecidos en esta investigación.

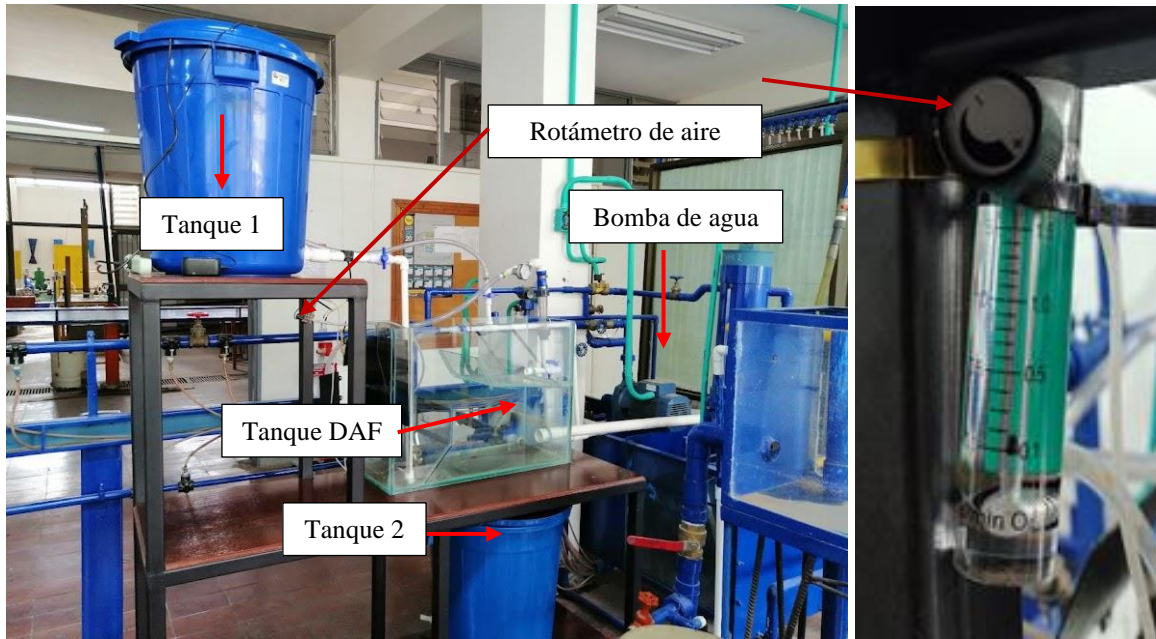
### 3.1 Ambiente de experimentación

El sistema DAF usado en esta investigación (Figura 3.1 a)), consta de un tanque rectangular de vidrio de espesor 1 cm para facilitar la visualización de las MB, el dispositivo generador de MBs, tubo Venturi cuyo principio físico se basa en el fenómeno de cavitación hidrodinámica, que fue diseñado con características especiales según [202], en el cual circula un caudal máximo de 16 litros/minuto. También de dos tanques de plástico de 60 litros de capacidad (Tanque 1 contenedor de agua residual el cual provee un agitador mecánico de 120 rpp incorporado en la tapa del tanque y tanque 2 contenedor del agua tratada).

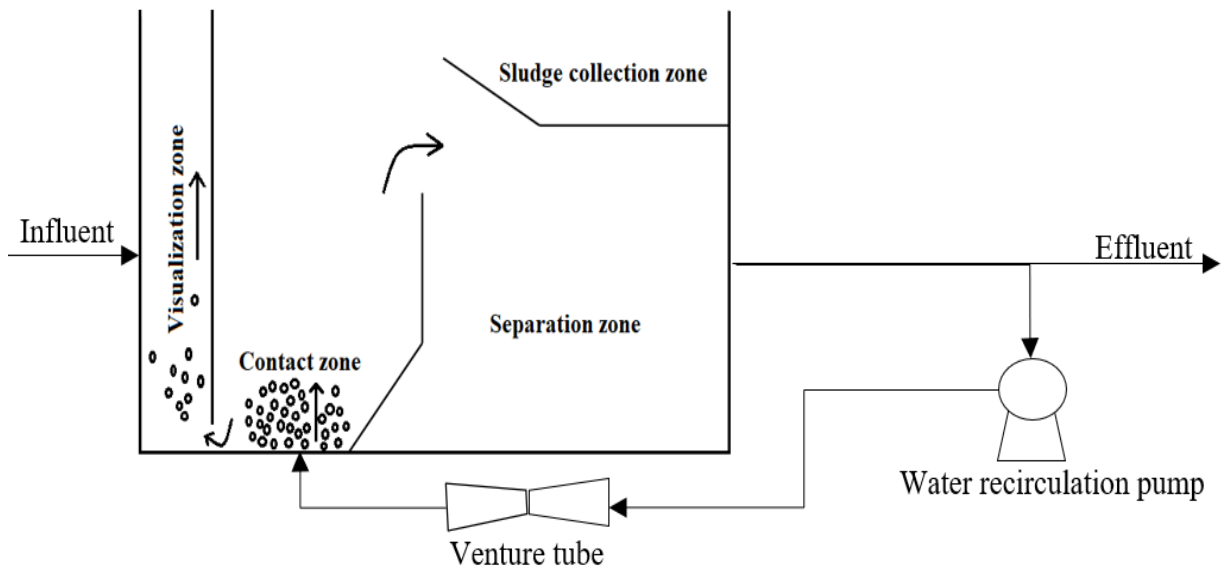
El rotámetro de aire el cual se configura para suministrar el aire atmosférico al tubo Venturi. Finalmente, la bomba de agua de referencia PEDROLLO CP 660 Italy 2 HP, que permite la circulación de agua por el circuito hidráulico con caudales entre 20-130 L/min. El tanque DAF de dimensiones alto, ancho y largo (52 cm, 25 cm y 75 cm) respectivamente, dispone de una división interna para garantizar la visualización de las MB y la hidrodinámica en el proceso de limpieza (Figura 3.1 b)). En este aspecto, se configuran la zona de contacto, zona de separación, zona de recolección de lodos y zona de visualización de las MB.

Un deflector con altura aproximada de 20 cm y con un ángulo de  $53^\circ$  divide el tanque DAF en la zona de separación en la cual se dispone el agua que ya ha sido limpiada por las MB, la cual parte será usada en la recirculación y otra tendrá salida para otros procesos de limpieza con el fin de cumplir con los parámetros exigidos por las leyes ambientales. Finalmente, la zona de visualización de MB es la más estrecha en dimensiones de longitud, se acondicionó con papel negro en las caras laterales del tanque para diferenciar las MB del fondo y evitar el reflejo de objetos externos.





a)



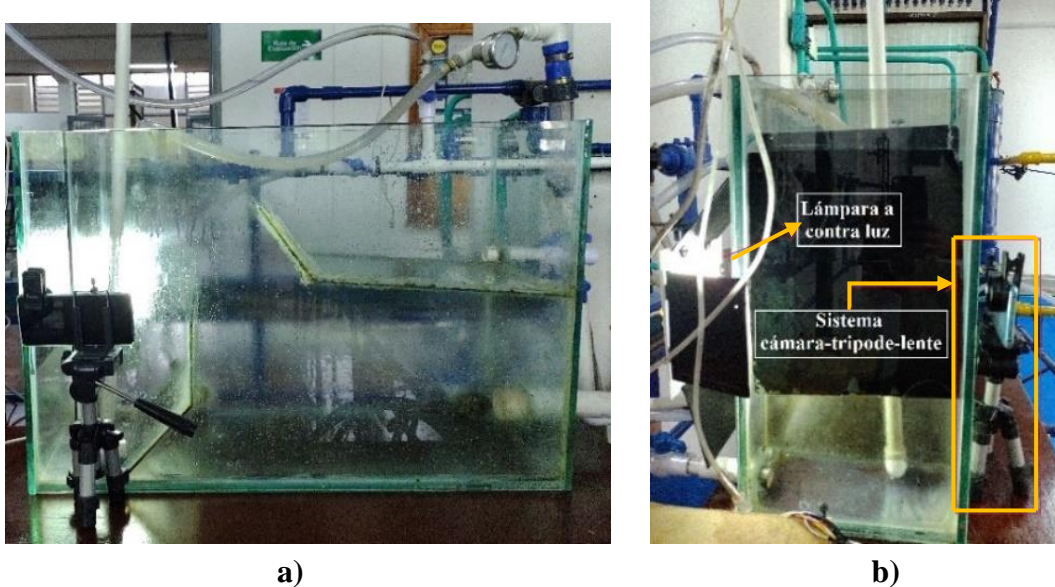
b)

**Figura 3.1** a) Sistema de Flotación por Aire Disuelto prototipo laboratorio; b) Esquema funcional del sistema DAF experimental.

El prototipo DAF se encuentra ubicado en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de ingeniería Civil de la Universidad del Cauca. Fue desarrollado en apoyo a este proyecto de investigación como trabajo de pregrado titulado “Propuesta de una planta de laboratorio para la remoción de contenido graso de aguas de producción usando la técnica de flotación por aire disuelto” [203] al cual se le hizo acompañamiento en todo su proceso de diseño y construcción.

## 3.2 Sistema de adquisición de imágenes

El sistema de adquisición de imágenes consta principalmente del dispositivo smartphone Huawei P 30 ELE-L04 equipado con una lente externa macro (MACRO 15X), dispuesto en un trípode a 20 cm sobre la mesa y ubicado en la zona de visualización del tanque DAF (Figura 3.2 a). Se uso una lámpara de luz blanca (7 W) a contra luz para iluminar las MB, la cual permite una alineación entre el objeto de rastreo, la cámara y la fuente de luz (Figura 3.2 b). Las cámaras del smartphone Huawei se caracterizan por ofrecer una alta calidad en la adquisición de imágenes garantizando un óptimo alcance, nitidez y muy buena resolución.



**Figura 3.2** a) Configuración tanque DAF-Sistema de adquisición de imágenes; b) Configuración Sistema de iluminación-Sistema de adquisición de imágenes.

El equipo cámara-lente macro (Figura 3.3) tiene una distancia focal de  $\pm 7$  cm para la captura de las imágenes. La resolución máxima de la cámara es de  $3648 \times 2736$  píxeles a una velocidad de adquisición de 60 fps.



**Figura 3.3.** a) Equipo cámara-lente macro; b) Huawei P30 ELE-L04

La resolución del video es de 720 x 1280 píxeles, a 720p y la velocidad de adquisición es de 960 fps. Estos parámetros permitieron adquirir videos que por defecto en la configuración del smartphone tienen una duración de 10 segundos, de los cuales se utilizan 235 fotogramas que corresponden a 0.2 segundos del tiempo total de duración de cada video, para determinar el diámetro y la velocidad de ascenso de las MBs. Se aclara que el equipo se utilizó como dispositivo de adquisición de imagen y no como smartphone, por lo tanto, el modo avión estuvo activado todo el tiempo.

### 3.3 Calibración de la cámara

La calibración del instrumento es un aspecto que no debe ignorarse en la adquisición de imágenes. Los métodos de calibración de cámaras se clasifican principalmente en tres categorías: calibración basada en objetivos 3D, 2D y unidimensional 1D [204]. En el caso de las cámaras fotográficas, los parámetros extrínsecos e intrínsecos de la cámara o factores como las propiedades ópticas de la lente pueden generar distorsión e influir en la precisión de la visión por computadora [205].

Los parámetros intrínsecos y extrínsecos de una cámara se pueden estimar a partir de un conjunto de correspondencias entre los puntos del mundo tridimensionales y los puntos de imagen bidimensionales. Por lo tanto, la precisión de la calibración depende en gran medida de la precisión de la detección de características [204].

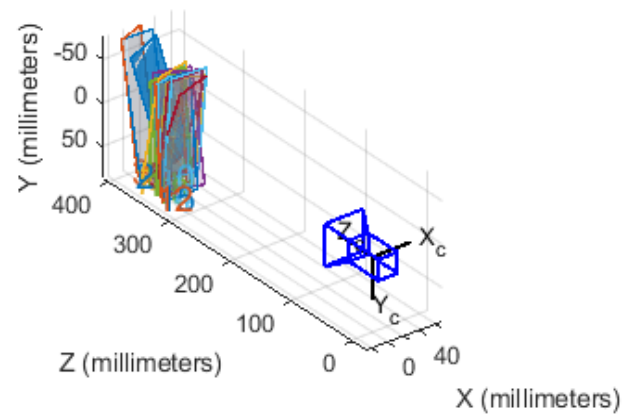
En este estudio, la calibración de la cámara del celular Huawei P 30 ELE-L04 se realizó mediante la aplicación *Camera Calibration de Matlab*. Se usó un tablero de ajedrez de 310 cuadros de 5 x 5 mm, como patrón de calibración (Figura 3.4 a)). La aplicación permite exportar los parámetros intrínsecos e intrínsecos de la cámara, con el fin de eliminar los efectos de distorsión de la lente presentes en la imagen. Finalmente, el archivo generado es usado por el algoritmo de pretratamiento y medición por medio de la función **undistortImage** de Matlab [Anexo digital, folder C].

Se tomaron alrededor de 40 imágenes del tablero de ajedrez ya que la aplicación discrimina imágenes defectuosas. Para garantizar las mismas condiciones de las burbujas, las imágenes se tomaron dentro del tanque DAF. Las imágenes se tomaron en diferentes orientaciones con un ángulo menor a 45° respecto del plano de la cámara, como lo recomienda la aplicación para observar los parámetros extrínsecos y permite observar si un patrón está demasiado lejos o demasiado cerca de la cámara. (Figura 3.4 b)). Se desactivo el enfoque automático de la cámara y se usó el mismo zoom para todas las imágenes.

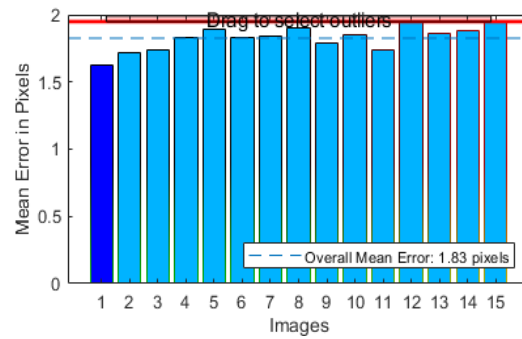
El ejercicio logró un error medio general de 1.83 píxeles dentro del tanque con agua (Figura 3.4 c)). Lo que es apropiado para encontrar los parámetros extrínsecos e intrínsecos de la cámara. Por lo tanto, se procede a exportar estos parámetros para eliminar la distorsión de la lente y corregir esta imperfección en las imágenes.



a)



b)



c)

**Figura 3.4** a) Tablero de ajedrez; b) Observación de los parámetros extrínsecos de la cámara; c) Estimación del (Overall mean error) en la calibración mediante MATLAB.

La matriz intrínseca de la cámara usada para este caso es la siguiente:

$$A = \begin{bmatrix} f_x & 0 & 0 \\ s & f_y & 0 \\ c_x & c_y & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.8762 \times 10^3 & 0 & 0 \\ 0 & 3.8944 \times 10^3 & 0 \\ 1.8399 \times 10^3 & 1.4461 \times 10^3 & 1 \end{bmatrix}$$

Y los factores de distorsión finales:

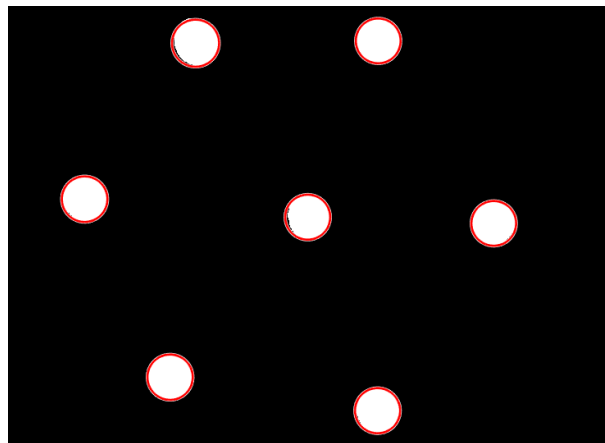
$$k = [0.3543 \quad -2.7778]^T$$

Los resultados muestran de  $k$  que la cámara toma imágenes con píxeles cuadrados, pues en el arreglo CCD estos son rectangulares si la relación de aspecto  $f_y/f_x$  es diferente de

1. Por tanto, de acuerdo con los resultados finales obtenidos, la tasa de aspecto de la cámara usada es  $f_y/f_x = 1.005$ .

### 3.4 Relación píxel-unidad de longitud

Una vez el proceso de calibración de la cámara es finalizado, se procede a determinar la relación píxel-unidad de longitud [Anexo digital, folder D]. Para esto se usó la metodología descrita en [147], usando un hilo de Nylon marca MEGA como objeto patrón de longitud. En este estudio el Nylon semitransparente de diámetro 600  $\mu\text{m}$  según las especificaciones del fabricante, fue incorporado de forma transversal en una hoja de cartulina color negra con varios cortes para garantizar la repetibilidad de la medida del diámetro (Figura 3.5).



**Figura 3.5.** Imagen tratada para determinar el diámetro de distintos cortes de Nylon.

Se tomaron 10 imágenes con el sistema cámara-lente macro a una resolución de 3648 x 2736, enfoque manual, zoom digital de 3x, ISO: 200, velocidad de obturación S: 1/400 s, apertura F: 1,80 con una distancia focal de 35 mm. Después de hacer el procesamiento de imágenes y determinar la longitud del diámetro en píxeles de los distintos cortes de Nylon mediante el

algoritmo basado en *Circular Hough Transform* (CHT) se determina la relación píxel-unidad de longitud encontrándose que 1 píxel equivale a 4,1018  $\mu\text{m}$ .

### 3.5 Diseño del algoritmo de visión artificial

De la revisión de la literatura se infiere que los métodos para rastreo de objetos mediante análisis de imágenes más frecuentes son:

A. Métodos que diferencian imágenes consecutivas alineadas.

-Alineamiento global

-Flujo óptico (Derivada temporal)

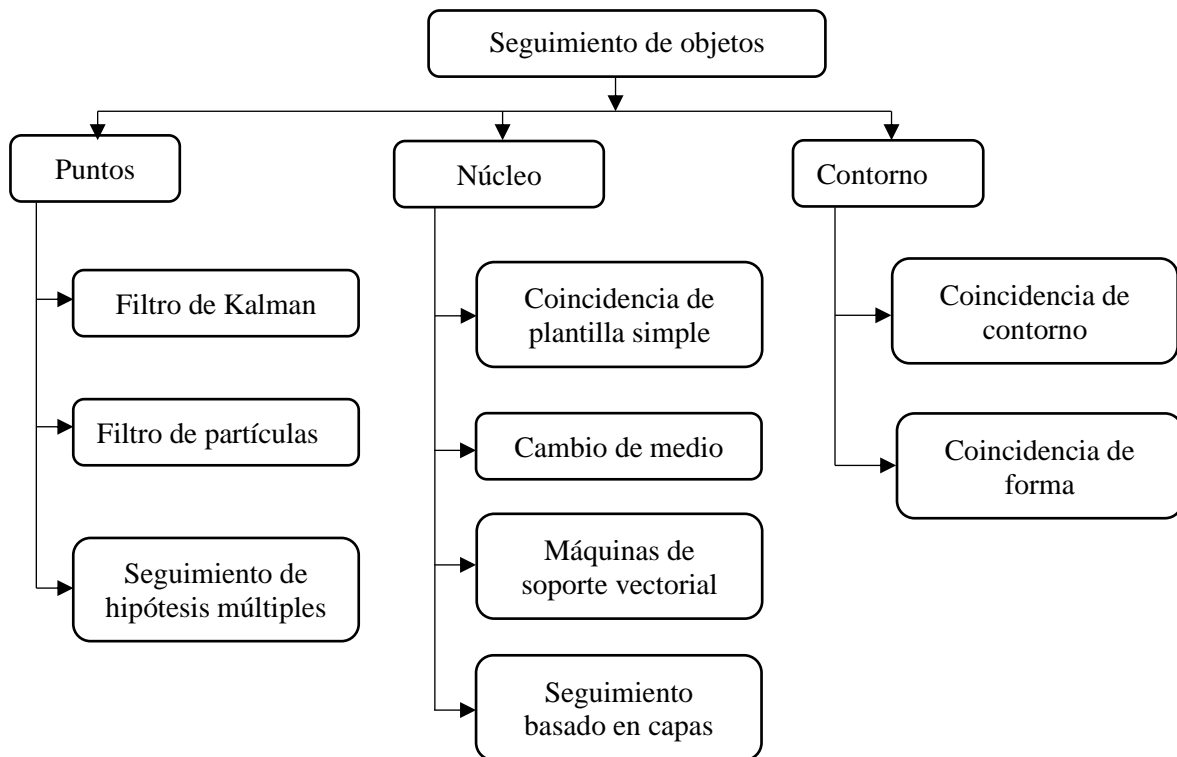
-Alineamiento por características

-Alineamiento por parámetros intrínsecos de la cámara

B. Métodos que detectan movimiento directamente en la imagen.

-Detección basada en distorsión de flujo

El estudio de seguimiento de objetos en una secuencia de imágenes ha desarrollado distintas técnicas (Fig. 3.6) las cuales deben garantizar parámetros de confiabilidad en la ventana de trabajo para que el objeto sea identificado de forma acertada y no se presenten objetos falsos positivos.



**Figura 3.6** Métodos para el rastreo de objetos [206]

Por tanto, se propone el método de seguimiento del núcleo con respecto a los cambios en las coordenadas (x,y) de los centros de las MB en una secuencia de imágenes (análisis fotograma a fotograma), conformadas por un video adquirido mediante cámara de teléfono inteligente y con 10.23 segundos de duración. Es importante en primera instancia caracterizar el video objeto de estudio para determinar la ventana de trabajo, eliminar las burbujas desenfocadas, establecer los parámetros de estudio y observar el comportamiento de las MB en cuanto a su forma y dinámica de flotación.

### **3.5.1 Diagrama de flujo del código para caracterización de MBs.**

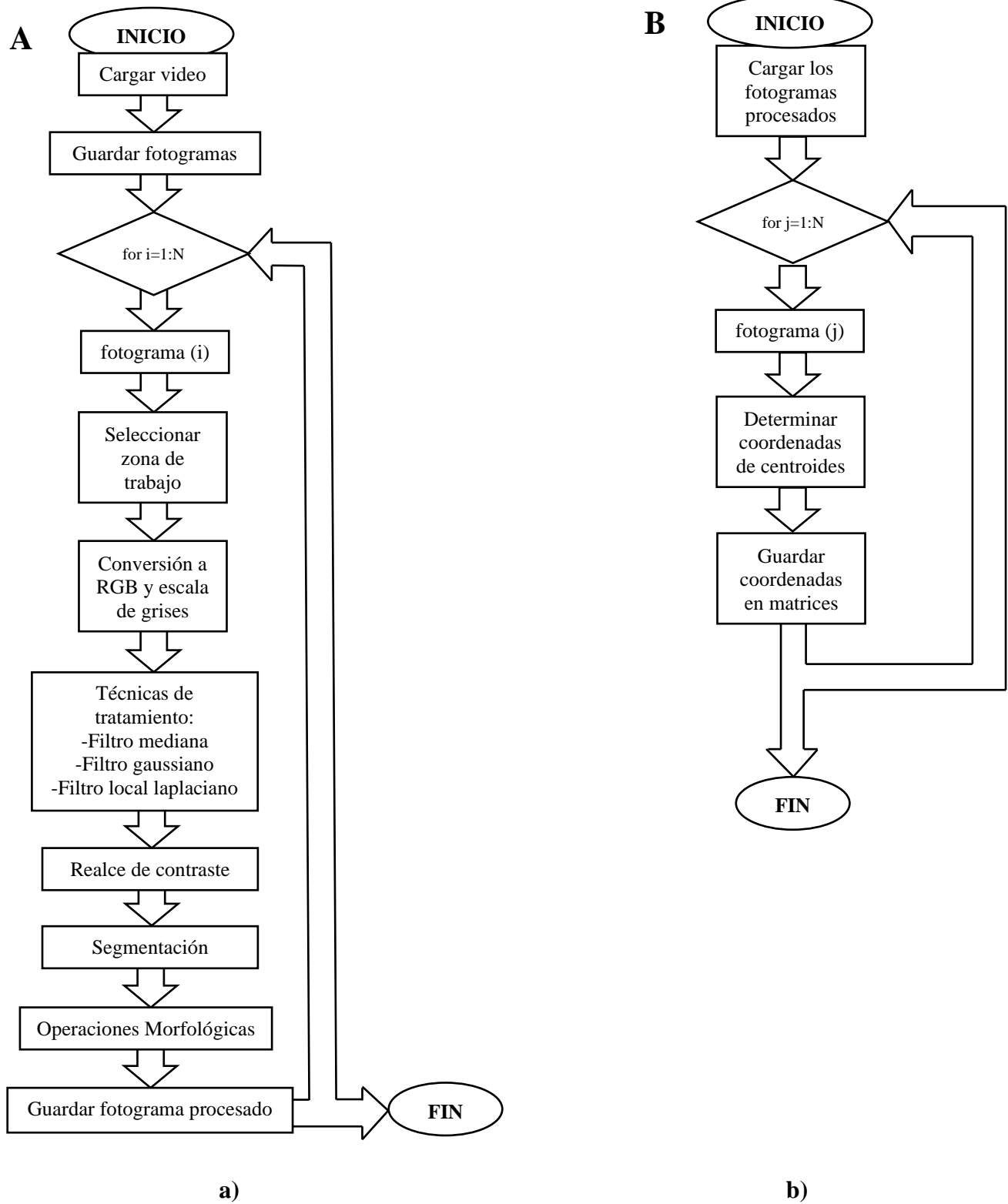
La metodología para desarrollar el algoritmo se fundamentó en la revisión de la literatura observando la trayectoria de las burbujas cuando ascienden en el tanque o columna de flotación. En este aspecto, el estudio [146] investigó la trayectoria y la velocidad de ascenso de las burbujas libres y cargadas con micropartículas en una columna de flotación a fin de observar el efecto de la carga en dichos parámetros característicos. El estudio demostró que las burbujas sin carga tienen una trayectoria en zigzag, mientras que las trayectorias de las burbujas con carga presentaron un comportamiento aproximado al de una recta vertical. También que, al aumentar el diámetro de la burbuja, la velocidad de ascenso y la desviación de la trayectoria recta incrementan.

Este hecho permite calcular la velocidad de ascenso de las burbujas esféricas a partir de la detección de sus centroides y el análisis cuadro a cuadro de los fotogramas consecutivos con respecto a la velocidad de captura de la cámara y a la distancia recorrida por el centro de la burbuja en dos fotogramas sucesivos. La metodología desarrollada se detalla en la sección 3.3.

Por tanto, el algoritmo desarrollado para la determinación del diámetro y la velocidad de ascenso de las MBs esféricas se divide en tres etapas principales denominadas A (Figura 3.7.a), B (Figura 3.7.b) y C (Figura 3.8).

El diagrama A hace referencia al pretratamiento de los fotogramas antes de iniciar la etapa B correspondiente a la detección de los centroides de las burbujas en coordenadas (x,y) en la secuencia de fotogramas del video, en donde N representa el número de fotogramas.

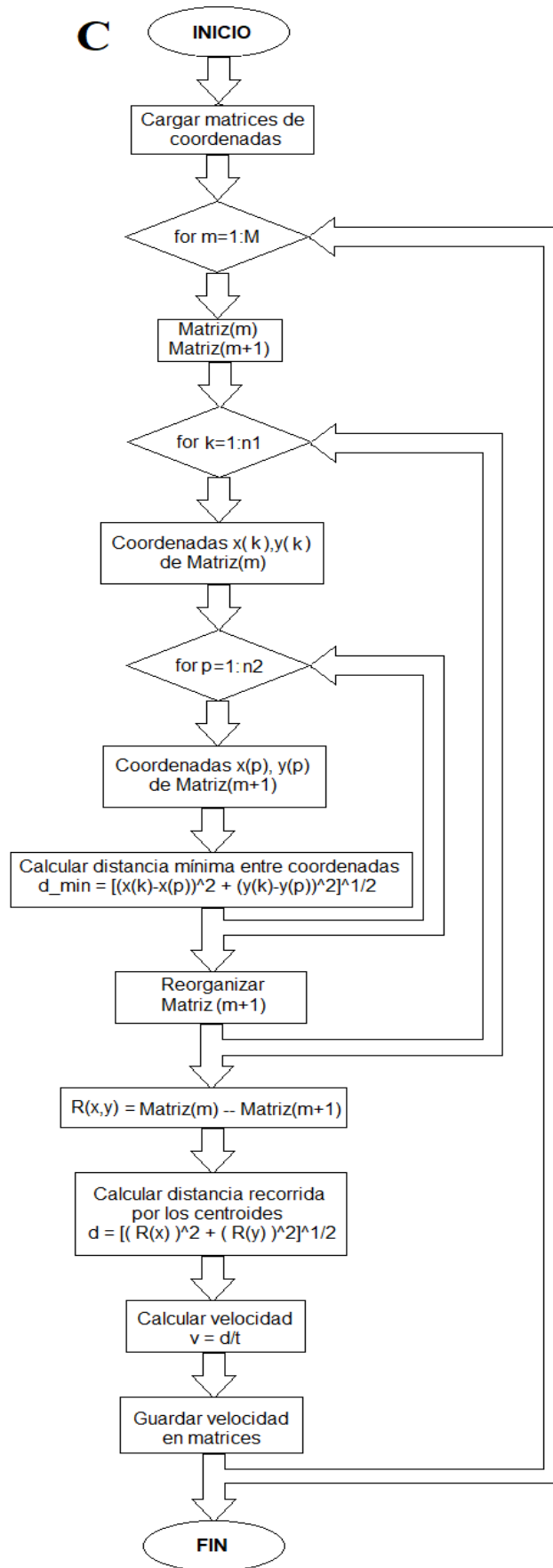
El diagrama C hace referencia a la etapa en la cual se determinan los diámetros y las velocidades de la población de burbujas. Donde M representa número de matrices de coordenadas, n1 el número de filas de Matriz (m); n2 al número de filas de Matriz (m+1), t al tiempo transcurrido entre cada fotograma y v la velocidad de ascenso de las microburbujas.



**Figura 3.7** a) Diagrama de flujo pretratamiento de fotogramas; b) Diagrama de flujo detección de centroides



**Figura 3.8** Algoritmo determinación de diámetros y velocidades de ascenso de MBs



### 3.5.2 Desarrollo del algoritmo de visión artificial

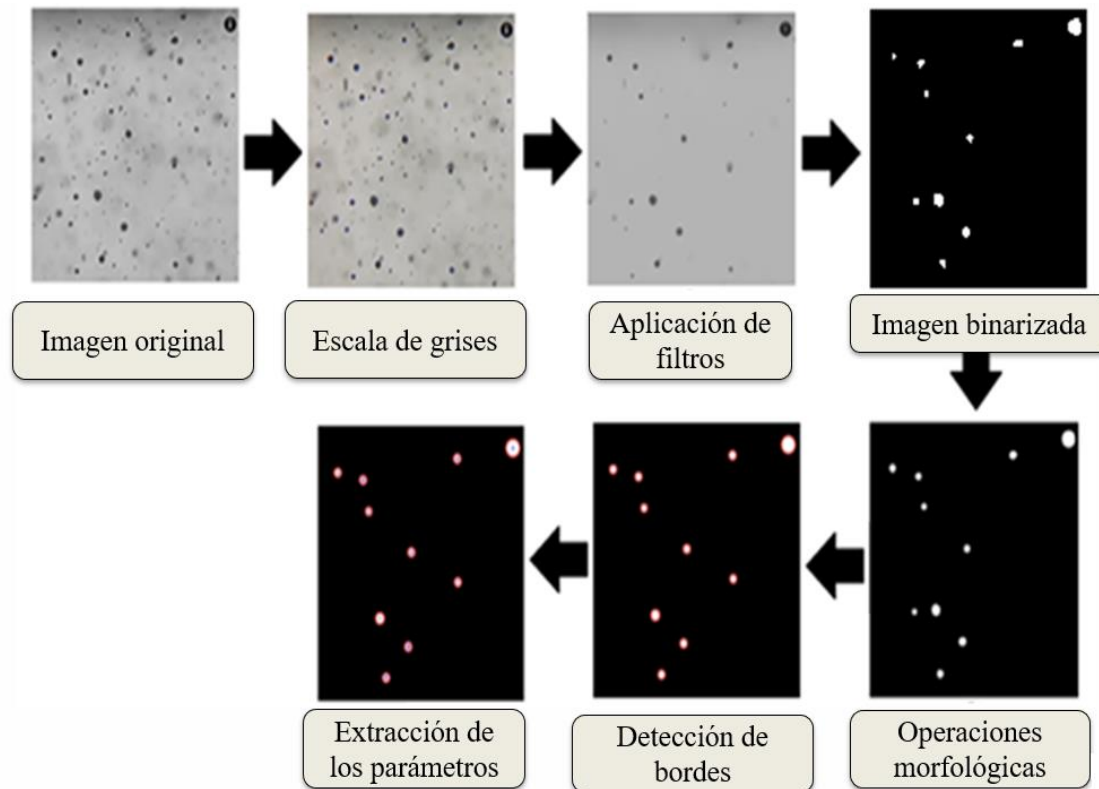
El rastreo a la población de MBs ubicadas sobre el plano focal se realiza mediante el entorno Matlab con el cual se aplican técnicas de pretratamiento a los fotogramas que componen cada video. Luego se determinan las coordenadas de los centroides de las MBs y los diámetros para calcular la distancia recorrida por cada una de ellas sobre fotogramas sucesivos del video.

Básicamente el algoritmo consta de cuatro etapas. En primer lugar, se descompone cada video en sus respectivos fotogramas mediante la función **hasFrame** de Matlab y se identifica la ventana de trabajo. Cada video tiene una duración de 10 segundos, es decir el sistema de adquisición de imágenes tarda aproximadamente 200 milisegundos en tomar cada frame. En segundo lugar, se realiza el pretratamiento a 235 fotogramas que son adquiridos en 0.2 segundos del tiempo total de cada video. Luego, estos fotogramas son sometidos a un tratamiento que permite mejorar la apariencia de la imagen original para posteriormente lograr separar los objetos del fondo, reconocerlos, interpretarlos o caracterizarlos.

El procesamiento inicia con la descomposición a escala de grises; posteriormente se aplican filtros con el objetivo de eliminar ruido (valores distorsionados que generalmente son ocasionados por el sensor CCD de la cámara) y hacer un suavizado. Los filtros se eligieron por conveniencia teniendo en cuenta que el fondo de la imagen de las MBs es uniforme lo cual potenció la apariencia de los fotogramas atenuando el ruido para finalmente hacer un realce de contraste que permite establecer diferencias claras entre el tono negro y el blanco usando la función `imadjust` de Matlab. Los filtros que se aplicaron son los siguientes: I) Filtro de la Mediana para reducir el ruido de sal y pimienta, II) Gaussiano realiza un primer suavizado al fotograma, reduciendo el ruido y eliminando de la imagen los detalles, III) Filtro Wiener permite un suavizado de la imagen preservando los bordes, IV) Filtro Local Laplaciano que permite un realce o detección de los bordes en la imagen.

Una vez los fotogramas han sido procesados a continuación se procede a detectar los objetos presentes y separarlos del medio en que se encuentran. Este proceso se denomina segmentación y en este caso se realizó mediante binarización de imágenes para detectar las MBs presentes en la totalidad de los fotogramas, a partir del método de Otsu de umbral global, de tal manera que permite obtener: I) Fondo uniforme para cada fotograma, II) Diferencia entre el fondo y los objetos de interés y III) Tiempo de procesamiento muy bajo. Estos tres aspectos son importantes para implementaciones futuras donde se requiere realizar medidas de velocidad y diámetros en tiempo real. Este procedimiento se aplicó por efecto de practicidad para aprovechar la geometría esférica de las MBs obteniéndose buenos resultados. Finalmente, se aplican operaciones morfológicas que consisten en un conjunto amplio de operaciones para procesar imágenes basadas en formas geométricas. Se usó la dilatación, erosión y la limpieza de bordes; tanto la dilatación como la erosión son aplicadas con base en elementos estructurantes lineales vertical y horizontal (Figura 3.9) permitiendo la definición geométrica y suavizado de las MBs.

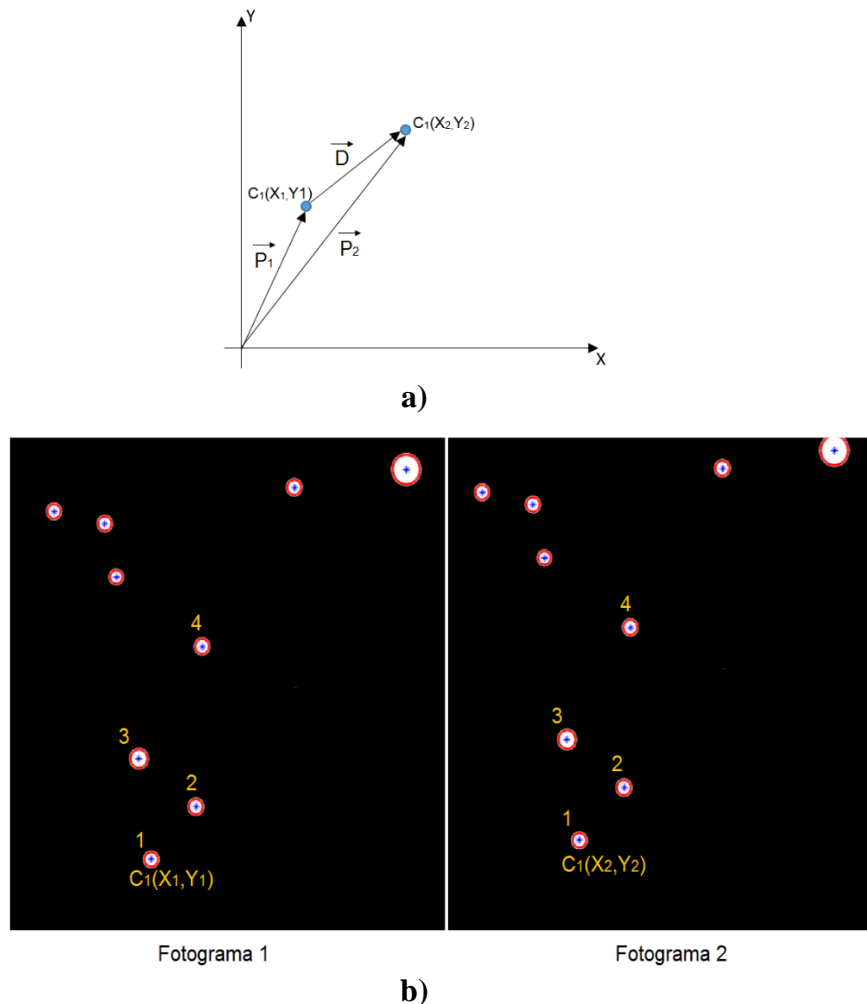
La etapa de segmentación es muy importante en el procesamiento de imágenes ya que su efectividad permitirá distinguir los objetos de estudio. En particular, la segmentación mediante *Watershed algorithm* se usa a menudo para determinar con precisión las características de las burbujas como su diámetro en poblaciones de geometría mixta (esféricas y elípticas) [154], [207], [208]. Sin embargo, la sobre segmentación es una dificultad que se presenta con frecuencia en *Watershed algorithm* [85], [116], [149].



**Figura 3.9** Procesamiento de imágenes.

En tercer lugar, se determinan los centroides y los diámetros de cada MB presente en los fotogramas procesados mediante CHT, la función **imfindcircles** de Matlab se utilizó para este propósito. Finalmente, el método utilizado para calcular la velocidad de ascenso de las MBs se adapta de [146], en el cual se toman dos fotogramas consecutivos para determinar la distancia recorrida por los centroides de las MBs. A medida que las MBs van cambiando de posición, representados por el vector de desplazamiento  $\vec{D}$  entre el par de fotogramas, también lo hacen sus respectivos centroides. Es decir, en la Figura 3.10 a) se muestra la posición inicial del centroide  $C_1$  con coordenadas  $(X_1, Y_1)$  de una MB, representado por el vector  $\vec{P}_1$  (correspondiente al fotograma 1) y la posición final  $\vec{P}_2$  del centroide  $C_1$  de la misma MB pero con coordenadas  $(X_2, Y_2)$  debido a que ha presentado un desplazamiento (correspondiente al fotograma 2). Por tanto, los vectores de posición  $\vec{P}_1$  y  $\vec{P}_2$  permitirán encontrar la distancia recorrida del centro de la MB en dos fotogramas consecutivos. Un ejemplo de esta estrategia para la determinación de la

velocidad de ascenso se observa en la Figura 3.10 b), en la cual los círculos blancos representan las MBs y los puntos de color verde indican los respectivos centroides.



**Figura 3.10** Metodología para determinar la velocidad de ascenso de las MB a) Vector de desplazamiento  $\vec{D}$ ; b) Representación en fotogramas consecutivos.

Para el caso de la MB<sub>1</sub> en el fotograma 1 (Figura 3.10), el centroide C<sub>1</sub> tiene coordenadas (X<sub>1</sub>, Y<sub>1</sub>), es decir, el vector posición  $\vec{P}_1$  para MB<sub>1</sub> está determinado por la Ecuación 1; en el fotograma 2 las coordenadas de este mismo centroide están dadas por (X<sub>2</sub>, Y<sub>2</sub>); por tanto, el vector posición  $\vec{P}_2$  está expresado por la Ecuación 6. Partiendo de estos dos vectores de posición, la magnitud del desplazamiento  $D$  (Figura 3.10b) se calcula mediante la Ecuación Euclidiana (Ecuación 7):

$$\vec{P}_1 = X_1 i + Y_1 j \quad (5)$$

$$\vec{P}_2 = X_2 i + Y_2 j \quad (6)$$

$$D = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2} \quad (7)$$

Finalmente, la velocidad  $V_{MB}$  de la MB<sub>1</sub> se determina por medio de la Ecuación 8:

$$V_{MB} = \frac{D}{t_f} \quad (8)$$

Donde  $t_f$ , es el tiempo que transcurre entre el par de fotogramas consecutivos y está determinado por la velocidad de adquisición de imágenes de la cámara (para este caso  $t_f = 0.00104$  s). Este procedimiento se aplica a las MB presentes en todos fotogramas consecutivos que componen el video.

### 3.5.3 Seguimiento de microburbujas

El seguimiento de las MB se realiza entre fotogramas procesados consecutivamente. En general, este proceso implica realizar tres pasos fundamentales:

1. Descomponer los videos en sus respectivos fotogramas.
2. Implementar técnicas de procesamiento de imágenes para segmentar las MB.
3. Determinar las coordenadas de los centroides de las MB presentes en cada fotograma procesado y guardarlas en matrices.

Partiendo de lo anterior, se procede a rastrear cada MB entre los fotogramas procesados utilizando el método de cálculo de las mínimas distancias recorridas por cada centroide mediante la Ecuación (3) de la siguiente manera:

1. Se toma la matriz de centroides de fotograma 1 y se extrae la primera coordenada de esta matriz.
2. Se calcula la distancia entre esta primera coordenada (centroide 1) y cada una de las coordenadas de centroides guardadas en la matriz correspondiente al fotograma 2.
3. Se elige la menor distancia obtenida en el paso anterior, para identificar las coordenadas del centroide 1 en el fotograma 2.

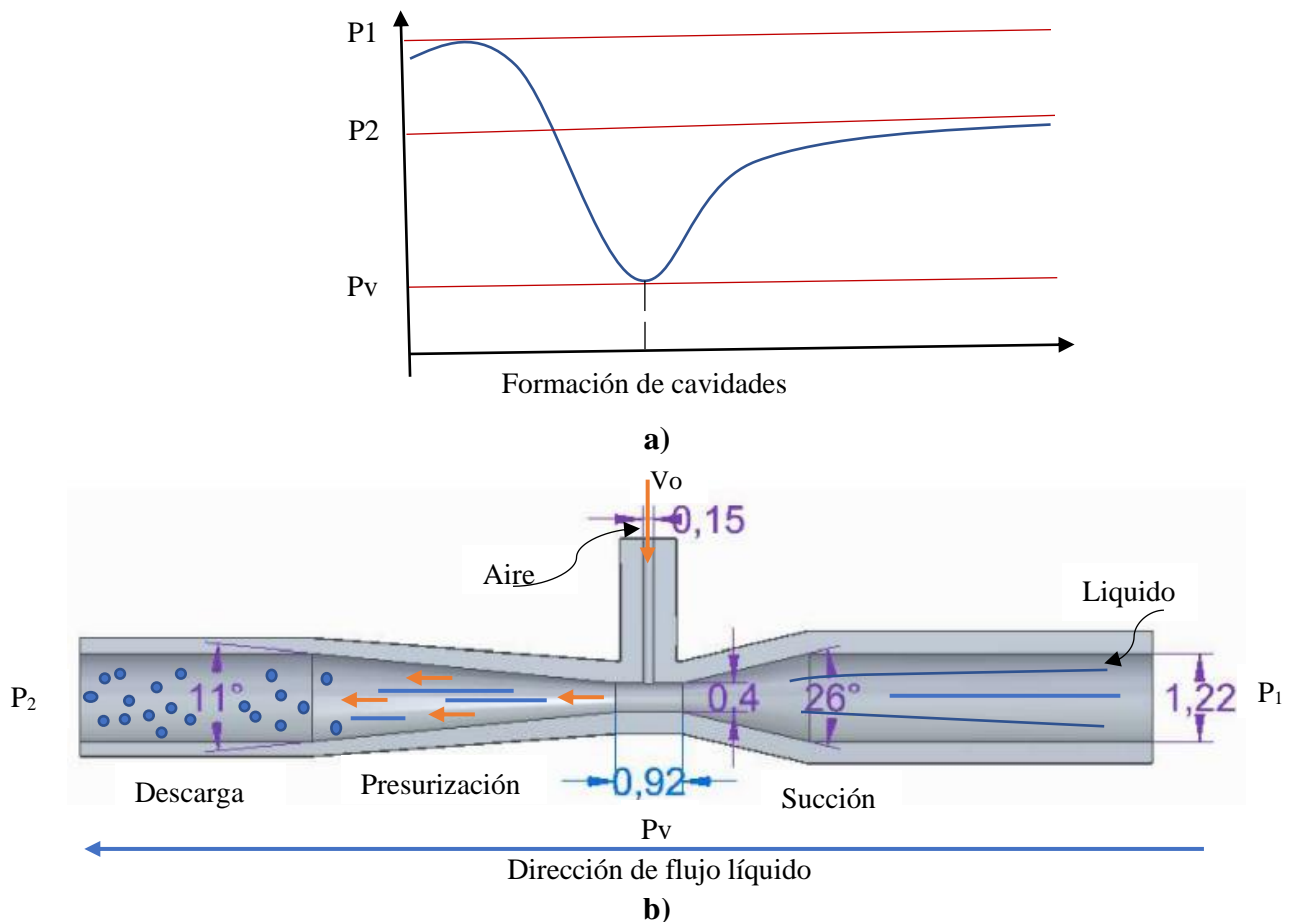
Estos tres pasos se aplican a todas las coordenadas de los fotogramas 1 y 2 para reorganizar la matriz de centroides de este último. Una vez reorganizada esta matriz se ejecuta el mismo procedimiento para reorganizar la matriz de centroides correspondiente al fotograma 3 y se replica en todas las imágenes procesadas que componen los videos de cada experimento. Por tanto, este método es apropiado para rastrear cada MB debido a que la reorganización de todas las matrices de coordenadas garantiza que la primera fila corresponda a la primera MB, la segunda fila a la segunda MB y así sucesivamente.

El algoritmo implementado tiene la capacidad de realizar seguimiento entre 9 y 32 MB por video, independientemente de la turbulencia del fluido generada por las presiones de trabajo, considerándose únicamente aquellas que se desplazan desde la zona inferior hasta la zona superior de cada fotograma. Además, rastrea las MB superpuestas mediante la asignación de centroides en sus respectivas posiciones en la matriz de coordenadas de cada fotograma, siempre que estas MB se encuentren separadas en el primer fotograma procesado para cada video.

Por otra parte, la entrada de nuevas MB entre un par de fotogramas consecutivos puede generar problemas en el seguimiento debido a dos razones principales: i) sobre escritura de coordenadas de centroides nuevas en coordenadas ya existentes y ii) exclusión de los centroides de las nuevas MB. Para solucionar estos inconvenientes se concatena la matriz de centroides con una matriz conformada por filas cero para garantizar que las coordenadas de las nuevas MB se ubiquen sobre ésta última.

### 3.6 Generación de MBs mediante el sistema DAF

Las burbujas estudiadas en este proyecto son generadas mediante el dispositivo tubo Venturi (Figura 3.11 a), el cual opera por efecto de la cavitación hidrodinámica (Figura 3.11 b) con presiones de recirculación de 34 y 36 psi e inyección de aire de 0,1 y 0,5 L/min como parámetros operativos del sistema DAF. El aire suministrado es el atmosférico, con el objetivo de evitar el uso de compresores de aire para dicho efecto y disminuir el coste energético.



**Figura 3.11 a)** Gráfica del fenómeno de cavitación hidrodinámica **b)** Tubo Venturi usado para la generación de MBs.  $P_1$  presión de entrada,  $P_2$  presión de descarga,  $P_v$  presión de vapor de líquido a la temperatura del sistema,  $V_o$  es la velocidad media del fluido en la garganta. Adaptado de [209].

### 3.7 Diseño experimental para la generación de MBs

El experimento para estimar el diámetro y velocidad de ascenso de las MBs se realizó con agua de grifo a temperatura ambiente en la ciudad de Popayán. Se basó en un experimento factorial 2 x 2 (Tabla 16), en el cual se variaron los parámetros operativos presión de recirculación de 34 psi y 36 psi e inyección de aire  $Q_1 = 0,1$  L/min y  $Q_2 = 0,5$  L/min. En cada tratamiento se tomaron 10 videos con un intervalo de 20s por cada toma con el objetivo de garantizar la detección de poblaciones nuevas de MB en cada video.

**Tabla 16.** Diseño experimental 2x2 generación de MB variando presión de recirculación y caudal de aire a un caudal de 900 L/h.

Experimento	Caudal de aire [L/min]	Presión de Saturación [psi]
A	0,5	34
B	0,1	34
C	0,5	36
D	0,1	36

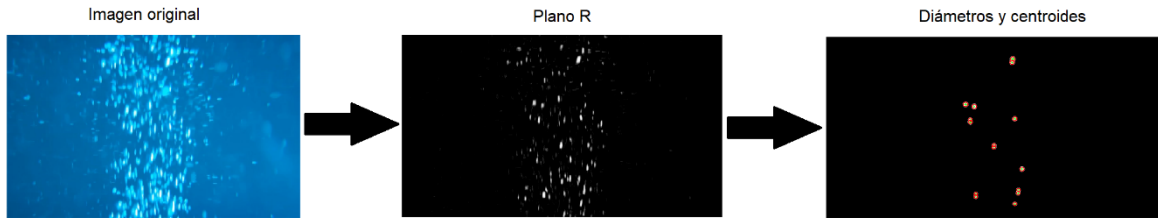
\*psi: unidad de presión (pound per square inch), por sus siglas en inglés

\*L/min: unidad de caudal de aire litros/minuto

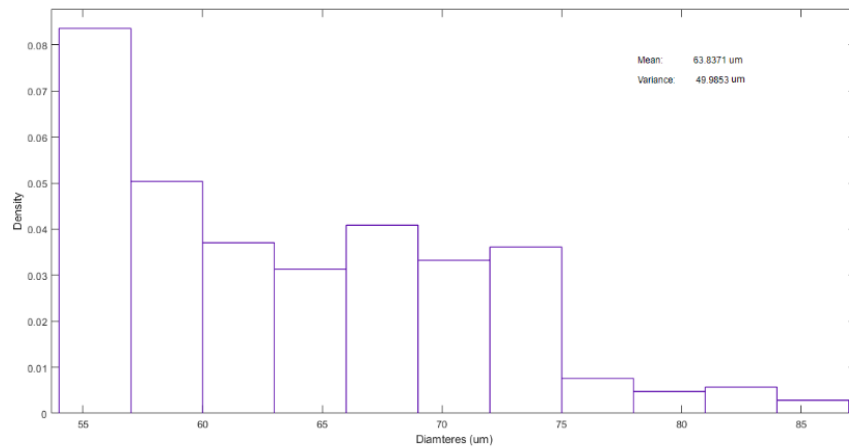
El tiempo total estimado del experimento fue de 300 s. En total se obtuvieron 40 videos de MB para la validación del algoritmo. Es importante mencionar que con la intención de garantizar las mismas condiciones del experimento y en efecto la repetibilidad de los datos se utilizó un tubo Venturi nuevo en cada prueba debido al efecto de desgaste en el interior del dispositivo ocasionado por la cavitación hidrodinámica.

### 3.8 Prueba del algoritmo con MBs en azul de metileno

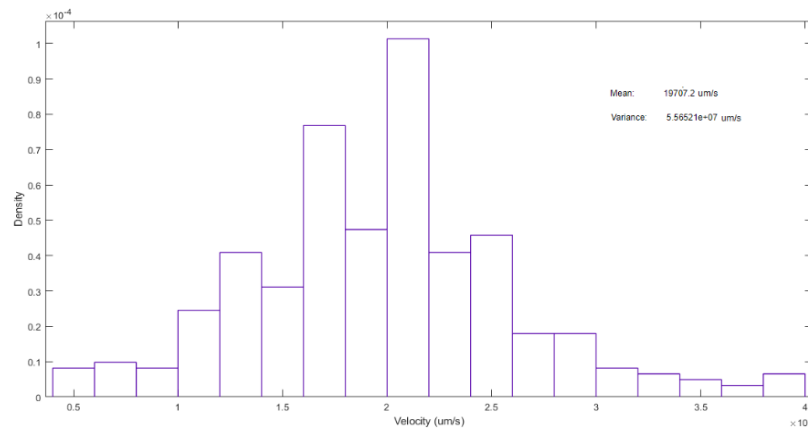
Una segunda prueba del algoritmo desarrollado para detectar las MBs y estimar el diámetro y la velocidad de ascenso se realizó con burbujas de bicarbonato de soda en agua de azul de metileno, con el objetivo de evaluar el alcance del sistema de adquisición de imágenes en objetos más pequeños. Las medidas arrojaron diámetros medios de  $63,84 \mu\text{m}$  y velocidades de ascenso de  $19707 \mu\text{m/s}$ . [\[Anexo digital, folder E\]](#)



a)



b)



c)

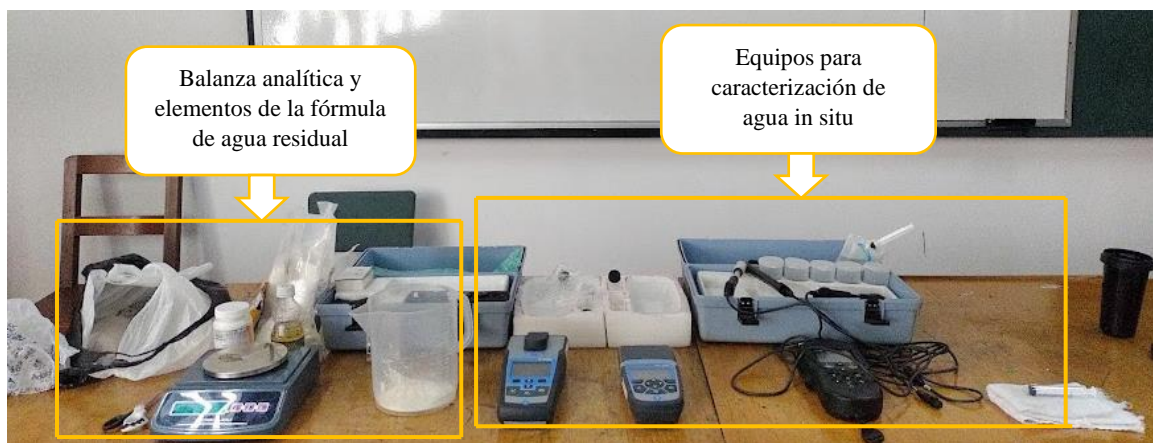
**Figura 3.12** a) Tratamiento con MBs en azul de metileno; b) Diámetros; c) Velocidades de ascenso

### 3.9 Caracterización del agua residual doméstica sintética

Los equipos usados para esta prueba experimental (Figura 3.13 a) fueron suministrados por el equipo técnico del Centro Agropecuario SENA Regional-Cauca y se describirán sus especificaciones en esta sección en el momento en que sean mencionados. Como primera medida la fórmula del agua residual doméstica sintética utilizada en el desarrollo de este



trabajo (Tabla 1) se preparó para 60 litros de agua a temperatura ambiente. El pesaje de los ingredientes se realizó con una pesa analítica previamente calibrada y fueron agregados al tanque contenedor de agua residual para ser agitados posteriormente a una revolución de 120 rpp. Una vez se disuelven los elementos del agua residual sintética (Figura 3.15 b) se procede a caracterizar el agua residual sintética.



a)



b)

**Figura 3.13** a) Equipos utilizados para la caracterización del agua; b) Apariencia del agua residual sintética.

### 3.9.1 Medición de los parámetros fisicoquímicos del agua residual

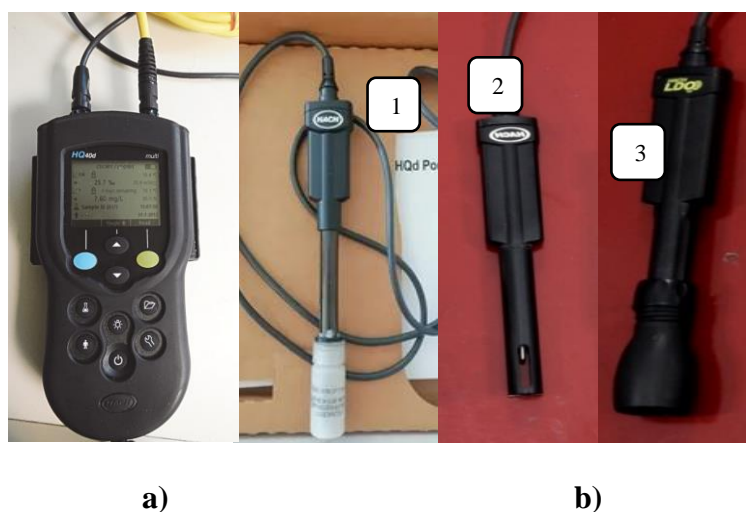
La literatura revisada con respecto a la caracterización de las aguas residuales domésticas, tanto en el ámbito nacional como internacional mostró que los parámetros analizados con más frecuencia son: DQO, DBO, SST, nitratos, nitritos, fosfatos y la presencia de

microorganismos (patógenos, parásitos, etc.). Sin embargo, la revisión de la literatura en cuanto al alcance de los sistemas DAF en el tratamiento de las aguas residuales de diferente composición evidenció que es una técnica sólida y ventajosa debido a su capacidad de remover contaminantes complejos como lo son los SST (micropartículas), aceites & grasas, metales pesados, agentes patógenos (microorganismos), entre otros. Lo cual se atribuye a las propiedades fisicoquímicas que presentan las MBs y a la capacidad de generar radicales libres. En este aspecto, es importante añadir a esta lista de parámetros la medida de oxígeno disuelto debido al aumento de  $O_2$  en el agua por efecto de la aireación ocasionada por las MBs.

Por tanto, los parámetros fisicoquímicos estudiados en este trabajo para la caracterización del agua residual y del agua tratada son: pH, Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), Turbidez (NTU), Color, Oxígeno disuelto, Aceites & grasas, SST de acuerdo a los métodos establecidos por la USEPA [Anexo digital, folder F].

### 3.9.2 Medición de pH, conductividad y oxígeno disuelto

La sonda HQ40d de Hach (Figura 3.14 a), previamente calibrada, permitió realizar medidas in situ de pH (sonda 1), conductividad (sonda 2) y oxígeno disuelto (sonda 3) (Figura 3.16 b) en la caracterización del agua residual. El equipo presenta una precisión para pH de  $\pm 0,002$  y realiza la medición en un rango de 0-14. Para la medición de la conductividad el equipo presenta una precisión de  $\pm 0,5\%$  ( $1\ \mu\text{S}/\text{cm}$  - 200 mS/cm) en un rango de medición de  $0,01\ \mu\text{S}/\text{cm}$  - 200 mS/cm. La medición de concentración de oxígeno, el equipo mide en un rango de 0,01 - 20 mg/l con una resolución de 0,01 mg/l / 0,1 %.



**Figura 3.14** a) Equipos HQ40d de Hach; b) Sondas de medición 1,2 y 3.

### 3.9.3 Medición de Turbidez

El equipo portátil 2100Q de Hach (Figura 3.15) está diseñado de acuerdo al método de USEPA 180.1 para medición de turbidez en un rango de 0-1000 NTU en una muestra de

volumen 15 ml con una exactitud de  $\pm 2\%$  de la lectura más luz difusa.



**Figura 3.15** Turbidímetro portátil 2100Q Hach

### 3.9.4 Medición de Color

El equipo portátil DR 900 Hach (Figura 3.16) se utilizó para realiza mediciones de color (unidades de Pt-Co, platino-cobalto) en una muestra de vidrio de 1 pulgada con marcas de graduación a 10, 20 y 25 ml. Opera por efecto de la Transmitancia (%), Absorbancia y Concentración en un rango de longitud de onda de 420 nm, 520 nm, 560 nm, 610 nm con una exactitud de  $\pm 1$  nm. El equipo se basa en el Método 8025 estándar APHA de platino-cobalto, adaptado de *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*.

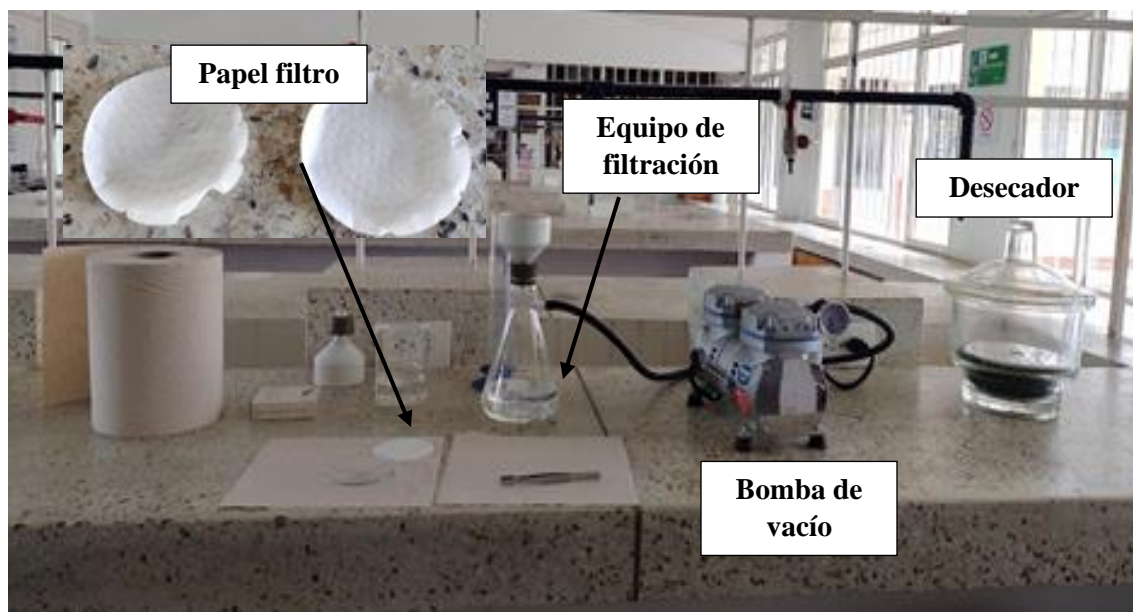


**Figura 3.16** Colorímetro portátil DR 900 Hach

### 3.9.5 Medición de SST

El Método 8158 y el Método 8164 USEPA *Gravimetric Method* adaptado de *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* [Anexo digital, folder F], se aplicó

para la medición de SST de las aguas residuales domésticas sintéticas. Es un método gravimétrico que se basa principalmente en la retención de las partículas sólidas en un filtro de fibra de 10  $\mu\text{m}$  a través del cual se hace pasar una muestra homogénea; el residuo que queda retenido se seca a 103-105°C. Es válido para muestras con SST en un intervalo de 4,5 a 20000 mg/L. Esta medida se realizó en laboratorio, por lo tanto, se preparó el agua residual para una muestra de 1 litro agitándose en el test de jarras a 120 rpp para disolver de forma homogénea los ingredientes.



**Figura 3.17** Configuración del sistema para medición de SST por el método gravimétrico.

### 3.9.6 Parámetros fisicoquímicos del agua residual doméstica sintética

Por tanto, los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales domésticas sintéticas son los siguientes:

**Tabla 17.** Caracterización del agua residual doméstica sintética.

Parámetro	Unidad de medida	Valor
pH	-	6,62
Conductividad	$\mu\text{S}/\text{cm}$	237,60
Concentración de Oxígeno disuelto	mg/L	7,42
Turbidez	NTU	154,20
Color	Pt-Co	965,24
SST	mg/L	480
*Aceites & grasas	mg/L	589

\* El análisis de aceites & grasas se solicitó al Laboratorio de la CRC y se realizó mediante el Método SM5520D Soxhlet.

# Capítulo 4

## Resultados y discusión

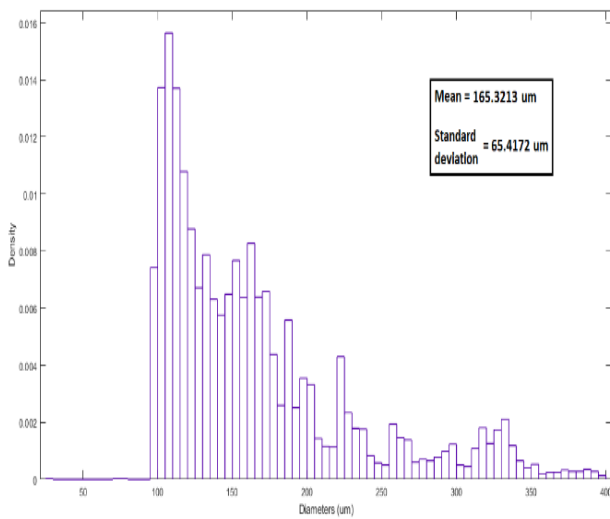
En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de cada experimento descrito en el capítulo anterior con el propósito de establecer mediante análisis estadístico la eficiencia en la remoción de O&G, partículas contaminantes y demás parámetros de limpieza estudiados en las pruebas de tratamiento del agua residual doméstica sintética con DAF. Finalmente, se discuten los análisis desarrollados.

### 4.1 Caracterización de las MBs generadas.

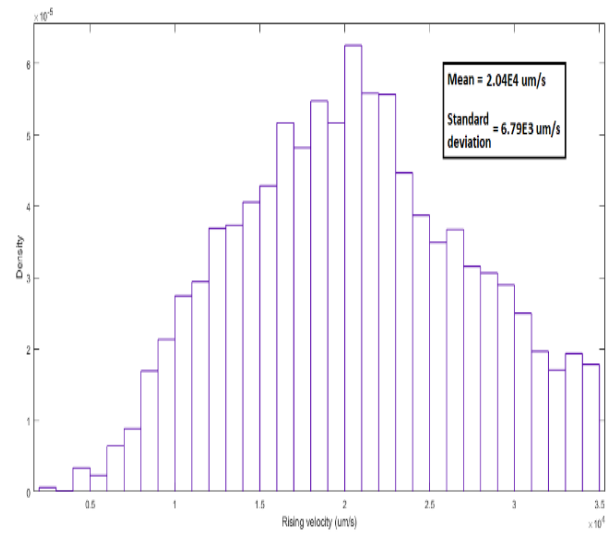
Es importante caracterizar las MBs generadas con los parámetros operativos del diseño experimental que se planteó para la generación de las burbujas (presiones de recirculación de 34 y 36 psi; inyección de aire de 0.1 y 0.5 mg/L), ya que el diámetro y la velocidad de ascenso es fundamental en la eficiencia de remoción de los sistemas DAF. Puesto que, a mayor diámetro, la velocidad de ascenso es mayor por tanto el tiempo de vida de la burbuja es menor y su capacidad para la interacción flóculos-MBs es limitada. Por el contrario, cuando el diámetro de la burbuja es menor, su velocidad de ascenso es reducida lo que conlleva a que su tiempo de vida sea mucho mayor y en efecto la capacidad de remoción es alta debido a la formación de flóculos originados, que posteriormente flotarán a la superficie formando una capa de lodo para luego ser retirada.

En este aspecto, cuando se caracterizan las MBs se garantiza un tratamiento de agua eficaz, pues el conocimiento de sus parámetros óptimos permite una alta eficiencia de remoción. De esta forma se tiene control sobre el proceso de flotación y el sistema no estará operando a ciegas, lo que optimiza la técnica, debido a que se reducen costes de operación y energéticos en la planta de tratamiento. En general, se espera siempre que un sistema de tratamiento de agua sea versátil, flexible y eficaz lo cual se le ha atribuido a la tecnología DAF como tratamiento primario de aguas residuales.

De acuerdo a los parámetros de operación indicados en el diseño experimental de generación de burbujas (sección 3.6), se observa para el Experimento A (presión de recirculación es 34 psi y un caudal de aire de 0.5 L/min) que se generaron MBs entre 100  $\mu m$  y 400  $\mu m$  de diámetro, sin embargo, se obtuvo una pequeña población de MBs con diámetros menores a 100  $\mu m$  (Figura 4.1a).



a)

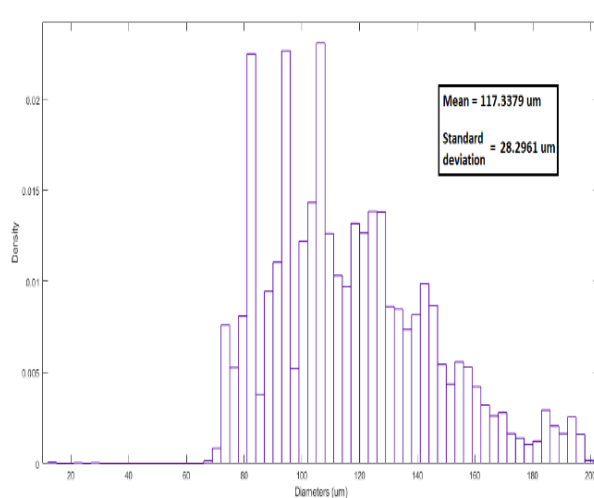


b)

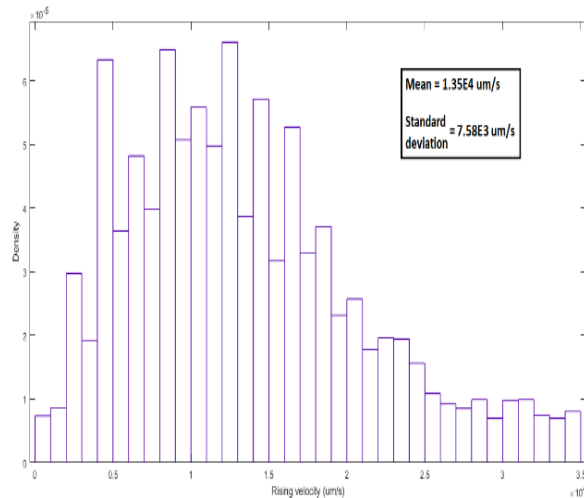
**Figura 4.1** Experimento A a) Diámetros de las MB; b) Velocidad de ascenso

Para este experimento, el diámetro medio obtenido es  $165.32 \mu m$  y la desviación estándar de  $65.42 \mu m$ . Así mismo, en esta figura se evidencia que las velocidades de ascenso de las MB generadas bajo estas condiciones de trabajo (Figura 4.1 b), tienen valores de  $0.5 E4 \mu m / s$  a  $3.5 E4 \mu m / s$  con una desviación estándar de  $6.79 E3 \mu m / s$ , por lo tanto, las MB se desplazan dentro del fluido a una velocidad media de  $2.04 E4 \mu m / s$ .

Al utilizar la misma presión de recirculación anterior, pero con un caudal de aire a  $0.1 L/min$  (Experimento B), se reduce el rango de diámetros de las MB generadas con respecto al obtenido en el experimento anterior, el cual varía entre  $70 \mu m$  y  $200 \mu m$ , es decir, el tamaño de las MB disminuye (Figura 4.2 a). Por lo tanto, el diámetro medio y la desviación estándar disminuyen a  $117.34 \mu m$  y  $28.30 \mu m$  respectivamente.



a)



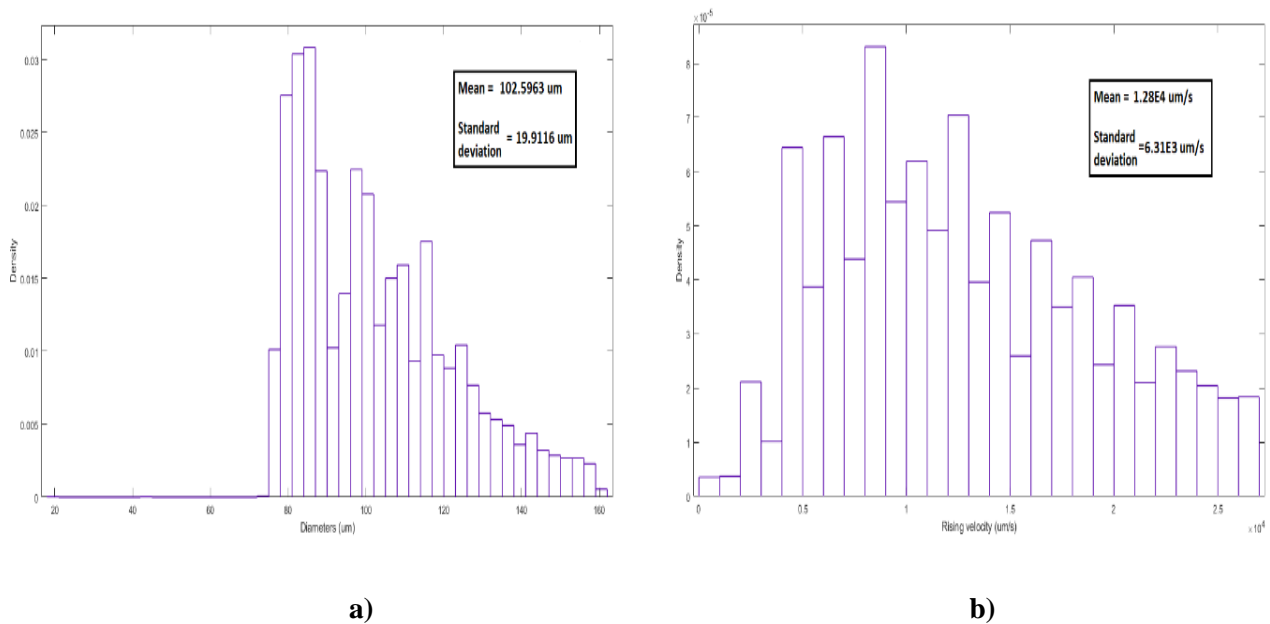
b)

**Figura 4.2** Experimento B a) Diámetros de las MB; b) Velocidad de ascenso.

No obstante, en este experimento se generó una pequeña población de MB con diámetros inferiores a  $70 \mu m$ . Las velocidades de estas MB (Figura 4.2 b) varían de  $0.1 E4 \mu m / s$  a

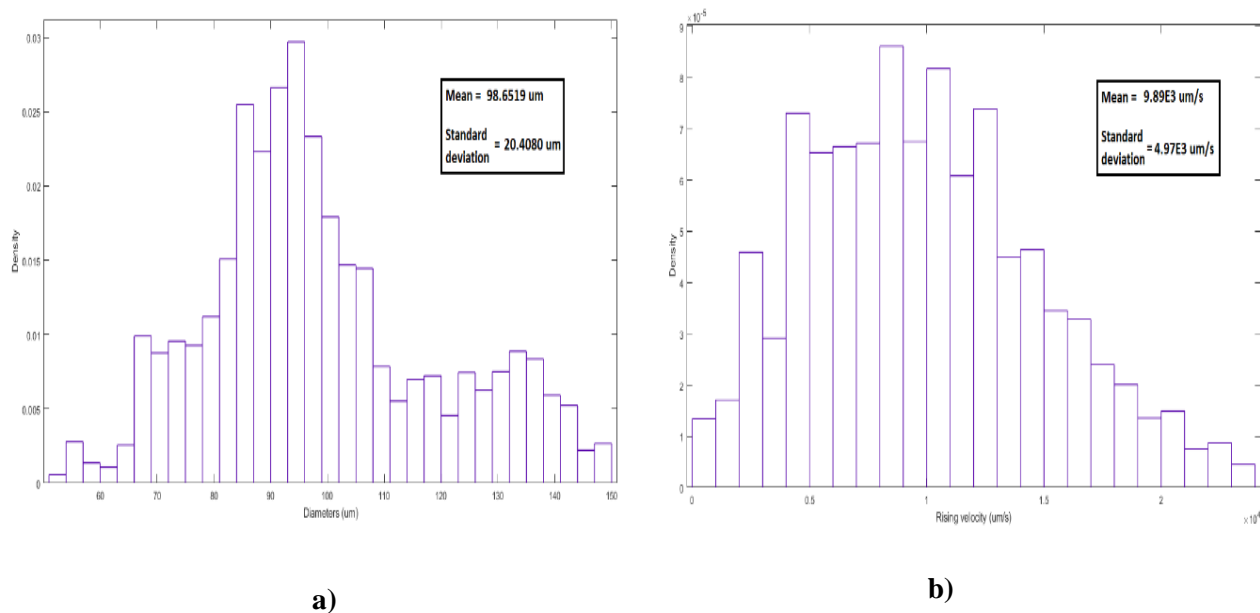
$3.5E4 \mu m /s$ , en otras palabras, se presenta un incremento tanto en el rango de velocidad como en la desviación estándar ( $7.58E3 \mu m /s$ ), sin embargo, la velocidad media con la cual se desplazan las MB dentro del fluido es menor ( $1.35E4 \mu m /s$ ), en comparación con lo registrado en el Experimento A.

Por otra parte, al incrementar la presión de recirculación a 36 psi y el caudal de aire a 0.5 L/min (Experimento C), se obtuvieron MB con diámetros entre  $75 \mu m$  y  $160 \mu m$  (Figura 4.3 a), aunque hubo una pequeña población de MB con tamaños inferiores a  $75 \mu m$  de diámetro; por consiguiente, en promedio se registra un diámetro de  $102.59 \mu m$  y una desviación estándar de  $19.9116 \mu m$ . Entre tanto, las velocidades de ascenso de las MB toman valores entre  $0.1E4 \mu m /s$  y  $2.7E4 \mu m /s$ , es decir, la velocidad media con la cual se desplazan las MB dentro del fluido y la desviación estándar en este experimento son iguales a  $1.28E4 \mu m /s$  y  $6.31E3 \mu m /s$ , respectivamente (Figura 4.3 b).



**Figura 4.3** Experimento C a) Diámetros de las MB; b) Velocidad de ascenso.

En el Experimento D se utilizó un caudal de aire de 0.1 L/min con una presión de recirculación igual a la empleada en el Experimento D, obteniéndose un rango de diámetros de MB entre  $50 \mu m$  y  $150 \mu m$  (Figura 4.4 a). Es de notar una reducción en el tamaño de estas MB con respecto al obtenido en el experimento anterior, por consiguiente, el valor del diámetro medio disminuye a  $98.65 \mu m$ , aunque se presenta un pequeño incremento en la desviación estándar ( $20.41 \mu m$ ). Por otro lado, la velocidad de ascenso de las MB generadas (Figura 4.4 b), toman valores de  $1E4 \mu m /s$  y  $2.5E4 \mu m /s$ , es decir, las MB se desplazan a una velocidad media menor ( $9.89E3 \mu m /s$ ) que en el Experimento C. Además, la desviación estándar ( $4.97E3 \mu m /s$ ) también disminuye en comparación a la registrada en el experimento anterior.



**Figura 4.4** Experimento D a) Diámetros de las MB; b) Velocidad de ascenso.

## 4.2 Selección de los parámetros de generación de burbujas DAF

En general, los resultados anteriores [Anexo digital, folder G] evidencian que en los cuatro experimentos (A, B, C, D) se obtienen en promedio MBs con diámetros inferiores a  $200 \mu\text{m}$  y velocidades de ascenso menores a  $2.1\text{E}4 \mu\text{m/s}$ . Sin embargo, comparando estos experimentos, se observa que al utilizar una presión de recirculación de 36 psi con inyección de aire de 0.1 L/min, se generan MB con diámetros medios y velocidades medias menores a  $100 \mu\text{m}$  y  $1\text{E}4 \mu\text{m/s}$ , respectivamente. Aunque, para una presión de recirculación de 36 psi con inyección de aire de 0.5 L/min el diámetro de las MB generadas es menor en promedio a  $120 \mu\text{m}$  y la velocidad media de ascenso es inferior a  $1.4\text{E}4 \mu\text{m/s}$ , lo cual es positivo para entrar a comparar el efecto del cambio de presiones a un mismo valor de inyección de aire.

Por tanto, los parámetros de generación de burbujas seleccionados para el estudio del tratamiento del agua residual doméstica sintética son a una presión de recirculación de 36 psi con inyección de aire de 0.1 L/min y de 34 psi e inyección de aire de 0.1 L/min.

## 4.3 Estimación de las poblaciones de MBs detectadas por video

El algoritmo desarrollado en este trabajo tiene la capacidad de realizar seguimiento entre 9 y 32 MB por video (Tabla 18), independientemente de la turbulencia del fluido generada por las presiones de recirculación, considerándose objeto de estudio únicamente aquellas que se desplazan desde la zona inferior hasta la zona superior de cada fotograma. Además, rastrea las MB superpuestas mediante la asignación de centroides en sus respectivas posiciones en

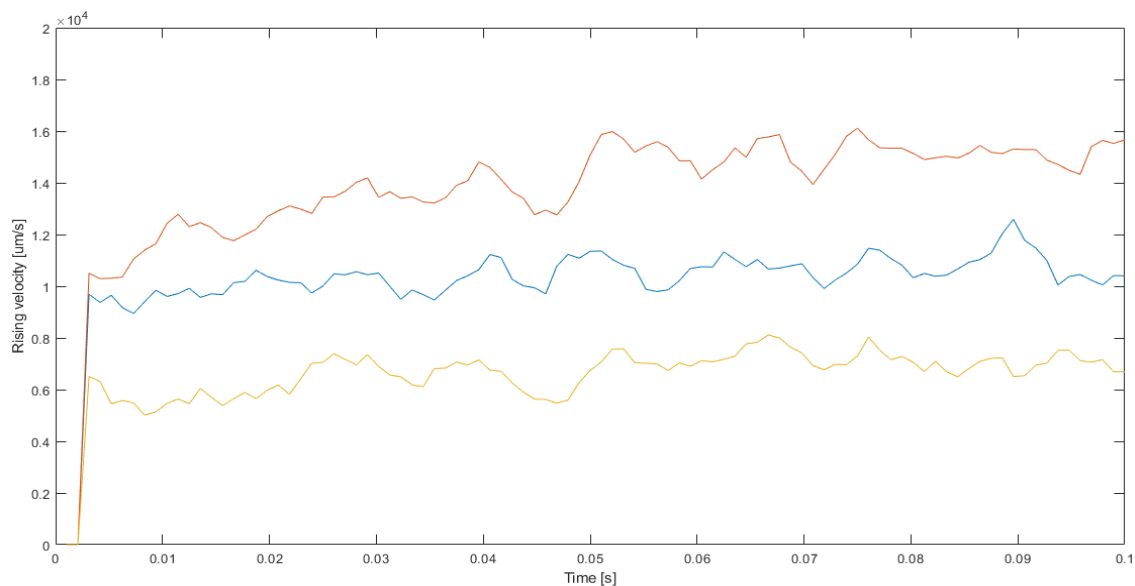


la matriz de coordenadas de cada fotograma, siempre que estas MB se encuentren separadas en el primer fotograma procesado para cada video.

**Tabla 18.** Número de microburbujas rastreadas por video en cada experimento de generación.

Experimento	Videos procesados									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>A</b>	21	17	27	17	18	18	9	13	11	15
<b>B</b>	12	20	32	12	32	20	20	27	24	21
<b>C</b>	25	21	30	21	25	26	20	15	9	27
<b>D</b>	11	16	16	8	9	12	8	12	7	14

La trayectoria de tres microburbujas mostró un comportamiento en zigzag (Figura 4.5) similar al estudio realizado en [77], lo cual podría deberse a la hidrodinámica del tanque de flotación en el cual pueden presentarse choques entre burbujas que ocasionan pérdida de energía y la correspondiente variación en los valores de velocidad para cada una de las burbujas.



**Figura 4.5.** Comportamiento de velocidad de tres microburbujas.

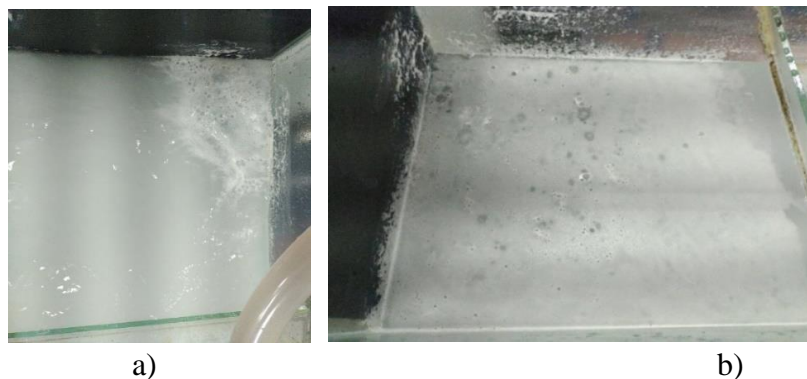
Un factor que puede afectar la velocidad de ascenso de las MBs es la interacción burbuja-burbuja, ya que al chocar estas entre si ocasiona que su velocidad de ascenso no sea idealmente lineal. Sin embargo, se observa de la Figura 4.5 que, pese a los choques y a la turbulencia del agua, este parámetro no es tan variante lo cual es afirmativo debido a que en este estudio las MBs no tienen carga de partículas en su superficie.

## 4.4 Pruebas de limpieza mediante la técnica DAF

Una vez se tienen los parámetros operativos del sistema se procedió a realizar las pruebas de limpieza para estudiar el efecto de estos en los parámetros de remoción. Para este propósito, se debe realizar la comparación de los parámetros fisicoquímicos del agua sin tratar con respecto a los del agua tratada. Este análisis permite determinar la eficiencia del sistema en el tratamiento del agua residual. Las pruebas de limpieza consisten en tratar el agua residual doméstica sintética con el prototipo DAF laboratorio durante un tiempo de 15 minutos.

Con el objetivo de garantizar la repetibilidad de las medidas de los parámetros de remoción establecidos en esta investigación, se realizaron cinco pruebas de limpieza con cada pareja de parámetros (34 psi a 0,1 L/min de inyección de aire y 36 psi a 0,1 L/min de inyección de aire) usando en cada prueba un tubo Venturi nuevo. Es decir, se obtuvieron en total 10 muestras de agua tratada de las cuales se midió para cada una los parámetros pH, conductividad, oxígeno disuelto, turbidez, color y aceites & grasas. El análisis de SST se realizó una sola vez debido a la limitación de los equipos y al costo.

El tiempo total del tratamiento del agua en el DAF prototipo laboratorio es de 16 minutos para cada prueba de limpieza, debido a que el tubo Venturi comienza a presentar desgaste debido a que está fabricado con un material de bajo costo (material de impresión 3D, PLA) y al estar expuesto al fenómeno de la cavitación hidrodinámica su tiempo de vida se reduce. También a que el tiempo máximo de operación de la bomba de agua es de 20 minutos. Durante el primer minuto el sistema se estabiliza en la presión de recirculación e inyección de aire configurada. En los 7 minutos siguientes se observa que el sistema comienza a formar una pequeña región de espuma o sólidos suspendidos (Figura 4.6 a). En los próximos 8 minutos se observa que el sistema ha comenzado a formar una capa visible de sólidos (Figura 4.6 b) en particular se observa la presencia de aceites & grasas.



**Figura 4.6.** Formación de la capa de sólidos de remoción a) A los 8 minutos de operación; b) A los 15 minutos de operación.

Es importante mencionar que en el tanque de flotación la zona que más presenta capa de remoción es la zona de visualización de las MBs (Figura 4.7).



**Figura 4.7.** Formación de una capa de espuma de sólidos de remoción en la zona de visualización del tanque DAF prototipo de laboratorio.

Esto puede ocasionarse debido a la turbulencia presentada por efecto del caudal de recirculación elevado, suministrado por la bomba de agua PEDROLLO, lo cual puede generar un estallido de una gran cantidad de nubes de burbujas, y conllevando de esta forma a la localización de MBs sobrevivientes en la zona de visualización.

## 4.5 Caracterización del agua tratada

Las muestras de agua tratada para cada uno de los experimentos fueron tomadas en recipientes de vidrio de 1 litro de capacidad. La medición de pH, conductividad, oxígeno disuelto, turbidez, color y SST se realizaron siguiendo el mismo método de análisis descrito en la sección 3.6 (Figura 4.8 a). Para el caso del análisis de aceites & grasas las muestras de agua tratada se conservaron con ácido sulfúrico con  $\text{pH} < 2$  y se transportaron en nevera de icopor hacia el laboratorio de la Corporación Autónoma Regional del Cauca, CRC Popayán (Figura 4.8 b).



a)



b)

**Figura 4.8.** Muestras del agua tratada a) Medición de los parámetros de limpieza in situ; b) Conservación de las muestras para análisis de aceites & grasas en laboratorio certificado.

Los promedios de los parámetros fisicoquímicos del agua tratada medidos para cada experimento se consignan en las Tablas 19 y 20 respectivamente [Anexo digital, folder H]. El análisis de aceites & grasas se excluye de estas tablas de datos debido a que las pruebas para su medición se realizaron posteriormente dada la limitación de los equipos para su análisis. Haciendo una comparación entre los parámetros fisicoquímicos del agua sin tratar con los del agua tratada se observa una eficiencia de remoción considerable en la remoción de SST y turbidez.

**Tabla 19.** Caracterización del agua tratada con 34 psi y 0,1 L/min de aire.

Parámetro	A. Residual	A. Tratada	Unidad	Eficiencia (%)
	Medida	Medida		
Turbidez	154,20	116,96	NTU	24,14
Color	965,24	938,76	Pt-Co	2,74
Conductividad	237,60	209,29	$\mu\text{S/cm}$	11,97
pH	6,62	6,7356	-	-
LDO	7,42	7,59	mg/L	-
SST	480	210	mg/L	56,25

**Tabla 20.** Caracterización del agua tratada con 36 psi y 0,1 L/min de aire.

Parámetro	A. Residual	A. Tratada	Unidad	Eficiencia (%)
	Medida	Medida		
Turbidez	154,20	139,44	NTU	9,5
Color	965,24	949,9	Pt-Co	1,53
Conductividad	237,60	192,48	$\mu\text{S/cm}$	18,99
pH	6,62	6,87	-	-
LDO	7,42	7,1	mg/L	-
SST	480	40	mg/L	91,6

Un caso muy particular se observa en los parámetros de pH y concentración de oxígeno disuelto. En el caso del pH el valor en el agua sin tratar es de 6,62, sin embargo, para el tratamiento con 34 psi se registra un valor de 6,73 y de 6,87 para 36 psi lo cual es algo positivo ya que reduce su acidez en un 1,77 %. Un parámetro fisicoquímico importante es la concentración de oxígeno disuelto debido al oxígeno suministrado (aire) en el agua residual para su tratamiento.

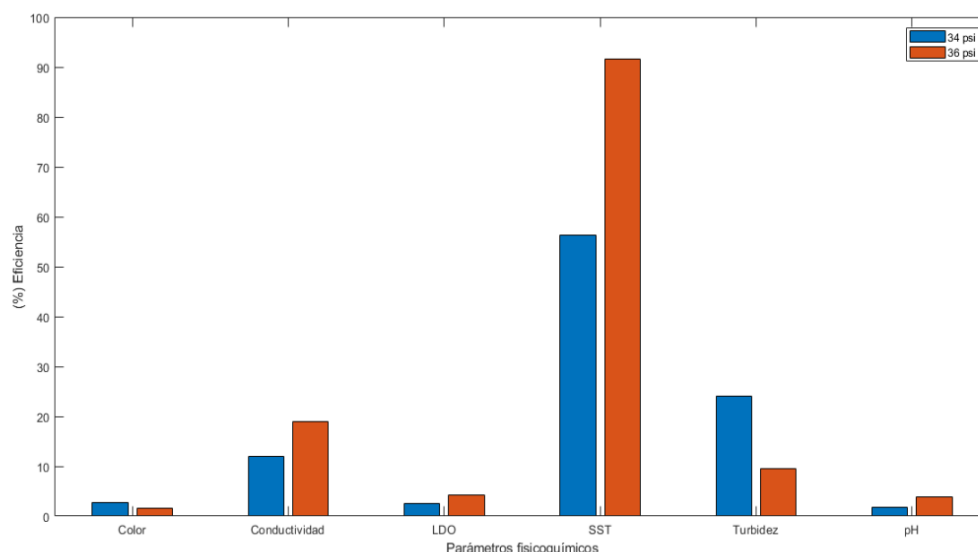
El aumento de la concentración de oxígeno disuelto es fundamental para evitar la eutrofización provocada por los incrementos de nitratos y fosfatos en el agua. En este aspecto, se obtuvo un valor de 7,42 mg/L en el agua residual, de 7,59 mg/L en el agua tratada a 34 psi aumentando con un 2.53 % de concentración y de 7,1 mg/L en el agua tratada con 36 psi. Lo cual es muy extraño ya que se esperaba que la concentración de oxígeno incrementara con el aumento de la presión de trabajo, lo cual indica que para este experimento el oxígeno se

redujo en un 4,24 %. En este aspecto, las aguas residuales domésticas sintéticas contenían nitrógeno orgánico en forma de urea al igual que en el estudio [69], que se convirtió en  $\text{NH}_4$  amonificación y consumió una gran cantidad de oxígeno disuelto.

El porcentaje de eficiencia en la remoción de turbidez para el agua tratada a 34 psi registró un valor de 24,14 % lo cual es considerable para el sistema DAF prototipo laboratorio debido a la limitación en el tiempo de operación del sistema, por el contrario, a 36 psi no es significativa ya que solo representa un 9,5 % de remoción. Estos resultados contradicen lo revisado en la literatura ya que según los investigadores a mayor presión el efecto de la cavitación hidrodinámica es mejor hasta cierto valor crítico de presión. Por otro lado, el color representó solo el 2,74 % de remoción para el agua tratada a 34 psi y de 1,53 % para una presión de 36 psi lo cual no representa un aporte significativo en la prueba de limpieza.

En el caso de la conductividad se observó un porcentaje de eficiencia del 11,97% a 34 psi y de 18,99 % para el agua tratada a 36 psi. Este parámetro es importante ya que expresa la capacidad de una sustancia de conducir la corriente eléctrica, por lo tanto, en el caso de medidas en soluciones acuosas, el valor de la conductividad es directamente proporcional a la concentración de sólidos disueltos, por lo tanto, cuanto mayor sea dicha concentración, mayor será la conductividad. En efecto, se observa que el porcentaje de eficiencia de remoción de SST a 34 psi es de 56,25 y de 91,6 % para agua tratada a 36 psi, lo cual representa la relación directa entre la conductividad y los SST.

En general, los resultados muestran que los parámetros óptimos para el tratamiento de agua doméstica sintética son a 34 psi con suministro de aire de 0,1 L/min para remoción de turbidez y color, observándose un incremento en la concentración de oxígeno disuelto. Sin embargo, se remueve mayor cantidad de elementos conductores de electricidad con 36 psi a 0,1 L/min de aire, aumentando el pH con esta misma configuración de parámetros de operación (Figura 4.9).



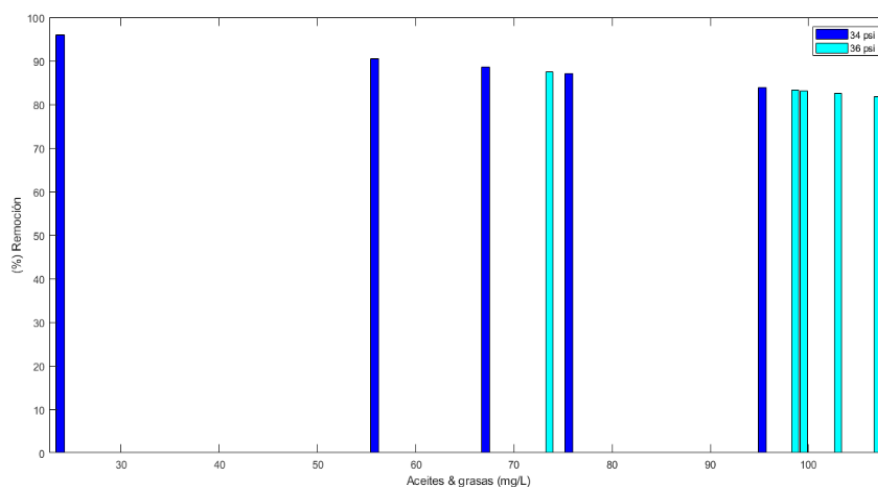
**Figura 4.9.** Porcentajes de eficiencia en los parámetros característicos del agua tratada

Por otra parte, el análisis de aceites & grasas (Tabla 21) para cada pareja de parámetros (34 psi a 0,1 L/min de inyección de aire y 36 psi a 0,1 L/min de inyección de aire) registró mejores resultados en la eficiencia de remoción para el agua tratada con 34 psi que con 36 psi (Figura 4.10).

**Tabla 21.** Eficiencias de remoción en aceites & grasas.

Análisis de aceites & grasas				
Sin tratamiento	Presión de recirculación: 34 psi; Inyección de aire: 0.1 L/min		Presión de recirculación: 36 psi; Inyección de aire: 0.1 L/min	
	Tratamiento DAF		Tratamiento DAF	
(mg/L)	(mg/L)	Eficiencia (%)	(mg/L)	Eficiencia (%)
589	95,3	83,82	103	82,51
589	75,6	87,16	99,5	83,11
589	23,8	95,96	107	81,83
589	67,1	88,61	73,6	87,50
589	55,8	90,53	98,6	83,26

Aunque los porcentajes de eficiencia en turbidez, color, conductividad no alcanzan el 50 % de eficiencia se observa que el sistema remueve con eficiencia los SST y los aceites & grasas.



**Figura 4.10.** Porcentajes de eficiencia de remoción en aceites & grasas.

## 4.6 Análisis del efecto de los parámetros característicos de las burbujas en el tratamiento del agua

El análisis de datos se realizó con Matlab. Para determinar si cualquiera de las diferencias entre las medianas es estadísticamente significativa, se compara el valor p con el nivel de significancia para evaluar la hipótesis nula. La hipótesis nula indica que las medias de población son todas iguales. Las diferencias se consideraron significativas a  $p < 0,05$ . Es

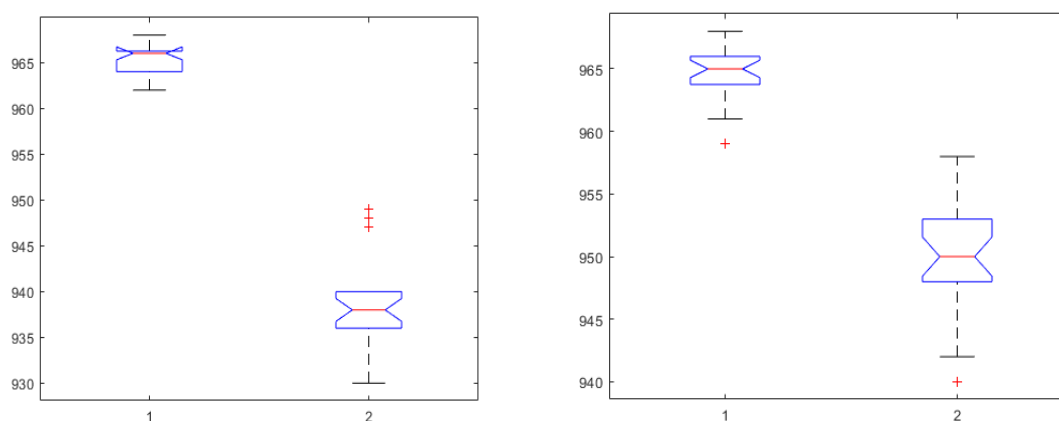
válido realizar una comparación entre las pruebas de limpieza (usando para cada una la pareja de parámetros 34 psi a 0,1 L/min de inyección de aire y 36 psi a 0,1 L/min de inyección de aire). Para el análisis posterior a las pruebas estadísticas entre poblaciones, se usa el promedio de los datos como medida de tendencia central.

Los valores de p obtenidos mediante el método de Kruskal-Wallis se consignan en la Tabla 22, con una significancia del 5% aplicado a los parámetros de remoción del agua tratada y sin tratar. Para valores de  $p < 0.05$  indica que se presentan diferencias entre los parámetros medidos de los dos tipos de agua. En caso contrario ( $p \geq 0.05$ ), indica que no es posible diferenciar el valor de los parámetros entre el agua sin tratar y la tratada.

**Tabla 22.** Valores de p con el método de Kruskal-Wallis.

Presión de recirculación (psi)	Valores de p					
	Color	Turbidez	Conductividad	LDO	pH	Aceites & Grasas
34	1.047E-9	1.191E-9	1.086E-9	1.274E-9	1.267E-9	0.0053
36	1.195E-8	1.214E-8	1.243E-8	1.218E-9	1.277E-9	0.0058

En las pruebas, el color disminuye significativamente en el agua tratada (Figura 4.11), es decir, los valores medios de este parámetro presentan diferencias estadísticamente significativas entre el agua sin tratar y tratada ya que el valor de p es menor a 0.05 para las presiones de recirculación de 34 psi y 36 psi. Sin embargo, al comparar los valores de p para estas dos presiones de recirculación, se evidencia una mayor diferencia para 34 psi, en otras palabras, el color se redujo en mayor proporción para este experimento. Hay diferencia entre presiones, el promedio del color a 34 psi es 2.74% y a 36 psi es 1.53%, por lo que para reducción de color se aconseja trabajar con una presión de 34 psi.

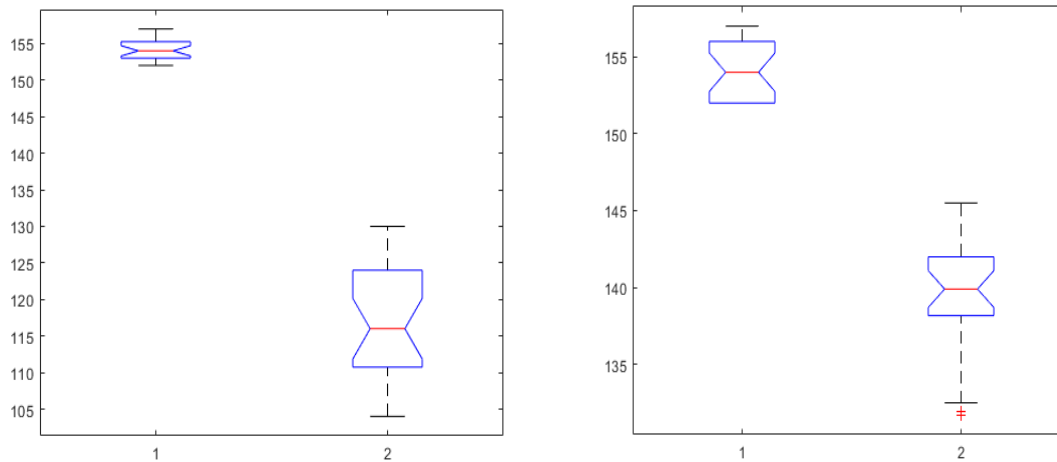


**Figura 4.11.** Análisis Kruskal-Wallis Color a) 34psi; b) 36 psi; (1: Agua no tratada, 2: Agua tratada)

En la Figura 4.12, se muestran los resultados obtenidos para la turbidez. Los valores medios de turbidez son menores en el agua tratada con presiones de recirculación de 34 psi y 36 psi, esto significa, que el valor de p obtenido en los dos experimentos es inferior a 0.05, lo cual

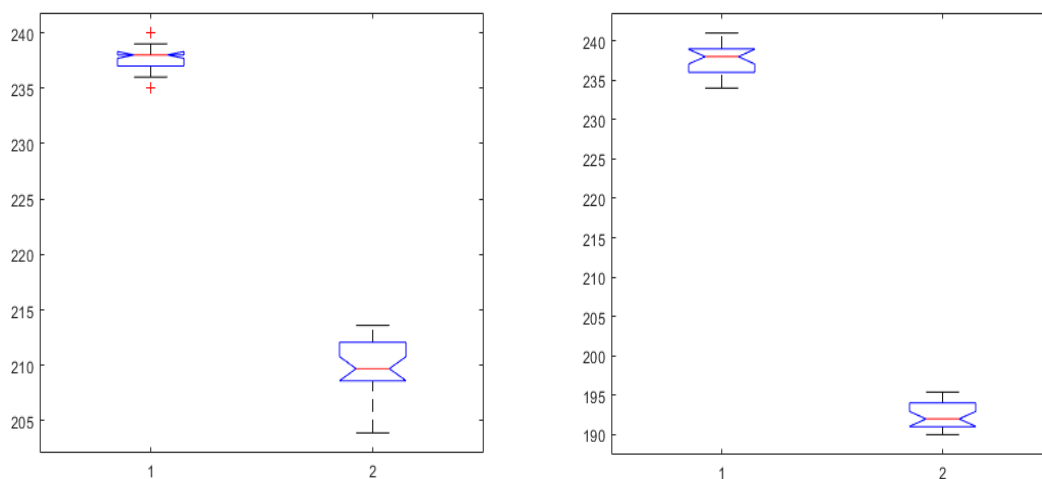
indica que entre los valores medios de turbidez se presentan diferencias estadísticamente significativas.

Por otra parte, al comparar los valores de p entre ambos experimentos, se puede notar que, para 34 psi se redujo en mayor proporción la turbidez. Hay diferencia entre presiones, el promedio de la turbidez a 34 psi es 24.14% y a 36 psi es 9.50%, por lo que para reducción de turbidez se aconseja trabajar con una presión de 34 psi.



**Figura 4.12** Análisis Kruskal-Wallis Turbidez a) 34psi; b) 36 psi; (1: Agua no tratada, 2: Agua tratada)

En cuanto a la conductividad, la Figura 4.13 muestra una reducción del valor medio de este parámetro sobre el agua tratada, tanto para una presión de recirculación de 34 psi como para 36 psi. Esto se comprueba mediante el valor de p, el cual es menor a 0.05 en los dos experimentos, lo cual significa que entre los dos tipos de agua (tratada y sin tratar), se presentan diferencias estadísticas considerables en conductividad.

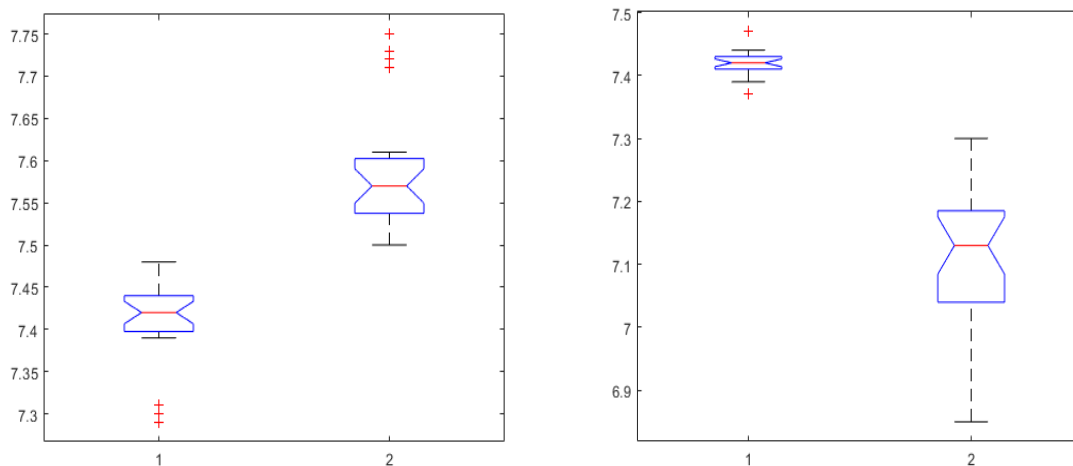


**Figura 4.13** Análisis Kruskal-Wallis Conductividad a) 34psi; b) 36 psi; (1: Agua no tratada, 2: Agua tratada)



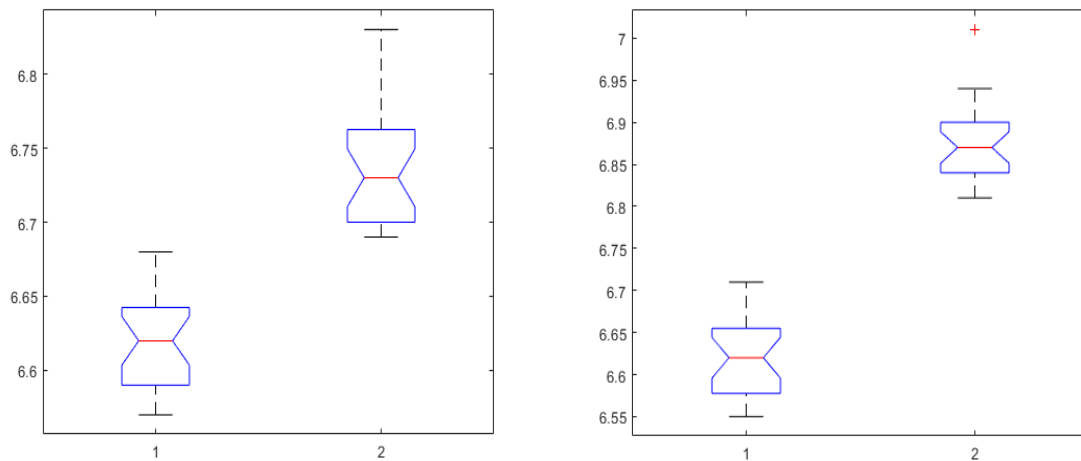
Al comparar ambos valores de  $p$  para los dos experimentos, se evidencia que, al utilizar una presión de recirculación de 34 psi, el nivel de reducción en la conductividad es mayor que la obtenida a 36 psi de presión. Hay diferencia entre presiones, el promedio de la conductividad a 34 psi es 11.97% y a 36 psi es 18.99%, por lo que para reducción de conductividad se aconseja trabajar con una presión de 36 psi.

Por otra parte, en la Figura 4.14 se evidencian diferencias estadísticas entre los valores medios de LDO para las presiones de recirculación de 34 psi y 36 psi, debido a que los valores de  $p$  son menores a 0.05. Sin embargo, para el experimento con presión de 34 psi, se presenta un incremento en LDO para el agua tratada, mientras que, en el experimento con presión de recirculación de 36 psi es menor. Esto indica que para disminuir LDO es necesario utilizar una presión de recirculación de 36 psi. Hay diferencia entre presiones de recirculación, el promedio del LDO a 34 psi es 2.53% y a 36 psi es 4.24%, por lo que para incremento de LDO se aconseja trabajar con una presión de 34 psi.



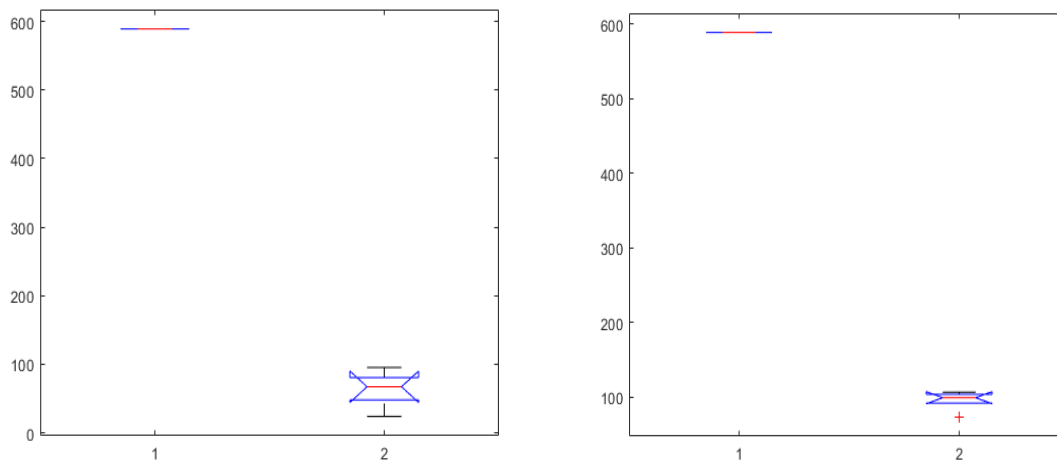
**Figura 4.14** Análisis Kruskal-Wallis Concentración oxígeno disuelto a) 34psi; b) 36 psi; (1: Agua no tratada, 2: Agua tratada)

En la Figura 4.15, se puede observar un incremento en el pH para el agua tratada utilizando las dos presiones de recirculación (34 psi y 36 psi), esta diferencia en el valor medio de pH entre el agua tratada y el agua sin tratar se evidencia mediante el parámetro  $p$  obtenido para ambos experimentos, los cuales son menores a 0.05, es decir, se presentan diferencias estadísticamente significativas en el pH, además los valores de  $p$  son muy cercanos entre los experimentos. Hay diferencia entre presiones, el promedio del pH a 34 psi es 1.77% y a 36 psi es 3.85%, por lo que para incremento del pH se aconseja trabajar con una presión de 36 psi.



**Figura 4.15** Análisis Kruskal-Wallis pH a) 34psi; b) 36 psi; (1: Agua no tratada, 2: Agua tratada)

Finalmente, la Figura 4.16 muestra los resultados obtenidos de aceites & grasas. Con base en esta figura, se presenta una disminución en el parámetro de aceites & grasas en el agua tratada, esto se evidencia mediante el valor de  $p$ , el cual toma valores menores a 0.05 en los experimentos con presión de recirculación de 34 psi y 36 psi, es decir, los valores medios de este parámetro presentan diferencias estadísticamente significativas. Además, el valor de  $p$  en los dos experimentos es similar. Hay diferencia entre presiones, el promedio de la grasa a 34 psi es 89.22% y a 36 psi es 83.64%, por lo que para reducción de grasas se aconseja trabajar con una presión de 34 psi.



**Figura 4.16** Análisis Kruskal-Wallis aceites & grasas a) 34psi; b) 36 psi; (1: Agua no tratada, 2: Agua tratada)

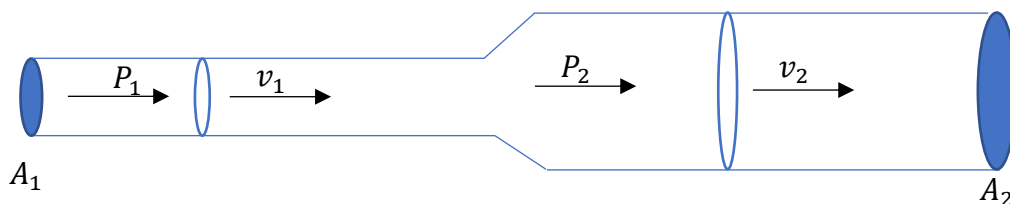
## 4.7 Discusión

Los resultados obtenidos muestran que el prototipo DAF es eficiente en remover aceites & grasas, SST y reducir la conductividad cuando el sistema trabaja a una presión de recirculación de 36 psi, y para el caso de la presión de recirculación a 34 psi el sistema remueve turbidez, color y aceites & grasas con porcentajes de eficiencia significativos. Sin embargo, se observa una falencia en el sistema pues se espera que la eficiencia de remoción de color y turbidez aumente con el incremento de la presión de recirculación, esto puede deberse a un fenómeno físico relacionado con la caída de presión ocasionada por la turbulencia, el incremento del caudal de recirculación y las diferencias de área del circuito hidráulico. Lo que conlleva a reducir la concentración de oxígeno disuelto cuando se configura el sistema a 36 psi y ocasionar una nube de colisión brusca entre MBs-partículas que permiten la remoción de SST, pero aumenta la turbidez pues cuantos más sólidos en suspensión haya en el agua, más sucia parecerá ésta y más alta será su medida.

En ese aspecto, observando este fenómeno dado puede decirse que es conveniente aumentar la altura del tanque de flotación para incrementar la eficiencia en la remoción de turbidez y color y se podría pensar en rediseñar el circuito hidráulico, ya que de acuerdo a los resultados del estudio [77] las MBs cuando están cargadas de micropartículas presentan una trayectoria distinta cuando no tienen carga, lo que evidencia posibles diferencias en su hidrodinámica de flotación que pueden afectarse por efectos de la cavitación hidrodinámica y la velocidad del fluido.

El principio de Bernoulli en la dinámica de los fluidos establece que un aumento en la velocidad del fluido ocasiona una disminución en la presión estática o lo que es lo mismo una pérdida en la energía potencial del fluido (Figura 4.17). En otras palabras, en un tramo de tubería de menor sección transversal, la velocidad del fluido será mayor que en el tramo de mayor sección transversal. De acuerdo a este principio, si se aplica la ecuación de Bernoulli para estimar el comportamiento de un líquido que fluye a través de una constricción se deriva la siguiente ecuación [210]:

$$\frac{v_1^2}{2} + gh_1 + \frac{P_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2} + gh_2 + \frac{P_2}{\rho} + g \sum h_{i,str} \quad (9)$$



**Figura 4.17.** Principio de Bernoulli.

$v$  es la velocidad de circulación del fluido en un punto de la línea de corriente,  $P$  es la presión en un punto determinado,  $\rho$  es la densidad del fluido,  $g$  es la aceleración de la gravedad, y  $h$  es la elevación del punto sobre un plano de referencia que tiene en cuenta la energía potencial,

y  $\sum h_{i, str}$  es la energía perdida por la corriente debido a la resistencia al flujo que se convierte en energía térmica durante el paso del fluido a través de la constricción.

Este principio es aprovechado por el fenómeno de la cavitación hidrodinámica como se describió en la sección 3.4, ya que se produce cuando el fluido pasa a gran velocidad por un área ocasionando una descompresión del fluido. Cuando la velocidad del líquido en la constricción aumenta, la presión en la constricción se reduce considerablemente y el líquido puede evaporarse generando burbujas de cavitación destructivas incluso a baja temperatura. En muchos casos, esto puede dañar el equipo; sin embargo, el diseño y la geometría adecuados de la constricción permiten controlar el proceso [210]. En este sentido es importante revisar el diseño del circuito hidráulico, ya que es un factor que puede explicar la caída de presión cuando en el sistema DAF prototipo de laboratorio se configura con una presión de recirculación de 36 psi.

El circuito hidráulico básicamente está conformado por elementos como válvulas, tubería PVC, manguera, reductores PVC, uniones PVC ubicadas en ciertas secciones del sistema. Se observa que el circuito presenta cambios bruscos de área en toda la conexión ya que la línea de conducción de fluido contiene tramos de manguera  $\frac{3}{4}$ " de 2 mm de espesor, reductores PVC y tramos de tubo PVC de distinto diámetro:

- Reductores PVC: conversor de 1" a 1/2" pulgada; conversor de 1" a 3/4" pulgada
- Uniones T en PVC: PVC sin rosca de 1/2" pulgada; PVC sin rosca de 1" pulgada
- Tramo 1: unión entre el tanque principal y la motobomba después de la válvula 1. Tubo de 1 1/4".
- Tramo 2: conexión entre la salida de la unión PVC 1 y la válvula 3. Tubo de 1" pulgada.
- Tramo 3: unión entre la salida de la válvula 2 y el rotámetro de agua. Tubo de 1" pulgada.
- Tramo 4: conexión entre manguera, y tubo Venturi.

Accesorios, válvulas y juntas de expansión, cualquier cambio en la dirección generará fricción y provocará la pérdida de presión. En efecto, los cambios repentinos de las constricciones generan cambios bruscos en la velocidad del fluido y las caídas de presión, que son el resultado de las fuerzas de fricción ejercidas sobre un fluido en un sistema hidráulico, resistiendo su flujo. Por tanto, a medida que aumenta la pérdida de presión, también incrementa la energía requerida por las bombas del sistema para compensarla, lo que genera mayores costos de operación.

En cuanto a la longitud de la tubería, el circuito hidráulico puede asemejarse a un circuito eléctrico ya que entre más largo sea el cable conductor de electricidad mayor resistencia habrá al flujo de corriente, de igual forma en la dinámica de fluidos se reduce la velocidad y la presión del agua. Otro factor que se puede sumar al efecto de las caídas de presión en los circuitos hidráulicos es la fuerza de fricción del material, ya que todo material utilizado en un sistema de tuberías tiene un coeficiente de fricción o una medida de rugosidad que puede ralentizar el fluido.

Finalmente, la reducción de presión ocasiona un efecto negativo sobre la concentración de oxígeno disuelto, ya que este parámetro depende en particular de la presión y la temperatura. Es decir, a mayor presión el contenido de aire disuelto en el agua es mayor, y a mayor

temperatura, el contenido de aire disuelto disminuye. En condiciones de alta temperatura y baja presión este oxígeno se libera en mayor proporción. En los cambios de pendientes de las conducciones se producen alteraciones de la presión dentro de las mismas, lo que hace que pueda liberarse aire disuelto con la consiguiente formación de cavidades de aire.

Por tanto, se recomienda cambiar el material de construcción de tubo Venturi para aumentar su tiempo de vida útil y aprovechar mejor las pruebas experimentales. También, mejorar el circuito hidráulico o rediseñarlo para evitar fluctuaciones y pérdidas en la presión. En cuanto al algoritmo de visión artificial desarrollado, se recomienda trabajar siempre a la misma distancia focal y con iluminación a contra luz para garantizar una óptima detección y rastreo de MBs.

# Capítulo 5

## Conclusiones y trabajos futuros

### 5.1 Conclusiones

Se implementó un sistema de visión artificial basado en técnicas de procesamiento de video en el entorno Matlab para identificar y rastrear burbujas esféricas. El algoritmo permitió determinar el diámetro y la velocidad de ascenso establecidos como parámetros característicos de las MBs, a partir del seguimiento de los centroides de las burbujas fotograma a fotograma, para estudiar el desplazamiento reflejado en la variación de sus coordenadas (x,y) y el cálculo de las mínimas distancias. Se observó que el tamaño y la velocidad de ascenso de las burbujas afectan el proceso de remoción de aceites & grasas, entre otros indicadores de limpieza que se establecieron en el tratamiento de aguas residuales domésticas mediante la planta piloto DAF.

Los resultados mostraron que cuando los parámetros operativos en la planta DAF piloto se configuran en una presión de recirculación de 34 psi con un caudal de aire a 0.1 L/min, el sistema de visión artificial caracteriza burbujas en un rango de 70  $\mu\text{m}$  y 200  $\mu\text{m}$  para los diámetros y un rango de 0.1E4  $\mu\text{m/s}$  a 3.5E4  $\mu\text{m/s}$  para la velocidad de ascenso. Por otra parte, cuando se trabaja con una presión de 36 psi y con un caudal de aire a 0.1 L/min se obtiene diámetros entre 50  $\mu\text{m}$  y 150  $\mu\text{m}$  con velocidades de ascenso entre 1E4  $\mu\text{m/s}$  y 2.5E4  $\mu\text{m/s}$ .

Se analizó la incidencia significativa entre los parámetros característicos de las microburbujas y la eficiencia en la remoción de los parámetros de limpieza establecidos con presiones de 34 psi y 36 psi a 0.1L/min de inyección de aire. Se obtuvieron eficiencias de remoción significativas con presiones de saturación a 34 psi del 89.22% en aceites & grasas, turbidez con un 24.14% y color en un 2.74%. De igual manera para presiones de saturación de 36 psi se obtuvo el 91,6 % en SST y conductividad con un 18.99 % de eficiencia, cumpliéndose en algunos casos que a menor diámetro mayor eficiencia de remoción, sin embargo, se presentaron inconvenientes en la hidrodinámica del sistema encontrándose como factores que afectan la generación de microburbujas las propiedades fisicoquímicas del fluido a tratar, la presión de recirculación, el caudal de recirculación, la velocidad del líquido y la hidrodinámica del tanque de flotación.

En resumen, se recomienda configurar la planta piloto DAF con presión de saturación de 34 psi e inyección de aire 0.1L/min para obtener una remoción eficiente de aceites & grasas, turbidez, color, aumento del contenido de oxígeno disuelto y aumento del pH para

desacidificar el agua. Por otro lado, para la remoción efectiva de conductividad y SST se recomienda configurar la planta a 36 psi con 0.1L/min de inyección de aire.

La revisión de la literatura demostró que DAF es una técnica sólida para el tratamiento de aguas residuales de tipo industrial, doméstico-municipal y agroindustrial. El estado de la tecnología muestra que la investigación continúa en aumento en distintas aplicaciones cuyo objetivo es la recuperación del agua y la conservación del medio ambiente.

En general, la tecnología DAF es eficiente en el tratamiento del agua; los costes operativos son menores en comparación a los métodos convencionales y puede ser muy atractiva si integra energías renovables en todos sus procesos. El estudio de las tendencias de la DAF permite prever su eficiencia en futuros estudios porque algunos ambientes presentan composiciones más complejas que otros. Por lo tanto, la revisión de diferentes aplicaciones de DAF nos permite identificar indirectamente las fortalezas y limitaciones de estos sistemas para optimizar la técnica.

## 5.2 Trabajos futuros

El sistema DAF prototipo de laboratorio puede mejorar el dispositivo generador de MBs, ya que el que se usó para esta investigación es un tubo Venturi de material PLA, el cual está expuesto al fenómeno de cavitación hidrodinámica provocando desgaste en la garganta por su corto tiempo de vida útil (aproximadamente 15 minutos), afectando la generación de las MBs y su hidrodinámica. Por otro lado, la bomba de agua PEDROLLO, también limitaba el tiempo de operación del DAF, ya que su tiempo máximo de operación es de 20 minutos razón por lo cual no se logró realizar pruebas con tiempos mayores.

El algoritmo desarrollado en este proyecto de investigación solo es apto para caracterizar fuera de línea las burbujas de geometría esférica generadas en agua pura, por lo cual un trabajo futuro podría estudiar la caracterización de MBs-flóculos en agua residual para analizar el efecto de las micropartículas sobre el diámetro y la velocidad de ascenso de las MBs. Por otra parte, el algoritmo tiene la capacidad de detectar únicamente los objetos que se encuentran en el plano focal del sistema cámara-lente. En este aspecto, un limitante para la caracterización de las MBs fue el tubo Venturi ya que generó burbujas de distintos diámetros para cada configuración experimental realizada. Por esta razón, únicamente se tomaron en cuenta aquellas burbujas que ascendían desde la parte inferior del fotograma.

Los algoritmos de visión artificial y de aprendizaje automático son potenciales para la medición y monitorización de los parámetros característicos de las MBs en los tratamientos de aguas residuales con tecnología DAF. Estos algoritmos optimizan el sistema en cuanto a la efectividad del proceso de flotación y remoción de contaminantes con el fin de promover la calidad ambiental del agua. Cuando las burbujas son muy pequeñas ( $< 30 \mu\text{m}$ ) y se agrupan traslapándose unas con otras, los centroides pueden fusionarse en un solo centro ocasionando que el algoritmo sólo detecte un objeto.

Un posible trabajo futuro además de resolver estos inconvenientes podría estudiar la velocidad de ascenso y diámetro de las MBs en tiempo real, para optimización de los sistemas de flotación DAF en ambientes industriales.



# Referencias

- [1] N. Delgado, A. Navarro, D. Marino, G. A. Peñuela, and A. Ronco, "Removal of pharmaceuticals and personal care products from domestic wastewater using rotating biological contactors," *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 16, no. 1, 2019, doi: 10.1007/s13762-018-1658-2.
- [2] J. E. Johnston, E. Lim, and H. Roh, "Impact of upstream oil extraction and environmental public health: A review of the evidence," *Sci. Total Environ.*, vol. 657, pp. 187–199, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.483>.
- [3] E. Raper, T. Stephenson, D. R. Anderson, R. Fisher, and A. Soares, "Industrial wastewater treatment through bioaugmentation," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 118, pp. 178–187, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.06.035>.
- [4] A. M. A. Pintor, V. J. P. Vilar, C. M. S. Botelho, and R. A. R. Boaventura, "Oil and grease removal from wastewaters: Sorption treatment as an alternative to state-of-the-art technologies. A critical review," *Chem. Eng. J.*, vol. 297, pp. 229–255, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.03.121>.
- [5] S. Jafarinejad and S. C. Jiang, "Current technologies and future directions for treating petroleum refineries and petrochemical plants (PRPP) wastewaters," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 7, no. 103326, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103326>.
- [6] V. Del Nery, M. H. Z. Damianovic, R. B. Moura, E. Pozzi, E. C. Pires, and E. Foresti, "Poultry slaughterhouse wastewater treatment plant for high quality effluent," *Water Sci. Technol.*, vol. 73, pp. 309–316, 2016, doi: <https://doi.org/10.2166/wst.2015.494>.
- [7] T. Zheng *et al.*, "Separation of Pollutants from Oil-Containing Restaurant Wastewater by Novel Microbubble Air Flotation and Traditional Dissolved Air Flotation," *Sep. Sci. Technol.*, vol. 50, no. 16, pp. 2568–2577, 2015, doi: <https://doi.org/10.1080/01496395.2015.1062396>.
- [8] A. Hernández-García, S. B. Velásquez-Orta, E. Novelo, I. Yáñez-Noguez, I. Monje-Ramírez, and M. T. O. Ledesma, "Wastewater-leachate treatment by microalgae: Biomass, carbohydrate and lipid production," *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 174, pp. 435–444, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.02.052>.
- [9] A. Mirshafiee, A. Rezaee, and R. S. Mamoory, "A clean production process for edible oil removal from wastewater using an electroflotation with horizontal arrangement of mesh electrodes," *J. Clean. Prod.*, vol. 198, pp. 71–79, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.201>.
- [10] A. El Shahawy and G. Heikal, "Organic pollutants removal from oily wastewater using clean technology economically, friendly biosorbent (*Phragmites australis*)," *Ecol. Eng.*, vol. 122, pp. 207–218, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoeng.2018.06.001>.

<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.08.004>.

- [11] T. Wallace, D. Gibbons, M. O'Dwyer, and T. P. Curran, "International evolution of fat, oil and grease (FOG) waste management: A review," *J. Environ. Manage.*, vol. 187, pp. 424–435, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.11.003>.
- [12] R. Etchepare, H. Oliveira, A. Azevedo, and J. Rubio, "Separation of emulsified crude oil in saline water by dissolved air flotation with micro and nanobubbles," *Sep. Purif. Technol.*, vol. 186, pp. 326–332, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.06.007>.
- [13] T. Kobayashi, H. Kuramochi, and K.-Q. Xu, "Variable oil properties and biomethane production of grease trap waste derived from different resources," *Int. Biodeterior. & Biodegrad.*, vol. 119, pp. 273–281, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.07.001>.
- [14] C. J. Nawarkar and V. D. Salkar, "Solar powered Electrocoagulation system for municipal wastewater treatment," *Fuel*, vol. 237, pp. 222–226, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.09.140>.
- [15] W. E. Juwana, A. Widyatama, A. I. Majid, Wiratni, Indarto, and Deendarlianto, "The application of digital image analysis to study the characteristic of bubble size distribution produced by orifice type microbubble generator," 2018, doi: <https://doi.org/10.1063/1.5049995>.
- [16] T. Temesgen, T. T. Bui, M. Han, T. Kim, and H. Park, "Micro and nanobubble technologies as a new horizon for water-treatment techniques: A review," *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 246, pp. 40–51, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2017.06.011>.
- [17] M. Sakr *et al.*, "A critical review of the recent developments in micro–nano bubbles applications for domestic and industrial wastewater treatment," *Alexandria Eng. J.*, vol. 61, no. 8, pp. 6591–6612, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.11.041>.
- [18] K. Ruby and S. K. Majumder, "Studies on stability and properties of micro and nano-particle-laden ionic microbubbles," *Powder Technol.*, vol. 335, pp. 77–90, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.04.069>.
- [19] M. M. G. Mofrad, H. Pourzamani, M. M. Amin, I. Parseh, and M. Alipour, "In situ treatment of metalworking wastewater by chemical addition-dissolved air flotation coupled with UV, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> & ZnO," *Heliyon*, vol. 6, no. e03091, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e03091>.
- [20] A. A. Inyinbor, O. S. Bello, A. P. Oluyori, H. E. Inyinbor, and A. E. Fadiji, "Wastewater conservation and reuse in quality vegetable cultivation: Overview, challenges and future prospects," *Food Control*, vol. 98, pp. 489–500, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.12.008>.
- [21] L. Yu, M. Han, and F. He, "A review of treating oily wastewater," *Arab. J. Chem.*, vol. 10, pp. S1913–S1922, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.07.020>.
- [22] R. Miranda, I. Latour, and A. Blanco, "Understanding the Efficiency of Aluminum

- Coagulants Used in Dissolved Air Flotation (DAF),” *Front. Chem.*, vol. 8, p. 27, 2020, doi: 10.3389/fchem.2020.00027.
- [23] K. Katam and D. Bhattacharyya, “Simultaneous treatment of domestic wastewater and bio-lipid synthesis using immobilized and suspended cultures of microalgae and activated sludge,” *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 69, pp. 295–303, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2018.09.031>.
- [24] X. Zhang, B. Zhang, Y. Wu, T. Wang, and J. Qiu, “Preparation and characterization of a diatomite hybrid microfiltration carbon membrane for oily wastewater treatment,” *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, vol. 89, pp. 39–48, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2018.04.035>.
- [25] A. J. G. Gomes, D. O. Atambo, K. K. Das, D. L. Cocke, and K. P. Das, “Electrochemical remediation of chicken processing plant wastewater,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 6, no. 5, pp. 6028–6036, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.09.039>.
- [26] M. R. Sabouri, V. Javanbakht, D. J. Ghotbabadi, and M. Mehravar, “Oily wastewater treatment by a magnetic superoleophilic nanocomposite foam,” *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 126, pp. 182–192, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.04.006>.
- [27] T. Lü, C. Luo, D. Qi, D. Zhang, and H. Zhao, “Efficient treatment of emulsified oily wastewater by using amphipathic chitosan-based flocculant,” *React. Funct. Polym.*, vol. 139, pp. 133–141, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2019.03.019>.
- [28] M. W. Lim, E. V. Lau, and P. E. Poh, “Analysis of attachment process of bubbles to high-density oil: Influence of bubble size and water chemistry,” *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, vol. 68, pp. 192–200, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.08.037>.
- [29] M. dos S. Pereira, A. C. Borges, F. F. Heleno, L. F. A. Squillace, and L. R. D. Faroni, “Treatment of synthetic milk industry wastewater using batch dissolved air flotation,” *J. Clean. Prod.*, vol. 189, pp. 729–737, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.065>.
- [30] M. W. Lim, E. V. Lau, and P. E. Poh, “Micro-macrobubbles interactions and its application in flotation technology for the recovery of high density oil from contaminated sands,” *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 161, pp. 29–37, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.11.064>.
- [31] H. A. Oliveira, A. C. Azevedo, R. Etchepare, and J. Rubio, “Separation of emulsified crude oil in saline water by flotation with micro- and nanobubbles generated by a multiphase pump,” *Water Sci. Technol.*, vol. 76, no. 10, pp. 2710–2718, 2017, doi: <https://doi.org/10.2166/wst.2017.441>.
- [32] H. Sun, H. Liu, S. Wang, and Y. Liu, “Remediation of oil spill-contaminated sands by chemical-free microbubbles generated in tap and saline water,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 366, pp. 124–129, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.11.102>.

- [33] R. Prakash, S. K. Majumder, and A. Singh, "Flotation technique: Its mechanisms and design parameters," *Chem. Eng. Process. - Process Intensif.*, vol. 127, pp. 249–270, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2018.03.029>.
- [34] P. Rajasulochana and V. Preethy, "Comparison on efficiency of various techniques in treatment of waste and sewage water – A comprehensive review," *Resour. Technol.*, vol. 2, no. 4, pp. 175–184, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.reffit.2016.09.004>.
- [35] R. Etchepare, A. Azevedo, S. Calgaroto, and J. Rubio, "Removal of ferric hydroxide by flotation with micro and nanobubbles," *Technol. Sep. Purif.*, vol. 184, pp. 347–353, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.05.014>.
- [36] K. Matsuura, T. Uchida, C. Guan, and S. Yanase, "Separation of carbon fibers in water using microbubbles generated by hydrogen bubble method," *Sep. Purif. Technol.*, vol. 190, pp. 190–194, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.08.065>.
- [37] T. Azuma *et al.*, "Removal of pharmaceuticals in water by introduction of ozonated microbubbles," *Sep. Purif. Technol.*, vol. 212, pp. 483–489, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.11.059>.
- [38] Y. Sun, S. Wang, and J. Niu, "Microbial community evolution of black and stinking rivers during in situ remediation through micro-nano bubble and submerged resin floating bed technology," *Bioresour. Technol.*, vol. 258, pp. 187–194, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.03.008>.
- [39] L. Hu and Z. Xia, "Application of ozone micro-nano-bubbles to groundwater remediation," *J. Hazard. Mater.*, vol. 342, pp. 446–453, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.08.030>.
- [40] A. Gurung, O. Dahl, and K. Jansson, "The fundamental phenomena of nanobubbles and their behavior in wastewater treatment technologies," *Geosystem Eng.*, vol. 19, no. 3, pp. 133–142, 2016, doi: [10.1080/12269328.2016.1153987](https://doi.org/10.1080/12269328.2016.1153987).
- [41] W. Jiang *et al.*, "Removal of emulsified oil from polymer-flooding sewage by an integrated apparatus including EC and separation process," *Sep. Purif. Technol.*, vol. 211, pp. 259–268, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.09.069>.
- [42] S. G. da Cruz, A. J. B. Dutra, and M. B. M. Monte, "The influence of some parameters on bubble average diameter in an electroflotation cell by laser diffraction method," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 4, no. 3, pp. 3681–3687, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.05.017>.
- [43] L. Liu, H. Yan, G. Zhao, and J. Zhuang, "Experimental studies on the terminal velocity of air bubbles in water and glycerol aqueous solution," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 78, pp. 254–265, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.06.011>.
- [44] R. Mazahernasab and R. Ahmadi, "Determination of bubble size distribution in a laboratory mechanical flotation cell by a laser diffraction technique," *Physicochem.*

*Probl. Miner. Process.*, vol. 52, pp. 690–702, 2016, doi:  
<https://doi.org/10.5277/ppmp160214>.

- [45] G. G. Redhyka, Bahrudin, and H. S. Alam, “Estimation of bubble size distribution using spatial digital image correlation,” in *Proceedings of the 2nd International Conference on Automation, Cognitive Science, Optics, Micro Electro-Mechanical System, and Information Technology, ICACOMIT 2017*, 2018, vol. 2018-Janua, pp. 123–127, doi: 10.1109/ICACOMIT.2017.8253399.
- [46] T. Kim, H. Park, and M. Han, “Design parameter estimations for adjustable bubble size in bubble generating system,” *Water Sci. Technol.*, vol. 77, no. 1, pp. 1–6, 2018, doi: <https://doi.org/10.2166/wst.2017.470>.
- [47] B. Liu *et al.*, “Dynamic Interaction between a Millimeter-Sized Bubble and Surface Microbubbles in Water,” *Langmuir*, vol. 34, no. 39, pp. 11667–11675, 2018, doi: 10.1021/acs.langmuir.8b01202.
- [48] P.-J. Lin, M.-C. Chuang, and S.-C. Chang, “Research on the Cleaning Efficacy of Micro-bubbles on Dental Plaque,” *Procedia Manuf.*, vol. 3, pp. 13–20, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.102>.
- [49] K. Petersen, S. Vakkalanka, and L. Kuzniarz, “Guidelines for conducting systematic mapping studies in software engineering: An update,” *Inf. Softw. Technol.*, vol. 64, pp. 1–18, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2015.03.007>.
- [50] A. Rahman, R. Mahdavi-Hezaveh, and L. Williams, “A systematic mapping study of infrastructure as code research,” *Inf. Softw. Technol.*, vol. 108, pp. 65–77, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2018.12.004>.
- [51] H. T. T. Ung *et al.*, “Combining flowform cascade with constructed wetland to enhance domestic wastewater treatment,” *Environ. Technol. Innov.*, vol. 27, p. 102537, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102537>.
- [52] X. Sheng *et al.*, “Management of rural domestic wastewater in a city of Yangtze delta region: Performance and remaining challenges,” *Bioresour. Technol. Reports*, vol. 11, p. 100507, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100507>.
- [53] M. E. H. Tovar, “Evaluación del almidón de papa como floculante en el tratamiento de aguas residuales domésticas,” *OpenJournal Syst.*, vol. 6, no. 1, 2015, doi: <https://doi.org/10.24054/19009178.v1.n1.2015.3243>.
- [54] E. M. J.-B. C. A. M.-P. A. C. O.-E. P. A. M.-A. E. J. P.-S. F. Machuca-Martínez, “High-rate algal pond for removal of pharmaceutical compounds from urban domestic wastewater under tropical conditions. Case study: Santiago de Cali, Colombia,” *Water Sci. Technol.*, vol. 82, no. 6, pp. 1031–1043, 2020, doi: <https://doi.org/10.2166/wst.2020.362>.
- [55] N. V. Sarria, J. R. Vicoria, P. T. Lozada, and C. M. Parra, “Performance of a contact stabilization process for domestic wastewater treatment of Cali, Colombia,” *Dyna*, vol. 78, no. 168, pp. 98–107, 2011, [Online]. Available: <http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0012->

73532011000400012&script=sci\_abstract&tlng=pt.

- [56] UNESCO World Water Assessment Programme, “The United Nations world water development report 2021: valuing water,” 2021. [Online]. Available: <https://www.unesco.org/reports/wwdr/2021/en/download-report>.
- [57] M. Russel *et al.*, “Investigating the potentiality of *Scenedesmus obliquus* and *Acinetobacter pittii* partnership system and their effects on nutrients removal from synthetic domestic wastewater,” *Bioresour. Technol.*, vol. 299, p. 122571, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122571>.
- [58] Z. Liang *et al.*, “High concentration powder carrier bio-fluidized bed process: A new perspective for domestic wastewater treatment,” *Bioresour. Technol.*, vol. 351, p. 127015, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127015>.
- [59] P. R. Rout *et al.*, “Nutrient removal from domestic wastewater: A comprehensive review on conventional and advanced technologies,” *J. Environ. Manage.*, vol. 296, p. 113246, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113246>.
- [60] J. Liu, J. Li, S. Piché-Choquette, and B. Sellamuthu, “Roles of bacterial and epistylis populations in aerobic granular SBRs treating domestic and synthetic wastewaters,” *Chem. Eng. J.*, vol. 351, pp. 952–958, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.06.161>.
- [61] A. Mojiri, J. Zhou, M. Vakili, and H. Van Le, “Removal performance and optimisation of pharmaceutical micropollutants from synthetic domestic wastewater by hybrid treatment,” *J. Contam. Hydrol.*, vol. 235, p. 103736, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2020.103736>.
- [62] M. F. van den Berg, M. Botes, and T. E. Cloete, “The formulation of synthetic domestic wastewater sludge medium to study anaerobic biological treatment of acid mine drainage in the laboratory,” *Water SA*, vol. 42, no. 2, pp. 350–354, 2016, doi: [10.4314/wsa.v42i2.18](https://doi.org/10.4314/wsa.v42i2.18).
- [63] U. Bracklow, A. Drews, M. Vocks, and M. Kraume, “Comparison of nutrients degradation in small scale membrane bioreactors fed with synthetic/domestic wastewater,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 144, no. 3, pp. 620–626, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.01.085>.
- [64] G. Liu, X. Xu, L. Zhu, S. Xing, and J. Chen, “Biological nutrient removal in a continuous anaerobic–aerobic–anoxic process treating synthetic domestic wastewater,” *Chem. Eng. J.*, vol. 225, pp. 223–229, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.01.098>.
- [65] M. Kositzki, I. Poulis, S. Malato, J. Caceres, and A. Campos, “Solar photocatalytic treatment of synthetic municipal wastewater,” *Water Res.*, vol. 38, no. 5, pp. 1147–1154, 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2003.11.024>.
- [66] H. Zheng, X. Gong, Y. Yang, J. Yang, X. Yang, and Z. Wu, “Concentration of nitrogen as new energy source from wastewater by electrodeionization,” *Energy Procedia*, vol. 142, pp. 1421–1426, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.03.001>.

<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.529>.

- [67] W. A. Lozano-Rivas and Rodríguez, “Preparación, composición y uso de agua residual sintética para alimentación de reactores prototipo y de laboratorio,” *Rev. Didáctica Ambient.*, vol. 8, pp. 10–16, 2012, [Online]. Available: <http://www.didacticaambiental.com/revista/numero11/completa.pdf>.
- [68] J. Ho and S. Sung, “Methanogenic activities in anaerobic membrane bioreactors (AnMBR) treating synthetic municipal wastewater,” *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 7, pp. 2191–2196, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.042>.
- [69] Y. Ma, Y. Zhai, X. Zheng, S. He, and M. Zhao, “Rural domestic wastewater treatment in constructed ditch wetlands: Effects of influent flow ratio distribution,” *J. Clean. Prod.*, vol. 225, pp. 350–358, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.235>.
- [70] M. de A. y D. Sostenible, “Red de desarrollo sostenible,” *Resolución 631 de 2015 - Parámetros vertimientos*, 2015. <https://www.rds.org.co/es/recursos/resolucion-631-de-2015-parametros-vertimientos#:~:text=Por la cual se establecen,y se dictan otras disposiciones>.
- [71] M. para la transición ecológica y el reto Demográfico, “Directiva 91/271/CEE Sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas,” *Gob. España*, [Online]. Available: [https://www.miteco.gob.es/es/agua/publicaciones/03\\_Manual\\_Directiva\\_91\\_271\\_CEE\\_tcm30-214069.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/agua/publicaciones/03_Manual_Directiva_91_271_CEE_tcm30-214069.pdf).
- [72] K. Gunes, F. Masi, S. Ayaz, B. Tuncsiper, and M. Besiktas, “Domestic wastewater and surface runoff treatment implementations by constructed wetlands for Turkey: 25 years of experience,” *Ecol. Eng.*, vol. 170, p. 106369, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106369>.
- [73] C. Cagnetta *et al.*, “High-rate activated sludge systems combined with dissolved air flotation enable effective organics removal and recovery,” *Bioresour. Technol.*, vol. 291, no. 121833, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121833>.
- [74] D. Kotoula *et al.*, “Municipal wastewater treatment by combining in series microalgae *Chlorella sorokiniana* and macrophyte *Lemna minor*: Preliminary results,” *J. Clean. Prod.*, vol. 271, p. 122704, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122704>.
- [75] N. T. Dinh *et al.*, “Biological treatment of saline domestic wastewater by using a down-flow hanging sponge reactor,” *Chemosphere*, vol. 283, p. 131101, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131101>.
- [76] F. Özyonar and M. U. Korkmaz, “Sequential use of the electrocoagulation-electrooxidation processes for domestic wastewater treatment,” *Chemosphere*, vol. 290, p. 133172, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133172>.
- [77] M. Zhang *et al.*, “Removal of micron-scale microplastic particles from different waters with efficient tool of surface-functionalized microbubbles,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 404, p. 124095, 2021, doi:

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124095>.

- [78] L. Liu, J. Cao, M. Ali, J. Zhang, and Z. Wang, "Impact of green roof plant species on domestic wastewater treatment," *Environ. Adv.*, vol. 4, p. 100059, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100059>.
- [79] F. Anjum *et al.*, "Trends and progress in AnMBR for domestic wastewater treatment and their impacts on process efficiency and membrane fouling," *Environ. Technol. Innov.*, vol. 21, p. 101204, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101204>.
- [80] C.-C. Tang, W. Zuo, Y. Tian, N. Sun, Z.-W. Wang, and J. Zhang, "Effect of aeration rate on performance and stability of algal-bacterial symbiosis system to treat domestic wastewater in sequencing batch reactors," *Bioresour. Technol.*, vol. 222, pp. 156–164, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.123>.
- [81] J. Saththasivam, O. Ogunbiyi, J. Lawler, R. Al-Rewaily, and Z. Liu, "Evaluating dissolved air flotation for oil/water separation using a hybridized coagulant of ferric chloride and chitosan," *J. Water Process Eng.*, vol. 47, p. 102836, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102836>.
- [82] A. Azevedo, H. Oliveira, and J. Rubio, "Bulk nanobubbles in the mineral and environmental areas: Updating research and applications," *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 271, no. 101992, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2019.101992>.
- [83] M. Zhang and P. Guiraud, "Surface-modified microbubbles (colloidal gas aphrons) for nanoparticle removal in a continuous bubble generation-flotation separation system," *Water Res.*, vol. 126, pp. 399–410, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.09.051>.
- [84] J. Huang *et al.*, "An investigation on the performance of a micro-scale Venturi bubble generator," *Chem. Eng. J.*, vol. 386, p. 120980, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.02.068>.
- [85] L. R. Villegas, D. Colombet, P. Guiraud, D. Legendre, S. Cazin, and A. Cockx, "Image processing for the experimental investigation of dense dispersed flows: Application to bubbly flows," *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 111, pp. 16–30, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2018.10.017>.
- [86] Q. Zhang, S. Liu, C. Yang, F. Chen, and S. Lu, "Bioreactor consisting of pressurized aeration and dissolved air flotation for domestic wastewater treatment," *Sep. Purif. Technol.*, vol. 138, pp. 186–190, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.10.024>.
- [87] L. Zhao *et al.*, "A visualized study of the motion of individual bubbles in a venturi-type bubble generator," *Prog. Nucl. Energy*, vol. 97, pp. 74–89, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2017.01.004>.
- [88] A. Azevedo, R. Etchepare, and J. Rubio, "Raw water clarification by flotation with microbubbles and nanobubbles generated with a multiphase pump," *Water Sci. Technol.*, vol. 75, pp. 2342–2349, 2017, doi: <https://doi.org/10.2166/wst.2017.113>.
- [89] B. M. Smirnov, N. Y. Babaeva, G. V. Naidis, V. A. Panov, E. E. Son, and D. V.



- Tereshonok, "Bubble Method of Water Purification," *High Temp.*, vol. 57, pp. 286–288, 2019, doi: <https://doi.org/10.1134/S0018151X19020202>.
- [90] S. Unyaphan, T. Tarnpradab, F. Takahashi, and K. Yoshikawa, "Improvement of tar removal performance of oil scrubber by producing syngas microbubbles," *Appl. Energy*, vol. 205, pp. 802–812, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.071>.
- [91] J. K. Edzwald, "Dissolved air flotation and me," *Water Res.*, vol. 44, no. 7, pp. 2077–2106, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.12.040>.
- [92] V. R. Fanaie, M. Khiadani, and T. Ayres, "Effects of internal geometry on hydrodynamics of dissolved air flotation (DAF) tank: An experimental study using particle image velocimetry (PIV)," *Colloids Surfaces A*, vol. 575, pp. 382–390, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.05.027>.
- [93] M. Ansari, H. H. Bokhari, and D. E. Turney, "Energy efficiency and performance of bubble generating systems," *Chem. Eng. Process. - Process Intensif.*, vol. 125, pp. 44–55, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2017.12.019>.
- [94] A. Azevedo, H. A. Oliveira, and J. Rubio, "Treatment and water reuse of lead-zinc sulphide ore mill wastewaters by high rate dissolved air flotation," *Miner. Eng.*, vol. 127, pp. 114–121, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.07.011>.
- [95] H. B. Ortiz-Oliveros and R. M. Flores-Espinosa, "Design of a mobile dissolved air flotation system with high rate for the treatment of liquid radioactive waste," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 144, pp. 23–31, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.07.016>.
- [96] O. V. Okoro, Z. Sun, and J. Birch, "Meat processing dissolved air flotation sludge as a potential biodiesel feedstock in New Zealand: A predictive analysis of the biodiesel product properties," *J. Clean. Prod.*, vol. 168, pp. 1436–1447, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.128>.
- [97] J. A. Muñoz-Alegría, E. Muñoz-España, and J. F. Flórez-Marulanda, "Dissolved Air Flotation: A Review from the Perspective of System Parameters and Uses in Wastewater Treatment," *TecnoLógicas*, vol. 24, no. 52, 2021, doi: [10.22430/22565337.2111](https://doi.org/10.22430/22565337.2111).
- [98] H. Al-Zoubi, K. A. Ibrahim, and K. A. Abu-Sbeih, "Removal of heavy metals from wastewater by economical polymeric collectors using dissolved air flotation process," *J. Water Process Eng.*, vol. 8, pp. 19–27, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2015.08.002>.
- [99] Y. Wang *et al.*, "Interactions between flocs and bubbles in the separation zone of dissolved air flotation system," *Sci. Total Environ.*, vol. 761, p. 143222, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143222>.
- [100] Y. Wang *et al.*, "A study on the feasibility and mechanism of enhanced co-coagulation dissolved air flotation with chitosan-modified microbubbles," *J. Water Process Eng.*, vol. 40, p. 101847, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.101847>.

<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101847>.

- [101] K. Satpathy, U. Rehman, B. Cools, L. Verdickt, G. Peleman, and I. Nopens, “CFD-based process optimization of a dissolved air flotation system for drinking water production,” *Water Sci. Technol.*, vol. 81, no. 8, pp. 1668–1681, 2020, doi: <https://doi.org/10.2166/wst.2020.028>.
- [102] M. M. Amin, M. M. Golbini Mofrad, H. Pourzamani, S. M. Sebaradar, and K. Ebrahim, “Treatment of industrial wastewater contaminated with recalcitrant metal working fluids by the photo-Fenton process as post-treatment for DAF,” *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 45, pp. 412–420, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2016.10.010>.
- [103] E. Villar-Navarro, R. M. Baena-Nogueras, M. Paniw, J. A. Perales, and P. A. Lara-Martín, “Removal of pharmaceuticals in urban wastewater: High rate algae pond (HRAP) based technologies as an alternative to activated sludge based processes,” *Water Res.*, vol. 139, pp. 19–29, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.03.072>.
- [104] R. R. Fonseca, J. Thompson José P., I. C. Franco, and F. V da Silva, “Automation and Control of a Dissolved Air Flotation Pilot Plant,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, no. 1, pp. 3911–3916, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.364>.
- [105] Y. Matsui, K. Fukushi, and N. Tambo, “Modeling, simulation and operational parameters of dissolved air flotation,” *J. Water Supply Res. Technol.*, vol. 47, no. 1, pp. 9–20, 1998, doi: <https://doi.org/10.2166/aqua.1998.0003>.
- [106] Z. Tian, C. Wang, and M. Ji, “Full-scale dissolved air flotation (DAF) equipment for emergency treatment of eutrophic water,” *WATER Sci. Technol.*, vol. 77, no. 7, pp. 1802–1809, 2018, doi: [10.2166/wst.2018.046](https://doi.org/10.2166/wst.2018.046).
- [107] J. P. Bogacki, P. Marcinowski, J. Naumczyk, and P. Wilinski, “Cosmetic wastewater treatment using dissolved air flotation,” *Arch. Environ. Prot.*, vol. 43, no. 2, pp. 65–73, Jun. 2017, doi: [10.1515/aep-2017-0018](https://doi.org/10.1515/aep-2017-0018).
- [108] S. Ahmadi and F. K. Mostafapour, “Survey of Efficiency of Dissolved Air Flotation in Removal Penicillin G Potassium from Aqueous Solutions,” *Br. J. Pharm. Res.*, vol. 15, no. 3, 2017, doi: [10.9734/BJPR/2017/31180](https://doi.org/10.9734/BJPR/2017/31180).
- [109] J. E. Forero, J. Diaz, and V. R. Blandon, “Diseño de un nuevo sistema de flotación para el tratamiento de aguas industriales,” *Ciencia, Tecnología y Futur. CT&F*, vol. 1, no. 5, pp. 67–75, 1999, doi: <http://www.scielo.org.co/pdf/ctyf/v1n5/v1n5a06.pdf>.
- [110] J.-E. Forero, O.-P. Ortiz, and J.-J. Duque, “Design and application of flotation systems for the treatment of reinjected water in a colombian petroleum field,” *CT&F - Ciencia, Tecnol. y Futur.*, vol. 3, pp. 147–158, 2007, [Online]. Available: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0122-53832007000100010&nrm=iso](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-53832007000100010&nrm=iso).
- [111] M.-S. Maeng, H.-S. Kim, K.-S. Lee, and S. Dockko, “Effect of DAF configuration on the removal of phosphorus and organic matter by a pilot plant treating combined sewer overflows,” *Int. Biodeterior. Biodegradation*, vol. 124, pp. 17–25, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.07.001>.

<https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.07.017>.

- [112] F. A. Soares *et al.*, “Dissolved air flotation as potential new mechanism for intestinal parasite diagnosis in feces,” *Acta Trop.*, vol. 224, p. 106137, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2021.106137>.
- [113] S. J. Gulden, C. Riedele, S. Rollié, M.-H. Kopf, and H. Nirschl, “Online bubble size analysis in micro flotation,” *Chem. Eng. Sci.*, vol. 185, pp. 168–181, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.04.009>.
- [114] L. Vinnett, J. Sovechles, C. O. Gomez, and K. E. Waters, “An image analysis approach to determine average bubble sizes using one-dimensional Fourier analysis,” *Miner. Eng.*, vol. 126, pp. 160–166, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.06.030>.
- [115] R. Prakash, S. Kumar Majumder, and A. Singh, “Bubble size distribution and specific bubble interfacial area in two-phase microstructured dense bubbling bed,” *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 156, pp. 108–130, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.01.032>.
- [116] W. E. Juwana, A. Widyatama, O. Dinaryanto, W. Budhijanto, Indarto, and Deendarlianto, “Hydrodynamic characteristics of the microbubble dissolution in liquid using orifice type microbubble generator,” *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 141, pp. 436–448, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.11.017>.
- [117] X. Wang *et al.*, “Bubble breakup in a swirl-venturi microbubble generator,” *Chem. Eng. J.*, vol. 403, p. 126397, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126397>.
- [118] N. Suwartha, D. Syamzida, C. R. Priadi, S. S. Moersidik, and F. Ali, “Effect of size variation on microbubble mass transfer coefficient in flotation and aeration processes,” *Heliyon*, vol. 6, no. 4, p. e03748, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03748>.
- [119] X. Tao, Y. Liu, H. Jiang, and R. Chen, “Microbubble generation with shear flow on large-area membrane for fine particle flotation,” *Chem. Eng. Process. - Process Intensif.*, vol. 145, p. 107671, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2019.107671>.
- [120] A. Kouhestani, A. Amani Tehrani, H. Parsaeian, M. H. Nikfar, A. Bazargan, and H. Masoumi Isfahani, “Study of 3D-Printed Pressure Release Nozzle for Microbubble Formation in Full-Scale Dissolved Air Flotation (DAF),” *Chem. Eng. Process. - Process Intensif.*, vol. 155, p. 108070, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.108070>.
- [121] L. de S. Leite, M. T. Hoffmann, and L. A. Daniel, “Coagulation and dissolved air flotation as a harvesting method for microalgae cultivated in wastewater,” *J. Water Process Eng.*, vol. 32, no. 100947, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100947>.
- [122] A. Chen, Z. Wang, and J. Yang, “Influence of bubble size on the fluid dynamic behavior of a DAF tank: A 3D numerical investigation,” *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 495, pp. 200–207, 2016, doi:

<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2015.10.039>.

- [123] V. R. Fanaie and M. Khiadani, “Effect of salinity on air dissolution, size distribution of microbubbles, and hydrodynamics of a dissolved air flotation (DAF) system,” *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 591, p. 124547, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.124547>.
- [124] J. P. Rodrigues and R. Béttega, “Evaluation of multiphase CFD models for Dissolved Air Flotation (DAF) process,” *Colloids Surfaces A*, vol. 539, pp. 116–123, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.12.015>.
- [125] A. H. Alshahri, L. Fortunato, N. Zaouri, N. Ghaffour, and T. Leiknes, “Role of dissolved air flotation (DAF) and liquid ferrate on mitigation of algal organic matter (AOM) during algal bloom events in RO desalination,” *Sep. Purif. Technol.*, vol. 256, p. 117795, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117795>.
- [126] Y. Rybachuk and A. Jodłowski, “Mathematical model of dissolved air flotation (DAF) based on impulse conservation law,” *SN Appl. Sci.*, vol. 541, pp. 1–8, 2019, doi: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0560-y>.
- [127] M. Karhu, T. Leiviskä, and J. Tanskanen, “Enhanced DAF in breaking up oil-in-water emulsions,” *Sep. Purif. Technol.*, vol. 122, pp. 231–241, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.11.007>.
- [128] B. Lakghomi, Y. Lawryshyn, and R. Hofmann, “A model of particle removal in a dissolved air flotation tank: Importance of stratified flow and bubble size,” *Water Res.*, vol. 68, pp. 262–272, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.09.053>.
- [129] G. L. Muniz, A. C. Borges, and T. C. F. da Silva, “Performance of natural coagulants obtained from agro-industrial wastes in dairy wastewater treatment using dissolved air flotation,” *J. Water Process Eng.*, vol. 37, p. 101453, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101453>.
- [130] M. do S. Pereira, A. C. Borges, G. L. Muniz, F. F. Heleno, and L. R. D. Faroni, “Dissolved air flotation optimization for treatment of dairy effluents with organic coagulants,” *J. Water Process Eng.*, vol. 36, p. 101270, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101270>.
- [131] S. Ansari, J. Alavi, and Z. M. Yaseen, “Performance of full-scale coagulation-flocculation/DAF as a pre-treatment technology for biodegradability enhancement of high strength wastepaper-recycling wastewater,” *Environ. Sci. Pollut. Res. Vol.*, vol. 25, pp. 33978–33991, 2018, doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3340-0>.
- [132] I. A. Crossley and M. T. Valade, “A review of the technological developments of dissolved air flotation,” *J. Water Supply Res. Technol.*, vol. 55, no. 7–8, pp. 479–491, 2006, doi: <https://doi.org/10.2166/aqua.2006.057>.
- [133] J. Xue, H. Zhong, and S. Wang, “Removal of sodium oleate from synthetic manganese leaching solution by coagulation-dissolved air flotation,” *J. Environ. Manage.*, vol. 247, pp. 1–8, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.026>.

- [134] H. S. Oh, S. H. Kang, S. Nam, E.-J. Kim, and T.-M. Hwang, “CFD modelling of cyclonic-DAF (dissolved air flotation) reactor for algae removal,” *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 22, pp. 477–481, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.12.003>.
- [135] K. H. Lee, H. Kim, J. W. KuK, J. D. Chung, S. Park, and E. E. Kwon, “Micro-bubble flow simulation of dissolved air flotation process for water treatment using computational fluid dynamics technique,” *Environ. Pollut.*, vol. 256, p. 112050, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.01.011>.
- [136] J. P. Rodrigues, J. N. M. Batista, and R. Béttega, “Application of population balance equations and interaction models in CFD simulation of the bubble distribution in dissolved air flotation,” *Colloids Surfaces A*, vol. 577, pp. 723–732, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.06.032>.
- [137] Z. Pourkarimi, B. Rezai, and M. Noaparast, “Effective parameters on generation of nanobubbles by cavitation method for froth flotation applications,” *Physicochem. Probl. Miner. Process.*, vol. 53, no. 2, pp. 920–942, 2017, doi: <http://dx.doi.org/10.5277/ppmp170220>.
- [138] J. Lee *et al.*, “Refractory oil wastewater treatment by dissolved air flotation, electrochemical advanced oxidation process, and magnetic biochar integrated system,” *J. Water Process Eng.*, vol. 36, p. 101358, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101358>.
- [139] J. Amaral Filho, A. Azevedo, R. Etchepare, and J. Rubio, “Removal of sulfate ions by dissolved air flotation (DAF) following precipitation and flocculation,” *Int. J. Miner. Process.*, vol. 149, pp. 1–8, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2016.01.012>.
- [140] G. L. de; Oliveira and L. A. Daniel, “Removal of *Giardia* spp. cysts and *Cryptosporidium* spp. oocysts from anaerobic effluent by dissolved air flotation,” *Environ. Technol.*, vol. 42, no. 1, pp. 141–147, 2019, doi: <https://doi.org/10.1080/09593330.2019.1625447>.
- [141] O. Sanchez, M.-A. Labelle, A. Gadbois, E. Laflamme, and P. L. Dold, “Recovery of particulate matter from a high-rate moving bed biofilm reactor by high-rate dissolved air flotation,” *Water Qual. Res. J.*, vol. 53, pp. 181–190, 2018, doi: <https://doi.org/10.2166/wqrj.2018.003>.
- [142] Y. Wang, W. Liu, L. Tian, R. Jia, Z. Du, and A. Zhou, “Research on the CFD numerical simulation and process optimization of countercurrent–cocurrent dissolved air flotation,” *J. Water Supply Res. Technol.*, vol. 68, no. 5, pp. 325–336, 2019, doi: <https://doi.org/10.2166/aqua.2019.147>.
- [143] B. Swart *et al.*, “In situ characterisation of size distribution and rise velocity of microbubbles by high-speed photography,” *Chem. Eng. Sci.*, vol. 225, p. 115836, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115836>.
- [144] J. O. Hanotu, H. Bandulasena, and W. B. Zimmerman, “Aerator design for microbubble generation,” *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 123, pp. 367–376, 2017, doi:

<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2017.01.034>.

- [145] M. Lichti and H.-J. Bart, “Bubble size distributions with a shadowgraphic optical probe,” *Flow Meas. Instrum.*, vol. 60, pp. 164–170, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2018.02.020>.
- [146] A. Eskanlou, M. R. Khalesi, M. Mirmogaddam, M. H. Chegeni, and B. V. Hassas, “Investigation of trajectory and rise velocity of loaded and bare single bubbles in flotation process using video processing technique,” *Sep. Sci. Technol.*, pp. 1520–5754, 2018, doi: <https://doi.org/10.1080/01496395.2018.1539104>.
- [147] R. Pérez-Garibay, A. Bueno-Tokunaga, R. H. Estrada-Ruiz, and L. F. Camacho-Ortegón, “Effect of surface electrical charge on microbubbles’ terminal velocity and gas holdup,” *Miner. Eng.*, vol. 119, pp. 166–172, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.01.026>.
- [148] A. Gordiychuk, M. Svanera, S. Benini, and P. Poesio, “Size distribution and Sauter mean diameter of micro bubbles for a Venturi type bubble generator,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 70, pp. 51–60, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.08.014>.
- [149] N. N. Misra, R. Phalak, and A. Martynenko, “A microscopic computer vision algorithm for autonomous bubble detection in aerated complex liquids,” *J. Food Eng.*, vol. 238, pp. 54–60, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.06.007>.
- [150] K. Bae, G. S. Go, N. S. Noh, Y.-I. Lim, J. Bae, and D. H. Lee, “Bubble characteristics in pressurized bubble column associated with micro-bubble dispersion,” *Chem. Eng. J.*, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.03.215>.
- [151] O. Adetunji and R. Rawatlal, “Estimation of bubble column hydrodynamics: Image-based measurement method,” *Flow Meas. Instrum.*, vol. 53, pp. 4–17, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2016.08.002>.
- [152] K. Li, Q. Wang, and M. Wang, “Three-dimensional visualisation of gas-water two-phase flow based on bubble mapping method and size projection algorithm,” *Flow Meas. Instrum.*, vol. 69, p. 101590, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2019.101590>.
- [153] X. Wang, C. Song, C. Yang, and Y. Xie, “Process working condition recognition based on the fusion of morphological and pixel set features of froth for froth flotation,” *Miner. Eng.*, vol. 128, pp. 17–26, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.08.017>.
- [154] H. Zhang, Z. Tang, Y. Xie, X. Gao, and Q. Chen, “A watershed segmentation algorithm based on an optimal marker for bubble size measurement,” *Measurement*, vol. 138, pp. 182–193, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.02.005>.
- [155] L. Zhao, T. Dai, Z. Qiao, P. Sun, J. Hao, and Y. Yang, “Application of artificial intelligence to wastewater treatment: A bibliometric analysis and systematic review of technology, economy, management, and wastewater reuse,” *Process Saf. Environ.*

- Prot.*, vol. 133, pp. 169–182, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.11.014>.
- [156] C. H. Lee, H. Choi, D.-W. Jerng, D. E. Kim, S. Wongwises, and H. S. Ahn, “Experimental investigation of microbubble generation in the venturi nozzle,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 136, pp. 1127–1138, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.03.040>.
- [157] L. Zhao *et al.*, “Effects of the divergent angle on bubble transportation in a rectangular Venturi channel and its performance in producing fine bubbles,” *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 114, pp. 192–206, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2019.02.003>.
- [158] L. Zhao, L. Sun, Z. Mo, J. Tang, L. Hu, and J. Bao, “An investigation on bubble motion in liquid flowing through a rectangular Venturi channel,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 97, pp. 48–58, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.04.009>.
- [159] Y. Song, D. Wang, J. Yin, J. Li, and K. Cai, “Experimental studies on bubble breakup mechanism in a venturi bubble generator,” *Ann. Nucl. Energy*, vol. 130, pp. 259–270, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.02.020>.
- [160] M. A. Seger, C. Oliveira, and R. T. Rodrigues, “Development of a laboratory-scale flotation column with inlet bubble size measurement,” *Miner. Eng.*, vol. 142, p. 105936, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.105936>.
- [161] C. Sun *et al.*, “Measurements of internal flow regime and bubble size in effervescent atomizer,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 98, pp. 604–620, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.07.002>.
- [162] U. Iben, F. Wolf, H. Freudigmann, J. Fröhlich, and W. Heller, “Optical measurements of gas bubbles in oil behind a cavitating micro-orifice flow,” *Exp. Fluids*, vol. 56, no. 114, pp. 1–10, 2015, doi: <https://doi.org/10.1007/s00348-015-1979-6>.
- [163] S. Zhong, X. Zou, Z. Zhang, and H. Tian, “A flexible image analysis method for measuring bubble parameters,” *Chem. Eng. Sci.*, vol. 141, pp. 143–153, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2015.10.033>.
- [164] J. Wen, Q. Sun, Z. Sun, and H. Gu, “An improved image processing technique for determination of volume and surface area of rising bubble,” *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 104, pp. 294–306, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2018.02.004>.
- [165] J. Yin, Y. Qian, Y. Ma, and D. Wang, “Experimental study on the bubble trajectory in an axial gas-liquid separator applied for tritium removal for molten salt reactors,” *Nucl. Eng. Des.*, vol. 320, pp. 133–140, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.05.015>.
- [166] S. Brittle *et al.*, “Minimising microbubble size through oscillation frequency control,” *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 104, pp. 357–366, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.08.002>.

- [167] A. H. Gadallah and K. Siddiqui, "Bubble breakup in co-current upward flowing liquid using honeycomb monolith breaker," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 131, pp. 22–40, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2015.03.028>.
- [168] M. de Langlard, H. Al-Saddik, S. Charton, J. Debayle, and F. Lamadie, "An efficiency improved recognition algorithm for highly overlapping ellipses: Application to dense bubbly flows," *Pattern Recognit. Lett.*, vol. 101, pp. 88–95, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2017.11.024>.
- [169] R. F. L. Cerqueira and E. E. Paladino, "Development of a deep learning-based image processing technique for bubble pattern recognition and shape reconstruction in dense bubbly flows," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 230, p. 116163, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.116163>.
- [170] J. Ilonen *et al.*, "Comparison of bubble detectors and size distribution estimators," *Pattern Recognit. Lett.*, vol. 101, pp. 60–66, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2017.11.014>.
- [171] Deendarlianto, I. Supraba, A. I. Majid, M. R. Pradecta, Indarto, and A. Widyaparaga, "Experimental investigation on the flow behavior during the solid particles lifting in a micro-bubble generator type airlift pump system," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 13, p. 100386, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.100386>.
- [172] N. Strokina, J. Matas, T. Eerola, L. Lensu, and H. Kälviäinen, "Detection of bubbles as concentric circular arrangements," *Mach. Vis. Appl. Vol.*, vol. 27, pp. pages387–396, 2016, doi: <https://doi.org/10.1007/s00138-016-0749-7>.
- [173] A. Castillo, P. Vall, M. Garrido-Baserba, J. Comas, and M. Poch, "Selection of industrial (food, drink and milk sector) wastewater treatment technologies: A multi-criteria assessment," *J. Clean. Prod.*, vol. 143, pp. 180–190, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.132>.
- [174] A. Aziz, F. Basheer, A. Sengar, Irfanullah, S. U. Khan, and I. H. Farooqi, "Biological wastewater treatment (anaerobic-aerobic) technologies for safe discharge of treated slaughterhouse and meat processing wastewater," *Sci. Total Environ.*, vol. 686, pp. 681–708, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.295>.
- [175] B. R. Baker, R. Mohamed, A. Al-Gheethi, and H. A. Aziz, "Advanced technologies for poultry slaughterhouse wastewater treatment: A systematic review," *J. Dispers. Sci. Technol.*, pp. 1–20, 2020, doi: <https://doi.org/10.1080/01932691.2020.1721007>.
- [176] Y. Shutova, B. L. Karna, A. C. Hambly, B. Lau, R. K. Henderson, and P. Le-Clech, "Enhancing organic matter removal in desalination pretreatment systems by application of dissolved air flotation," *Desalination*, vol. 383, pp. 12–21, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.12.018>.
- [177] M. R. Aliff Radzuan, M. A. Abia-Biteo Belope, and R. B. Thorpe, "Removal of fine oil droplets from oil-in-water mixtures by dissolved air flotation," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 115, pp. 19–33, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.09.013>.
- [178] F. C. P. Rocha e Silva *et al.*, "Oil removal efficiency forecast of a Dissolved Air



- Flotation (DAF) reduced scale prototype using the dimensionless number of Damköhler,” *J. Water Process Eng.*, vol. 23, pp. 45–49, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.01.019>.
- [179] L. Zhang, “Advanced treatment of oilfield wastewater by a combination of DAF, yeast bioreactor, UASB, and BAF processes,” *Sep. Sci. Technol.*, vol. 56, no. 4, pp. 779–788, 2020, doi: 10.1080 / 01496395.2019.1711411.
- [180] C. Rattanapan, A. Sawain, T. Suksaroj, and C. Suksaroj, “Enhanced efficiency of dissolved air flotation for biodiesel wastewater treatment by acidification and coagulation processes,” *Desalination*, vol. 280, no. 1, pp. 370–377, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.07.018>.
- [181] R. T. Rodrigues and J. Rubio, “DAF–dissolved air flotation: Potential applications in the mining and mineral processing industry,” *Int. J. Miner. Process.*, vol. 82, no. 1, pp. 1–13, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2006.07.019>.
- [182] S. Calgaroto, A. Azevedo, and J. Rubio, “Separation of amine-insoluble species by flotation with nano and microbubbles,” *Miner. Eng.*, vol. 89, pp. 24–29, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.01.006>.
- [183] X. Zhang, X. Zhang, Y. Liu, Q. Zhang, S. Yang, and X. He, “Removal of viscous and clogging suspended solids in the wastewater from acrylonitrile-butadiene-styrene resin production by a new dissolved air release device,” *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 148, pp. 524–535, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.10.031>.
- [184] H. A. Oliveira, A. C. Azevedo, and J. Rubio, “Removal of flocculated TiO<sub>2</sub> nanoparticles by settling or dissolved air flotation,” *Environ. Technol. (United Kingdom)*, vol. 42, no. 7, pp. 1001–1012, 2021, doi: 10.1080/09593330.2019.1650123.
- [185] H. B. . Ortiz-Oliveros and R. M. Flores-Espinosa, “Simultaneous removal of oil, total Co and 60Co from radioactive liquid waste by dissolved air flotation,” *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 16, pp. 3679–3686, 2018, doi: <https://doi.org/10.1007/s13762-018-1984-4>.
- [186] S. Watanabe *et al.*, “STRAD project for systematic treatments of radioactive liquid wastes generated in nuclear facilities,” *Prog. Nucl. Energy*, vol. 117, p. 103090, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2019.103090>.
- [187] N. R. Hanumanth Rao *et al.*, “The role of algal organic matter in the separation of algae and cyanobacteria using the novel ‘Posi’ - Dissolved air flotation process,” *Water Res.*, vol. 130, pp. 20–30, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.11.049>.
- [188] H.-B. Ding, M. Doyle, A. Erdogan, R. Wikramanayake, and P. Gallagher, “Innovative use of dissolved air flotation with biosorption as primary treatment to approach energy neutrality in WWTPs,” *Water Pract. Technol.*, vol. 10, no. 1, pp. 133–142, 2015, doi: <https://doi.org/10.2166/wpt.2015.015>.

- [189] S. Choi, J. Shin, K.-J. Chae, and Y. M. Kim, "Mitigation via physiochemically enhanced primary treatment of antibiotic resistance genes in influent from a municipal wastewater treatment plant," *Sep. Purif. Technol.*, vol. 247, p. 116946, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116946>.
- [190] F. C. Andreoli and L. P. Sabogal-Paz, "Coagulation, flocculation, dissolved air flotation and filtration in the removal of *Giardia* spp. and *Cryptosporidium* spp. from water supply," *Environ. Technol.*, vol. 40, no. 5, pp. 654–663, 2017, doi: <http://dx.doi.org/10.1080/09593330.2017.1400113>.
- [191] G. H. Johannesson, A. Crolla, J. D. Lauzon, and B. H. Gilroyed, "Estimation of biogas co-production potential from liquid dairy manure, dissolved air flotation waste (DAF) and dry poultry manure using biochemical methane potential (BMP) assay," *Biocatal. Agric. Biotechnol.*, vol. 25, no. 101605, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101605>.
- [192] F. Ghasemi Naghdi and P. M. Schenk, "Dissolved air flotation and centrifugation as methods for oil recovery from ruptured microalgal cells," *Bioresour. Technol.*, vol. 218, pp. 428–435, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.06.093>.
- [193] N. Rajapakse, M. Zargar, T. Sen, and M. Khiadani, "Effects of influent physicochemical characteristics on air dissolution, bubble size and rise velocity in dissolved air flotation: A review," *Sep. Purif. Technol.*, vol. 289, p. 120772, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120772>.
- [194] A. L. Piaggio, L. A. Soares, M. Balakrishnan, T. Guleria, M. K. de Kreuk, and R. E. F. Lindeboom, "High suspended solids removal of Indian drain water with a down-scaled Dissolved Air Flotation (DAF) for water recovery. Assessing water-type dependence on process control variables.," *Environ. Challenges*, p. 100567, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100567>.
- [195] A. K. Badawi, B. Ismail, O. Baaloudj, and K. Z. Abdalla, "Advanced wastewater treatment process using algal photo-bioreactor associated with dissolved-air flotation system: A pilot-scale demonstration," *J. Water Process Eng.*, vol. 46, p. 102565, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102565>.
- [196] S. Cheng *et al.*, "Harvesting of *Microcystis flos-aquae* using dissolved air flotation: The inhibitory effect of carboxyl groups in uronic acid-containing carbohydrates," *Chemosphere*, vol. 300, p. 134466, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134466>.
- [197] A. Atamaleki *et al.*, "Effect of coagulation and sonication on the dissolved air flotation (DAF) process for thickening of biological sludge in wastewater treatment," *Environ. Heal. Eng. Manag. J.*, vol. 7, no. 1, pp. 59–65, 2020, doi: [10.34172/EHEM.2020.08](https://doi.org/10.34172/EHEM.2020.08).
- [198] R. Rodrigues Fonseca, I. C. Franco, and J. P. hompson Jr, "Turbidity control on dissolved air flotation process using fuzzy logic," *Water Sci. Technol.*, vol. 78, no. 12, pp. 2586–2596, 2018, doi: <https://doi.org/10.2166/wst.2019.015>.
- [199] K. Xu, Y. Li, X. Zou, H. Wen, Z. Shen, and X. Ren, "Investigating microalgae cell-

- microsphere interactions during microalgae harvesting by ballasted dissolved air flotation through XDLVO theory,” *Biochem. Eng. J.*, vol. 137, pp. 294–304, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2018.06.013>.
- [200] X. Zhang, L. Wang, M. Sommerfeld, and Q. Hu, “Harvesting microalgal biomass using magnesium coagulation dissolved air flotation,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 93, pp. 43–49, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.06.024>.
- [201] M. A. S. Alkarawi, G. S. Caldwell, and J. G. M. Lee, “Continuous harvesting of microalgae biomass using foam flotation,” *Algal Res.*, vol. 36, pp. 125–138, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.10.018>.
- [202] Y. Xiong and F. Peng, “Optimization of cavitation venturi tube design for pico and nano bubbles generation,” *Int. J. Min. Sci. Technol.*, vol. 25, no. 4, pp. 523–529, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2015.05.002>.
- [203] J. S. M. Campo, “Propuesta de una planta de laboratorio para la remoción de contenido graso de aguas de producción usando la técnica de flotación por aire disuelto,” Universidad del Cauca, 2020.
- [204] X. Chen *et al.*, “Fourier-transform-based two-stage camera calibration method with simple periodical pattern,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 133, p. 106121, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106121>.
- [205] Q. Zhang, H. Xie, W. Shi, and B. Fan, “A novel sampling moiré method and its application for distortion calibration in scanning electron microscope,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 127, p. 105990, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2019.105990>.
- [206] D. Santos, L. Dallos, and P. A. Gaona-García, “Algoritmos de rastreo de movimiento utilizando técnicas de inteligencia artificial y machine learning,” *Inf. Tecnológica*, vol. 31, no. 3, pp. 23–38, 2020, doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642020000300023>.
- [207] L. Vinnett, J. Yianatos, L. Arismendi, and K. E. Waters, “Assessment of two automated image processing methods to estimate bubble size in industrial flotation machines,” *Miner. Eng.*, vol. 159, p. 106636, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106636>.
- [208] P. K. Saha, R. Pal, S. Sarkar, and A. Mukhopadhyay, “A novel image processing technique for detection of pseudo occluded bubbles and identification of flow regimes in a bubble column reactor,” *Measurement*, vol. 189, p. 110568, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110568>.
- [209] I. Carpenter and V. K. S. A. B. P. Mandar Badve, Sunil Rajoriya, Suja George, “Hydrodynamic cavitation: an emerging technology for the intensification of various chemical and physical processes in a chemical process industry,” *Rev. Chem. Eng.*, vol. 32, pp. 433–470, 2016, doi: 10.1515/revce-2016-0032.
- [210] M. Gałol, A. Przyjazny, and G. Boczkaj, “Wastewater treatment by means of advanced oxidation processes based on cavitation – A review,” *Chem. Eng. J.*, vol.

338, pp. 599–627, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.01.049>.