



Tratamiento de aguas residuales cárnicas mediante un sistema de flotación por aire disperso con burbujas de tamaño mediano

Treatment of meat wastewater using a dispersed air flotation system with medium-sized bubbles

Arbey De Jesús Urrego Cortes ¹, Hernando Carlos Oñate Barrasa ², Gridis Yulieth Cortés Henao ³

Fecha de Recepción: 28 de julio de 2025

Fecha de Aceptación: 22 de diciembre de 2025

Cómo citar: A. D. J. Urrego Cortes, H. C. Oñate Barrasa, and G. Y. Cortés Henao. (2025). Tratamiento de aguas residuales cárnicas mediante un sistema de flotación por aire disperso con burbujas de tamaño mediano. *Tecnura*, 29(86), 1–25. <https://doi.org/10.14483/22487638.23958>

Abstract

Background: Meat processing industries generate effluents with high pollutant loads, requiring the adoption of efficient treatment technologies that comply with environmental regulations.

Objective: The efficacy of a Dispersed Air Flotation (DAF) system in removing contaminants from meat processing wastewater was investigated, using medium-sized bubbles generated by air.

Methodology: Representative samples were collected from the meat processing plant of the municipality of Agustín Codazzi, located in the department of Cesar, Colombia. Samples were characterized through physicochemical analyses following Standard Methods guidelines, evaluating parameters such as pH, chemical oxygen demand (COD), oils and greases (O&G), turbidity, and temperature. A laboratory-scale pilot DAF system was implemented using a ½-inch diameter Venturi injector to induce the formation of medium-sized bubbles (0.69 mm).

Results: Results revealed a dependence of bubble size on retention time. The optimal configuration for O&G removal (77.9%) and COD removal (74.2%) corresponded to a retention time of twenty minutes, while turbidity removal efficiency of 38.8% was achieved at a retention time of five minutes.

Conclusions: The findings demonstrate that the DAF system, with optimized bubble size and retention time, constitutes an efficient alternative for the treatment of meat industry effluents and for maximizing O&G, COD, and turbidity removal, making its potential application at a larger scale viable.

Funding: Universidad Popular del Cesar (UPC).

Keywords: oils and greases, bubbles, dispersed air flotation, meat processing plant, wastewater

¹ Ingeniero Ambiental y Sanitario y magíster en Ciencias Ambientales de la Universidad Popular Del Cesar. Miembro del grupo de investigación ESTUDIOS SANITARIOS Y AMBIENTALES – E.S.A.E7. Email: arbeyurrego@hotmail.com

² Ingeniero Ambiental y Sanitario y magíster en Ingeniería Ambiental de la Universidad Popular Del Cesar. Miembro del grupo de investigación ESTUDIOS SANITARIOS Y AMBIENTALES – E.S.A.E7. Email: hernoba@hotmail.com

³ Microbióloga agroindustrial y magíster en Ciencias Ambientales de la Universidad Popular Del Cesar. Miembro del grupo de investigación ESTUDIOS SANITARIOS Y AMBIENTALES – E.S.A.E7. Email: gridiscorts@gmail.com

Resumen

Contexto: las industrias cárnicas generan efluentes con elevadas cargas contaminantes, lo cual exige la adopción de tecnologías de tratamiento eficientes que cumplan con la normativa ambiental.

Objetivo: se investigó la eficacia de un sistema de flotación por aire disperso (*Dispersed Air Flotation*, DAF) en la remoción de contaminantes de aguas residuales cárnicas, con un tamaño mediano de burbujas generadas por aire.

Métodología: se recolectaron muestras representativas de la planta procesadora de cárnicos del municipio de Agustín Codazzi, ubicado en el departamento del Cesar, Colombia. Las muestras fueron caracterizadas mediante análisis fisicoquímicos de acuerdo con los lineamientos del *Standard Methods*, y se evaluaron parámetros como pH, demanda química de oxígeno (DQO), Aceites y Grasas (AyG), turbidez y temperatura. Se implementó un sistema piloto de DAF a escala laboratorio, con el empleo de un inyector Venturi de diámetro ½" para inducir la formación de burbujas de tamaño mediano (0.69 mm).

Resultados: los resultados revelaron una dependencia del tamaño de burbuja con el tiempo de retención. Se encontró que la configuración óptima para la remoción de AyG (77.9 %) y DQO (74.2 %) correspondió a un tiempo de retención de veinte minutos y un tiempo de cinco minutos para la turbidez con una eficiencia de 38.8 %.

Conclusiones: los hallazgos demuestran que el sistema DAF, con la optimización del tamaño de burbuja y del tiempo de retención, constituye una alternativa eficiente para el tratamiento de efluentes industriales cárnicos y para maximizar la remoción de AyG, DQO y turbidez, lo que hace viable su potencial aplicación a mayor escala.

Financiamiento: Universidad Popular del Cesar (UPC).

Palabras clave: aceites y grasas, burbujas, flotación por aire disperso, procesadora de cárnicos, aguas residuales

Introducción

La industria alimentaria, particularmente la del procesamiento de carne, se caracteriza por un elevado consumo de agua en sus procesos productivos y de limpieza [1]. Estas industrias generan aguas residuales con altas cargas contaminantes que, de no recibir un tratamiento adecuado, representan un elevado riesgo para el medio ambiente y la salud pública [2]. La descarga de estos efluentes sin tratamiento en alcantarillas o cuerpos de aguas naturales puede ocasionar diversos daños ambientales, desde obstrucciones en sistemas de tratamiento hasta la destrucción irreversible de ecosistemas [3].

La planta de beneficio animal de Agustín Codazzi, Cesar, Colombia, ha reportado una elevada carga contaminante con parámetros críticos como turbidez, Demanda Química de Oxígeno (DQO), Aceites y Grasas (AyG) en el efluente de sus aguas residuales. Por ello, a pesar de que la planta cuenta con una trampa de grasas para el tratamiento de sus aguas residuales, se debería optar por tecnologías más eficientes para disminuir de manera más efectiva la carga contaminante [4].

Entre los efectos que producen las aguas residuales de origen cárnico se encuentran la formación de películas superficiales de aceites y grasas que pueden ocasionar la aparición de malos olores y enfermedades pues impiden el intercambio gaseoso debido a su lenta biodegradabilidad [5], [6]. En este tipo de

aguas residuales, las altas concentraciones de materia orgánica medidas mediante la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), los Sólidos Suspendedos Totales (SST) y los aceites y grasas (AyG) que al solidificarse pueden provocar obstrucciones en el alcantarillado incrementan el riesgo de desbordamientos de aguas residuales y la exposición de la población a patógenos potencialmente peligrosos [7].

A pesar de la disponibilidad de opciones convencionales para el tratamiento primario de estas aguas residuales, como la flotación por aire disuelto, la flotación electrolítica y el sistema por de flotación por aire disperso (*Dispersed Air Flotation*, DAF), la remoción eficiente de AyG sigue siendo un desafío [8], [9]. Estas tecnologías, a pesar de ser utilizadas a gran escala, tienen eficiencias de eliminación que oscilan entre un 50 % y 80 %, lo que no siempre resulta suficiente para garantizar el cumplimiento de las regulaciones más recientes [10]. En el caso de Colombia, el Decreto 0631 de 2015 especifica condiciones estrictas para las descargas, lo cual se traduce en la necesidad de que las industrias apliquen tratamientos más eficientes para evitar consecuencias legales y reducir los efectos adversos en los ecosistemas.

Bajo estas condiciones, es crucial la exploración de alternativas destinadas a mejorar la eficacia de los sistemas de tratamiento actuales. Un enfoque prometedor radica en el control del tamaño de las burbujas empleadas en la etapa de flotación, un parámetro crítico que influye directamente en la eficiencia de la adhesión-separación de la contaminación, como lo demuestran estudios recientes [11], [12], en los cuales se evidencia el uso de tamaños específicos de burbuja y de ciertos dispersores de burbuja para la mejora en la extracción de compuestos orgánicos e inorgánicos, así como la suspensión y separación de residuos. La posibilidad de adaptar los tamaños de las burbujas a la variada composición de las aguas residuales podría demostrar una mayor eficiencia en estos procesos.

El objetivo principal de este proyecto fue la evaluación de la eficiencia de un sistema de flotación por aire disperso en el tratamiento de aguas residuales provenientes de industrias cárnicas, mediante el desarrollo de un sistema piloto capaz de generar burbujas de tamaño mediano. Esto permitió determinar la relación tamaño y tiempo de retención hidráulica para maximizar la remoción de AyG, DQO y turbidez, para mejorar la eficiencia de los tratamientos y reducir el impacto ambiental asociado.

Metodología

En esta sección se describen las diferentes etapas del desarrollo de esta investigación, divididas en tres fases: fase I, recolección y caracterización de las aguas residuales de la industria cárnica; fase II tratamiento de las muestras de agua residual cárnica mediante un DAF con burbuja mediana; fase III, evaluación de la eficiencia de remoción del sistema DAF propuesto.

Fase I. Recolección y caracterización de las aguas residuales

La toma de muestras se realizó en la cajilla de inspección ubicada en el efluente final después de los procesos de producción de la Planta de Beneficio Animal del Matadero Municipal del municipio de Agustín Codazzi en el departamento del Cesar. Las muestras se tomaron y preservaron siguiendo los lineamientos establecidos por la *Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas del IDEAM* y la guía APHA-AWWA-WEF [13]. Se realizó un muestreo de tipo compuesto, tomando unas muestras puntuales de 400 ml cada dos horas la cual se almacenaron en una botella de plástico, para un total diario de dos litros. Para la evaluación de AyG se tomaron tres frascos de vidrio de 300 ml cada uno para cada muestra puntual. La toma de muestras se repitió tres veces cada una en semanas diferentes.

Culminada la recolección de las muestras, se realizó un análisis inicial *in situ* de los parámetros pH, caudal y temperatura; posteriormente se analizaron en el laboratorio los parámetros DQO, turbidez, temperatura, AyG. Los análisis se realizaron según la metodología descrita en *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, publicado por la American Public Health Association (APHA), la American Water Works Association (AWWA) y la Water Environment Federation (WEF) [13].

El pH se determinó mediante el método electrométrico (4500-H⁺ B) utilizando un potenciómetro previamente calibrado. La DQO se analizó por el método de reflujo cerrado titulométrico (5220 C), basado en la oxidación con dicromato en medio ácido y posterior titulación. La turbidez se midió mediante el método nefelométrico (2130 B) empleando un turbidímetro calibrado. Los AyG se determinaron mediante el método gravimétrico por extracción con solvente (5520 B).

Fase II. Implementación y puesta en marcha de la unidad piloto

Las muestras recolectadas se sometieron a un tratamiento de flotación por aire disperso (DAF) en el laboratorio ambiental de la Universidad Popular del Cesar. El equipo piloto consta de un tanque de flotación circular con capacidad de 30 L, fabricado en acrílico transparente de 8 mm de espesor en posición vertical, con una altura de 1,72 m y un diámetro de 17 cm; su diseño tomó como referencia la celda de James tipo Imhoff-lot y la columna de flotación. Al tanque se le acopló un inyector de burbujas tipo venturi de ½", encargado de introducir microburbujas de forma descendente al sistema. Asimismo, se instaló una bomba de agua de medio caballo de fuerza (0,5 HP) para garantizar la recirculación del fluido; en dicho proceso, el agua residual se captaba en la parte inferior del tanque y se recirculaba por la parte superior.

Puesta en marcha de la unidad piloto

La puesta en marcha del sistema piloto inició con la activación de la bomba impulsora, que condujo el agua residual a través de una tubería conectada a la parte superior del tanque de flotación. En el extremo de dicha tubería se instaló un dispersor tipo venturi, encargado de generar microburbujas dentro del

sistema. El flujo descendente favoreció la interacción y coalescencia burbuja-partícula. Posteriormente, debido a la diferencia de densidades, las burbujas ascienden hacia la superficie arrastrando el material disperso y formando una capa superficial de grasa. El sistema opera recirculando el agua residual de forma continua durante 20 minutos; cada 5 minutos se extrajeron muestras con el fin de evaluar el rendimiento del dispersor de burbujas en función del tiempo.

Caracterización de las burbujas generadas (tamaño, velocidad de ascenso y presión de generación).

Se realizó la medición de algunas características físicas de las burbujas como el tamaño, velocidad y presión de estas. Antes de analizar se tuvieron en cuenta unas consideraciones:

- Se utilizó para este fin agua potable de la llave para una mejor visibilidad de las burbujas en el tanque de flotación.
- Se colocó una cuadrícula de 1 cm x 1 cm en una parte del tanque para poder realizar la respectiva calibración de cada software.
- Se utilizó un celular con su trípode a 40 cm de altura y a 30 cm de distancia del tanque de flotación para todas las tomas de fotografía y video.

Caracterización del tamaño de burbujas.

El análisis del tamaño de burbuja se realizó mediante el software *Bubble Analyzer Analyzer* [16], utilizando 100 imágenes por condición experimental, con lo cual se obtuvo el diámetro promedio de las burbujas generadas. La metodología y el procedimiento detallado para el uso del software se desarrollaron siguiendo el protocolo propuesto por Mella [14], ver [Anexo 1](#).

Caracterización de la velocidad de ascenso de las burbujas generadas.

La velocidad de ascenso de las burbujas se determinó mediante el software **Tracker 6.2**, empleado para el análisis de trayectorias y el cálculo de variables cinemáticas a partir de videos. Este software permite calcular datos de posición, velocidad y aceleración de los objetos estudiados [17].

Se utilizó como base la metodología sugerida por la Universidad de Burgos [18] en su manual de nuevas tecnologías para la detección de la trayectoria de objetos. La [figura 1](#) muestra lo que encontraremos al seguir el paso a paso en la utilización del software Tracker 6.2.

Caracterización de la presión de generación de las burbujas.

Para la caracterización de la presión, se instaló un manómetro de presión de 80 psi antes de la implementación del dispersor venturi en el piloto, y de esta manera se midió la presión con que se generó el tamaño de burbujas mediano.

Fase III: evaluación de la eficiencia del prototipo diseñado en el tratamiento de las aguas residuales cárnicas

En esta fase se evaluó la eficiencia del sistema de flotación DAF en la remoción de contaminantes presentes en aguas residuales provenientes de la industria del sector cárnico. El diseño experimental es un diseño factorial mixto con medidas repetidas; este diseño es de carácter longitudinal y no es completamente aleatorizado.

Diseño experimental para la evaluación de la eficiencia del prototipo.

El diseño experimental para la evaluación de la eficiencia del piloto está dado por las siguientes características:

Factores y niveles.

Para evaluar la eficiencia del proceso de flotación, se consideraron dos factores principales:

- **Factor 1: Tamaño de burbuja**
 - Mediano (300 mm - 1000 mm).

- **Factor 2: Tiempo de tratamiento (5 niveles)**
 - Inicial
 - 5 minutos.
 - 10 minutos.
 - 15 minutos.
 - 20 minutos.

Se evaluaron **la eficiencia de remoción de contaminantes de las aguas residuales cárnicas** con burbujas de rango de tamaño mediano.

Variables dependientes

Para cada combinación de tamaño de burbuja y tiempo de tratamiento, se midieron los siguientes parámetros:

- **DQO (% de remoción).**
- **AyG (% de remoción).**
- **Turbidez (% de remoción).**
- **pH medido en cada tiempo.**

El porcentaje de remoción de los contaminantes (% R) se expresa como se muestra en la ecuación 1:

$$\%R = \frac{(carga\ contaminante\ de\ entrada - carga\ contaminante\ de\ salida)}{Carga\ contaminante\ de\ entrada} * 100 \quad (1)$$

En la Tabla 1 se exponen los factores y niveles del diseño experimental con sus respectivas repeticiones en cada uno de los tiempos previamente establecidos.

Tabla 1. Factores y niveles del diseño experimental

TIPO DE AGUA	PARÁMETRO	FACTOR 1 (Tamaño de burbujas)	BLOQUE	FACTOR 2 (Tiempo)				
				Inicial	5 min	10 min	15 min	20 min
Aguas residuales de origen cárnico	Parámetro x	Mediana	Bx	Rep 1	Rep 1	Rep 1	Rep 1	Rep 1
				Rep 2	Rep 2	Rep 2	Rep 2	Rep 2
				Rep 3	Rep 3	Rep 3	Rep 3	Rep 3
				Rep 2	Rep 2	Rep 2	Rep 2	Rep 2
				Rep 3	Rep 3	Rep 3	Rep 3	Rep 3
				Rep 3	Rep 3	Rep 3	Rep 3	Rep 3

Fuente: elaboración propia.

Aunque en la [Tabla 1](#) no se muestra la medición de pH, este parámetro se midió en cada tiempo de muestreo para evaluar su evolución durante el proceso y analizar si hubo cambios significativos en función de la remoción.

Procedimiento experimental

Se recolectan muestras de aguas residuales directamente en la industria cárnica, en tres días distintos para conformar los bloques experimentales. En cada día de muestreo se recoge 40 L para realizar las pruebas y sus repeticiones internas. Las muestras recolectadas se almacenan en un refrigerador y se dejan a temperatura ambiente antes de cada ensayo.

El sistema DAF opera en modo continuo durante 20 minutos por cada ensayo. Se toman muestras en botellas diferentes en los tiempos 5, 10, 15 y 20 minutos y una muestra inicial que permite evaluar la evolución del tratamiento.

Durante este tiempo, se generan las burbujas del tamaño correspondiente (300 mm – 1000 mm) al tratamiento mediante un sistema controlado. Cada muestra se analiza por triplicado para determinar DQO, AyG, turbidez y pH

El proceso completo en cada tipo de aguas residuales se repitió tres veces, utilizando muestras distintas en cada ocasión. En la Tabla 1, estas repeticiones se presentan en la columna “bloques”,

correspondiente a tres bloques o repeticiones globales del experimento. Esto permite aumentar la exactitud de los resultados y depuración de los datos erróneos. En resumen, se analizaron 45 muestras: 1 tamaños de burbuja \times 5 tiempos \times 3 réplicas internas \times 3 bloques = 45 muestras.

Análisis estadístico.

Pruebas preliminares

Antes del análisis factorial, se realizaron pruebas para verificar el cumplimiento de los supuestos del análisis de varianza (ANOVA):

- Prueba de normalidad (Kolmogorov-Smirnov): para evaluar si los datos presentan una distribución normal.
- Prueba de homocedasticidad (Test de Barlett o Test de Levene): para verificar si la dispersión de los datos es homogénea entre los grupos.

Los datos que no cumplieron los supuestos de normalidad y homocedasticidad fueron analizados mediante pruebas no paramétricas (Kruskal-Wallis o ANOVA de doble vía), los que sí cumplieron, se analizaron mediante un ANOVA de dos factores para datos paramétricos.

Análisis de efectos principales e interacción

Se realizó un ANOVA factorial de dos vías con bloques aleatorizados el agua residual cárnica, evaluando:

- El efecto del tamaño de burbuja en la eficiencia del tratamiento.
- El efecto del tiempo de tratamiento en la remoción de contaminantes.
- La interacción entre el tamaño de burbuja y el tiempo, determinando si el rendimiento del sistema depende de la combinación de ambos factores.
- Diferencias entre los dos tipos de aguas residuales en términos de remoción de contaminantes.

Para identificar diferencias significativas entre grupos, se aplicaron pruebas de comparaciones múltiples *post hoc* (Dunn) para datos no paramétricos y prueba de Tukey para datos paramétricos.

Resultados

Caracterización fisicoquímica inicial de las aguas residuales

Una vez realizadas las determinaciones de los parámetros fisicoquímicos en las aguas residuales de la industria cárnica, se obtuvieron los valores correspondientes a el caudal, pH, temperatura, DQO, AyG, Turbidez y SST. La [Tabla 2](#) muestra los resultados de estos parámetros en las aguas residuales cárnicas.

Tabla 2. Parámetros de aguas residuales cárnicas iniciales y medidos *in situ*.

Parámetro	Unidad	Máximo	Mínimo	Promedio	[19]	Resolución 0631 de 2015
Caudal	L/s	2,34	2,01	2,19	-	-
Temperatura	° C	29,6	27	28,26	-	-
pH	Unidades de pH	8,9	6,85	7,74	-	-
DQO	Mg O ₂ /L	9984	640	2965	3054,5	450
SST	Mg/L	2063,3	106,7	861,2	3130,5	150
AyG	Mg/L	4574	485	1652,6	2159	20
Turbidez	NTU	593,3	302	410,9	ND	-

Fuente: Autores.

El análisis *in situ* de los parámetros fisicoquímicos del agua residual cárnica (Tabla 2) reveló que no hay una variabilidad significativa en el caudal (2,01 – 2,34 L/s, promedio 2,19 L/s). Esto facilita el control del proceso de flotación al no generarse fluctuaciones grandes en la carga contaminante.

La temperatura del efluente se mantuvo relativamente estable (27,0 – 29,6 °C), con un promedio de 28,26 °C, lo que indica la ausencia de descargas térmicas significativas que pudieran afectar el proceso de tratamiento. Esta misma estabilidad se observa en el pH, cuyo valor promedio se ubica en un rango ligeramente alcalino (7,74). Se registraron variaciones puntuales (6,84 – 8,9); no obstante, el valor promedio se mantiene dentro del rango operativo adecuado para el tratamiento.

La caracterización fisicoquímica inicial del agua residual generada en la industria cárnica evidenció una carga contaminante considerablemente superior a los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución 0631 de 2015. La DQO promedio registrada (2965 mg O₂/L) superó en más de seis veces el límite máximo permisible (450 mg/L). De manera similar, la concentración promedio de AyG (1652,6 mg/L, con un valor máximo de 4574 mg/L) excedió ampliamente el nivel máximo permitido (20 mg/L). Los SST también presentaron niveles elevados (promedio: 861,2 mg/L frente al límite de 150 mg/L), al igual que la turbidez (promedio: 410,9 NTU). Al comparar estos resultados con los reportados por Cabrera, se observó que los valores de DQO (3054,5 mg O₂/L) y AyG (2159 mg/L) son ligeramente superiores, pero comparables con los encontrados en el agua residual cárnica del matadero de Agustín Codazzi.

La elevada presencia de materia orgánica puede atribuirse a residuos animales como sangre, tejidos, grasa y otros subproductos, los cuales deben ser tratados adecuadamente antes de su vertimiento. En cuanto a las AyG, concentraciones tan elevadas pueden generar problemas en el sistema de tratamiento, debido a la tendencia de estos compuestos a flotar y formar capas superficiales que interfieren con la oxigenación y el funcionamiento de los procesos biológicos. Los niveles de SST y turbidez registrados

indican una alta presencia de partículas finas o coloidales en el agua residual, atribuibles a los residuos orgánicos generados durante las etapas de sacrificio y procesamiento de los animales —sangre, heces, orina, pelos, plumas, grasas y fragmentos de tejido—, que al descomponerse originan partículas finas. La presencia de estos compuestos evidencia la necesidad de implementar un sistema de tratamiento que garantice un efluente final conforme a los estándares de descarga y minimice el impacto ambiental.

Caracterización de las burbujas generadas (tamaño, velocidad de ascenso y presión de generación).

La [Tabla 3](#) presenta un análisis detallado de la parametrización de las burbujas generadas por el sistema implementado, incluyendo el diámetro promedio, la desviación estándar, el rango de tamaños, la velocidad de ascenso promedio con su desviación estándar, la presión de generación requerida, y los resultados del análisis estadístico (pruebas de normalidad de Kolmogórov-Smirnov y Shapiro-Wilk, y las pruebas no paramétricas de Kruskal-Wallis para el tamaño y la velocidad de ascenso).

Tabla 3. Parametrización y análisis estadístico ANOVA de las burbujas.

Tamaño de burbuja	Diámetro (mm) ± DE	Velocidad (mm/s) ± DE	Rango velocidad (mín-máx)	Presión (psi)	Normalidad Krustal wallis Tamaño de Burbuja	Normalidad Krustal wallis Velocidad de la burbuja
Mediana	0,69 ± 0,214 ^b	26,02 ± 5,61 ^b	13,3 – 34,05	35	p < 2.2e-16	p < 1.21e-15

Fuente: elaboración propia

El análisis de los datos revela una clara diferenciación en el diámetro promedio dando como resultado un tamaño de burbuja mediano de (0,69 ± 0,214 mm), lo que confirma la capacidad del sistema para generar y mantener poblaciones de burbujas de un tamaño de manera consistente. La desviación estándar dada puede atribuirse a una dispersión gracias al fenómeno de coalescencia en el dispersor al momento de la generación de las burbujas [15], [19].

Dado que no se cumplió el supuesto de homogeneidad de varianzas para la velocidad de ascenso, el análisis estadístico se realizó mediante pruebas no paramétricas. Los resultados indicaron diferencias estadísticamente significativas tanto en el tamaño de burbuja ($p < 2.2 \times 10^{-16}$) como en la velocidad de ascenso ($p < 1.21 \times 10^{-15}$). Adicionalmente, la relación entre el tamaño de la burbuja, su velocidad de ascenso y la presión de generación evidencia una correlación positiva entre el tamaño promedio de la burbuja y su velocidad de ascenso promedio.

Evaluación de la eficiencia del sistema DAF en el tratamiento de las aguas residuales cárnicas

A continuación, se presenta el análisis estadístico y los resultados de la eficiencia del sistema DAF en términos de remoción de los distintos parámetros evaluados con burbuja mediana. Dado que la disponibilidad de referencias específicas sobre diferentes tamaños de burbuja en la remoción de aguas

residuales alimentarias mediante flotación DAF es limitada, se tomaron como referencia estudios sobre sistemas de flotación por aire disuelto que operan con tamaños de burbuja entre 20 μm y 120 μm , así como trabajos sobre el uso de sistemas de flotación en la recuperación y remoción de minerales, crudo y materia orgánica. Los datos detallados correspondientes a los análisis de cada parámetro evaluado se presentan en el [Anexo 3](#).

Evaluación de la eficiencia de la remoción de los parámetros AyG, DQO, Turbidez y pH en el sistema DAF.

En esta sección se analiza en comportamiento general del sistema de flotación DAF en función del tiempo de operación. En este contexto, en la [Figura 1](#) se presenta el gráfico correspondiente a la eficiencia de remoción obtenida para los parámetros AyG, DQO y turbidez.

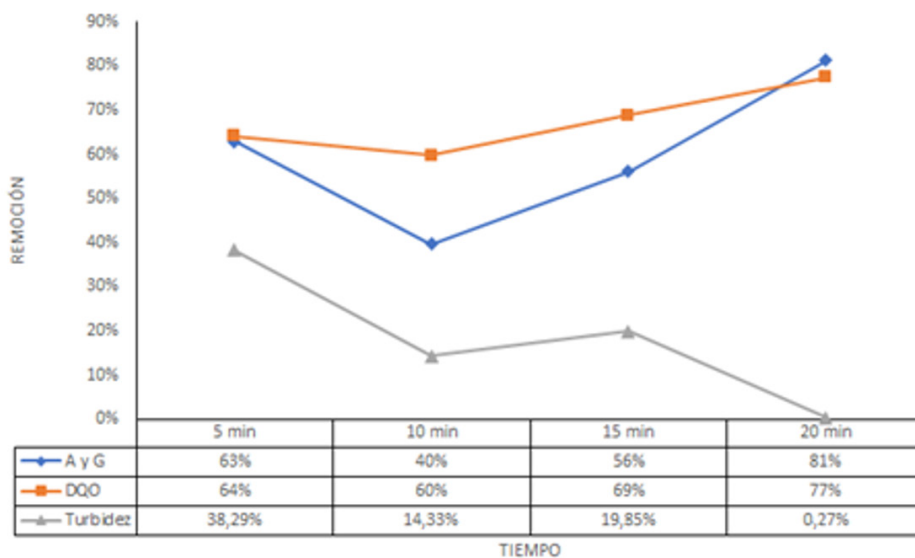


Figura 1. Eficiencia de remoción del sistema DAF en los diferentes parámetros AyG, DQO y Turbidez

Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la [Figura 1](#), con respecto al parámetro de AyG, durante los primeros cinco minutos se removieron las partículas de aceites hidrófobas fáciles de arrastrar y flotar; sin embargo, a los minutos 10 y 15 hubo un pequeño bache donde podrían haber quedado partículas más difíciles, como partículas de grasa de menor tamaño, que requieren más tiempo en formar una capa hidrofóbica alrededor de la partícula para ser removidas [23]. Al evaluar el comportamiento del sistema a los 20 minutos, se observó una eficiencia de remoción del 81 %, lo que indica que este tiempo de retención fue el más efectivo, favorecido por una combinación entre un contacto adecuado de burbuja-partícula y una velocidad media de ascenso que optimiza el proceso de flotación [24]. Estos resultados evidencian que el sistema evaluado puede alcanzar eficiencias comparables a las reportadas para otros sistemas de flotación, como la flotación por aire disperso, cuyos valores oscilan entre 80 % y 90 % [5], [25]. A pesar de que la eficiencia de estos dos últimos es un poco mayor a la de nuestro sistema DAF, nuestro proyecto presenta una

ventaja sobre aquellos, al requerir menor energía para su funcionamiento, pues no utiliza una bomba adicional para el proceso de presurización, como si la utilizan los sistemas de flotación por aire disuelto.

En relación al parámetro de DQO, durante los primeros 5 minutos de operación se observó un arrastre inicial de materia orgánica; sin embargo, a los 10 minutos se observó una ligera disminución en la eficiencia de remoción. Posteriormente, a los 20 minutos, las burbujas alcanzaron la mayor remoción de DQO, con un valor del 77 %, resultado que podría estar relacionado con un tamaño de burbuja ideal para evitar quedar atrapadas en flujos turbulentos y tener un comportamiento estable y equilibrado, además el área superficial parece ser suficiente para retener partículas orgánicas y coloidales [26]. El nivel de remoción encontrado (77 %), supera algunos valores reportados para sistemas de flotación por aire disuelto aplicados en industrias cárnicas [5], donde se indica que la remoción promedio de DQO en este tipo de sistemas oscila entre el 19 % y el 51 %.

Al analizar la turbidez, se observaron eficiencias de remoción entre 14 % y 38 %, alcanzándose el valor máximo a los cinco minutos. Este comportamiento podría atribuirse a que, en ese intervalo, se presentó una velocidad de ascenso óptima que favoreció la adhesión de las partículas a las burbujas y contribuyó a una mayor estabilidad del sistema, lo que se tradujo en una mejor remoción. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Reis [24].

Posteriormente, dicha estabilidad disminuyó debido a fenómenos de turbulencia y coalescencia de las burbujas, que ocasionaron colisiones y desfloculación de las partículas a medida que transcurría el tiempo [27], [28].

La relación de pH a través del tiempo en el proceso de flotación se muestra en la [Figura 2](#).

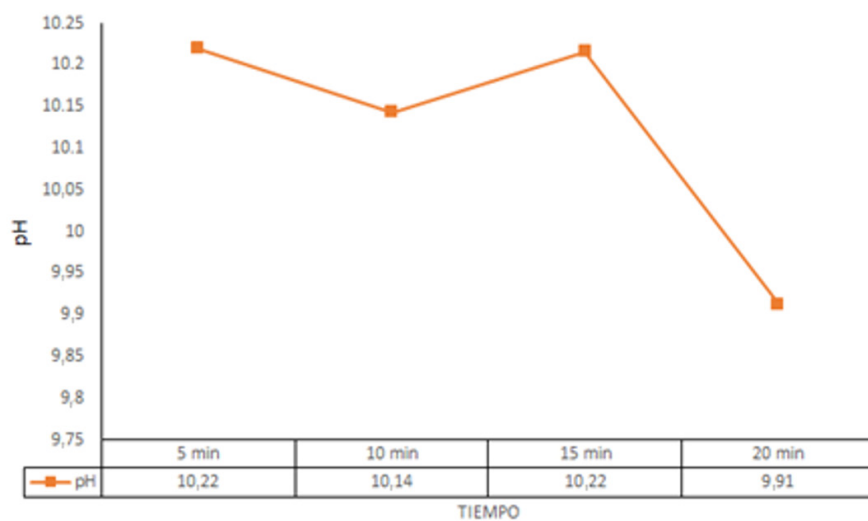


Figura 2. Relación del pH a través del tiempo en el funcionamiento del sistema DAF.

Fuente: elaboración propia.

La [Figura 2](#) muestra la evolución del pH a lo largo del ensayo, con valores que oscilaron entre 9,91 y 10,22. De acuerdo con lo reportado en la literatura los valores esperados para el funcionamiento óptimo de sistemas de flotación van dentro de un pH de 6 hasta un pH de 9,5 [29]. En este caso, el sistema presentó condiciones ligeramente alcalinas que superan los valores óptimos. Comportamiento que puede explicarse por la degradación de compuestos nitrogenados, proteínas y materia orgánica presentes en el agua residual cárnica, especialmente en condiciones anaerobias, se generan productos como amoníaco, que tienen un efecto alcalinizante en el agua residual, elevando así el pH [30]. También esta condición de alcalinidad en el agua residual puede afectar directamente la adhesión de partículas al momento de utilizar un espumante [31].

Diseño experimental

Con el fin de evaluar el efecto del tamaño de burbuja y el tiempo de operación sobre los parámetros de calidad del agua, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de doble vía. La [Tabla 4](#) resume los estadísticos F y los valores de significancia obtenidos para cada variable evaluada.

Tabla 4. Resultados del ANOVA de doble vía para evaluar el efecto del tamaño de burbuja y el tiempo sobre los parámetros DQO, pH, AyG y turbidez.

Parámetro	Factor	F	P	Interacción	Significativo
DQO	Burbuja	4,28	0,0169	No	Sí
DQO	Tiempo	7,44	0,000175		Sí
AYG	Burbuja	2,949	0,0589	No	NO
Turbidez	Burbuja	22,67	<0.001	Sí	Sí
pH	Burbuja	53,17	<0.001	No	Sí

Fuente: Autores

La [Tabla 4](#) presenta para la DQO se observó un efecto estadísticamente significativo tanto del tamaño de burbuja ($F = 4,28$; $p = 0,0169$) como del tiempo ($F = 7,44$; $p = 1,75 \times 10^{-4}$). Este comportamiento podría atribuirse a que ambos factores podrían estar influyendo en la eficiencia del sistema, a pesar de que no se evidenció una interacción significativa entre ellos ($p > 0.05$). Los resultados completos del análisis se presentan en el [Anexo 2](#).

En el caso del pH, el tamaño de burbuja mostró un efecto altamente significativo ($F = 53,17$; $p = 2,86 \times 10^{-16}$), mientras que ni el tiempo ni la interacción burbuja \times tiempo presentaron efectos estadísticamente significativos ($p > 0,05$), lo que sugiere que las variaciones en este parámetro podrían estar principalmente asociadas al tamaño de burbuja.

Para los parámetros AyG, el efecto del tamaño de burbuja fue cercano al nivel de significancia ($F = 2,949$; $p = 0,0589$), por lo que no puede considerarse estadísticamente significativo bajo un nivel de $\alpha =$

0,05. Sin embargo, el tiempo sí mostró un efecto significativo ($F = 2,821$; $p = 0,0451$), lo que podría indicar que el tiempo de retención influye en el comportamiento de este parámetro.

Por otra parte, la turbidez presentó un efecto significativo del tamaño de burbuja ($F = 22,67$; $p < 0,001$) y una interacción significativa burbuja \times tiempo ($F = 5,58$; $p < 0,001$). Esto sugiere que el efecto del tamaño de burbuja sobre la turbidez podría depender del tiempo de operación, indicando una posible influencia combinada de ambos factores en la eficiencia de remoción.

Comparación de resultados obtenidos con otras tecnologías en el tratamiento de las aguas residuales

Se presenta una comparación entre los resultados obtenidos y los reportados para otras tecnologías de flotación y tratamiento de aguas residuales, tanto a nivel nacional como internacional considerando sus principales ventajas y desventajas. Esta comparativa se muestra en la [Tabla 5](#), donde además de contrastar las ventajas y desventajas se muestran los porcentajes de remoción en distintos parámetros.

Tabla 5. Comparación de los resultados obtenidos con otras tecnologías de flotación y de tratamiento en aguas residuales.

Tecnologías	Eficiencia de remoción (%)	Ventajas	Desventajas	Referencias
Flotación por aire disperso con burbujas variables (Propuesta de esta tesis)	DQO: 77 % AyG: 81 % Turbidez: 38 % pH: 9,91-10,22	-No utiliza coagulante. -El tamaño de burbujas es ajustable para adaptarse al tipo de agua residual. -Gasto energético bajo.	-Requiere un ajuste preciso del tamaño de burbujas y la presión de flujo de agua. -La remoción en turbidez no es muy alta.	[32], [33]
Flotación por aire disuelto en aguas residuales Cárnicas	DQO: 30% AyG: 66-73% Turbidez: 50% pH: 7,41 – 11,63	Eficiencia media-alta dependiendo de las características del agua residual.	-No es posible variar el tamaño de burbujas, permanecen estáticas (20-100 micras).	[4]
Electrocoagulación. aguas residuales de agroindustria.	DQO: 96 % AyG: ND Turbidez: 82- 94 % pH: 12,63	-No requiere aditivos químicos, producción de poco lodo.	-Desgaste de electrodos. -Residuos de lodos con residuos metálicos y pH alcalinos.	[34], [35]
Cavitación (hidrodinámica o ultrasónica)	DQO: 30- 90 AyG: ND Turbidez: 65 pH:-	-Remoción media de contaminantes como DQO y turbidez Y contaminantes orgánicos.	Requiere equipos específicos, altos costos	[36], [37], [38]
Trampa de grasas. Industria de embutidos	AyG: 97 % Turbidez: ND pH:6 – 7			[19]

Nota: la sigla ND significa que el parámetro no fue determinado.

Fuente: elaboración propia.

En la [Tabla 5](#) podemos observar que, en comparación con otras tecnologías de flotación, el sistema DAF con burbujas variables desarrollado en esta investigación presenta ventajas importantes frente a métodos convencionales como la flotación por aire disperso. La tecnología de flotación por aire disperso ha sido ampliamente utilizada, en el tratamiento de aguas residuales cárnicas se reportan eficiencias de remoción que alcanzan hasta un 73% en AyG, un 30 % en DQO y un 50% en turbidez [\[4\]](#). Sin embargo, esta eficiencia media-alta depende de varios factores, como la necesidad de adicionar coagulantes químicos y realizar ajustes de pH, lo cual incrementa tanto los costos operativos como la complejidad del sistema. Además, el tamaño de burbuja en la flotación por aire disperso es fijo (entre 20–100 micras), lo que limita su adaptabilidad y flexibilidad ante diferentes tipos de efluentes.

Por el contrario, el sistema DAF propuesto en esta investigación ha demostrado eficiencias similares o superiores en la remoción de AyG (81%) y una eliminación aceptable de DQO (77 %), sin necesidad de químicos externos ni corrección de pH. Su principal ventaja radica en la posibilidad de ajustar el tamaño de las burbujas, lo que permite adaptar el tratamiento al tipo de agua residual. Esta flexibilidad, sumada a su bajo consumo energético, convierte al DAF en una opción más sostenible. Si bien su eficiencia en la remoción de turbidez (38 %) es menor que en otros procesos, se identifican oportunidades de mejora mediante ajustes operativos o la combinación con otros tratamientos físicos [\[32\]](#), [\[33\]](#).

En el caso de la electrocoagulación, se puede observar altas eficiencias alcanzando hasta un 96% de remoción de DQO y más del 90% en turbidez, gracias a la generación in situ de coagulantes metálicos y burbujas finas de gas [\[34\]](#), [\[35\]](#). No obstante, este método presenta limitaciones importantes: eleva considerablemente el pH, llegando hasta 12,6, genera lodos o residuos con contenido metálico que requieren un manejo adecuado y supone costo en el desgaste y reemplazo de electrodos. Aunque bien ofrece mejores resultados en la remoción de contaminantes que el sistema DAF, su sostenibilidad a largo plazo y facilidad de operación resultan inferiores.

Otra tecnología emergente es la cavitación hidrodinámica o ultrasónica, que produce burbujas mediante diferencias de presión o sonido de alta frecuencia. Esta técnica ha logrado remociones variables de DQO (30–90%) y de turbidez (~65%) en distintos estudios [\[36\]](#), [\[37\]](#), [\[38\]](#). Aunque no requiere químicos, su implementación depende de equipos especializados y presenta altos costos energéticos, lo que limita su implementación en contextos con recursos limitados. En comparación, el DAF resulta más accesible, aunque con una eficiencia más moderada en la remoción de compuestos disueltos.

Finalmente, las trampas de grasas son sistemas pasivos de bajo costo, comúnmente utilizados como pretratamientos en cocinas e industrias alimentarias. En versiones mejoradas, como la trampa de grasas con un mayor tiempo de retención y condiciones específicas del agua residual, han mostrado eficiencias más altas en la remoción de AyG hasta de un 97%, especialmente en industrias de embutidos [\[19\]](#). A pesar de estos avances, estas tecnologías continúan siendo menos versátiles que los sistemas de flotación

como el DAF y en la mayoría de ocasiones menos eficientes en la remoción de AyG, particularmente cuando se requiere tratar aguas residuales con cargas orgánicas elevadas o aguas residuales mixtas tanto de origen lácteo como origen cárnico.

En resumen, el análisis evidencia que el sistema DAF con burbujas de tamaño mediano logra un balance favorable entre eficiencia, costo y adaptabilidad, posicionándose como una alternativa prometedora frente a tecnologías más costosas o dependientes de insumos químicos.

Conclusiones

La caracterización inicial de las aguas residuales cárnicas reveló cargas contaminantes significativamente elevadas para DQO, SST, AyG, turbidez y pH, excediendo los límites de la Resolución 0631 de 2015 y subrayó la necesidad de tecnologías de tratamiento más eficientes. Se identificaron características clave en el tipo de efluente como: mayor presencia de sólidos y grasas asociadas a proteínas en aguas residuales cárnicas, grasas con poco emulsificador y de mayor flotabilización.

El sistema DAF demostró la capacidad de generar y controlar el tamaño de burbuja mediano con un diámetro promedio de 0,69 mm, a una presión de generación de 35 psi confirmando la relación entre la presión aplicada y el tamaño de burbuja según la teoría de fragmentación de gas. A pesar de observaciones de turbulencias internas momentáneas, el sistema exhibió una estabilidad operativa general, sugiriendo su potencial para escalabilidad industrial.

La dinámica de las burbujas evidenció una correlación positiva entre el tamaño y la velocidad de ascenso de las burbujas la cual fue en promedio de: 26,0 mm/s, un factor crucial que influye en el tiempo de contacto con los contaminantes y, por ende, en la eficiencia de separación. El tiempo de retención (5-20 minutos) se confirmó como un parámetro operativo determinante en la interacción burbuja-partícula.

En el tratamiento de aguas residuales cárnicas, el mejor resultado para AyG (81 %) se obtuvo con burbujas medianas a 20 minutos, lo que sugiere una influencia de la naturaleza de los lípidos en este caso más solidificados y con una flotabilidad importante.

La remoción de DQO fue de 77% a un tiempo de retención de 20 minutos indicando que los compuestos orgánicos más complejos de las aguas residuales cárnicas requieren un mayor tiempo de contacto. La turbidez se removió más eficientemente en un tiempo de retención hidráulico de 5 minutos con un porcentaje de remoción de 38,8% lo que podría estar relacionado con las diferencias en el tamaño y la buena sedimentabilidad de los sólidos en aguas residuales cárnicas. El pH se mantuvo un poco alcalinos (9,91-10,22) pero sin afectar significativamente la eficiencia del tratamiento.

Además de validar la eficiencia técnica del sistema DAF, se realizó una comparación con otras tecnologías empleadas en el tratamiento de aguas residuales alimentarias, como la flotación por aire disuelto, la electrocoagulación, la cavitación y las trampas de grasas. Si bien tecnologías como la electrocoagulación y la flotación por aire disperso han demostrado remociones elevadas de AyG, DQO y turbidez, sus altos costos operativos, el uso intensivo de insumos químicos y la generación de residuos secundarios representan desventajas importantes. En cambio, en esta investigación se demuestra potencialmente la adaptabilidad del sistema DAF para el tratamiento de aguas residuales industriales como una alternativa más flexible, económica y sostenible, con una eficiencia que varía en función del tipo de agua, el tamaño de burbuja y el tiempo de retención. En comparación con otras tecnologías, desde una perspectiva preliminar, se resalta su simplicidad, estabilidad operativa y buenos resultados en remoción de AyG y DQO que lo sugiere que podría constituir una solución prometedora para ser aplicada a mayor escala en entornos industriales.

Referencias

- [1] G. González, "Propuesta de un sistema para el tratamiento de aguas residuales de la empresa Food & Drinks Alimentos SAS a nivel laboratorio," Tesis de pregrado, Fundación Universidad de América, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.11839/8004>
- [2] S. Muñoz Lucas y R. Sánchez García, "El agua en la industria alimentaria," *Boletín de la Sociedad Española de Historia de la Medicina*, 2019. doi: 10.23853/BSEHM.2018.0571
- [3] M. Reilly, A. P. Cooley, D. Tito, S. A. Tassou y M. K. Theodorou, "Electrocoagulation treatment of dairy processing and slaughterhouse wastewater," *Energy Procedia*, vol. 161, pp. 343–351, 2019. doi: 10.1016/j.egypro.2019.02.106
- [4] Y. D. Venera Saballe y R. Salazar Benavidez, "Evaluación de un sistema de flotación por aire disuelto (DAF) para la remoción de aceites y grasas en aguas residuales de la planta de beneficio municipal de Agustín Codazzi," Tesis de pregrado, Universidad Popular del Cesar, Valledupar, Colombia, 2022.
- [5] M. Sánchez, Y. Caldera y E. Gutiérrez, "Eficiencia de coagulantes durante el tratamiento de aguas residuales de la industria avícola en un sistema de flotación," *Impacto Científico*, vol. 12, no. 1, pp. 201–214, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://produccioncientificaluz.org/index.php/impacto/article/view/34799>
- [6] V. Reyes Pacheco y E. Yunge Siebald, "Contaminación de los ríos y eutrofización: El caso del río Damas en Los Notros, Osorno," *Revista Nothofagus*, vol. 7, no. 3, pp. 37–46, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://revista-nothofagus.ulagos.cl/index.php/nothofagus/article/view/72>
- [7] P. A. Granados Pabuena, "Estudio de los diferentes métodos de remoción de aceites en aguas residuales urbanas para vertimiento en cuerpos de agua," Trabajo de grado, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/handle/20.500.12744/5435>
- [8] A. M. Popayán Páez, "Estudio de diferentes técnicas de remoción de aceites en aguas residuales provenientes de la industria petrolera," Trabajo de grado, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia, 2021. [En línea]. Disponible en: <http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/handle/20.500.12744/5469>

- [9] L. Vargas, "Flotación," 10 abr. 2017. [En línea]. Disponible en: <http://www.ingenieroambiental.com/4014/ocho.pdf> [Accedido: 17 noviembre. 2025]
- [10] H. M. Bermejo Bermejo, "Evaluación del sistema DAF (flotación por aire disuelto) para eliminación de material suspendido en aguas de industrias lácteas," Trabajo de titulación de pregrado, Universidad Católica de Cuenca, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.ucacue.edu.ec/items/e95b0e21-834f-457a-b42c-c4db6a9c8a93>
- [11] J. F. Calderón-Tarazona, M. S. Tarazona Castillo "Análisis y evaluación de la incidencia de las micro-burbujas en el tratamiento de agua, a través del desarrollo y estudio de un sistema de operación continua para tratamiento primario de aguas residuales," Trabajo de grado, Universidad Antonio Nariño, Bogotá, Colombia, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.uan.edu.co/handle/123456789/2807>
- [12] M. Sakr, M. M. Mohamed, M. A. Maraqa, M. A. Hamouda, A. Aly Hassan, J. Ali y J. Jung, "A critical review of the recent developments in micro-nano bubbles applications for domestic and industrial wastewater treatment," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, no. 8, pp. 6591–6612, 2022. doi: 10.1016/j.aej.2021.11.041
- [13] APHA, AWWA y WEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 23.^a ed., R. B. Baird, A. D. Eaton y E. W. Rice, Eds. Washington, DC, EE. UU.: APHA Press, 2017..
- [14] C. O. Mella Burdiles, "Caracterización de la hidrodinámica del enjambre de burbujas en ductos confinados para aplicaciones en flotación de minerales," Tesis de maestría, Universidad Técnica Federico Santa María, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/499383272/3560900258295UTFSM>
- [15] G. E Barrera Mendoza, "Control de tamaño de burbujas en sistemas de flotación utilizando dispersores de gas tipo jet de orificio de descarga de apertura variable," Tesis de maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2008. Disponible en: http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/bitstream/handle/DGB_UMICH/51110/IIMM-M-2008-0064.pdf?sequence=1
- [16] D. Mesa, P. Quintanilla y F. Reyes, "Bubble analyser: An open-source software for bubble size measurement using image analysis," *Minerals Engineering*, vol. 181, art. no. 107497, 2022. doi: 10.1016/j.mineng.2022.107497
- [17] P. A. Rahim Garzón y P. E. Garzón Carreño, "Uso de los simuladores de PhET y Tracker para el estudio de movimiento oscilatorio," *Góndola, Enseñanza y Aprendizaje de las Ciencias*, vol. 18, no. Esp., pp. 404–418, 2023. doi: 10.14483/23464712.21397
- [18] Universidad de Burgos, "Breve tutorial de Tracker," 2017. [En línea]. Disponible en: https://www.ubu.es/sites/default/files/portal_page/files/2_-_breve_tutorial_de_tracker.pdf [Accedido: 17 noviembre. 2025]
- [19] M. Cabrera, L. Montenegro y A. Jiménez, "Análisis de un sistema de tratamiento de aguas residuales de una industria de embutidos," *Revista Politécnica*, vol. 49, no. 2, pp. 47–54, 2022. doi: 10.33333/rp.vol49n2.05
- [20] P. M. Herrera Paucar, "Tratamiento de aguas residuales de procesamientos cárnicos mediante procesos físico-químicos y biológicos convencionales (lodos activados) a escala de laboratorio," Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/29391/1/MSQ916.pdf>
- [21] U. Adhikari, T. Harrigan y D. M. Reinhold, "Use of duckweed-based constructed wetlands for nutrient recovery and pollutant reduction from dairy wastewater," *Ecological Engineering*, vol. 78, pp. 6–14, 2015. doi: 10.1016/j.ecoleng.2014.05.021

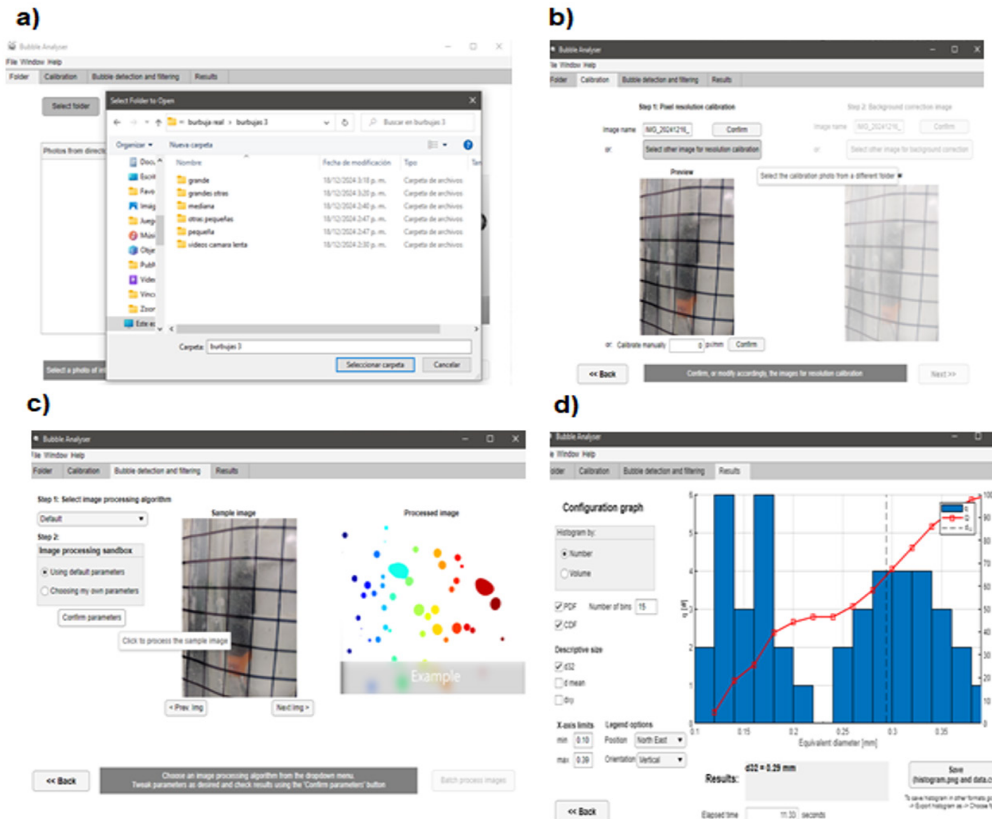
- [22] R. Vallejo Rodríguez, A. López López y J. Gallardo Váldez, *Manejo integral de efluentes residuales generados en los rastros municipales*. Guadalajara, México: CIATEJ, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://ciatej.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1023/683/1/1%20Libro%20rastros%20version%20final.pdf>
- [23] C. Gontijo, D. Fornasiero y J. Ralston, "The limits of fine and coarse particle flotation," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 85, pp. 739–747, 2007. doi: 10.1002/cjce.5450850519
- [24] A. Reis, A. Filho, L. Demuner y M. Barrozo, "Effect of bubble size on the performance flotation of fine particles of a low-grade Brazilian apatite ore," *Powder Technology*, vol. 356, art. no. 114532, 2019. doi: 10.1016/j.powtec.2019.09.029
- [25] A. Bolaño Ennis, "Sistema de flotación por aire disuelto para el tratamiento de aguas residuales industriales," Universidad EIA, 2009. [En línea]. Disponible en: <https://repository.eia.edu.co/handle/11190/1918>
- [26] J. K. Edzwald, "Dissolved air flotation and me," *Water Research*, vol. 44, no. 7, pp. 2077–2106, 2010. doi: 10.1016/j.watres.2009.12.040
- [27] J.-L. Salager y A. Forgiarini de Guédez, "Fundamentos de la flotación (Cuaderno FIRP S335-A, versión 3)," Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química, 2007. [En línea]. Disponible en: <https://es.firp-ula.org/wpcontent/uploads/2019/06/S335A.Flotation.pdf>
- [28] M. A. Zarazúa Escobar, "Efecto del tamaño de burbuja en la dispersión gaseosa sobre la recuperación y el enriquecimiento de la rectificación por espuma," Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000814565/3/0814565.pdf>
- [29] J. García, "Sistema de tratamiento para el agua residual de la industria de embutidos por procesos fisicoquímicos y biológicos," Centro de Investigación y Asistencia en Diseño y Tecnología del Estado de Jalisco A.C., 2014. [En línea]. Disponible en: <https://ciatej.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1023/434/1/Jorge%20Eduardo%20Garc%C3%ADa%20Camacho.pdf>
- [30] Environmental Protection Agency (EPA), "Toxicological Review of Ammonia Noncancer Inhalation: Executive Summary," 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.epa.gov/iris>
- [31] A. Bueno-Tokunaga, R. Pérez-Garibay y D. Martínez-Carrillo, "Zeta potential of air bubbles conditioned with typical froth flotation reagents," *International Journal of Mineral Processing*, vol. 140, pp. 50–57, 2015. doi: 10.1016/j.minpro.2015.04.028
- [32] A. de J. Urrego Cortes, "Tratamiento de aguas residuales de industrias de alimentos mediante la aplicación de un sistema de flotación de aire disperso con burbujas variables," Trabajo de grado, Universidad Popular del Cesar, Valledupar, Colombia, 2025.
- [33] Gonzalez Rivera "Propuesta de un sistema para el tratamiento de aguas residuales de la empresa Food & Drinks Alimentos SAS a nivel laboratorio," Tesis de pregrado, Fundación Universidad De América, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.11839/8004>
- [34] Y. J. Rodríguez Díaz, M. D. Fuentes Guevara, Ó. D. Beleño Díaz y L. H. Montoya Armenta, "Electrocoagulación como proceso de tratabilidad de aguas residuales de una planta de lácteos y cárnicos," *Tecnura*, vol. 25, no. 67, pp. 26–39, 2021. doi: 10.14483/22487638.15769
- [35] G. H. Bracher, E. Carissimi, D. B. Wolff, A. G. Gluszcak y C. Graepin, "Performance of an electrocoagulation-flotation system in the treatment of domestic wastewater for urban reuse," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 29, no. 32, pp. 49439–49456, 2022. doi: 10.1007/s11356-022-20630-2

- [36] E. A. Ruiz y E. F. López, "Evaluación del proceso de cavitación hidrodinámica para el tratamiento de los lixiviados generados en el almacenamiento de residuos orgánicos del municipio de Villa de San Diego de Ubaté," Trabajo de grado, [Institución — verificar], Colombia, 2023. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12010/3160>
- [37] S. Chandak, P. K. Ghosh y P. R. Gogate, "Treatment of real pharmaceutical wastewater using different processes based on ultrasound in combination with oxidants," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 137, pp. 149–157, 2020. doi: 10.1016/j.psep.2020.02.025
- [38] A. Zuluaga Meza, "Evaluación del tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios mediante cavitación hidrodinámica," Trabajo de grado, Universidad Nacional de Colombia, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/76583>

Anexos

Anexo 1. Paso a paso para la obtención del tamaño de burbujas.

Metodología de Análisis de Burbujas con Bubble Analyzer:



Nota: a) Directorio raíz Bubble Analyzer, b) Calibración, c) Confirmación de Parámetros, d) Procesamiento de Imágenes. Tomado del Software Bubble Analyze

Fuente: Autores

Lo primero es abrir el software y elegir el directorio raíz de donde se extraerán las imágenes tomadas a las burbujas, (a), este directorio debe contener 100 imágenes con el fin de que el software calcule la mediana de las intensidades de cada pixel y así detectar la profundidad y el cálculo espacial. A continuación, se calibra el software subiendo una de las 100 fotos anteriormente tomadas y se seleccionan dos puntos en la foto que estén a 1 cm de distancia, (b). Luego se selecciona el botón siguiente y se da click en el botón confirmar parámetros dejando los parámetros por defecto que trae el software, (c). El siguiente paso es dar click en el botón procesar imágenes y el software automáticamente mide cada una de las burbujas tomadas en las fotografías y saca un promedio de su diámetro y nos arroja el valor exacto. (d)

Anexo 2 ANOVA de cada uno de los parámetros evaluados en las aguas residuales cárnicas en relación al tamaño de burbuja

Análisis de Varianza (ANOVA de doble vía para datos no paramétricos) para la DQO, tamaños de burbuja respecto al tiempo y el test pos hoc de Dunn.

Tipo de análisis	Df	F	Value	Pr(>F)	Test post hoc de Dunn
Anova	Burbuja ^b	85	4,28284	1,69E-02	
	Tiempo ^b	85	7,44E+00	1,75E-04	
	burbuja:tiempo ^a	85	0,96262	0,45554602	
	Burbuja Mediana 20 min		-	-	0,0031 – 0,0048

Análisis de Varianza (ANOVA de doble vía para datos paramétricos) para los AyG, tamaños de burbuja respecto al tiempo y la prueba post hoc de Tuckey.

Tipo de análisis	Df	Sq	F value	Pr(>F)	Test post hoc de Tukey
Anova	Burbuja ^b	1,86E+03	2,949	0,0589	-
	Tiempo ^b	1,78E+03	2,821	0,0451	-
	burbuja:tiempo ^a	1,17E+03	1,861	0,0998	-
	Burbuja Mediana 20 mint		-	-	0,0489
			-	-	> 0,05

Análisis de Varianza (ANOVA de doble vía para datos paramétricos) para la Turbidez, tamaños de burbuja respecto al tiempo y el post test de Tukey.

Tipo de análisis	Df	Sq	F value	Pr(>F)	Test post hoc de Tukey Diferencia
Anova	Burbuja ^b	14090,2	22,67	0,000	
	Tiempo ^b	931,6	1,00	0,397	
	burbuja:tiempo ^a	10409,6	5,58	0,000	
	Mediana 5 mint		-	-	+58,82
	Mediana 5 mint		-	-	0,0000029
	Mediana 10 min				+33,50

Análisis de Varianza (ANOVA de doble vía para datos no paramétricos) para el pH, tamaños de burbuja respecto al tiempo.

Df	Df.res	F	Value	Pr(>F)
Burbuja ^b	2	96	53,173444	2,86E-16
Tiempo ^a	3	96	0,087783	0,96659
burbuja:tiempo ^a	6	96	0,15297	0,98805

Anexo 3 Resultados de los análisis de los diferentes parámetros estudiados con sus valores máximos, mínimos y promedio.

En la siguiente tabla se muestran los resultados de los análisis del agua residual para cada uno de los intervalos de tiempo a la salida del sistema de flotación piloto utilizado,

	DQO (<i>mg O₂/L</i>)		
	Máximo	Mínimo	Promedio
Inicial	9984	640	3088
5 min	2880	320	888
10 min	2240	320	1244
15 min	1728	320	960
20 min	1600	320	696
	AyG (<i>mg/L</i>)		
	Máximo	Mínimo	Promedio
Inicial	4574	1390	2455
5 min	2210	260	913
10 min	2230	220	1482
15 min	2992	296	1079
20 min	1075	240	537
	Turbidez (<i>NTU</i>)		
	Máximo	Mínimo	Promedio
Inicial	612	371	492
5 min	406	206	303
10 min	601	245	421
15 min	435	336	394
20 min	722	278	490
	pH (<i>Unidades de pH</i>)		
	Máximo	Mínimo	Promedio
Inicial	11,59	7,86	10,36
5 min	11,74	7,68	10,22
10 min	11,66	7,48	10,14
15 min	11,07	7,98	10,22
20 min	11,55	7,42	9,91

