

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y
FORESTAL**



**"TRATAMIENTO DEL EFLUENTE DEL CAMAL DE MACUSANI
POR COAGULACIÓN QUÍMICA Y APROVECHAMIENTO DE
LADOS GENERADOS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS"**

Eulalia Silvia Ccoa Ccoito

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL Y FORESTAL**

Asesor: Mg. Hugo Apaza Aquino



Juliaca - Perú

2025



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y
FORESTAL**



**"TRATAMIENTO DEL EFLUENTE DEL CAMAL DE MACUSANI
POR COAGULACIÓN QUÍMICA Y APROVECHAMIENTO DE
LODOS GENERADOS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS"**

Eulalia Silvia Ccoa Ccoito

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL Y FORESTAL**

Asesor: Mg. Hugo Apaza Aquino



**Juliaca - Perú
2025**

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
AMBIENTAL Y FORESTAL**



**“TRATAMIENTO DEL EFLUENTE DEL CAMAL DE MACUSANI
POR COAGULACIÓN QUÍMICA Y APROVECHAMIENTO DE
LODOS GENERADOS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS”**

Eulalia Silvia Ccoa Ccoito

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL Y FORESTAL**

Asesor: Mg. Hugo Apaza Aquino

Juliaca, Perú

2025

Ccoa, E. (2024). Tratamiento del efluente del camal de Macusani por coagulación química y aprovechamiento de lodos generados para la producción de biogás. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Juliaca.

Autor: Eulalia Silvia Ccoa Ccoito

Título: Tratamiento del efluente del camal de Macusani por coagulación química y aprovechamiento de lodos generados para la producción de biogás.

Publicación: Juliaca, 2025.

Descripción: Cantidad de páginas (141).

Nota: Tesis - Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Forestal - Universidad Nacional de Juliaca

Código: 01-000056-01/C72

Nota: Incluye bibliografía

Asesor: Mg. Hugo Apaza Aquino

Palabras clave: Biogás, coagulación química, efluentes de camal, lodos postcoagulación, sulfato de aluminio.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
AMBIENTAL Y FORESTAL

**“TRATAMIENTO DEL EFLUENTE DEL CAMAL DE MACUSANI POR
COAGULACIÓN QUÍMICA Y APROVECHAMIENTO DE LODOS
GENERADOS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS”**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL Y FORESTAL

Presentada por:

Eulalia Silvia Ccoa Ccoito

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Dr. José Luis Pineda Tapia

PRESIDENTE DE JURADO



Dr. Alejandro Félix Taquire Arroyo

JURADO (secretario)



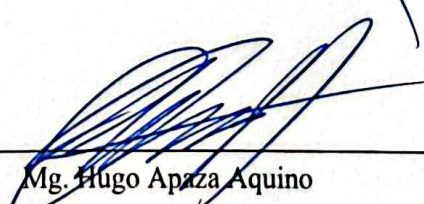
2° MIEMBRO

Mg. Milton Quispe Tisnado

JURADO (vocal)




3° MIEMBRO



Mg. Hugo Apaza Aquino
ASESOR DE TESIS

Eulalia Silvia Ccoa Ccoito

TRATAMIENTO DEL EFLUENTE DEL CAMAL DE MACUSANI POR COAGULACIÓN QUÍMICA Y APROVECHAMIENTO DE LO...

 Universidad Nacional de Juliaca

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:524175302

Fecha de entrega

6 nov 2025, 5:09 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

6 nov 2025, 5:23 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

BORRADOR DE TESIS_2025_empastar V005.pdf

Tamaño del archivo

3.4 MB

140 páginas

29.919 palabras

166.770 caracteres






8% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- › Bibliografía
- › Texto citado
- › Texto mencionado
- › Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 6%  Fuentes de Internet
- 2%  Publicaciones
- 6%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

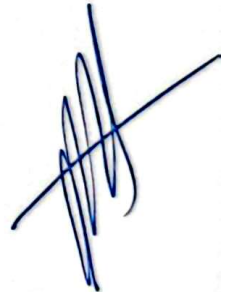
Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



DEDICATORIA

En memoria de mi querido padre, Américo Ccoa Flores.

A mi madre, Quintina Ccoito Tapara Vda. de Ccoa, por estar siempre conmigo y apoyándome.

A mis hermanos Mariela, Franco y Mario por su apoyo incondicional para seguir logrando mis objetivos.

A mis sobrinos Gardenia y Eythan.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, expresar mi infinita gratitud a Dios por guiarme e iluminar mi camino.

Agradezco a mi familia por su constante apoyo incondicional, sus palabras de aliento han sido fundamentales para lograr mis objetivos.

Expreso mi más sincero agradecimiento al Mg. Hugo Apaza Aquino en calidad de asesor por su guía y apoyo constante durante todo el desarrollo de este trabajo.

Agradezco profundamente al Grupo de Investigación GICOA de la Universidad Nacional de Moquegua – Sede Ilo y, especialmente, al Dr. Franz Zirena Vilca, director del grupo, por su apoyo en brindarme el acceso al detector multigas portátil, fundamental para la realización del presente estudio.

Agradezco a los miembros del jurado Dr. José Luis Pineda Tapia, Dr. Alejandro Félix Taquire Arroyo y Mg. Milton Quispe Tisnado, por su valioso tiempo y sus observaciones, gracias a las cuales logré culminar esta investigación.

Finalmente, agradezco a Luis Miguel y Lisset por su sincera amistad en mi etapa universitaria y el gran apoyo que me brindaron en todo este proceso.

ÍNDICE GENERAL

| | Pág. |
|------------------------|-------------|
| DEDICATORIA..... | i |
| AGRADECIMIENTO..... | ii |
| ÍNDICE GENERAL..... | iii |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | vi |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | viii |
| ÍNDICE DE ANEXOS..... | ix |
| RESUMEN..... | 13 |
| ABSTRACT..... | 14 |
| INTRODUCCIÓN..... | 15 |

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

| | |
|---|----|
| 1.1. Descripción del problema de investigación..... | 17 |
| 1.2. Formulación del problema de investigación..... | 19 |
| 1.2.1. Problema general..... | 19 |
| 1.2.2. Problemas específicos..... | 19 |
| 1.3. Objetivos de la investigación..... | 19 |
| 1.3.1. Objetivo general..... | 19 |
| 1.3.2. Objetivos específicos..... | 19 |
| 1.4. Justificación de la investigación..... | 20 |
| 1.4.1. Justificación técnica..... | 20 |
| 1.4.2. Justificación económica..... | 20 |
| 1.4.3. Justificación socioambiental..... | 20 |

CAPITULO II

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

| | |
|--|----|
| 2.1. Antecedentes de la investigación..... | 22 |
| 2.1.1. Antecedentes internacionales..... | 22 |
| 2.1.2. Antecedentes nacionales..... | 24 |
| 2.1.3. Antecedentes locales..... | 25 |
| 2.2. Marco teórico..... | 26 |
| 2.2.1. Calidad de agua..... | 26 |
| 2.2.2. Aguas residuales..... | 27 |
| 2.2.3. Camal..... | 28 |
| 2.2.4. Efluentes de camal..... | 30 |
| 2.2.5. Coagulación química..... | 33 |

| | | |
|--------|---|----|
| 2.2.6. | Lodos post coagulación | 44 |
| 2.2.7. | Biogás | 45 |
| 2.2.8. | Normativa en materia de gestión de efluentes de camal | 47 |
| 2.2.9. | Análisis factorial estadístico..... | 48 |

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

| | | |
|--------|--|----|
| 3.1. | Ámbito de estudio..... | 49 |
| 3.2. | Tipo, nivel y diseño de la investigación | 50 |
| 3.3. | Población y muestra..... | 50 |
| 3.3.1. | Población | 50 |
| 3.3.2. | Muestra | 51 |
| 3.4. | Variables de la investigación | 51 |
| 3.4.1. | Variable independiente | 51 |
| 3.4.2. | Variable dependiente | 51 |
| 3.5. | Hipótesis de la investigación | 51 |
| 3.5.1. | Hipótesis general | 51 |
| 3.5.2. | Hipótesis específicas..... | 51 |
| 3.6. | Equipos, materiales, reactivos e insumos | 52 |
| 3.6.1. | Equipos | 52 |
| 3.6.2. | Materiales | 52 |
| 3.6.3. | Reactivos | 52 |
| 3.6.4. | Insumos..... | 52 |
| 3.7. | Métodos | 53 |
| 3.7.1. | Caracterización fisicoquímica del efluente del camal Macusani..... | 53 |
| 3.7.2. | Evaluación de coagulación química a bajo la interacción de factores | 54 |
| a. | Proceso de coagulación química..... | 54 |
| b. | Eficiencia de la coagulación química | 56 |
| 3.7.3. | Evaluación lodos postcoagulación para la producción de biogás | 57 |
| a. | Obtención y caracterización de lodos post coagulación | 57 |
| b. | Producción de biogás..... | 58 |
| c. | Caracterización de biogás..... | 59 |
| 3.8. | Análisis de resultados | 62 |

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

| | | |
|------|---|----|
| 4.1. | Caracterización fisicoquímica del efluente de camal Macusani | 64 |
| 4.2. | Eficiencia de coagulación química en el porcentaje de reducción de DQO | 67 |

| | | |
|--------|--|----|
| 4.2.1. | Análisis estadístico | 71 |
| a) | Efectos simples | 71 |
| b) | Efectos principales..... | 72 |
| c) | Interacciones de efectos..... | 72 |
| 4.3. | Evaluación de lodos postcoagulación para la producción de biogás | 77 |

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

| | | |
|-----------------------------------|-----------------------|------------|
| 5.1. | Conclusiones | 85 |
| 5.2. | Recomendaciones | 86 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | | 87 |
| ANEXOS | | 104 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Tabla 1 Características físicas de las aguas residuales del camal..... | 31 |
| Tabla 2 Características químicas de aguas residuales del camal..... | 32 |
| Tabla 3 Características microbiológicas..... | 33 |
| Tabla 4 División de factores que influyen en el proceso de coagulación..... | 38 |
| Tabla 5 Coagulantes químicos..... | 40 |
| Tabla 6 Método de análisis fisicoquímico para el efluente del camal Macusani. | 53 |
| Tabla 7 Concentración de coagulante químico..... | 55 |
| Tabla 8 Condiciones de operación en el equipo de prueba de jarras..... | 56 |
| Tabla 9 Métodos de análisis fisicoquímicos de lodos post coagulación | 58 |
| Tabla 10 Rango de medición del equipo detector multigas portátil. | 61 |
| Tabla 11 Diseño factorial de 3 factores bajo 3 niveles y 2 repeticiones. | 63 |
| Tabla 12 Parámetros fisicoquímicos del efluente de camal Macusani. | 64 |
| Tabla 13 Porcentaje de reducción de la DQO por coagulación química..... | 67 |
| Tabla 14 Características fisicoquímicas de lodos post coagulación..... | 77 |
| Tabla 15 Producción de biogás mediante el método de desplazamiento..... | 79 |
| Tabla 16 Caracterización de biogás..... | 82 |
| Tabla 17 Matriz de consistencia | 113 |
| Tabla 18 Análisis de varianza de para efectos principales. | 114 |
| Tabla 19 Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para efecto simple a.b1. ... | 114 |
| Tabla 20 Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para efecto simple a.b2. ... | 115 |
| Tabla 21 Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para efecto simple a.b3. ... | 116 |
| Tabla 22 Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para efecto simple a.c1..... | 117 |
| Tabla 23 Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para efecto simple a.c2..... | 118 |
| Tabla 24 Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para efecto simple a.c3..... | 119 |
| Tabla 25 Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para efecto simple b.a1. ... | 120 |
| Tabla 26 Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para efecto simple b.a2. ... | 121 |
| Tabla 27 Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para efecto simple b.a3. ... | 122 |
| Tabla 28 Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para efecto simple b.c1. ... | 123 |
| Tabla 29 Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para efecto simple b.c2. ... | 124 |
| Tabla 30 Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para efecto simple b.c3. ... | 125 |
| Tabla 31 Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para efecto simple c.a1..... | 126 |

| | | |
|-----------------|---|-----|
| Tabla 32 | Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para efecto simple c.a2..... | 127 |
| Tabla 33 | Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para efecto simple c.a3..... | 128 |
| Tabla 34 | Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para efecto simple c.b1. ... | 129 |
| Tabla 35 | Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para efecto simple c.b2. ... | 130 |
| Tabla 36 | Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para efecto simple c.b3. ... | 131 |
| Tabla 37 | Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para factor A. | 132 |
| Tabla 38 | Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para factor B..... | 133 |
| Tabla 39 | Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para factor C..... | 134 |
| Tabla 40 | Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para factor A:B..... | 135 |
| Tabla 41 | Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para factor B:C..... | 136 |
| Tabla 42 | Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para factor A:C..... | 137 |
| Tabla 43 | Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para factor A:B:C..... | 138 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Figura 1 Consumo y producción de aguas residuales por sector..... | 27 |
| Figura 2 Tipos de mataderos. | 28 |
| Figura 3 Proceso de faenado de animales..... | 29 |
| Figura 4 Proceso de beneficio de animales en camal. | 31 |
| Figura 5 Diagrama del proceso de tratamiento de aguas residuales..... | 35 |
| Figura 6 Proceso de coagulación química. | 36 |
| Figura 7 Representación del mecanismo de coagulación química. | 37 |
| Figura 8 Coagulación con sulfato de aluminio..... | 42 |
| Figura 9 Proceso de prueba de jarras..... | 43 |
| Figura 10 Aspecto visual del efluente antes y después del tratamiento fisicoquímico. 43 | 43 |
| Figura 11 Lodos post coagulación..... | 44 |
| Figura 12 Etapas de la digestión anaeróbica en un biodigestor..... | 47 |
| Figura 13 Ubicación del camal Macusani. | 49 |
| Figura 14 Sistema de evacuación de las aguas residuales del camal Macusani. | 49 |
| Figura 15 Esquema de experimento y variables..... | 50 |
| Figura 16 Proceso de coagulación química. | 54 |
| Figura 17 Procedimiento para análisis de DQO. | 56 |
| Figura 18 Proceso de obtención de lodos para la producción de biogás. | 57 |
| Figura 19 Montaje de biodigestor tipo batch..... | 59 |
| Figura 20 Mecanismo de uso del detector multigas. | 60 |
| Figura 21 Equipo detector multi gas portátil..... | 60 |
| Figura 22 Información del medidor de gases. | 61 |
| Figura 23 Porcentaje de reducción de la DQO en el número de pruebas realizadas..... | 68 |
| Figura 24 Interacción de los factores pH – concentración de coagulante. | 73 |
| Figura 25 Interacción de los factores pH – dosis de coagulante. | 74 |
| Figura 26 Interacción de los factores concentración - dosis de coagulante. | 74 |
| Figura 27 Interacción de los factores de Concentración de coagulante -pH. | 75 |
| Figura 28 Interacción factores de Dosis de coagulante -pH..... | 75 |
| Figura 29 Interacción dosis de coagulante -concentración de coagulante. | 76 |
| Figura 30 Rendimiento total de producción de biogás. | 80 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Anexo 1 Toma de muestras y análisis de parámetros de campo. | 104 |
| Anexo 2 Análisis de muestras en laboratorio. | 105 |
| Anexo 3 Proceso de coagulación química. | 105 |
| Anexo 4 Determinación de demanda química de oxígeno (DQO). | 106 |
| Anexo 5 Proceso de obtención de lodos post coagulación. | 106 |
| Anexo 6 Producción y caracterización de biogás con lodos post coagulación. | 107 |
| Anexo 7 Cadena de Custodia. | 108 |
| Anexo 8 Informe de Laboratorio. | 109 |
| Anexo 9 Matriz de consistencia. | 113 |
| Anexo 10 Análisis estadístico. | 114 |

RESUMEN

Los efluentes de camales contienen alta carga orgánica, lo que genera contaminación ambiental y riesgos para la salud. La investigación tuvo como objetivo determinar la eficiencia de tratamiento del efluente del camal de Macusani por coagulación química y aprovechar los lodos generados para la producción de biogás. Se tomaron las muestras del efluente de camal de un volumen total de 40 litros; en seguida se caracterizó fisicoquímicamente, luego se evaluó la eficiencia en función del porcentaje de reducción de la DQO, mediante la aplicación de coagulación química con sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), utilizando un diseño factorial de tres factores con tres niveles; pH (6, 7, 8), concentración de coagulante (0.5, 1, 2%) y dosis de coagulante (3, 5, 10 ml), los lodos generados en el tratamiento más eficiente fueron utilizados para la producción de biogás, para ello, se emplearon reactores tipo batch, utilizando como sustrato el lodo postcoagulación y como inóculo estiércol de bovino, en dos relaciones de mezcla T1 (1:2) y T2 (2:3). Los resultados mostraron que el efluente presenta 990 mg/l de sólidos suspendidos totales, 1146 mg/l de DBO_5 y 3960 mg/l de DQO, valores que representan alta concentración de materia orgánica. Por otro lado, se logró la mayor eficiencia de remoción de DQO, con un 80.07%, bajo un pH 6, una concentración de coagulante al 2% y una dosis de coagulante de 3 ml. En cuanto a la producción de biogás, el tratamiento T2 presentó un rendimiento superior, con un 38.5 %, frente al 22.5 % obtenido en T1, y mostró una composición de 40% vol de metano, 22% vol de CO_2 , 19 ppm de H_2S y 5% vol de O_2 . Se concluye que la coagulación química representa una alternativa eficaz para el tratamiento de efluentes de camales, y que los lodos generados durante este proceso pueden ser aprovechados para la producción de biogás, promoviendo su valorización energética.

Palabras clave: Biogás, coagulación química, efluentes de camal, lodos postcoagulación, sulfato de aluminio.

ABSTRACT

Slaughterhouse effluents contain high organic loads, which generate environmental pollution and health risks. The objective of this research was to determine the treatment efficiency of the Macusani slaughterhouse effluent through chemical coagulation and to use the sludge generated for biogas production. Samples of a total volume of 40 liters were taken from the slaughterhouse effluent; these were then characterized physiochemically, and their efficiency was evaluated based on the percentage reduction in COD through the application of chemical coagulation with aluminum sulfate ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), using a three-factor factorial design with three levels: pH (6, 7, 8), coagulant concentration (0.5, 1, 2%), and coagulant dose (3, 5, 10 ml). The sludge generated in the most efficient treatment was used for biogas production. For this purpose, batch reactors were used, with post-coagulation sludge as the substrate and bovine manure as the inoculum, in two mixing ratios: T1 (1:2) and T2 (2:3). The results showed that the effluent had 990 mg/l of total suspended solids, 1146 mg/l of BOD_5 and 3960 mg/l of COD, values that represent a high concentration of organic matter. On the other hand, the highest COD removal efficiency was achieved, with 80.07%, under pH 6, a coagulant concentration of 2% and a coagulant dose of 3 ml. Regarding biogas production, the T2 treatment presented a higher yield, with 38.5%, compared to 22.5% obtained in T1, and showed a composition of 40% vol of methane, 22% vol of CO_2 , 19 ppm of H_2S and 5% vol of O_2 . It is concluded that chemical coagulation represents an effective alternative for the treatment of slaughterhouse wastewater, and that the sludge generated during this process can be used for the production of biogas, promoting its energetic valorization.

Key words: Biogas, chemical coagulation, slaughterhouse wastewater, post coagulation sludge, aluminum sulfate.

INTRODUCCIÓN

La calidad del recurso hídrico se encuentra cada vez más comprometida debido al crecimiento de la población y por la mayor demanda de recursos naturales, este hecho se ve intensificado por las actividades económicas que demandan mayor cantidad de agua, lo que ha generado un incremento en los problemas ambientales asociados a su uso (Corrales et al., 2021). Los sistemas naturales como ríos, lagos, estuarios son altamente vulnerables por fuentes de contaminación antropogénica (Kim & Chung, 2022). La disminución de la calidad del agua de ecosistemas acuáticos representa un problema ambiental a nivel global que, en un futuro, podría derivar en una crisis de escasez hídrica (Escalona-Domenech et al., 2022).

Uno de los sectores con mayor impacto en el recurso hídrico es el agroindustrial, especialmente los establecimientos como los camales, mataderos y/o plantas de beneficio, los cuales generan efluentes que poseen altas concentraciones de materia orgánica y nutrientes, tanto en forma disuelta como en suspensión (Núñez & Lupaca, 2021). Por lo tanto, la caracterización fisicoquímica de estos efluentes permite evaluar su nivel de contaminación y prever posibles impactos ambientales asociados (Dos Santos-Pereira et al., 2024). Ante ello, la caracterización resulta fundamental para la implementación de sistemas de tratamiento adecuados antes de su descarga en el alcantarillado o su vertimiento en el medio ambiente (Choudhury et al., 2024).

El tratamiento deficiente o la inadecuada disposición de estos efluentes, está asociada principalmente a la ausencia de recursos económicos y técnicos, así como a la débil fiscalización por parte de las autoridades competentes (Dos Santos-Pereira et al., 2024). Si bien existen tecnologías avanzadas como la microfiltración (MF), ultrafiltración (UF), nanofiltración (NF), ósmosis inversa (OI) y electrocoagulación (EC), estas opciones presentan elevados costos operativos, lo que limita su implementación a gran escala (Zanol et al., 2024). Por ello, el uso de tecnologías convencionales como la coagulación-floculación sigue siendo una alternativa viable en contextos con recursos limitados (Das et al., 2022).

La coagulación química es un proceso que permite la remoción de contaminantes mediante la aglomeración de partículas coloidales y la neutralización de su carga eléctrica, facilitando así su separación, este proceso se complementa con la floculación,

donde se forman flóculos de mayor tamaño que sedimentan fácilmente (Benakcha & Masmoudi, 2024). La eficiencia del tratamiento depende de varios factores operativos y químicos, así como del tipo de coagulante empleado, entre los que destacan el sulfato de aluminio, cloruro férrico y sulfato férrico (Arab et al., 2022; Sandoval et al., 2022).

Lodos generados durante la coagulación química son residuos que pueden valorizados mediante compostaje, producción de combustible o en materiales de construcción (Ballou et al., 2022), debido a que, en su composición presentan características apropiadas para su manejo y reutilización sostenible (Nayeri & Mousavi, 2022). Una de las alternativas más sostenibles es su uso en la producción de biogás, a través del proceso de digestión anaerobia, el cual comprende de cuatro etapas principales: (i) hidrólisis, que implica la degradación de compuestos orgánicos complejos en compuestos orgánicos simples, como ácidos grasos, alcoholes y azúcares; (ii) acidogénesis, en la que estos compuestos se convierten en ácido acético e hidrógeno; (iii) acetogénesis, donde el ácido acético se convierte en acetato; y (iv) metanogénesis, fase donde se produce metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) a partir de acetato e hidrógeno (Meegoda et al., 2018).

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo determinar la eficiencia en el tratamiento del efluente del camal de Macusani mediante coagulación química con sulfato de aluminio y aprovechar los lodos generados para la producción de biogás.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA

1.1. Descripción del problema de investigación

La creciente demanda de agua dulce, impulsada por el aumento poblacional y la expansión de las actividades económicas, ha generado una presión significativa sobre los recursos hídricos. Según Brichi et al. (2025), esta demanda se incrementa a un ritmo aproximado del 1 % anual, lo que a su vez provoca un aumento considerable en el volumen de aguas residuales generadas. En este contexto, sectores como el agroindustrial, en particular la industria cárnica, destacan como importantes consumidores de agua y emisores de efluentes contaminantes (Azabache et al., 2020). En particular, los camales emplean grandes volúmenes de agua para mantener condiciones higiénicas durante el sacrificio, evisceración, despiece, lavado de canales y procesamiento de pieles (Teo et al., 2023).

Se estima que entre el 82 % y el 98 % del agua utilizada en estas operaciones se convierte en aguas residuales, alcanzando aproximadamente 1100 litros por rumiante adulto sacrificado (Choudhury et al., 2024). Estas aguas se agrupan en dos corrientes principales: la línea verde, derivada de los contenidos intestinales y estiércol, y la línea roja, que incluye sangre, grasas y otros residuos del sacrificio (Loganath & Senophiyah-Mary, 2020). La generación de efluentes varía según la especie sacrificada, oscilando entre 0.54 y 1.63 m³ por animal (Zanol et al., 2024).

Los efluentes de camal se caracterizan por una alta carga orgánica y presencia de agentes físicos, químicos y biológicos, incluyendo grasas y aceites, proteínas, sangre, fibras, nutrientes (nitrógeno y fósforo), microorganismos patógenos, detergentes, metales pesados y, en algunos casos, residuos farmacéuticos veterinarios (Dos Santos-Pereira et al., 2024). Entre los parámetros más críticos se encuentran la DBO₅ (1,800 - 49,000 mg/l), DQO (4,200 - 120,000 mg/l), SST (hasta 19,000 mg/l), grasas y aceites (hasta 37,000 mg/l), sólidos disueltos totales (hasta 350,000 mg/l), y valores de pH entre 6.2 y 7.9, superando ampliamente los límites establecidos en la normativa ambiental (Choudhury et al., 2024).

La descarga directa de estos efluentes sin tratamiento adecuado genera severos impactos ambientales (Dos Santos-Pereira et al., 2024). Entre ellos destacan la eutrofización de cuerpos de agua por exceso de nutrientes, disminución del oxígeno disuelto, proliferación de microorganismos patógenos, afectación de la biodiversidad acuática y alteración de la cadena trófica (Hilares et al., 2021). Además, los residuos pueden infiltrarse en las fuentes subterráneas de agua o ingresar a los sistemas de alcantarillado, dificultando el funcionamiento de las plantas de tratamiento municipales debido a su alta carga contaminante y baja biodegradabilidad (Zanol et al., 2024).

En muchos países en desarrollo como el Perú, este problema se agrava por la ausencia de control regulatorio, limitada fiscalización ambiental y escasa implementación de sistemas de tratamiento, especialmente en los camales municipales de zonas rurales (Bhunja et al., 2022). Esta situación no solo representa una amenaza ecológica, sino también un riesgo significativo para la salud pública, ya que favorece la propagación de enfermedades transmitidas por el agua y deteriora la calidad del agua disponible para consumo humano y riego (Dos Santos-Pereira et al., 2024).

Frente a esta problemática, la coagulación química se plantea como una alternativa de tratamiento viable para reducir la carga orgánica de efluentes de camal (Knap-Bałdyga et al., 2025). No obstante, la eficiencia del tratamiento depende de múltiples factores como el tipo y concentración del coagulante, el pH y las condiciones operativas del proceso, debido a la variabilidad de la composición del efluente a tratar (Abujazar et al., 2022; Owodunni & Ismail, 2021). Un proceso mal ajustado no solo reduce la eficiencia de remoción de contaminantes, sino que también incrementa el consumo de coagulante, la generación de lodos residuales y los costos operativos, comprometiendo la viabilidad económica y ambiental del sistema (Madeira et al., 2023).

Además, los lodos generados pueden representar un problema de gestión o, en contraste, una oportunidad de valorización energética mediante digestión anaerobia (Loganath & Senophiyah-Mary, 2020). En este sentido, Otero et al. (2021), estima que los residuos de los camales y el estiércol de ganado podrían generar en

promedio hasta 8654 millones de m³ de biogás al año, lo que resalta el potencial de estos subproductos como fuente renovable de energía.

1.2. Formulación del problema de investigación

1.2.1. Problema general

¿El tratamiento por coagulación química al efluente del camal de Macusani permite aprovechar los lodos generados en la producción de biogás?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cuáles son las características fisicoquímicas presentes en el efluente del camal de Macusani?
- ¿Cuál es la condición óptima bajo la interacción de factores de pH, concentración de coagulante, dosis de coagulante para la reducción de materia orgánica del efluente de camal Macusani?
- ¿Se puede aprovechar los lodos generados por coagulación química como sustrato para la producción de biogás?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

Evaluar el tratamiento por coagulación química al efluente del camal de Macusani y aprovechar los lodos generados para la producción de biogás.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar las características fisicoquímicas presentes en el efluente del camal de Macusani.
- Evaluar la condición óptima bajo la interacción de factores de pH, concentración de coagulante, dosis de coagulante para la reducción de materia orgánica del efluente de camal Macusani.
- Aprovechar los lodos generados por coagulación química como sustrato para la producción de biogás

1.4. Justificación de la investigación

1.4.1. Justificación técnica

La coagulación química es un método eficaz y ampliamente utilizado en el tratamiento de aguas residuales debido a su capacidad para eliminar partículas en suspensión, compuestos orgánicos, turbidez y compuestos metálicos, lo que mejora significativamente la calidad del agua tratada (Azabache et al., 2020). Su aplicación precisa permite cumplir con los estándares de descarga establecidos, contribuyendo a la protección del medio ambiente y la salud pública (Zhao et al., 2021). Este estudio proporciona datos técnicos para optimizar el proceso de coagulación química en función de parámetros como el pH, la dosis y la concentración del coagulante, lo que puede contribuir al desarrollo de estrategias más eficientes para el tratamiento de aguas residuales en canales y establecimientos similares (Acosta-Bastar & Hernández-Barajas, 2021; Pardo et al., 2020; Tamayo, 2021).

1.4.2. Justificación económica

La coagulación química representa una alternativa económicamente eficiente para el tratamiento de efluentes de canales, su implementación requiere menor inversión en infraestructura y presenta costos operativos más bajos en comparación con tecnologías más avanzadas (Janampa & Quiroz, 2021). Además, el uso de coagulantes accesibles como el sulfato de aluminio reduce los gastos de adquisición y operación (Knap-Bałydyga et al., 2025). A ello se suma el potencial aprovechamiento de los lodos generados para la producción de biogás, lo que no solo disminuye los costos de disposición, sino que también abre oportunidades para generar energía renovable (Loganath & Senophiyah-Mary, 2020).

1.4.3. Justificación socioambiental

La descarga de efluentes sin tratamiento adecuado al medio acuático genera impactos negativos significativos, como la alteración de la composición del agua, la desestabilización de ecosistemas, la proliferación de microorganismos y la eutrofización de ríos y lagos, afectando la biodiversidad y la salud pública (Djonga et al., 2019; Gnowe et al., 2020). En este contexto, la aplicación de la coagulación química se presenta como una alternativa eficaz para reducir la carga

contaminante y mitigar estos efectos. Su implementación no solo beneficia el equilibrio ecológico, sino que también impacta positivamente en los ganaderos, quienes dependen del río Macusani para el riego de cultivos y la provisión de agua para camélidos sudamericanos y animales domésticos (Hernandez-Alvarez et al., 2021). Además, mejora las condiciones sanitarias para los comercializadores de carne, promoviendo un ambiente de trabajo más seguro y contribuyendo a su bienestar económico (Soto-Cabrera et al., 2020).

CAPÍTULO II

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Antecedentes internacionales

Ortiz et al. (2024), analizaron dos sistemas de tratamiento de aguas residuales de camal Portoviejo en una planta piloto; el tratamiento A consistió en coagulación con sulfato de aluminio al 1% bajo diferentes dosis, una mezcla rápida de 200 rpm, mezcla lenta de 63 rpm y un tiempo de sedimentación de 10 min, y el tratamiento B se basó en un sistema de lodos activados. Los resultados reportaron que el efluente presentó un pH 7.85 ± 0.65 , temperatura de $22,71 \pm 2,36$ °C, DQO de $5976,31 \pm 2.382,91$ mg/l y DBO₅ $2683,13 \pm 598,90$ mg/l. Obtuvieron una mayor eficiencia en la remoción de 96.83 % de DQO, 97.07 % DBO₅ y 52.78% SST, con el tratamiento A.

Aleksić et al. (2020), evaluaron la composición de las aguas residuales generadas en 41 mataderos, aplicando procedimientos estandarizados de muestreo y análisis, obtuvieron valores promedio de pH de $7,24 \pm 0,69$, mientras que los rangos observados para los principales parámetros contaminantes como DQO con valores de 32 mg/l a 4500 mg/l, DBO₅ de 3,54 mg/l a 2871 mg/l, y SST desde 1 mg/l hasta 2138 mg/l, concluyen que estos resultados reflejan una amplia variabilidad en la carga contaminante de los efluentes y que 24 de los 41 mataderos evaluados no cuentan con sistemas de tratamiento para las aguas residuales generadas.

Zamani et al. (2019), estudiaron la eliminación de contaminantes del efluente de matadero mediante coagulación-floculación a escala laboratorio, con un pH inicial de 6.8 y evaluaron el sulfato de aluminio en concentraciones de 90, 110, 120, 150 y 200 mg/l, determinando que 110 mg/l fue la dosis óptima, logrando una reducción del 76% de la DQO. Sin embargo, al aumentar la dosis lograron disminuir los contaminantes, a consecuencia se observó un incremento en sólidos totales disueltos y conductividad eléctrica, por lo que sugieren la necesidad de optimización del proceso.

Mahtab et al. (2019), estudiaron el tratamiento de aguas residuales procedente de mataderos, aplicaron un sistema de coagulación utilizando coagulantes que incluyen; alumbre, cal, sulfato ferroso, y cloruro férrico, emplearon el método de ensayo en jarras para determinar la dosis óptima de estos coagulantes y realizaron mediciones de la formación de lodos y de la DQO para cada tratamiento. Reportando que estos efluentes presentan altas concentraciones de DBO₅, DQO y SST, y que la eficiencia de eliminación de la carga de materia orgánica alcanzó valores de hasta 91,8 % para DQO y 93,5 % para DBO, respectivamente.

Ramírez & Sierra (2018), investigaron el proceso de coagulación como una alternativa de tratamiento de aguas residuales, mediante la prueba de jarras determinaron la dosis óptima con diferentes concentraciones de policloruro de aluminio (PAC), sulfato de aluminio (Al₂(SO₄)₃) y cloruro férrico, proporcionaron una mezcla rápida de 110 rpm durante un minuto, mezcla lenta de 40 rpm, dejando flocular el agua durante 15 minutos y un periodo de sedimentación de 30 minutos. El coagulante que presentó mejores resultados con relación a los parámetros estudiados DQO y SST fue el cloruro férrico (FeCl₃) con porcentajes de remoción de 77,13% y 91,03% respectivamente. Y con el sulfato de aluminio se redujo un 76.36% de DQO con un pH inicial de 7.47 en promedio.

Ejimofor et al. (2020), investigaron la caracterización y conversión de lodos postcoagulación de aguas residuales en biogás. Para ello, realizaron experimentos de prueba jarras y la digestión anaeróbica de lodos postcoagulación en reactores anaeróbicos y la medición utilizaron el método de desplazamiento de líquido acidificado, posteriormente el biogás se caracterizó mediante cromatografía de gases (GC), y obtuvieron una producción máxima de biogás de 80 ml en el día 20.

Adou et al. (2020), evaluaron el rendimiento de digestión anaerobia de lodos generados en el tratamiento de aguas residuales de matadero, el estudio se realizó en un reactor discontinuo 5 litros de capacidad, operando bajo condiciones mesófilas (32 ± 3°C), el reactor fue cargado con 4,5 litros de lodos y la producción de biogás se midió diariamente mediante el método de desplazamiento de agua, obtuvieron una producción de 112 ml al día 30.

Latifi et al. (2019), investigaron la producción de biogás a partir de residuos de mataderos mediante un proceso de codigestión anaerobia en reactores por lotes, a escala de laboratorio; los ensayos se llevaron a cabo en reactores de 1 litro, operados a temperatura mesofílica constante ($34 \pm 1^\circ\text{C}$) en baño maría, con un tiempo de retención de 50 días, evaluaron la relación inóculo-sustrato y su influencia en la generación de biogás. Reportaron que los mayores rendimientos obtenidos fueron de 0.631 m^3 de biogás y 0.462 m^3 de $\text{CH}_4/\text{kg SV}$ añadido, con un contenido de metano del 73 %.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Taipe & Paucar (2024), analizaron la eficiencia de remoción de turbidez y materia orgánica con el sulfato de aluminio y la *Opuntia ficus-indica* de las aguas residuales del camal Santo Domingo de Guzmán - Sicaya, los resultados indicaron que el porcentaje de remoción de DQO con el sulfato de aluminio con una dosis de 1g/l tuvo una capacidad de remoción del 74.79 %, disminuyó 1186.0 mg/l a 299.0 mg/l , concluyendo que ambos coagulantes tanto orgánico como inorgánico logran remover la turbidez y la materia orgánica presente en el efluente.

Miyashiro & Meliton (2022), compararon los tratamientos de coagulación-floculación y electrocoagulación en aguas residuales de camal Conchucos, en la coagulación-floculación trabajaron bajo 4 variables independientes, dosis de coagulante ($600 - 1000 \text{ mg/l}$), dosis de floculante ($4 - 8 \text{ mg/l}$), velocidad de agitación rápida ($250 - 350 \text{ rpm}$) y velocidad de agitación lenta ($80-100 \text{ rpm}$), quienes lograron una reducción de DQO del 61.79% mediante la coagulación/floculación y un 75.71% por electrocoagulación.

Oré (2017), en su estudio determinó la influencia del sulfato de aluminio y el pH en la remoción de materia orgánica en el tratamiento del agua residual del camal municipal de Chupaca, bajo parámetros de ensayos de dosis de coagulante de 3 y 5 g/l de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, pH (7 y 9), obtuvo que el mayor porcentaje de remoción de DQO fue de 64.47% a un pH de 8 y una dosis $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ de 5 g/l .

Castro (2024), evaluó la cantidad y calidad del biogás producido a partir de residuos orgánicos, utilizando biodigestores tipo batch contruidos con frascos de vidrio de 1 litro, acoplados a bolsas herméticas para la captura del gas generado,

el volumen de biogás fue determinado mediante el principio de Arquímedes, midiendo el líquido desplazado por el gas acumulado. Además, la calidad del biogás se analizó utilizando un medidor multigas, el cual le permitió identificar las concentraciones de metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), oxígeno (O₂) y ácido sulfhídrico (H₂S), expresadas tanto en porcentajes como en partes por millón (ppm). El mejor rendimiento se alcanzó al día 43, con una producción de 1200 cm³ de biogás.

Barrena et al. (2017), en la investigación optimizaron la producción de biogás a escala laboratorio con estiércol de bovino, lactosuero y totora (*Scirpus californicus*), los biodigestores de 12 litros de volumen del cual utilizaron 10 litros, en el que emplearon diferentes relaciones estiércol, obteniendo una máxima producción de biogás de 1400 ml a partir de 1,7 y 2,5 litros de estiércol (estiércol: agua de 1:3 y 1:5), con 400 y 200 ml de lactosuero (2 y 4% v/v), respectivamente.

2.1.3. Antecedentes locales

Inchuanaco (2024), determinó los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales de camal frigorífico Sur Export Delicar SCRL - Puno, que vierte los efluentes a pozos temporales. El investigador reportó valores de 158 NTU de turbidez, 685.50 mg/l SST, 16.6 °C de temperatura, 7.48 pH, 941.10 mg/l DBO₅ y 3234.60 mg/l de DQO.

Mendoza (2023), caracterizó los efluentes líquidos de camal de Ilave y determinó el efecto de los efluentes residuales del camal en la calidad de agua del río Ilave, para ello tomó muestras del efluente, dando como resultado que el efluente presentó un caudal de 4.9 m³/seg., 16°C de temperatura, 3387.5 µS/cm de conductividad, 1.65% de salinidad, 1565.25 mg/l de sólidos totales disueltos, 159.95 mg/l de sólidos suspendidos totales, 7.62 de pH, 167.25 mg/l de DBO₅, 418.25 mg/l de DQO, concluye que existe una ligera alteración con efecto puntual sobre la calidad del agua del río Ilave.

Cuba (2019), realizó su investigación con la finalidad de generar biogás a partir de lodos del tanque imhoff generados en el tratamiento de aguas residuales, para ello aplicó cuatro biodigestores alimentados con lodo y carbonato de calcio (CaCO₃) a escala laboratorio con volumen de 3 litros a condiciones mesofílicas

(37°C ±5) a un TRH de 28 días; logrando una producción del gas metano (CH₄) de 0.55 l/kg de lodos activados con relación a la adición del carbonato de calcio (CaCO₃), en comparación a la biodigestión normal.

Ojeda (2019), evaluó la producción de biogás a partir de los residuos sólidos de la laguna de oxidación en Espinar, Puno. En su investigación, se mantuvo una temperatura constante de 35°C en un biorreactor con un volumen de 40.79 litros y una carga de lodos de 9 kg, generando una presión de 14.76 PSI. Como resultado, se determinó que la densidad del metano producido era de 0.6280 g/l, y se obtuvo un volumen de gas metano (CH₄) de 3.33 litros.

2.2. Marco teórico

2.2.1. Calidad de agua

La calidad del agua se describe por medio de la composición de parámetros físicos, químicos y microbiológicos, evaluados según su uso y en comparación con normativas y/o estándares en materia ambiental (Arce-Villalobos et al., 2022). Esta calidad es fundamental para diversos fines, como el abastecimiento, el riego, la recreación y las actividades industriales. Su idoneidad depende de los tipos y concentraciones de contaminantes, los cuales suelen analizarse mediante procedimientos estandarizados (Bouchareb et al., 2025)

El agua es un recurso finito y vital, esencial para toda la vida, ya sea humana, vegetal o animal, y desempeña un papel fundamental en el mantenimiento de la salud y el equilibrio de los ecosistemas, los hábitats y las comunidades rurales y urbanas (Bouchareb et al., 2025). Este recurso viene siendo afectada por el crecimiento económico, el cual intensifica actividades que demandan mayor cantidad de agua (Corrales et al., 2021). Para su óptimo aprovechamiento, es fundamental un equilibrio permanente entre su valor social, económico y ambiental (Singh et al., 2022).

El agua superficial es considerada como uno de los recursos naturales fundamentales para la supervivencia humana como para las actividades relacionadas con el desarrollo económico (Salem, 2021). Sin embargo, estos sistemas naturales como ríos, lagos y estuarios, se ven afectados por

contaminación de fuentes puntuales y difusas (Kim & Chung, 2022). La disminución de su calidad representa un problema global, que en un futuro generaría escasez (Escalona-Domenech et al., 2022).

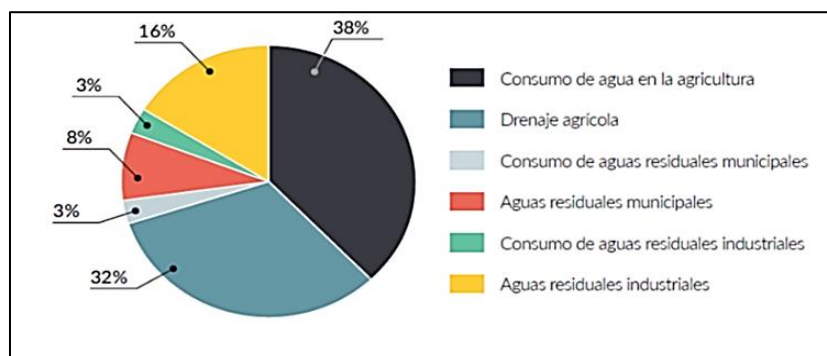
2.2.2. Aguas residuales

Las aguas residuales son aquellas cuya composición original ha sido modificada debido a su uso por parte de comunidades o industrias, y que contienen materiales orgánicos e inorgánicos tanto disueltos como en suspensión (Beltrán & Lozano, 2023). En función a su origen y características, las aguas residuales se clasifican en:

- a. **Aguas residuales industriales:** Resultado de actividades productivas, propias de sectores como la minería, la agricultura, la energía, la agroindustria, entre otros. Estas aguas presentan una amplia variedad de contaminantes, dependiendo del proceso industrial (Thomas & Thomas, 2022).
- b. **Aguas residuales domésticas:** Producto de aguas usadas en viviendas, residencias, establecimientos institucionales y comerciales que contienen aguas negras y aguas grises, estas aguas contienen principalmente materia orgánica, nutrientes (nitrógeno y fósforo), microorganismos patógenos, residuos de detergentes, grasas, restos de alimentos, entre otros contaminantes (Hsien et al., 2019).
- c. **Aguas residuales municipales:** Producto de la combinación entre aguas residuales domésticas con agua de lluvia o aguas residuales industriales tratadas antes de ingresar a sistemas de alcantarillado (Hsien et al., 2019).

Figura 1

Consumo y producción de aguas residuales por sector.



Nota. Extraído de AQUASTAT de la FAO.

Según la base de datos de AQUASTAT de la FAO, en la Figura 1 muestra el porcentaje de consumo y producción de aguas residuales por sector, donde el mayor porcentaje de consumo de agua se encuentra en la agricultura seguido por la producción de aguas residuales que van directamente al drenaje.

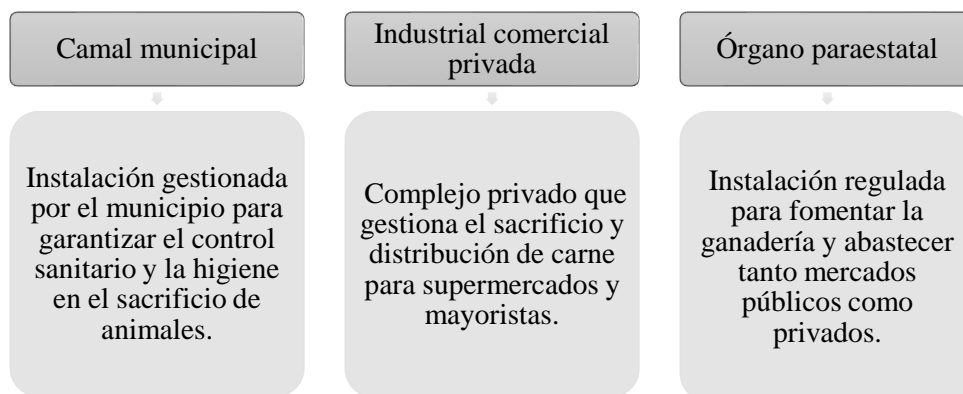
2.2.3. Camal

Es una instalación donde se realiza el sacrificio de animales de granja destinado al consumo humano, donde también se lleva a cabo el procesamiento, almacenamiento y comercialización de carne y sus derivados. (Euroinnova, 2023). Las principales actividades incluyen el lavado y desinfección del área de sacrificio del animal, desangrado, extracción de las vísceras, extracción y lavado del estómago de animal, retiro del rumen, lavado de la parte interior del animal sacrificado, lavado del piso por exceso de estiércol (Araujo et al., 2021).

A continuación, en la Figura 2 se muestran los tipos de camales según su clasificación y características operativas.

Figura 2

Tipos de mataderos.



Nota. Extraído de Euroinnova (2023) & Veall (2022).

Según el SENASA (2021), los camales se clasifican en tres categorías, considerando el nivel técnico-sanitario del proceso de faenado, la capacidad de sacrificio, así como la infraestructura, equipamiento y materiales disponibles.

- **Categoría 1:** Cuenta con capacidad para faenar hasta 10 bovinos, 20 porcinos o camélidos, y 30 ovinos o caprinos por jornada, abasteciendo principalmente a la demanda local.

- **Categoría 2:** Destinados exclusivamente al procesamiento de animales para el consumo dentro del país.
- **Categoría 3:** Apto para el sacrificio de animales con fines de exportación, cumpliendo con estándares internacionales de calidad e inocuidad.

De acuerdo con SENASA (2021), el proceso de faenado de animales de abasto garantiza la inocuidad de la carne y el bienestar animal, dividiéndose en varias etapas clave como se muestra en la Figura 3.

Figura 3

Proceso de faenado de animales.

| |
|--|
| Transporte y recepción |
| • Traslado de animales en condiciones adecuadas con identificación sanitaria y acceso a agua. |
| Inspección ante-mortem |
| • Evaluación de su salud antes de sacrificio para detectar enfermedades o anomalías. |
| Condiciones previas al faenamiento |
| - Los animales deben permanecer en corrales limpios, bien ventilados y con acceso a duchas para garantizar la higiene. |
| Zona de faenamiento |
| - Inicia con el aturdimiento mecánico o eléctrico para evitar sufrimiento, seguido del izado y degüello, donde se drena la sangre. Luego, en el desuello y eviscerado, se retiran piel y vísceras, asegurando la limpieza de la carne. |
| Inspección post-mortem |
| - Se examina la carne y los órganos internos para descartar enfermedades y se coloca el sello de "Apto para Consumo Humano" en las carnes aprobadas. |
| Lavado, pesado y conservación |
| • La carne se limpia, pesa y almacena en refrigeración a temperaturas entre 0 y 5°C. |
| Distribución y transporte |
| - La carne se traslada en vehículos refrigerados, cumpliendo con normativas sanitarias para evitar la contaminación y asegurar su calidad hasta su destino final. |

Nota. Extraído de SENASA (2021).

Los efluentes que se generan en estas instalaciones están compuestas por sangre, agua, restos de pelos, orinas, heces del animal, rumen, desechos de intestinos, detergentes, por lo que presentan alto contenido en materia orgánica (Hilares et al., 2021).

2.2.4. Efluentes de camal

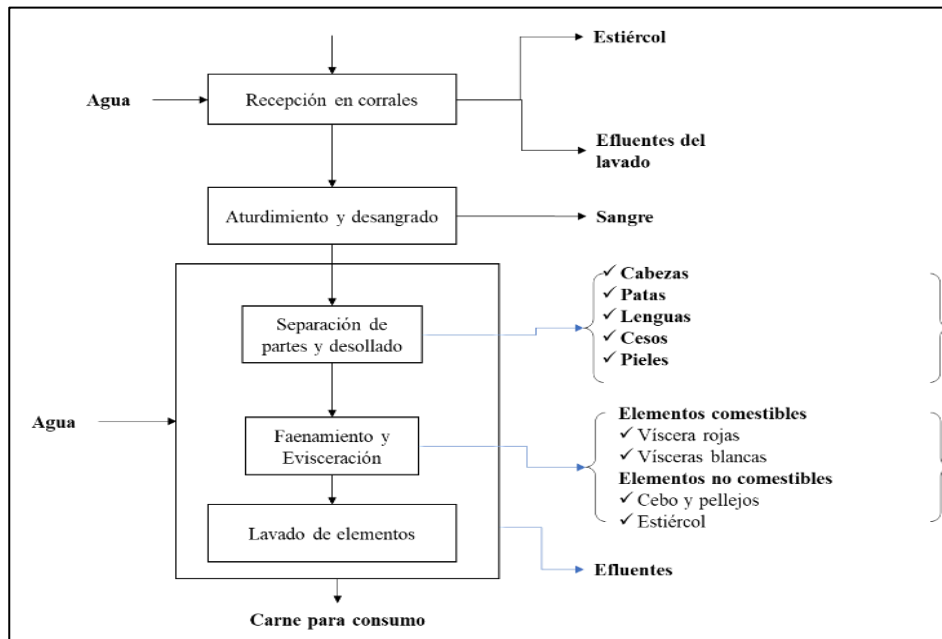
En la industria de alimentos, en específico los camales donde se benefician a los ganados, genera un alto impacto ambiental debido a la gran cantidad de efluentes que produce (Núñez & Lupaca, 2021). En la mayoría de los casos, estos son vertidos al medio ambiente sin un tratamiento adecuado, lo que implica un alto volumen de aguas residuales con elevadas concentraciones de materia orgánica, emisiones gaseosas y sobrecarga de nutrientes como nitrógeno y fósforo (Djonga et al., 2021).

Las características de las aguas residuales generadas por los camales dependen de diversos factores tales como el tamaño de las instalaciones del matadero, el tipo de animal a sacrificar, el método de faenamiento del animal, el proceso de limpieza de los equipos e instalaciones (Aziz et al., 2019). Comúnmente, presentan altas concentraciones de compuestos nitrogenados, como amonio (NH_4^+), nitrito (NO_2^-) y nitrato (NO_3^-), fosfatos (PO_4^{3-}) y materia orgánica en descomposición (Djonga et al., 2021). Debido a la presencia de macromoléculas como proteínas, carbohidratos, lípidos, estos efluentes facilitan el crecimiento de microorganismo, especialmente bacterias (Ramakodi et al., 2020). Además. Su rápida descomposición genera gases malolientes, lo que genera impactos negativos tanto en el ambiente como en la salud de la población (Bogéa et al., 2022).

Los efluentes del camal poseen una elevada carga de materia orgánica, tanto en suspensión como disuelta, además de una alta concentración de aceites y grasas (Núñez & Lupaca, 2021). Estos residuos líquidos son producto de la mezcla de agua con sangre, desechos ruminales provenientes del lavado de las vísceras, grasas y el estiércol, huesos, pezuñas, intestinos, desperdicios de carne (García & Zevallos, 2021). En la figura 4 muestra el proceso de beneficio de animales en el camal, donde se generan residuos sólidos y líquidos en cada etapa de operación, donde se arrastran grandes cantidades de contenidos gástricos e intestinales, sangre, grasa, heces y otras sustancias orgánicas, además de detergentes y desinfectantes utilizados para la limpieza del área de trabajo (Velásquez, 2017).

Figura 4

Proceso de beneficio de animales en camal.



Nota. El gráfico fue elaborado en base a Gronerth (2017) & Malpartida (2020).

A continuación, se presentan las características del agua residual generada en el camal, clasificadas en tres tablas según sus propiedades. La tabla 1 muestra los parámetros físicos. La tabla 2 detalla las características químicas, incluyendo la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), la demanda química de oxígeno (DQO), el pH y la concentración de nutrientes, factores determinantes en la contaminación del agua. Finalmente, la tabla 3 presenta el análisis microbiológico, presencia de microorganismos patógenos que pueden representar riesgos para la salud y el medio ambiente.

Tabla 1

Características físicas de las aguas residuales del camal.

| Parámetro | Definición |
|-----------|--|
| Turbiedad | Medida óptica que indica la presencia de partículas suspendidas que dispersan la luz, causadas por sólidos en suspensión finos y coloides. |

| | |
|-----------------------|--|
| Sólidos totales | Suma de materia sólida, disuelta o en suspensión, de naturaleza orgánica o inorgánica, presentes en el agua residual. |
| Sólidos en suspensión | Porción de partículas sólidas no disueltas en el agua que pueden ser visibles a simple vista y contribuyen a la turbidez y sedimentación del efluente. |
| Color | Atributo visual del agua influenciado por sustancias disueltas o materia particulada. |
| Olor | Percepción sensorial del agua residual, originada por compuestos volátiles derivados de la descomposición de la materia orgánica. |
| Temperatura | Parámetro que refleja el nivel térmico del agua, propio de los procesos biológicos y físicos. |
| Aceites y grasas | Compuestos lipídicos comunes en las aguas residuales de los camales. |

Nota. Definición de características fisicoquímicas del efluente.

Fuente: Borja et al. (2019); Pastrana (2021).

Tabla 2

Características químicas de aguas residuales del camal.

| Parámetro | Definición |
|---|--|
| Materia orgánica | Compuestos biológicos como tejidos animales, grasas, proteínas y carbohidratos, derivados de la actividad y descomposición en el camal. |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅) | Cantidad de oxígeno requerida por microorganismos aeróbicos para descomponer la materia orgánica presente en el agua durante un período típico de cinco días a una temperatura específica. |

| | |
|----------------------------------|---|
| Demanda Química de Oxígeno (DQO) | Medida de la cantidad de oxígeno necesario para oxidar los compuestos orgánicos e inorgánicos mediante un agente químico fuerte. |
| pH | Medida de la acidez o alcalinidad del agua residual, influenciada por ácidos grasos, orgánicos, sales y productos químicos de limpieza. |
| Fósforo | Nutriente presente como resultado de la descomposición de la materia orgánica y residuos animales en estas aguas. |
| Nitrógeno | Resultado de la descomposición de materia orgánica, excreción de animales y uso de productos químicos. |
| Conductividad eléctrica | Capacidad del agua para conducir corriente eléctrica, influenciada por la cantidad de sales disueltas. |

Nota. Definición de características químicas del efluente.

Fuente: Borja et al. (2019); Pastrana (2021).

Tabla 3

Características microbiológicas.

| Parámetro | Definición |
|-----------------------------|---|
| Coliformes totales | Grupo de bacterias que se encuentran comúnmente en el intestino de humanos y animales de sangre caliente. |
| Coliformes termo tolerantes | Subgrupo de coliformes capaces de crecer a temperaturas elevadas, típicamente entre 44.5°C y 45.5°C. |

Nota. Definición de características microbiológicas del efluente.

Fuente: Borja et al. (2019); Pastrana (2021).

2.2.5. Coagulación química

El término "coagulación" se utiliza comúnmente para nombrar todo el proceso de tratamiento de agua en el que las impurezas coloidales y disueltas se transforman

en agregados más grandes, denominados flóculos, que posteriormente se eliminan mediante el procesos de sedimentación o filtración (Pivokonsky et al., 2024).

La coagulación química es un proceso unitario esencial en el tratamiento de aguas residuales, cuya finalidad es la remoción de partículas coloidales y materia en suspensión que no pueden eliminarse mediante la sedimentación natural (Abujazar et al., 2022). El proceso inicia con la adición de un coagulante al agua, al disolverse, este se disocia e hidroliza, formando complejos cargados positivamente que neutralizan la carga negativa de los contaminantes coloidales, facilitando así su desestabilización (Knap-Bałdyga et al., 2025).

Las partículas coloidales, a pesar de su reducido tamaño que oscilan entre 0,001 y 1,0 μm , poseen una superficie específica que impide su sedimentación. Por ello, la coagulación permite su eliminación eficiente al reducir las fuerzas de repulsión electrostática, facilitando su aglomeración y posterior eliminación (Abujazar et al., 2022).

Para llevar a cabo este proceso se emplean coagulantes inorgánicos como el sulfato de aluminio, cloruro férrico y sulfato férrico, entre otras sales, que contribuyen a la formación de agregados más grandes y sedimentables (Sandoval et al., 2022). La eficacia del tratamiento depende de la correcta dosificación del coagulante y del control de parámetros como el pH, la alcalinidad y el tiempo de mezcla (Arab et al., 2022).

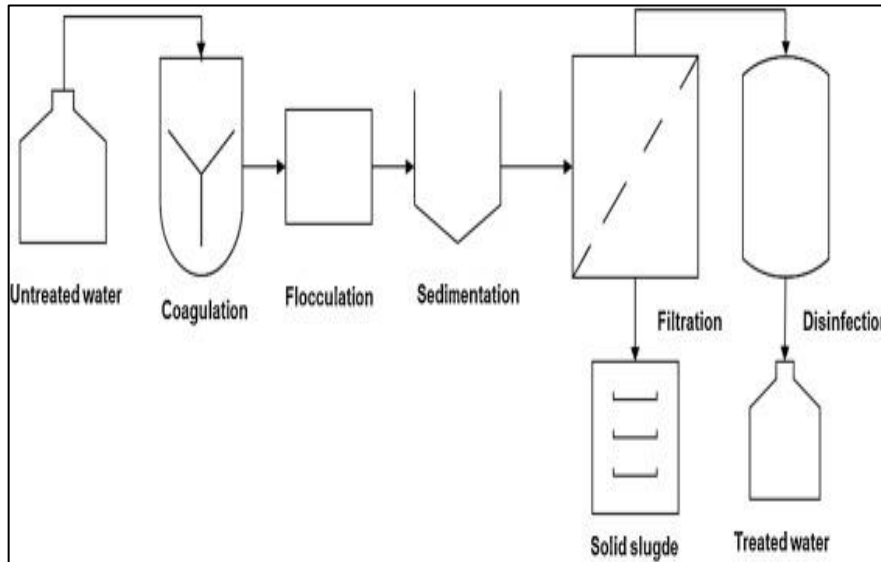
La coagulación se complementa con la floculación, proceso físico mediante el cual los micro flóculos formados durante la coagulación se agrupan en flóculos de mayor tamaño mediante una agitación lenta controlada. Esta fase favorece la posterior separación por sedimentación o filtración (Arab et al., 2022). La combinación de coagulación-floculación se considera una técnica eficaz, simple y ampliamente aplicada en el tratamiento de aguas residuales industriales (Abujazar et al., 2022).

Finalmente, el agua tratada se somete a procesos adicionales como la sedimentación y la filtración, y, en sistemas más completos, a tratamientos complementarios como la oxidación o desinfección mediante métodos físicos o

químicos (Arab et al., 2022). La Figura 5 muestra un esquema del flujo general de tratamiento en sistemas avanzados.

Figura 5

Diagrama del proceso de tratamiento de aguas residuales.



Nota. Arab et al., (2022).

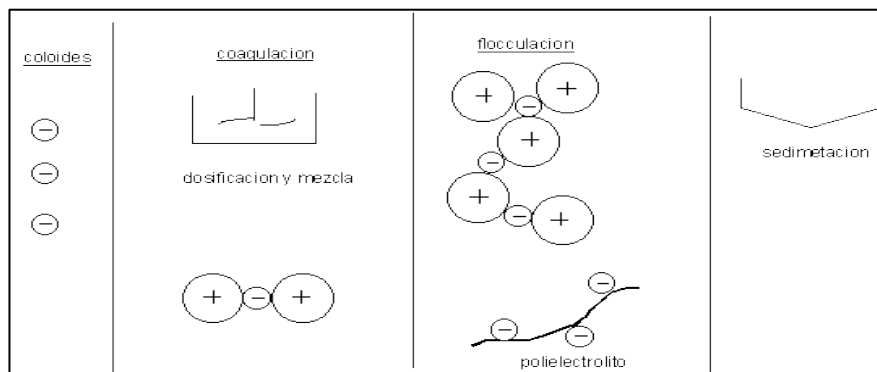
a. Proceso de coagulación

El proceso de la coagulación requiere una mezcla enérgica para favorecer la aglutinación de los flóculos en estructuras de mayor tamaño. Al inicio del proceso, una mezcla rápida asegura una distribución uniforme del coagulante en el agua, mientras que una mezcla más lenta facilita la unión progresiva de las partículas (Kweiyor-Tetteh et al., 2017).

Tras la etapa de coagulación-floculación, el agua pasa por un proceso de sedimentación, donde las partículas de mayor tamaño se depositan en el fondo por acción de la gravedad, como se muestra en la Figura 6. La eficiencia de esta fase está determinada por la velocidad de sedimentación y el tiempo de retención. Finalmente, el agua es sometida a filtración para separar los sedimentos restantes, pasando a través de filtros o membranas que garantizan su clarificación (Owodunni & Ismail, 2021).

Figura 6

Proceso de coagulación química.



Nota. Representación gráfica del proceso de coagulación química.
Fuente: TIMSA, (2017).

b. Mecanismo del proceso de coagulación

El proceso de coagulación se basa en una serie de mecanismos que explican las reacciones entre las partículas coloidales y el coagulante agregado, lo que conduce a su desestabilización y neutralización de las cargas iónicas (Nath et al., 2021).

La eficacia de este proceso depende en gran medida de la dosis de coagulante utilizada (Nath et al., 2021). Al entrar en contacto con el agua, los coagulantes inorgánicos interactúan con la alcalinidad y se hidratan, formando precipitados de hidróxido metálicos de aluminio o hierro. Estos precipitados operan mediante un mecanismo de floculación por barrido, atrapando las partículas en suspensión y facilitando su eliminación (Huerta, 2022).

Según Owodunni & Ismail (2021), los principales mecanismos responsables de la desestabilización los coloides durante la coagulación incluyen:

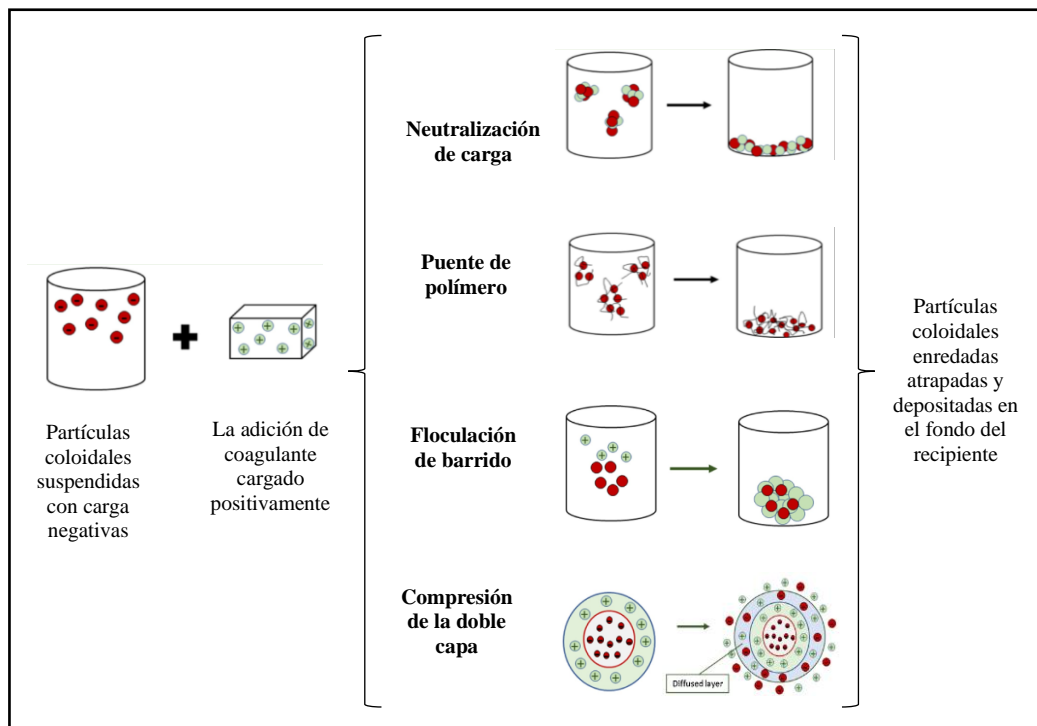
- **Neutralización de carga:** Consiste en la reducción de la repulsión electrostática entre las partículas coloidales mediante la adición de iones de carga opuesta, lo que permite su agrupación y posterior formación de flóculos.
- **Puentes de polímero:** Se produce cuando polímeros coagulantes de cadena larga se adhieren a la superficie de varias partículas, formando enlaces entre ellas. Este mecanismo da lugar a la creación de macro

flóculos más estables y resistentes.

- **Floculación de barrido:** Se produce cuando el coagulante, forma precipitados que arrastran consigo las partículas suspendidas facilitando su sedimentación.
- **Compresión de doble capa:** Al reducirse la distancia entre las partículas coloidales, se minimiza la repulsión electrostática, lo que favorece su agrupación y posterior eliminación.

Figura 7

Representación del mecanismo de coagulación química.



Nota. La representación fue elaborada en base a Owodunni & Ismail, (2021).

c. Factores que influyen en el proceso de coagulación

La evaluación de un coagulante y su eficiencia en el tratamiento del agua se requiere ajustar diversos parámetros para identificar los valores óptimos que maximizan su efectividad (Owodunni & Ismail, 2021). Los factores operativos desempeñan un papel importante en las reacciones durante la coagulación, considerando aspectos como el tipo de coagulante, pH, velocidad e intensidad de agitación, tiempo de mezcla y sedimentación (Coox et al., 2022). En la tabla 4 se detalla la división de los factores que influyen en el proceso.

Tabla 4*División de factores que influyen en el proceso de coagulación.*

| División | Factores |
|---|--|
| Propiedades de coagulante | Identificar el tipo, la dosis y concentración adecuada del coagulante |
| Características fisicoquímicas del agua | Las propiedades fisicoquímicas del agua incluyen pH, temperatura, conductividad eléctrica, turbidez, alcalinidad, dureza, concentración de partículas coloidales, concentración de carbono orgánico total, color, entre otras. |
| Características del mezclado | Tiempo y velocidad de agitación del agua, equipo de mezclado, tiempo de sedimentación. |
| Características de las partículas | Se considera el Potencial Z, el tamaño, la movilidad peri-cinética (relacionada con el movimiento browniano) y orto-cinética (relacionada con el gradiente de velocidad), y la capacidad de flotación. |

Nota. Definición de factores que influyen en el proceso de coagulación.

Fuente: El-taweel et al., (2023).

Según Owodunni & Ismail (2021), los factores que influyen en el proceso de coagulación son:

- **Dosis de coagulación:** Cantidad ideal de coagulante necesaria para conseguir una floculación eficiente sin provocar efectos adversos en la calidad del agua a tratar, su determinación requiere de prueba de jarras en una mesa de coagulación para evaluar su desempeño de manera analítica y visual (Abujazar et al., 2022).
- **Concentración de coagulante:** Proporción de coagulante disuelto en el agua a tratar, la cual debe ser adecuada para lograr la neutralización de cargas eléctricas y favorecer la agregación de partículas (Pardo et al., 2020). Una concentración insuficiente puede no ser capaz de desestabilizar

las partículas, mientras que una concentración excesiva puede generar floculantes de gran tamaño o una cantidad excesiva de lodos, afectando la eficiencia del proceso (Córdova & Caján, 2019).

- **pH del agua:** Parámetro que indica la acidez o alcalinidad del agua y afecta directamente la eficacia del tratamiento con coagulantes, su valor influye en el rendimiento de productos químicos como las sales férricas y de aluminio, los cuales requieren rangos específicos de pH para lograr una precipitación óptima (El-taweel et al., 2023).

Un pH inadecuado puede alterar la formación de flóculos, reduciendo la eficiencia del proceso, por ello, es necesario ajustar el pH mediante la adición de alcalinizantes como carbonato de sodio o cal (Mogbo et al., 2020).

- **Velocidad de agitación:** Garantiza una adecuada distribución del coagulante y la formación de flóculos, empleando dos velocidades de mezcla; rápida y lenta. La mezcla rápida permite una dispersión uniforme del coagulante y la desestabilización de partículas coloidales, mientras que la mezcla lenta favorece la formación y consolidación de macro flóculos (Sigmadaf, 2024).
- **Tiempo de agitación:** La duración de la mezcla rápida varía según el tipo de coagulante utilizado, mientras que el tiempo de mezcla lenta no debe superar los 15 minutos, un tiempo prolongado puede generar calentamiento de la muestra, mejorando la floculación, pero reduciendo la eficiencia de sedimentación debido a la liberación de gases disueltos que provocan la flotación de los flóculos (Owodunni & Ismail, 2021).
- **Temperatura:** Afecta la velocidad de formación del flóculo y la eficiencia del proceso de coagulación, a temperaturas más bajas, la velocidad de reacción disminuye, por lo que se requiere un aumento en la dosis de coagulante para garantizar una adecuada formación de flóculos (Sigmadaf, 2024).
- **Tiempo de sedimentación:** Durante esta etapa, los flóculos formados se depositan por gravedad, permitiendo la clarificación del agua.

El éxito del proceso de coagulación depende del ajuste adecuado de estos factores, ya que variaciones en los parámetros pueden afectar la formación y

estabilidad de los flóculos, reduciendo la eficiencia en la eliminación de contaminantes (Owodunni & Ismail, 2021). Además, el uso de coagulantes químicos puede generar lodos voluminosos debido a reacciones secundarias no controladas, lo que representa un desafío en el manejo de residuos del proceso (El-taweel et al., 2023).

d. Coagulantes químicos

Los coagulantes químicos, también conocidos como coagulantes inorgánicos son sustancias compuestas principalmente por sales por sales metálicas de carga positiva; al incorporarlos al agua, los iones metálicos liberados neutralizan las cargas negativas de las partículas coloidales, eliminando su repulsión y facilitando la aglomeración (Sukmana et al., 2021).

Según El-taweel et al. (2023), estos coagulantes se clasifican principalmente en:

- Sales metálicas hidrolizantes: Incluyen compuestos como el cloruro férrico, sulfato férrico, cloruro de magnesio y sulfato de aluminio (alumbre); estos reaccionan rápidamente con el agua, formando hidróxidos metálicos que atrapan las impurezas (El-taweel et al., 2023).
- Sales metálicas prehidrolizadas: Se caracterizan por haber sido parcialmente hidrolizadas durante su fabricación, lo que mejora su rendimiento en diversas condiciones, entre las que destacan el cloruro de polialuminio (PAC), cloruro poliférrico (PFC), sulfato poliferroso (PFS) y cloruro férrico de polialuminio (El-taweel et al., 2023).

En la siguiente tabla 5, se resumen algunos de los compuestos más comúnmente utilizados en los procesos de coagulación y floculación:

Tabla 5
Coagulantes químicos.

| Compuestos | Fórmula química |
|---------------------|-----------------------------|
| Sulfato de aluminio | $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$ |

| | |
|-------------------------|--|
| Aluminato de sodio | NaAlO_2 |
| Alumbre de potasio | $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3\text{K}_2\text{SO}_4\cdot 24\text{H}_2\text{O}$ |
| Alumbre de amonio | $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4\cdot 24\text{H}_2\text{O}$ |
| Policloruro de aluminio | $\text{Al}_2(\text{OH})_n\text{Cl}_{6-n}$ |
| Cloruro férrico | FeCl_3 |
| Sulfato férrico | $\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$ |
| Sulfato ferroso | $\text{Fe}(\text{SO}_4)\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ |
| Carbonato de magnesio | MgCO_3 |

Nota. Fórmulas químicas de coagulantes inorgánica.

Fuente: Pivokonsky et al. (2024).

e. Sulfato de aluminio

El sulfato de aluminio conocido como “alumbre”, es uno de los coagulantes inorgánicos más empleados en el tratamiento de aguas residuales, debido a su bajo costo, alta disponibilidad y buena estabilidad química (Adebayo et al., 2021).

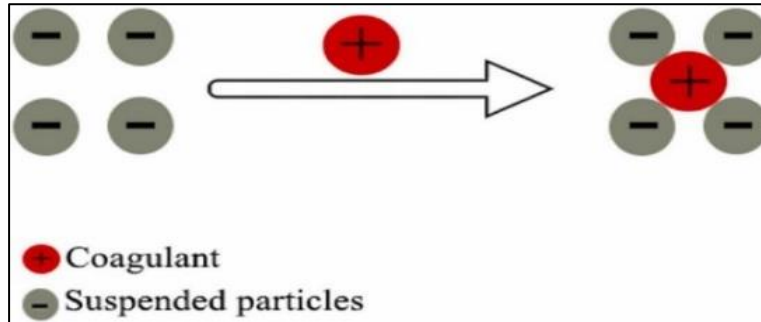
El “alumbre” actúa principalmente sobre la fracción coloidal de las aguas residuales, facilitando la neutralización de cargas y la aglomeración de partículas (Rachid et al., 2024). La fórmula comercial es $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3\cdot 14\text{H}_2\text{O}$ (Morales et al., 2020). Una vez disuelto en el agua, este compuesto experimenta un proceso de hidrólisis que da lugar a la formación de diversas especies de aluminio como Al^{3+} , $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ y la predominancia de estas especies depende del pH, la concentración y la composición iónica del medio (Mortadi et al., 2025)

A valores de pH menores a 4, se generan especies catiónicas solubles (como $\text{Al}(\text{OH})_2^+$), que pueden neutralizar las cargas negativas de los coloides. Sin embargo, en el rango óptimo de pH (6 - 8), se forma un precipitado amorfo de hidróxido de aluminio $\text{Al}(\text{OH})_3$, el cual tiene una estructura coloidal y gelatinosa con alta capacidad para adsorber contaminantes orgánicos e

inorgánicos, favoreciendo la formación de flóculos que pueden separarse por sedimentación (Liu et al., 2025).

Figura 8

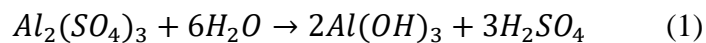
Coagulación con sulfato de aluminio.



Nota. Extraído de Rachid et al., (2024).

Según Syaichurrozi et al., (2024), las reacciones químicas involucradas en la coagulación con alumbre son las siguientes:

- Al agregar alumbre al líquido, se forma el hidróxido de aluminio



- Adsorción de contaminantes y formación de flóculos



f. Prueba de jarras

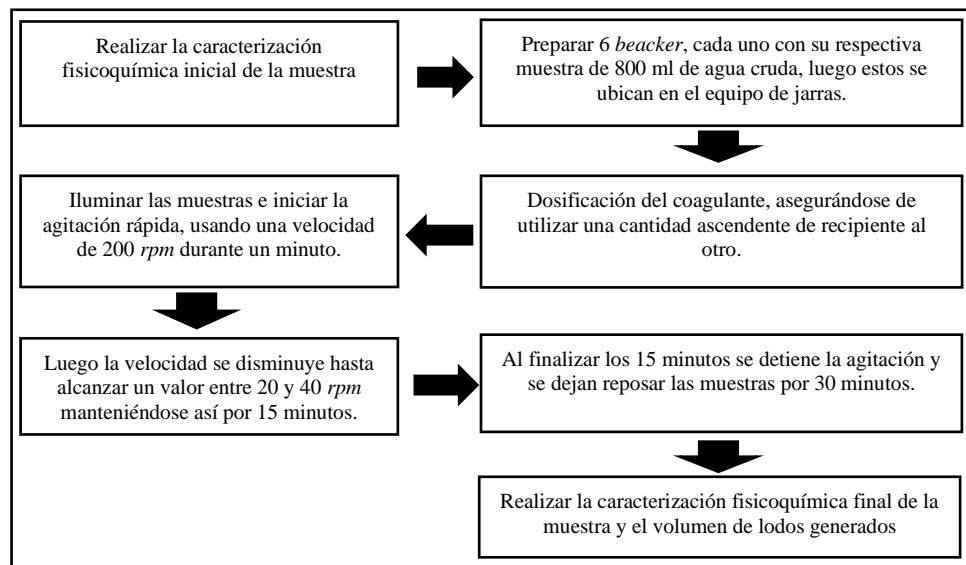
La prueba de jarras es un procedimiento de laboratorio utilizada para simular el proceso de coagulación-floculación, que permite determinar las condiciones óptimas de tratamiento de aguas residuales, como el tipo de coagulante, dosis, pH, y tiempos de mezcla y sedimentación (Rachid et al., 2024).

El ensayo consta de tres fases principales; mezcla rápida para dispersar el coagulante, mezcla lenta para promover la formación de flóculos, y sedimentación para separar los sólidos (Ait-Hmane et al., 2024). Durante el ensayo, se evalúan los cambios en los parámetros fisicoquímicos del agua, como turbidez, color o DQO (Mortadi et al., 2025; Onen et al., 2018).

En la Figura 9, representa el proceso de prueba de jarras que se lleva a cabo en seis vasos precipitados, con parámetros operacionales como tiempo y velocidad de agitación. Por otro lado, en la Figura 10 se presenta el aspecto visual del agua residual antes y después del tratamiento, evidenciando los cambios físicos observados tras la aplicación del proceso de coagulación (FLOWEN, 2021).

Figura 9

Proceso de prueba de jarras.



Nota. Esquema adaptado en base a Charapaqui, (2019).

Figura 10

Aspecto visual del efluente antes y después del tratamiento fisicoquímico.



Nota. Extraído de FLOWEN, (2021).

La eficiencia de la prueba de jarras se evalúa en función de la remoción de elementos específicos una vez completado el proceso (Pivokonsky et al., 2024),

se determina comparando las características del efluente antes y después del tratamiento, lo cual permite verificar si el tratamiento empleado cumple con los estándares de calidad establecidos por los organismos reguladores (Costa & Fioravante, 2024). Para este propósito, se aplica comúnmente la siguiente fórmula:

$$\text{Eficiencia de remoción (\%)} = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \quad (3)$$

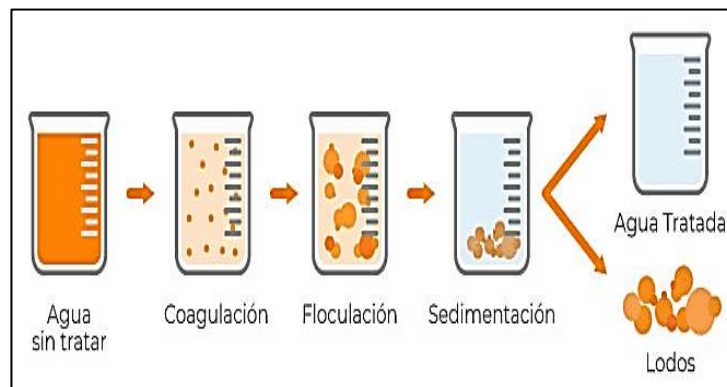
Donde C_i es la concentración inicial del contaminante y C_f es la concentración final después del tratamiento (Adebayo et al., 2021).

2.2.6. Lodos post coagulación

El lodo post coagulación son residuos sólidos generados el tratamiento de aguas residuales mediante procesos de coagulación y floculación (Wang et al., 2022). Se originan tras la adición de coagulantes químicos, tanto orgánicos como inorgánicos, que desestabilizan las partículas coloidales presentes en el agua, permitiendo su aglomeración en flóculos más grandes y su posterior sedimentación (Abujazar et al., 2022).

Figura 11

Lodos post coagulación.



Nota. Extraído de ZEOMEDIA (2023).

La composición fisicoquímica de estos lodos depende de muchos factores como la calidad del agua a tratar, el tipo y cantidad de coagulante utilizado en el tratamiento (Kang et al., 2022). Generalmente, contienen altos niveles de materia orgánica, nutrientes, metales pesados, microorganismos y otros compuestos que

dependen de la fuente del efluente y del tratamiento aplicado (Torrado & Pérez, 2022).

Estos lodos, al contener compuestos orgánicos biodegradables pueden ser aprovechados como sustrato para la producción de biogás a través de la digestión anaeróbica (Ejimofor et al., 2020). Además, pueden emplearse en otras aplicaciones como la agricultura, compostaje, fabricación de materiales de construcción (cemento y ladrillos), o incluso recuperación de metales en ciertos casos (Nayeri & Mousavi, 2022).

En países como China, se reporta que aproximadamente el 45 % de los lodos se reutiliza en agricultura, el 40 % se dispone en vertederos, y solo un 3,5 % se recicla o convierte en productos con valor agregado, como biocombustibles o insumos para la industria de la construcción (Binnie et al., 2017).

Por tanto, la caracterización fisicoquímica de los lodos post coagulación es fundamental para seleccionar el tratamiento o estrategia de aprovechamiento más adecuada, esta evaluación permite determinar su potencial de reutilización, identificar riesgos ambientales y optimizar su gestión (Qamar et al., 2022).

2.2.7. Biogás

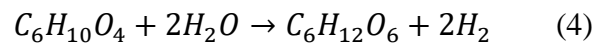
El biogás es un biocombustible renovable generado por la degradación anaeróbica de materia orgánica en ausencia de oxígeno, un proceso en el que intervienen diversas comunidades microbianas, principalmente bacterias metanogénicas (Wang et al., 2023). Su composición típica incluye metano (CH_4) entre un 50 % y 70 %, y dióxido de carbono (CO_2) entre 30 % y 50 %, además de trazas de otros gases como sulfuro de hidrógeno (H_2S), oxígeno (O_2) y vapor de agua (Agabo-García et al., 2022).

El metano es el principal componente energético del biogás debido a su alto poder calorífico, siendo capaz de sustituir a combustibles fósiles en diversas aplicaciones como; la generación de electricidad, abastecimiento de caldera o estufas, combustible para vehículos, entre otras (Wang et al., 2023). Además, el uso de biogás reduce las emisiones de gases de efecto invernadero (Torrado & Pérez, 2022).

Para la obtención de biogás se realiza en sistemas conocidos como biodigestores, los cuales operan en condiciones mesofílicas (30 - 40 °C) o termofílicas (50 - 60 °C), y requieren un equilibrio en parámetros como la relación carbono/nitrógeno (C/N), el tiempo de retención, la carga orgánica y el pH (Siddiki et al., 2021).

Según Casanovas et al. (2019), el proceso de digestión anaeróbica para la producción de biogás se desarrolla en tres etapas fundamentales:

- a. **Hidrólisis:** Primera fase del proceso y consiste en la descomposición de macromoléculas orgánicas complejas (como carbohidratos, proteínas y lípidos) en compuestos más simples y solubles, tales como monosacáridos, aminoácidos y ácidos grasos. Esto es facilitado por la acción de enzimas extracelulares producidas por bacterias hidrolíticas.

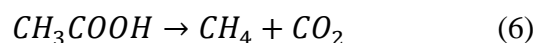
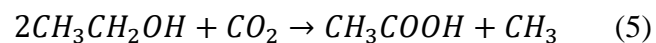


- b. **Formación de ácidos (acidogénesis y acetogénesis):** Etapa que comprende dos reacciones principales.

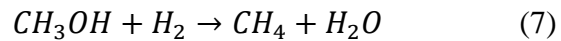
- Fermentación (acidogénesis): Los productos de la hidrólisis, como la glucosa, son transformados en ácidos orgánicos (como ácido láctico, ácido butírico y ácido propiónico), así como en etanol, hidrógeno y dióxido de carbono.
- Acetogénesis: En esta fase, los compuestos orgánicos generados en la acidogénesis se convierten en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono, que posteriormente serán utilizados por las arqueas metanogénicas en la última etapa del proceso.

- c. **Metanogénesis:** La última etapa donde las arqueas metanogénicas convierten los productos de la acetogénesis en biogás, compuesto principalmente por metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂). Las principales rutas de formación de metano son:

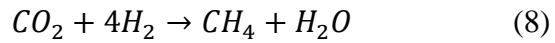
- Conversión de acetato en metano y dióxido de carbono:



- Conversión de metanol en metano:



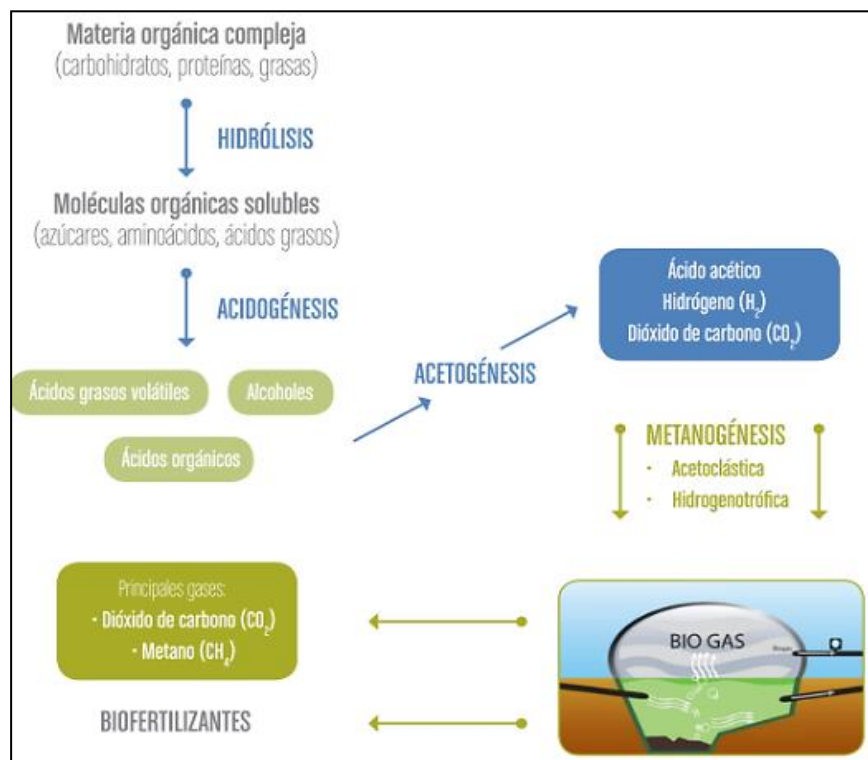
- Reducción de dióxido de carbono por hidrógeno:



A continuación, en la Figura 12 muestra las etapas del proceso de digestión anaeróbica en la producción de biogás.

Figura 12

Etapas de la digestión anaeróbica en un biodigestor.



Nota. Extraído de Casanovas et al, (2019).

2.2.8. Normativa en materia de gestión de efluentes de camal

El Decreto Supremo Número 021-2009-VIVIENDA establece los valores máximos admisibles (VMA) para regular las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario, su propósito es prevenir daños a las instalaciones y la infraestructura sanitaria, así como garantizar su correcto funcionamiento, contribuyendo así a la sostenibilidad de los sistemas de

alcantarillado y tratamiento de aguas residuales (VIVIENDA, 2019).

Por otro lado, el decreto supremo 2009 - MINAM aprueba límites máximos permisibles (LMP) para efluentes de actividades agroindustriales tales como planta de camales y plantas de beneficio, su finalidad es mitigar los efectos negativos en el ambiente, particularmente, la contaminación de los cuerpos de agua, así como los riesgos a la salud de la población.

2.2.9. Análisis factorial estadístico

El análisis factorial estadístico es un método empleado en el diseño de experimentos que permite evaluar el efecto de dos o más factores, es decir, con dos o más variables independientes sobre una variable de respuesta (Martínez et al., 2020).

En un diseño factorial, cada nivel de los factores independientes se combina con todos los niveles de los demás factores, permitiendo evaluar todas las combinaciones posibles como condiciones experimentales (Minitab, 2024). Esta estructura hace que el diseño sea eficiente, ya que proporciona información detallada sobre los efectos individuales (efectos principales), los efectos simples (comparaciones dentro de un nivel de otro factor) y las interacciones entre factores, es decir, cómo cambia la respuesta del experimento cuando se modifican simultáneamente dos o más factores (Fernández, 2020).

Los diseños factoriales 3^k se caracterizan por incluir k factores, cada uno con tres niveles, y como resultado, una réplica completa de este tipo de diseño implica un total de 3^k observaciones (Fernández, 2020).

CAPÍTULO III

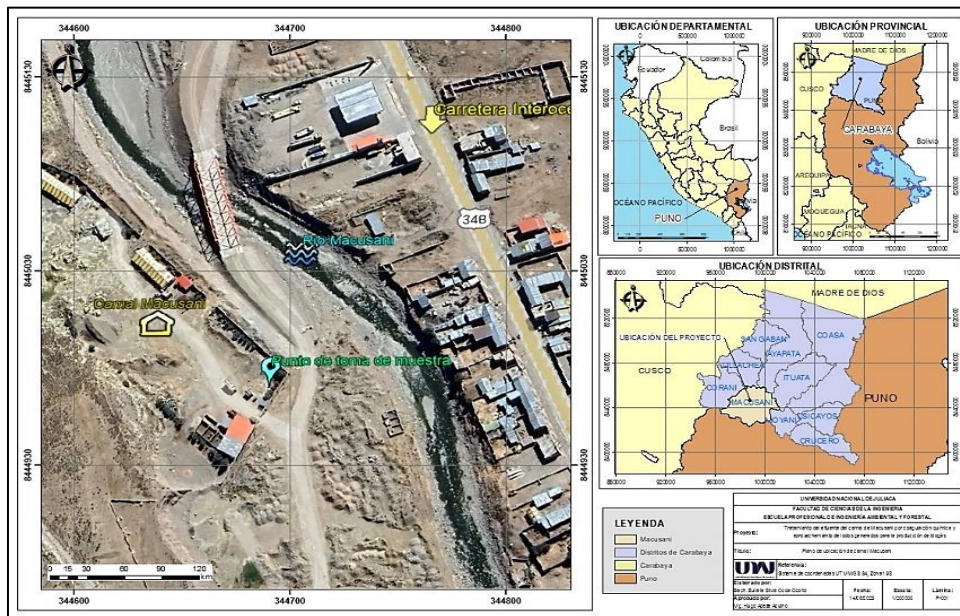
MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ámbito de estudio

El estudio se llevó a cabo utilizando muestras recolectadas de los efluentes generados por el camal Macusani, situado en el distrito de Macusani, provincia de Carabaya, departamento de Puno a 4315 m.s.n.m. Geográficamente, el sitio de muestreo se encuentra ubicado en las coordenadas UTM WGS 84 este 344657.19 y norte 8444987.42, como se puede observar en la Figura 13.

Figura 13

Ubicación del camal Macusani.



Nota. Elaboración propia.

Figura 14

Sistema de evacuación de las aguas residuales del camal Macusani.



Nota. Elaboración propia.

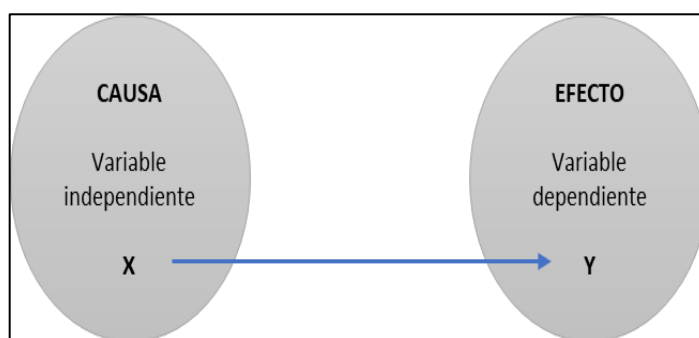
3.2. Tipo, nivel y diseño de la investigación

La presente investigación se enmarca en un nivel explicativo ya que tiene como propósito identificar las causas o efectos de un fenómeno mediante el análisis de las relaciones entre variables. En ese contexto, el estudio busca determinar la eficiencia del tratamiento de efluentes de camal mediante coagulación química, evaluada a través de la remoción de la demanda química de oxígeno (DQO). Este enfoque posibilita comprender las relaciones causales entre los parámetros operativos y la eficacia del tratamiento, facilitando la identificación de las condiciones óptimas del proceso.

El diseño de la investigación es experimental, ya que implica la manipulación intencionada de variables independientes por parte del investigador, lo que permite mayor control y evidencia de causa-efecto, con el fin de analizar sus efectos sobre una variable dependiente (Martínez et al., 2020). En este estudio, se controlaron y modificaron factores como el pH, concentración de coagulante y dosis de coagulante, para evaluar su influencia en la remoción de la demanda química de oxígeno (DQO) del efluente del camal de Macusani.

Figura 15

Esquema de experimento y variables.



Nota. Representación en base a Martínez et al. (2020).

3.3. Población y muestra

3.3.1. Población

La población está constituida por las aguas residuales generadas diariamente en el camal Macusani, cuyo caudal promedio es de 4.1 m³/día aproximadamente.

3.3.2. Muestra

La muestra fue recolectada del canal de evacuación de efluentes de camal de Macusani, se tomaron en total 40 litros de muestra; 3 litros para la caracterización fisicoquímica en laboratorio y 37 litros para el procedimiento experimental del tratamiento por coagulación química.

La unidad de análisis es el agua residual no tratada del camal de Macusani.

3.4. Variables de la investigación

3.4.1. Variable independiente

- Factores de coagulación química: pH (6,7 y 8), dosis de coagulante (3 ml, 5 ml y 10 ml) y concentración del coagulante (0.5%, 1% y 2%).
- Proporción de sustrato e inóculo: (1:2) y (2:3).

3.4.2. Variable dependiente

- Reducción de materia orgánica del efluente, medida en función de la DQO.
- Volumen de biogás producido a partir de lodos generados.

3.5. Hipótesis de la investigación

3.5.1. Hipótesis general

El tratamiento del efluente del camal de Macusani mediante coagulación química permite una reducción de la demanda química de oxígeno superior al 75 %. Además, los lodos generados son aprovechados en la producción de biogás mediante digestión anaerobia.

3.5.2. Hipótesis específicas

- Las características fisicoquímicas del efluente del camal de Macusani presentan concentraciones elevadas de materia orgánica, con valores de DQO que superan los 3900 mg/L.
- La condición más óptima para la reducción de materia orgánica del efluente de camal Macusani se alcanza bajo la interacción de pH 6, concentración

de coagulante mayor del 1% y una dosis de coagulante de 3 ml.

- Los lodos generados por coagulación química pueden ser aprovechados como sustrato para la producción de biogás mediante digestión anaerobia, debido a su alto contenido de materia orgánica biodegradable y características fisicoquímicas favorables para la actividad microbiana.

3.6. Equipos, materiales, reactivos e insumos

3.6.1. Equipos

Multiparámetro, conductímetro, digestor, agitador magnético, termo reactor para DQO, equipo/floculador digital de prueba de jarras 6P mod., balanza analítica, colorímetro digital, baño maría, refrigeradora, detector multigas, laptop.

3.6.2. Materiales

Probeta 100 ml, vaso precipitado 50, 100, 500 y 1000 ml, fiola de 100 ml, piseta, embudos de vidrio, micropipetas, puntas para micropipetas, matraz 100 ml, gradilla para tubos de ensayo, matraz aforado de vidrio de 100 ml, pipeta volumétrica de vidrio de 5 y 10 ml, varilla de vidrio, espátula de laboratorio, matraz Kitasato de 500 ml, peras de succión, papel filtro, papel aluminio, manguera transparente de 8 mm de diámetro, cinta aisladora, bolsas ziploc, guantes quirúrgicos, barbijo, guardapolvo.

3.6.3. Reactivos

Sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) al 98%, solución de digestión (mezcla entre dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado y sulfato de mercurio (HgSO_4)), hidróxido de sodio (NaOH) grado reactivo analítico y solución buffer.

3.6.4. Insumos

Agua destilada.

3.7. Métodos

3.7.1. Caracterización fisicoquímica del efluente del camal Macusani

Para la toma de muestras se siguió el protocolo de muestreo de aguas residuales no domésticas que se descargan en la red de alcantarillado (NTP 214.060 2016), el cual consistió en la recolección durante el horario de faena del camal de Macusani, con un volumen total de 40 litros de agua residual directamente del canal de evacuación. Del volumen total, se tomaron 3 litros para el análisis fisicoquímico (ver tabla 6); esta fracción fue conservada en un cooler a 4°C para preservar sus condiciones hasta su análisis en laboratorio, para el caso de la DQO se agregó ácido sulfúrico hasta pH <2. Los 37 litros restantes fueron destinados al procedimiento experimental de coagulación química con sulfato aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$). Las muestras fueron recolectadas en intervalos de 2 horas, previamente pre filtradas para eliminar residuos de gran tamaño y almacenadas en bidones de polietileno de 5 galones, debidamente rotulados. Posteriormente, todas las muestras fueron transportadas al laboratorio de la Universidad Nacional de Juliaca.

Adicionalmente, se realizaron mediciones in situ de pH y temperatura utilizando un multiparámetro debidamente calibrado, estas mediciones se efectuaron directamente en el punto de muestreo, utilizando un recipiente de colecta conforme al protocolo descrito por Acosta-Espino et al. (2022).

Tabla 6

Método de análisis fisicoquímico para el efluente del camal Macusani.

| Parámetros | Unidad de medida | Método de análisis |
|-----------------------------------|-------------------------|--|
| pH | Unidades de pH | Medición en campo con el multiparámetro. |
| Temperatura | °C | Medición en campo con el multiparámetro. |
| Sólidos suspendidos totales (SST) | mg/l | SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 D. |

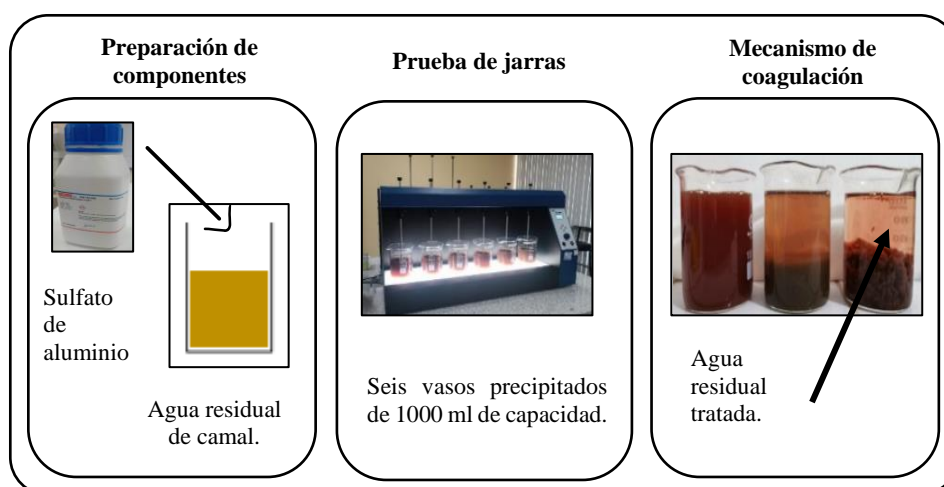
| | | |
|---|------|--|
| Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅) | mg/l | SM 5210 B Prueba de DBO de 5 días. |
| Demanda química de oxígeno (DQO) | mg/l | SM 5220 C Reflujo cerrado, método Titulométrico. |
| Aceites y grasas | mg/l | Método Soxhlet |
| Fósforo total | mg/l | Método espectrofotométrico |
| Nitrógeno total | mg/l | Método espectrofotométrico |

Nota. Elaboración propia.

3.7.2. Evaluación de coagulación química a bajo la interacción de factores

Figura 16

Proceso de coagulación química.



Nota. Elaboración propia.

a. Proceso de coagulación química

Para determinar la condición óptima para el tratamiento por coagulación química con sulfato de aluminio ($Al_2(SO_4)_3$), se utilizó el equipo de prueba de jarras compuesto por seis vasos precipitados de 1000 ml de capacidad y seis agitadores de paletas. Se llevaron a cabo los ensayos donde se variaron factores como el pH, la concentración de coagulante y el volumen o dosis de coagulante.

El procedimiento de coagulación química siguió lo establecido por Acosta-Espino et al., (2022). Para ello, se prepararon 600 ml de la muestra de agua residual en cada vaso precipitado del equipo de prueba de jarras. Posteriormente, el pH fue ajustado mediante la adición de hidróxido de sodio (NaOH) y ácido sulfúrico (H₂SO₄) (Haddaji et al., 2022). Luego, se agregaron las dosis de coagulante con las respectivas concentraciones.

A continuación, se detalla la variación de factores pH, la concentración de coagulante y dosis de coagulante.

- **pH:** Se ajustó a valores de pH de 6, 7 y 8, mediante la adición de ácido sulfúrico (H₂SO₄) 1N e hidróxido de sodio (NaOH) 1N.
- **Concentración de coagulante químico:** Se prepararon soluciones con concentraciones de 0,5%, 1% y 2%. Para ello, se pesaron 0,5 g, 1 g y 2 g de sulfato de aluminio (Al₂(SO₄)₃), disolviéndose por separado en 100 ml de agua destilada, como se muestra a continuación.

Tabla 7

Concentración de coagulante químico.

| Peso de sulfato de aluminio (Al₂(SO₄)₃) | Volumen de agua destilada | Concentración en % peso/volumen |
|---|----------------------------------|--|
| (g) | (ml) | (%) |
| 0.5 | 100 | 0.5 |
| 1 | 100 | 1 |
| 2 | 100 | 2 |

Nota. Elaboración en base a Huamán, (2023) y Pastor et al., (2022).

- **Dosis de coagulante:** La dosis de coagulante que se empleó en los distintos tratamientos fue de 3 ml, 5 ml y 10 ml.

Así mismo, se programó en el equipo de prueba de jarras las condiciones de operación constantes como se muestra en la tabla 8.

Tabla 8

Condiciones de operación en el equipo de prueba de jarras.

| Parámetro de operación | Valor |
|-------------------------------|--------------|
| Velocidad máxima de agitación | 150 rpm |
| Tiempo de agitación máxima | 2 min |
| Velocidad mínima de agitación | 60 rpm |
| Tiempo de agitación mínima | 15 min |
| Tiempo de sedimentación | 15 min |

Nota. Elaboración en base a estudios de Acosta-Espino et al., (2022) y Toapanta-Casco et al., (2021).

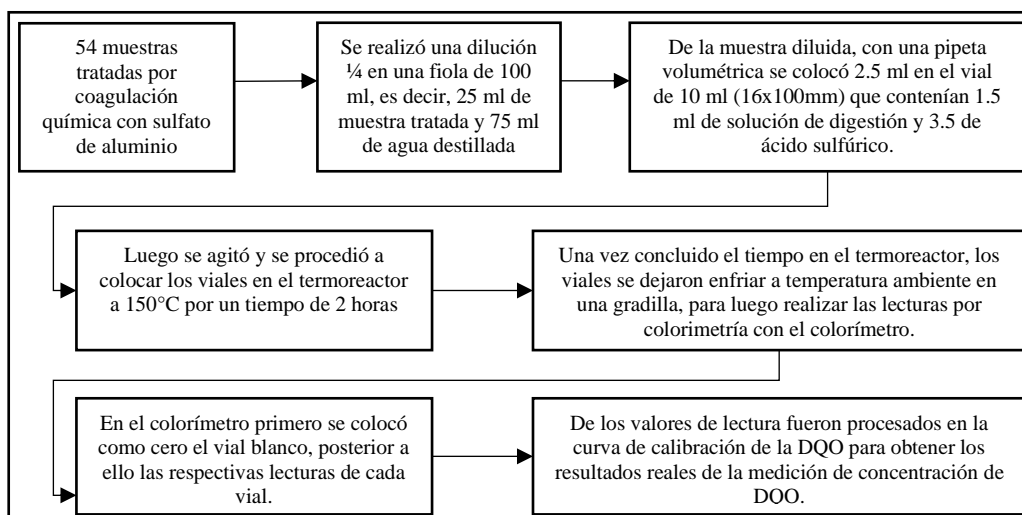
Al finalizar el tiempo de sedimentación de 15 min (Tributino et al., 2023), se tomó 25 ml del sobrenadante en una probeta para el análisis fisicoquímico de demanda química de oxígeno (DQO) (Haddaji et al., 2022).

b. Eficiencia de la coagulación química

La eficiencia del tratamiento mediante coagulación química se evaluó considerando la remoción de demanda química de oxígeno (DQO). Este análisis se llevó a cabo utilizando equipos como el termo reactor y el colorímetro, como se ilustra en el procedimiento mostrado en la figura 17.

Figura 17

Procedimiento para análisis de DQO.



Nota. Representación en base a Pastor et al. (2022).

El porcentaje de reducción de la demanda química de oxígeno, se calculó mediante la fórmula:

$$\text{Porcentaje de reducción de DQO} = \frac{DQO_i - DQO_f}{DQO_i} \times 100 \quad (9)$$

Donde:

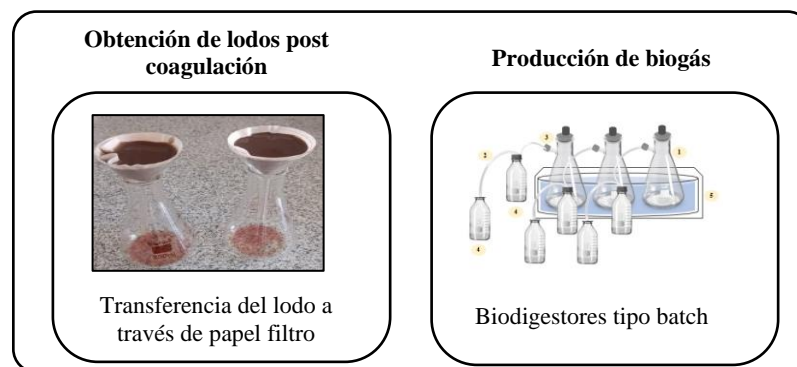
DQO_i: Valor inicial de DQO

DQO_f: Valor final de DQO

3.7.3. Evaluación lodos postcoagulación para la producción de biogás

Figura 18

Proceso de obtención de lodos para la producción de biogás.



Nota. Elaboración propia.

a. Obtención y caracterización de lodos post coagulación

Siguiendo el método descrito por Ejimofor et al. (2021), se recuperaron los lodos generados a partir del tratamiento más eficiente por coagulación química con sulfato de aluminio. Después de la fase formación de flóculos, el agua tratada se dejó sedimentar por gravedad durante 30 minutos a temperatura ambiente, permitiendo la separación y recolección de los lodos postcoagulación. Posteriormente, estos lodos fueron enviados al laboratorio para su caracterización fisicoquímica.

La muestra de lodo postcoagulación química fue debidamente almacenada en bolsas ziploc limpias y herméticas, debidamente etiquetadas para evitar derrames, siguiendo las recomendaciones de Malacatus et al. (2019).

Finalmente, los lodos fueron enviados al laboratorio para su análisis, en la tabla 9 se detallan los métodos de análisis de cada parámetro.

Tabla 9

Métodos de análisis fisicoquímicos de lodos post coagulación

| Parámetros | Unidad de medida | Método de análisis |
|---------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| pH | Unidades de pH | Electrométrico |
| Humedad | % | Gravimétrico |
| Conductividad | mS/cm | Electrométrico |
| Materia Orgánica | % | Walkley Black |
| Nitrógeno total | % | Kjeldahl |
| Sólidos volátiles | | |
| Sólidos fijos | g/l | Calcinación |
| Sólidos totales | | |
| Concentración de aluminio | mg/kg | Absorción Atómica (digestión) |

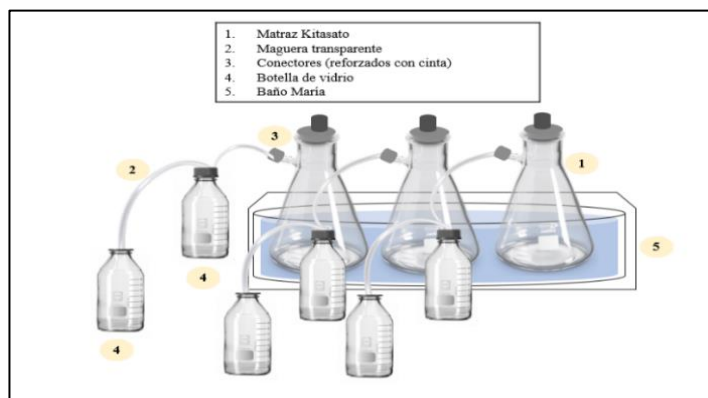
Nota. Elaboración propia.

b. Producción de biogás

La producción de biogás se llevó a cabo utilizando biodigestores de tipo batch, en la Figura 19 se puede visualizar el montaje del biodigestor, se emplearon matraces Kitasato de 500 ml sellados con goma y dispuestos en baño maría a temperatura de 35 °C. Cada reactor fue conectado mediante mangueras transparentes a una botella con agua acidificada con un valor de pH 2 para la recolección del biogás y otro recipiente destinado para medir el volumen de biogás mediante el método de desplazamiento de agua (Castro, 2024).

Figura 19

Montaje de biodigestor tipo batch.



Nota. Adaptado en base a Córdoba, (2016) y Marín et al., (2007).

Se utilizó estiércol de bovino (ESB) como inóculo y lodo post coagulación (LPC) como sustrato, aplicando dos tratamientos con tres proporciones; T1 (1:2) con 100 g de LPC y 200 g de ESB, y T2 (2:3) con 200 g de LPC y 300 g de ESB, además de un control (T0). En los tratamientos, se agregaron agua, manteniéndose un tiempo de retención hidráulica de 25 días.

El volumen de biogás producido se cuantificó mediante el método de desplazamiento de agua, considerando que el volumen desplazado es equivalente al gas generado (Castro, 2024). Para el análisis de los resultados, se empleó un diseño ANOVA, que permitió comparar promedios y determinar diferencias significativas entre los tratamientos (Fernández, 2020).

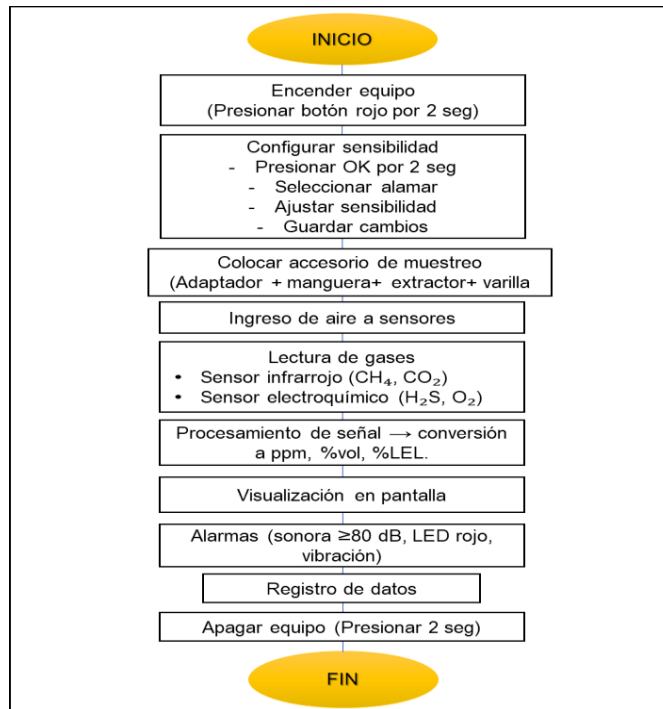
c. Caracterización de biogás

La caracterización de biogás obtenido se realizó de manera puntual, para ello se utilizó un detector multigas portátil proporcionado por el laboratorio de contaminantes orgánicos de la Universidad Nacional de Moquegua- UNAM Sede Ilo, como se muestra en la Figura 21.

Este dispositivo permitió la medición de la composición del biogás, incluye metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), sulfuro de hidrógeno (H₂S) y oxígeno (O₂), mediante sensor infrarrojo y sensor electroquímico, su mecanismo de uso se detalla en la figura 20.

Figura 20

Mecanismo de uso del detector multigas.



Nota. Elaboración propia.

En la tabla 10 muestra el rango de medición del equipo para cada uno de estos compuestos.

Figura 21

Equipo detector multi gas portátil.



Nota. Elaboración propia.

Figura 22*Información del medidor de gases.*

| Características del Detector multigas portátil | |
|--|--|
| Marca | Beijing Shian Technology 46 Instrument Ltd |
| Modelo | IRCD4. |
| Gases detectados | CH ₄ , CO ₂ , H ₂ S, O ₂ |
| Rango de medición | CH ₄ : (0-100) % vol. CO ₂ : (0-100) % vol. H ₂ S: (0~1000) ppm O ₂ : (0~30,0) % vol. |
| Relación de resolución | CH ₄ : 1 % vol, CO ₂ : 1 % vol, H ₂ S: 1 ppm, O ₂ : 0,1 % vol. |
| Sensor | Sensor infrarrojo y sensor electroquímico |
| Vida útil del sensor | ≥5 años (CH ₄ , CO ₂) ≥2 años (H ₂ S, O ₂) |
| Tiempo de respuesta | CH ₄ : ≤ 45 s (T90) CO ₂ : ≤ 45 s (T90) H ₂ S: ≤45 s (T90) O ₂ : ≤45s (T90) |
| Alarma | Audible--zumbador con ≥ 80 dB audible Visible: LED rojo parpadeante, ≥20 m visible |
| Punto de alarma | totalmente ajustable |
| Registro de datos | Registro de datos continuo (1900 eventos en intervalos configurables de 0,1 a 10 minutos) |
| Tiempo de carga | 4-5 horas |
| Resistencia al polvo y al agua | IP 65 |
| Tamaño y peso | 130*66*30mm / 250g |
| ex-signo | exibidoI |

Nota. Extraído de Castro, (2024).**Tabla 10***Rango de medición del equipo detector multigas portátil.*

| Parámetro | Unidad de medida | Rango de medición |
|---|------------------|-------------------|
| Metano (CH ₄) | % vol | 0-100 |
| Dióxido de carbono (CO ₂) | % vol | 0-100 |
| Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S) | Ppm | 0-2000 |
| Oxígeno (O ₂) | % vol | 0.0-30.0 |

Nota. El rango de medición es establecido en las especificaciones técnicas del equipo.

Fuente: Elaboración propia.

3.8. Análisis de resultados

Para evaluar la eficiencia del tratamiento por coagulación química, se aplicó el diseño factorial de 3^3 (3A x 3B x 3C), es decir, tres factores con tres niveles de pH, concentración de coagulante (%) y dosis de coagulante (ml), en un diseño completamente al azar (DCA).

El análisis de datos se realizó utilizando el software estadístico R y para modelar estadísticamente los datos mediante el software R, se emplearon nomenclaturas para facilitar el trabajo, las cuales son:

- Factor A (pH): pH₁=6 (a1), pH₂=7 (a2) y pH₃=8 (a3).
- Factor B (concentración de coagulante): 0.5 % (b1), 1% (b2) y 2% (b3).
- Factor C (dosis de coagulante): 3 ml (c1), 5 ml (c2) y 10 ml (c3).

Se establecieron 27 tratamientos (3x3x3), cada uno con dos repeticiones, generando un total de 54 condiciones experimentales. La variable dependiente es el porcentaje de remoción de DQO. Este diseño permitió analizar no solo el efecto individual de cada factor, sino también sus posibles interacciones sobre la remoción de la DQO.

En la tabla 11, se muestra el diseño factorial aplicado en la presente investigación.

Para analizar la producción de biogás a partir de los lodos post coagulación, se utilizó el diseño análisis de varianza ANOVA, este análisis permitió comparar los promedios de las diferentes muestras y determinar la existencia de diferencias significativas en las cantidades de biogás producido (Fernández, 2020). Así mismo, el ANOVA facilitó identificar y cuantificar las variaciones en la producción de biogás.

Tabla 11*Diseño factorial de 3 factores bajo 3 niveles y 2 repeticiones.*

| | a1 | | | | | | | | | a2 | | | | | | | | | a3 | | | | | | | | |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Repeticiones | b1 | | | b2 | | | b3 | | | b1 | | | b2 | | | b3 | | | b1 | | | b2 | | | b3 | | |
| | c1 | c2 | c3 | c1 | c2 | c3 | c1 | c2 | c3 | c1 | c2 | c3 | c1 | c2 | c3 | c1 | c2 | c3 | c1 | c2 | c3 | c1 | c2 | c3 | c1 | c2 | c3 |
| Repeticiones | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 |
| Repeticiones | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 |

Nota: Los valores del factor pH (A) y los niveles pH1=6 (a1), pH2=7 (a2) y pH3=8 (a3) respectivamente; para el factor de concentración de coagulante (B) y los niveles j1= 0.5 % (b1), 1% (b2) y 2% (b3) respectivamente y para el último factor de volumen o dosis de coagulante (C) y los niveles k1= 3 ml (c1), 5 ml (c2) y 10 ml (c3).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Caracterización fisicoquímica del efluente de camal Macusani

Tabla 12

Parámetros fisicoquímicos del efluente de camal Macusani.

| N° | Parámetros | Unidad de medida | Valor |
|----|---|------------------|-------|
| 1 | pH | - | 6.25 |
| 2 | Temperatura | °C | 18.2 |
| 3 | Sólidos suspendidos totales | mg/l | 990 |
| 4 | Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅) | mg/l | 1649 |
| 5 | Demanda química de oxígeno (DQO) | mg/l | 3960 |
| 6 | Aceites y grasas | mg/l | 98 |
| 7 | Fósforo total | mg/l | 112 |
| 8 | Nitrógeno total | mg/l | 60 |

Nota. Elaboración propia.

En la Tabla 12 se presentan las características fisicoquímicas del efluente del camal de Macusani, donde se obtuvo un valor de pH de 6.25, resultado similar fue reportado por Pachari (2024), en el camal de Melgar, con un pH de 6.20, lo que demuestra que este rango es característico de los efluentes generados en actividades de faenado, esta condición se asocia principalmente a la liberación de fluidos biológicos durante el sacrificio animal, tales como sangre, orina, jugos gástricos y contenido intestinal, los cuales presentan una naturaleza ligeramente ácida debido a la presencia de ácidos orgánicos (láctico y úrico), tal como lo señala Incahuanaco (2024).

Asimismo, la descomposición de la materia orgánica proveniente de tejidos, vísceras y restos animales genera ácidos grasos volátiles (AGV), resultado de la actividad microbiana anaerobia, proceso descrito por Mendoza (2023), lo que contribuye a mantener o disminuir ligeramente el pH del efluente. Sin embargo, el uso de detergentes y desinfectantes alcalinos durante las labores de limpieza puede contrarrestar este efecto, incrementando el pH dependiendo de la frecuencia, concentración y tipo de agente químico empleado (Zamani et al., 2019).

En relación a los sólidos suspendidos totales, el valor obtenido en este estudio es de 990 mg/l, refleja una concentración considerablemente elevada de material particulado en el efluente, siendo superior a lo registrado por Mendoza (2023), quien obtuvo un valor de 159.95 mg/l, la diferencia que puede atribuirse a factores operativos y de manejo de residuos sólidos, ya que en el camal de Macusani se registra un mayor volumen de sacrificio diario y un manejo inadecuado de subproductos como el rumen, estiércol y restos de tejidos animales, los cuales tienden a incorporarse al canal de evacuación durante las operaciones de faenado (Ortiz et al., 2024) .

Asimismo, Taipe & Paucar (2024) en su estudio demostraron que la deficiencia en los sistemas de pretratamiento, como rejillas o trampas de sólidos, permite que una fracción importante de residuos orgánicos; tales como fragmentos de grasa, pelos, fibras musculares y contenido ruminal, se incorporen al flujo del efluente y estos materiales, al no sedimentar con facilidad, aumentan la turbidez y la demanda de oxígeno del agua residual, dificultando su posterior tratamiento (Mahtab et al., 2019).

Respecto a la demanda química de oxígeno (DQO), Borja et al. (2019) lo define como un indicador de la carga orgánica total en las aguas residuales e indica que representa la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica biodegradable y no biodegradable, bajo ese enfoque, el efluente del camal de Macusani alcanzó un valor de 3960 mg/l, indicativo de una alta carga orgánica y una elevada concentración en comparación con reportado por Mendoza (2023) quien realizó la caracterización fisicoquímica del efluente en el camal Ilave, obteniendo un valor de 418.25 mg/l de DQO, la diferencia se atribuye a la mayor concentración de sólidos suspendidos, debido a la mayor carga operativa en Macusani, que funciona el doble de tiempo diario y sacrifica mayor cantidad animales. Por su parte, Pachari (2024) en su estudio reporta un valor de 3713 mg/l de DQO en el camal municipal de Melgar, se justifica

al deficiente manejo de efluentes, con almacenamiento temporal sin tratamiento previo, lo cual incrementa la concentración de materia orgánica por descomposición biológica bajo condiciones ambientales desfavorables. Por el contrario, Ortiz et al. (2024) informó un valor aún mayor de 5976,31mg/l de DQO en el camal de Portoviejo, lo que puede explicarse por la inclusión de porcinos en las faenas, cuya sangre y vísceras incrementan la carga orgánica del efluente.

En conjunto, como menciona Brichi et al. (2025), las variaciones en la demanda química de oxígeno (DQO) en los efluentes de camal se debe a la combinación de factores como el tipo y cantidad de animales beneficiados, el manejo operativo dentro de las instalaciones del camal, el uso de productos químicos para la limpieza del área operativa y el sistema de disposición final de dichos efluentes.

4.2. Eficiencia de coagulación química en el porcentaje de reducción de DQO

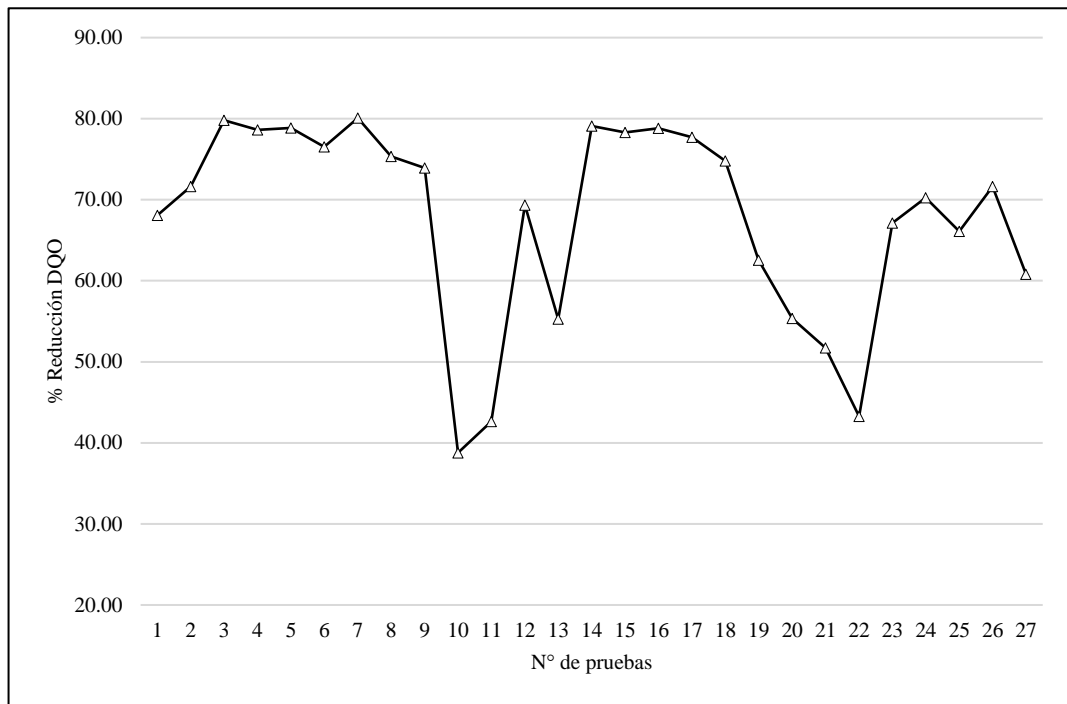
Tabla 13

Porcentaje de reducción de la DQO por coagulación química.

| Tratamiento | Factores | | | DQO | | % Remoción DQO | |
|-------------|----------|---------------------------------|--------------------------|----------|----------|----------------|----------|
| | pH | Concentración de coagulante (%) | Dosis de coagulante (ml) | Prueba 1 | Prueba 2 | Prueba 1 | Prueba 2 |
| T1 | 6 | 0.5 | 3 | 1249.10 | 1280.98 | 68.46 | 67.65 |
| T2 | 6 | 0.5 | 5 | 1057.79 | 1189.88 | 73.29 | 69.95 |
| T3 | 6 | 0.5 | 10 | 793.62 | 807.28 | 79.96 | 79.61 |
| T4 | 6 | 1 | 3 | 861.94 | 830.05 | 78.23 | 79.04 |
| T5 | 6 | 1 | 5 | 839.16 | 834.61 | 78.81 | 78.92 |
| T6 | 6 | 1 | 10 | 925.71 | 934.81 | 76.62 | 76.39 |
| T7 | 6 | 2 | 3 | 798.17 | 779.95 | 79.84 | 80.30 |
| T8 | 6 | 2 | 5 | 966.70 | 984.92 | 75.59 | 75.13 |
| T9 | 6 | 2 | 10 | 1048.68 | 1016.80 | 73.52 | 74.32 |
| T10 | 7 | 0.5 | 3 | 2465.23 | 2383.24 | 37.75 | 39.82 |
| T11 | 7 | 0.5 | 5 | 2201.05 | 2342.25 | 44.42 | 40.85 |
| T12 | 7 | 0.5 | 10 | 1153.45 | 1276.42 | 70.87 | 67.77 |
| T13 | 7 | 1 | 3 | 1772.90 | 1768.34 | 55.23 | 55.34 |
| T14 | 7 | 1 | 5 | 848.27 | 807.28 | 78.58 | 79.61 |
| T15 | 7 | 1 | 10 | 871.05 | 848.27 | 78.00 | 78.58 |
| T16 | 7 | 2 | 3 | 898.38 | 779.95 | 77.31 | 80.30 |
| T17 | 7 | 2 | 5 | 880.16 | 884.71 | 77.77 | 77.66 |
| T18 | 7 | 2 | 10 | 1003.14 | 994.03 | 74.67 | 74.90 |
| T19 | 8 | 0.5 | 3 | 1444.95 | 1522.38 | 63.51 | 61.56 |
| T20 | 8 | 0.5 | 5 | 1681.80 | 1854.88 | 57.53 | 53.16 |
| T21 | 8 | 0.5 | 10 | 1936.87 | 1886.77 | 51.09 | 52.35 |
| T22 | 8 | 1 | 3 | 2214.71 | 2278.48 | 44.07 | 42.46 |
| T23 | 8 | 1 | 5 | 1349.30 | 1253.65 | 65.93 | 68.34 |
| T24 | 8 | 1 | 10 | 1085.12 | 1271.87 | 72.60 | 67.88 |
| T25 | 8 | 2 | 3 | 1321.97 | 1362.97 | 66.62 | 65.58 |
| T26 | 8 | 2 | 5 | 1085.12 | 1162.55 | 72.60 | 70.64 |
| T27 | 8 | 2 | 10 | 1554.27 | 1549.71 | 60.75 | 60.87 |

Figura 23

Porcentaje de reducción de la DQO en el número de pruebas realizadas.



Nota. Elaboración propia.

En la Tabla 13 y Figura 23 muestran el porcentaje de reducción de DQO de las 27 pruebas, el tratamiento T7 (pH 6, 2%, 3 ml), logrando una remoción de 79.84% y 80.30% en las pruebas 1 y 2, respectivamente. Seguido del T3 (pH 6, 0.5%, 10 ml), con remociones de 79.96% y 79.61%. En contraste, los tratamientos con remociones por debajo de 45% fueron T10 y T11 (pH 7, 0.5%, 3 ml y 5 ml, respectivamente), Según la base teórica la coagulación química permite la reducción de la materia orgánica Taipei & Paucar, (2024), al emplear el sulfato de aluminio logró una máxima de remoción de DQO del 80.07 %, bajo condiciones óptimas de pH 6, una concentración de coagulante al 2 % y dosis de coagulante de 3 ml, estos resultados evidencian que una adecuada interacción entre los factores es determinante para lograr mayor eficiencia del proceso. Según Mortadi et al. (2025), la reducción de la DQO en efluentes de camal está principalmente asociada a la eliminación de compuestos orgánicos solubles y partículas coloidales finas, los cuales son eficientemente aglomeradas y removidos durante el proceso de coagulación-floculación (Costa & Fioravante, 2024). Asimismo, es relevante señalar que las aguas residuales de camal presentan altas concentraciones de sangre, proteínas

provenientes de mucosas intestinales, carbohidratos, así como mezclas complejas de grasas y ácidos grasos de cadena larga, que incrementa significativamente la DQO del efluente (Sau et al., 2024).

El resultado obtenido es similar a lo reportado por Zamani et al. (2019), quienes obtuvieron una reducción de 76 % de DQO con un pH inicial de 6.8, un medio ligeramente ácido el cual favoreció la formación de especies hidrolizadas del coagulante. El pH juega un rol determinante en la eficacia de la coagulación, ante ello, Mortadi et al. (2025) describe que a pH 6, se favorece la hidrólisis del sulfato de aluminio, formando especies activas como $\text{Al}(\text{OH})_3$ y $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, las cuales son responsables de la neutralización de las cargas negativas de las partículas coloidales y facilitan la floculación, a partir de esta reacción se logra la reducción de contaminantes. Asimismo, Mahtab et al. (2019), señalan que el rango óptimo de pH para coagulantes metálicos como el alumbre se encuentra entre 6.0 y 7.5, ya que fuera de este intervalo disminuye la formación de flóculos estables e incrementa el consumo de coagulante, reduciendo la eficiencia global del proceso. Del mismo modo, Aleksić et al. (2020), resaltan la importancia de caracterizar previamente el efluente, ya que conocer su acidez y carga orgánica permite ajustar el pH y mejorar la eficiencia del proceso. En este estudio, trabajar a pH 6, permitió alcanzar los mayores porcentajes de remoción de DQO.

Se observó que una concentración al 2 % de sulfato de aluminio fue la más eficaz en la remoción de DQO, alcanzando un máximo de 80.07 %. Este resultado respalda la hipótesis de que una mayor concentración del coagulante incrementa la disponibilidad de especies activas como Al^{3+} , favoreciendo la neutralización de cargas y la formación de flóculos estables (Mortadi et al., 2025). De hecho, Ortiz et al. (2024) reportaron una remoción de solo 47.30 % utilizando una concentración del 1 %, pese a aplicar una dosis mayor, lo que demuestra que una mayor cantidad de coagulante no garantiza una coagulación efectiva si la concentración activa no es suficiente. En concordancia, en la presente investigación se observaron remociones inferiores al 50 % en los tratamientos T10, T11 y T22, los cuales emplearon concentraciones de 0.5 % y 1 %, evidenciando el efecto limitante de concentraciones bajas. Similarmente, Castro (2017), logró una reducción del 60.69 % utilizando también una concentración del 1 %, aunque combinada con lechada de cal, lo cual modificó el pH del medio hacia condiciones más favorables, lo que refuerza el rol

del pH en la eficiencia del tratamiento. Por otro lado, Ait-Hmane et al. (2024) evaluaron la coagulación química con sulfato de aluminio al 2 % en aguas superficiales impactadas por descargas de camal, logrando una eficiencia del 75.4 % en la remoción de DQO, resultado comparable al del presente estudio.

En el presente estudio, la dosis de 3 ml de coagulante al 2 % resultó ser la más efectiva. Sin embargo, Taípe & Paucar, (2024) utilizaron 2 g/l y obtuvieron solo un 39.7 % de remoción de DQO, mientras que Oré (2017), logró un 64.47 % con 5 g/l de dosis a un pH de 8. Estas diferencias dependen en gran medida por la composición del efluente, el ajuste del pH y las condiciones operativas aplicadas en cada tratamiento (Teo et al., 2023). Asimismo, Zamani et al. (2019), explica que en las aguas residuales de camal, el incremento de la dosis de coagulante no necesariamente mejora la remoción de contaminantes, debido a fenómenos como la saturación del sistema o la inversión de carga superficial, los cuales pueden reestabilizar las partículas coloidales, reduciendo la eficiencia del proceso (Zhang et al., 2021). Esto resalta la necesidad de determinar una dosis óptima específica para cada tipo de efluente.

Para validar la consistencia de los datos obtenidos, se realizó un análisis estadístico, obteniendo un coeficiente de variabilidad (CV) de 2.11817. Este valor se encuentra por debajo del 25%, límite aceptable para la aceptación de la variabilidad, lo que indica que los datos experimentales son confiables y válidos (Apaza, 2018).

En el anexo 10 (tabla 18) muestra el análisis estadístico de la interacción entre los tres factores pH (A), concentración de coagulante (B) y dosis de coagulante (C), se obtuvo un valor de $8.67e-16$, lo que indica una interacción altamente significativa entre los factores, este resultado sugiere que el tratamiento depende de la combinación conjunta de estos tres parámetros. En consecuencia, se procedió a realizar un análisis de los efectos simples mediante la prueba de Tukey con un nivel de significancia (α) de 0.05, para identificar las diferencias estadísticas entre los niveles de cada factor (Fernández, 2020).

4.2.1. Análisis estadístico

a) Efectos simples

El análisis para el factor pH presentó diferencias estadísticamente significativas al combinarse con los niveles de concentración de coagulante (b1, b2 y b3). Según el anexo 10 (tablas 19-21), la mejor combinación para la remoción de DQO se obtuvo con pH 6 (a1) y concentración de coagulante 1% (b2).

Para el caso del factor pH, en combinación con los niveles de dosis de dosis de coagulante (c1, c2 y c3), presentó diferencias estadísticamente significativas. De acuerdo con el anexo 10 (tablas 22-24), la combinación más efectiva fue pH 6 (a1) y dosis de coagulante 10 ml (c3).

Respecto al análisis estadístico de la concentración del coagulante presentó diferencias significativas al combinarse con los tres niveles de pH (a1, a2 y a3). De acuerdo con el anexo 10 (tablas 25-27), la combinación más efectiva para la remoción de DQO fue de concentración al 1% (b2) y pH 6 (a1).

Para el caso de la concentración del coagulante en combinación con los niveles de dosis (c1, c2 y c3), evidenciaron diferencias significativas. Según el anexo 10 (tablas 28-30), la combinación óptima fue concentración al 1% (b2) y dosis de 5 ml (c2).

En cuanto al efecto de la dosis del coagulante, el análisis estadístico reportó diferencias significativas al combinarse con los niveles de pH (a1, a2 y a3). Como se observa en el anexo 10 (tablas 31-33), la mejor combinación para la remoción de DQO fue dosis de 10 ml (c3) y pH 6 (a1).

Finalmente, se identificaron diferencias significativas al analizar la dosis del coagulante en combinación con los niveles de concentración (b1, b2 y b3). De acuerdo con el anexo 10 (tablas 34-36), la combinación más eficiente fue dosis de 5 ml (c2) con concentración de coagulante al 1% (b2).

Sobre el análisis estadístico de los efectos simples confirmó que los tres factores evaluados el pH, concentración y dosis de coagulante tienen un

impacto significativo sobre la remoción de la DQO mediante coagulación química, en el tratamiento de los efluentes del camal de Macusani.

b) Efectos principales

Según el anexo 10 (tabla 37), el análisis estadístico del factor pH evidenció diferencias significativas entre los tres niveles evaluados, con un nivel de significancia del 5%. La combinación óptima para la remoción de DQO se alcanzó con un pH de 6, como se muestra en la Figura 24.

Según el anexo 10 (tabla 38), el análisis estadístico del factor concentración de coagulante evidenció diferencias significativas entre los niveles evaluados, con un nivel de significancia del 5%. Los mayores porcentajes de remoción de DQO se registraron con concentraciones del 2%, como se muestra en la Figura 25.

Según el anexo 10 (tabla 39), el análisis estadístico del factor dosis de coagulante mostró diferencias significativas entre los tres niveles evaluados, con un nivel de significancia del 5%. Las dosis de 10 ml registraron el mejor desempeño en la remoción de DQO, como se muestra en la Figura 26.

c) Interacciones de efectos

Para el análisis estadístico de la interacción de efecto principal del pH y concentración de coagulante, según el anexo 10 (tabla 40) los resultados estadísticos evidencian diferencias significativas al 5% de significancia. La mejor combinación fue pH 6 y concentración de coagulante 1%, logrando una reducción del 78% de DQO.

Respecto a la interacción de concentración de coagulante y dosis de coagulante, según el anexo 10 (tabla 41) también se identificaron diferencias significativas al 5% de significancia, siendo la mejor combinación óptima de la concentración de coagulante al 1% y dosis de 5 ml, con una reducción del 75.03% de DQO.

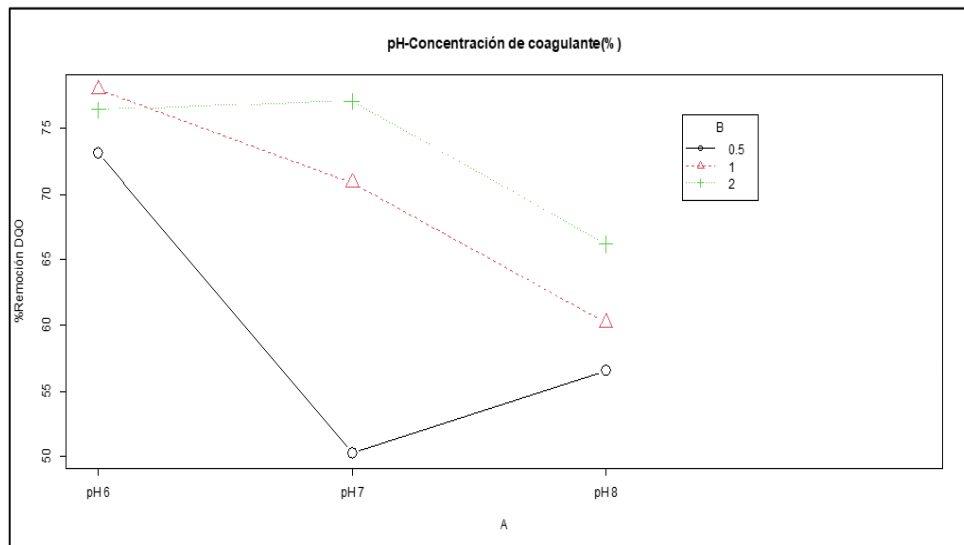
La interacción entre pH y dosis de coagulante, según el anexo 10 (tabla 42) mostró diferencias significativas, logrando la mejor combinación obtenida con pH 6 y dosis de 10 ml, alcanzando una reducción de 76.73% de DQO.

Finalmente, el análisis estadístico de la interacción de los tres factores (pH, concentración de coagulante y dosis de coagulante), presentado en el anexo 10 (tabla 43), evidenció diferencias altamente significativas, obteniendo la mejor combinación fue pH 6, concentración de coagulante 2% y dosis de 3 ml, logrando una remoción óptima de DQO del 80.07%.

A continuación, se presentan los gráficos de las interacciones de los factores pH, concentración y dosis de coagulantes.

Figura 24

Interacción de los factores pH – concentración de coagulante.

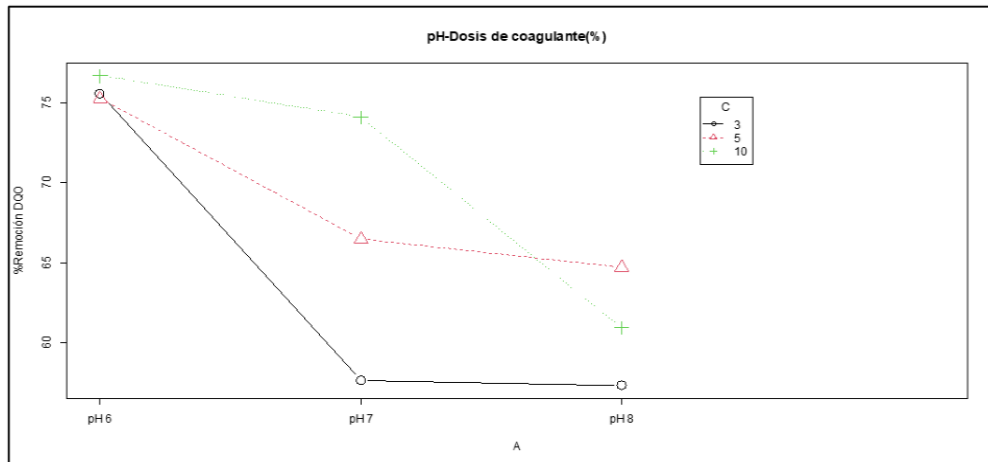


Nota. Elaboración propia.

En la Figura 24, se muestra la interacción del factor de pH en los tres niveles de concentración de coagulante ($b_1=0.5\%$, $b_2=1\%$ y $b_3=2\%$). Se visualiza que el efecto de pH varía según la concentración de coagulante, concluyendo que la combinación a_1 (pH 6) y b_2 (1% de coagulante) logra una remoción de DQO del 78%.

Figura 25

Interacción de los factores pH – dosis de coagulante.

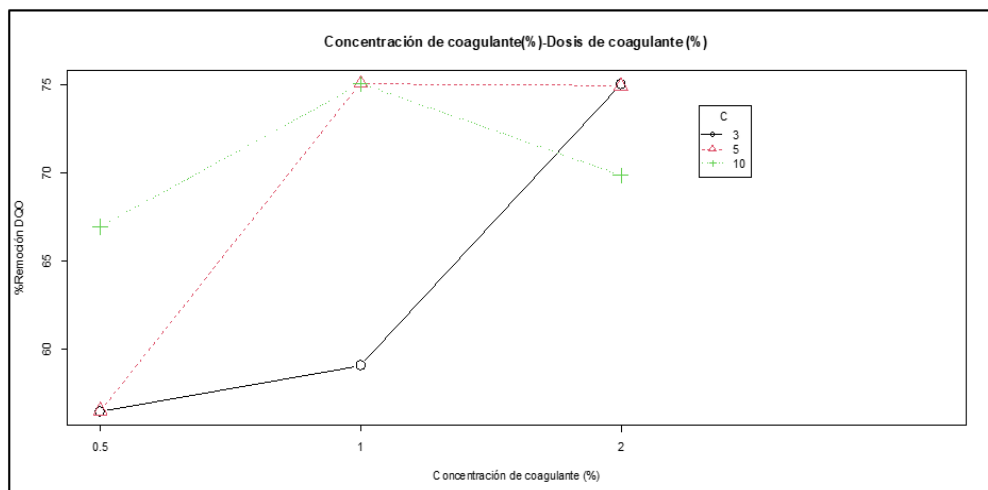


Nota. Elaboración propia.

En la Figura 25, se muestra la interacción entre el factor pH y los tres niveles de dosis de coagulante ($c_1 = 3$ ml, $c_2 = 5$ ml y $c_3 = 10$ ml). Se observa que el efecto del pH varía según la dosis de coagulante, concluyendo que la combinación a1 (pH 6) y c3 (10 ml de coagulante) logra una remoción de DQO del 76.73%.

Figura 26

Interacción de los factores concentración - dosis de coagulante.



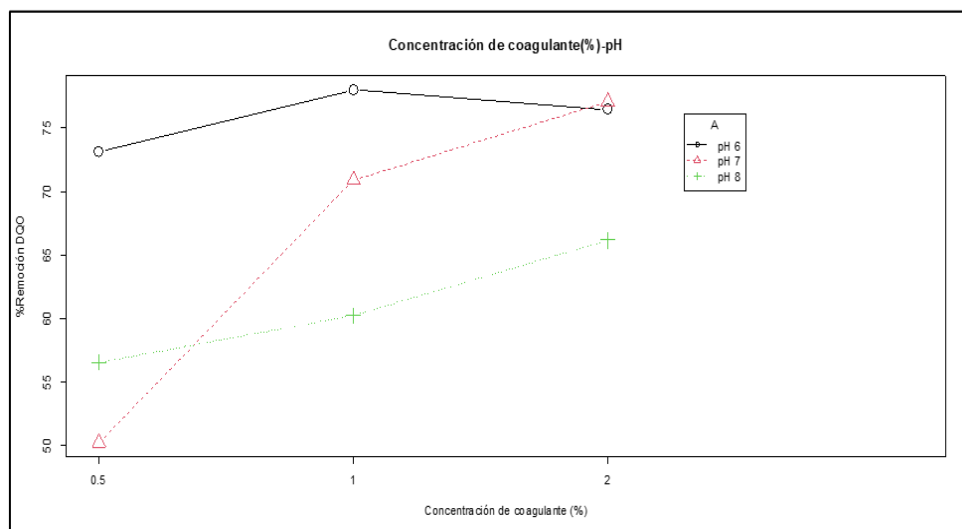
Nota. Elaboración propia.

En la Figura 26, se analiza la interacción entre la concentración de coagulante y los tres niveles de dosis de coagulante ($c_1 = 3$ ml, $c_2 = 5$ ml y $c_3 = 10$ ml). Se evidencia que el efecto de la concentración de coagulante depende de la

dosis aplicada, determinando que la combinación b2 (1% de coagulante) y c2 (5 ml de coagulante) permite alcanzar una remoción de DQO del 75.03%.

Figura 27

Interacción de los factores de Concentración de coagulante -pH.

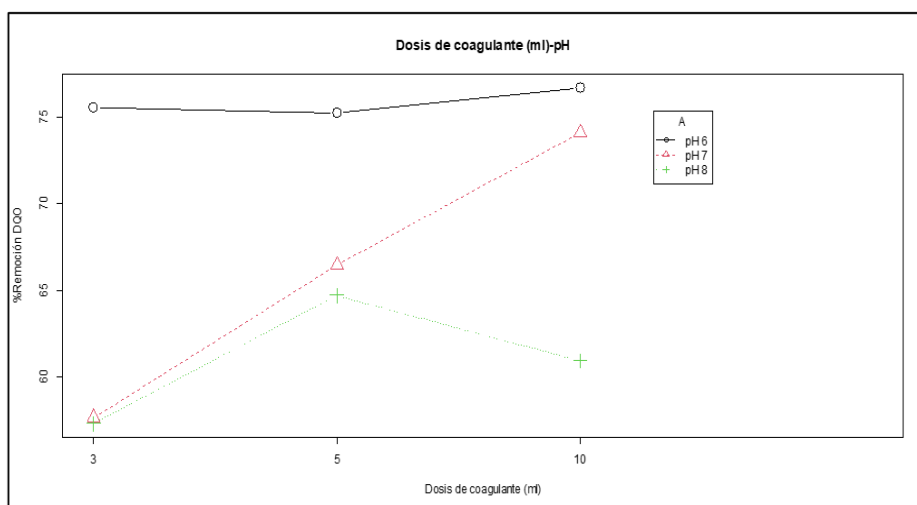


Nota. Elaboración propia.

En la Figura 27, se presenta la interacción entre la concentración de coagulante y los tres niveles de pH (a1 = 6, a2 = 7 y a3 = 8). Se concluye que la combinación b2 (1% de coagulante) y a1 (pH 6) logra una remoción de DQO del 78%, evidenciando que la concentración de coagulante influye en el tratamiento dependiendo del nivel de pH.

Figura 28

Interacción factores de Dosis de coagulante -pH.

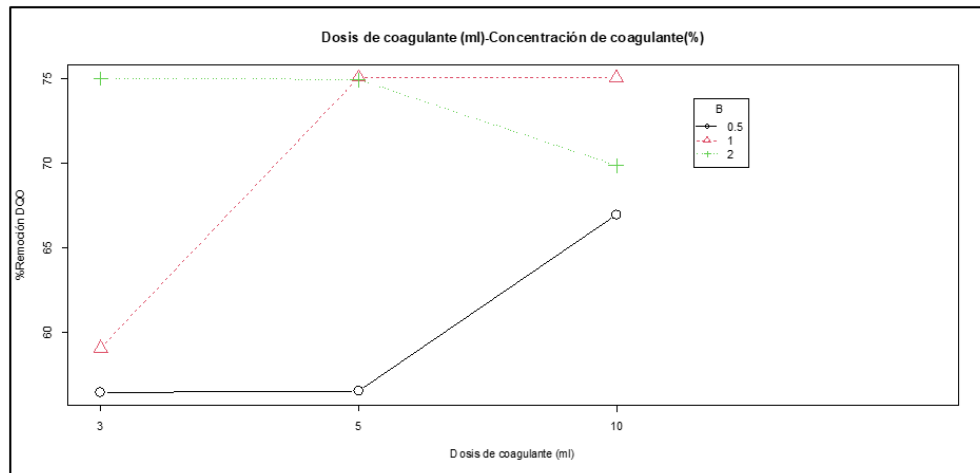


Nota. Elaboración propia.

En la Figura 28, se muestra la interacción entre la dosis de coagulante y los tres niveles de pH ($a_1 = 6$, $a_2 = 7$ y $a_3 = 8$). Se concluye que la combinación c_3 (10 ml de coagulante) y a_1 (pH 6) obtiene una remoción de DQO del 76.74%, demostrando que la dosis de coagulante influye significativamente en la eficiencia del proceso en función del pH.

Figura 29

Interacción dosis de coagulante -concentración de coagulante.



Nota. Elaboración propia.

Finalmente, en la Figura 29, se analiza la interacción entre la dosis de coagulante y los tres niveles de concentración de coagulante ($b_1 = 0.5\%$, $b_2 = 1\%$ y $b_3 = 2\%$). Se concluye que la combinación c_2 (5 ml de coagulante) y b_2 (1% de coagulante) permite alcanzar una remoción de DQO del 75.03%.

El análisis estadístico realizado permitió comprender con certeza el impacto individual y combinado de los factores pH, concentración y dosis de coagulante sobre la eficiencia de remoción de DQO en los efluentes del camal de Macusani, validando la hipótesis de que un equilibrio óptimo entre estos tres factores es esencial para obtener el máximo rendimiento del tratamiento de coagulación química. Los resultados indicaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) en los efectos de los tres factores analizados. En particular, el pH fue un factor crítico, alcanzando su mejor desempeño a pH 6, lo cual coincide con lo descrito por Zamani et al. (2019), quienes señalan que un pH 6 facilita la hidrólisis del sulfato de aluminio y la formación de especies activas como $Al(OH)_3$, esenciales para la neutralización de partículas

coloidales (Mortadi et al., 2025). En cuanto a la concentración del coagulante, aunque las mayores eficiencias se asociaron a concentraciones del 2 %, se observó que concentraciones del 1 % también ofrecieron buenos resultados en combinación con otros factores. Esto sugiere que, si bien una mayor concentración incrementa la disponibilidad de especies coagulantes, también es crucial optimizarla para evitar costos innecesarios y excesiva generación de lodos (Taibe & Paucar, 2024). Respecto a la dosis, se halló que 10 ml ofreció los mejores resultados individuales en términos de remoción de DQO. No obstante, se evidenció que dosis intermedias, como 5 ml, combinadas con concentraciones moderadas de coagulante (1 %), también logran eficiencias elevadas. Este hallazgo coincide con lo reportado por Zamani et al. (2019) y Oré, (2017), quienes advierten que dosis excesivas pueden inducir fenómenos de inversión de carga superficial y re estabilización de partículas, disminuyendo la eficacia del proceso.

La eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno (DQO) alcanzada se explica no solo por las condiciones químicas óptimas (pH 6, 2 % y 3 ml), sino también por acondicionamiento de parámetros operativos durante la prueba de jarras. Aunque no fueron factores experimentales, la agitación rápida y lenta, junto con un tiempo de sedimentación, fueron claves en la formación de flóculos eficientes. Como señalan El-taweel et al. (2023) y Sukmana et al. (2021), una mezcla rápida asegura el contacto inmediato entre el coagulante y las partículas, así como la mezcla lenta que favorece la formación y estabilización de los flóculos, demostrando que estos aspectos influyen de manera decisiva en el rendimiento del proceso.

4.3. Evaluación de lodos postcoagulación para la producción de biogás

Tabla 14

Características fisicoquímicas de lodos post coagulación.

| Parámetros | Unidad de medida | Valor |
|-------------------------|-------------------------|--------------|
| pH | Unidades de pH | 5.98 |
| Humedad | % | 30.52 |
| Conductividad eléctrica | mS/cm | 2.58 |

| | | |
|---------------------------|-------|-------|
| Materia Orgánica | % | 95.91 |
| Nitrógeno total | % | 42 |
| Sólidos volátiles | g/l | 53 |
| Sólidos fijos | g/l | 38 |
| Sólidos totales | g/l | 43 |
| Concentración de aluminio | mg/kg | 137 |

Nota. Elaboración propia.

En la tabla 14 muestra los resultados de la caracterización de los lodos generados durante el tratamiento por coagulación química más eficiente en la reducción de DQO. El lodo presentó un pH ácido de 5.98, contenido de humedad de 30.52%, conductividad eléctrica de 2.58 mS/cm, materia orgánica de 95.91%, nitrógeno total de 42 %, sólidos volátiles 53 g/l, sólidos fijos 38 g/L, sólidos totales 43 g/l y una concentración de aluminio 137 mg/kg.

La elevada concentración de materia orgánica con un valor de 95.91%, puede atribuirse a la sedimentación de partículas provenientes de residuos como sangre, contenido ruminal y componentes orgánicos, lo cual resulta favorable para su aprovechamiento en procesos biológicos como la digestión anaerobia, según lo señalado por (Adou et al., 2020). Además, los sólidos volátiles representan más del 50% de los sólidos totales, lo que, de acuerdo con Sánchez et al. (2023), indica una alta fracción biodegradable útil para la producción de biogás.

Sin embargo, el contenido de nitrógeno total con 42% podría suponer un riesgo en el proceso de digestión anaerobia, ya que podría derivar en acumulación de amoníaco, inhibiendo la actividad microbiana (Chernysh et al., 2024). Por consiguiente, Rhee et al. (2021), señalan que la relación carbono/nitrógeno (C/N) óptima para este tipo de procesos debe encontrarse entre 20 y 35. En este estudio, se sugiere que la adición de sustratos ricos en carbono, como estiércol bovino, sería necesaria para ajustar dicha relación y evitar la inhibición amoniacal, como también lo recomienda Tjutju et al. (2024).

Por otro lado, el valor de pH ácido de 5.98 puede atribuirse a la aplicación de sulfato de aluminio como coagulante, este resultado coincide con lo reportado por Latifi et al. (2019) quienes obtuvieron un pH de 6.2 en lodos tratados con alumbre mediante coagulación química. La disminución del pH se debe al proceso de hidrólisis del sulfato de aluminio, durante el cual se liberan iones hidrógeno H⁺, a medida que se incrementa la concentración del coagulante, la acidez del medio aumenta, generando una reducción progresiva del pH (Mortadi et al., 2025). Con respecto a la presencia de aluminio con un valor de 137 mg/kg, esta concentración se encuentra dentro del rango reportado por Ejimofor et al. (2021), quienes identificaron concentraciones entre 15.41 y 1194 mg/kg en lodos generados con sulfato de aluminio. No obstante, la acumulación de aluminio puede representar un factor inhibitor en la digestión anaerobia si no se controla adecuadamente (Adou et al., 2020).

Finalmente, Sánchez et al. (2023) proponen que la codigestión con materiales orgánicos complementarios, como estiércol de animal pueden neutralizar y mitigar los efectos negativos asociados a la composición química de los lodos postcoagulación.

Tras la preparación y adecuación de biodigestores tipo batch, se colocó lodos post coagulación (LPC) y el estiércol de bovino (ESB) según los tratamientos descritos en la metodología. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la siguiente tabla 15.

Tabla 15

Producción de biogás mediante el método de desplazamiento.

| Tratamientos | Relación LPC: ESB | Volumen inicial (ml) | Volumen total desplazado (ml) | Diferencia (ml) | Rendimiento (%) |
|----------------|-------------------------|----------------------------|-------------------------------------|--------------------|--------------------|
| T ₀ | - | 400 | 0 | 0 | - |
| T ₁ | 1:2 | 400 | 86 | 314 | 21.5 |
| T ₂ | 2:3 | 400 | 154 | 246 | 38.5 |

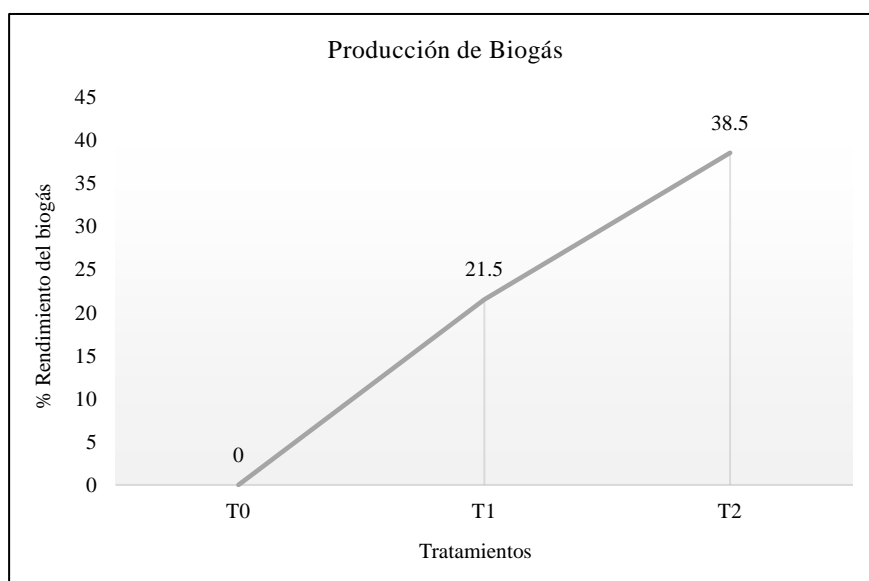
Nota: LPC: Lodos post coagulación; ESB: Estiércol de bovino.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la tabla 16 evidencian la producción de biogás mediante la medición por método de desplazamiento. En el tratamiento T1 (relación 1:2; 100 g de LPC + 200 g de estiércol) desplazó un volumen total de 86 ml tras 25 días de proceso. Finalmente, el tratamiento T2 (relación 2:3; 200 g de LPC + 300 g de estiércol) mostró el mayor desplazamiento de 154 ml, indicando una mayor producción de biogás en comparación con los demás tratamientos.

Figura 30

Rendimiento total de producción de biogás.



Nota. Elaboración propia.

En la Figura 30 se presentan los rendimientos totales de biogás generados durante el proceso de digestión anaerobia. El tratamiento control (T0) no produjo biogás, mientras que los tratamientos con mezcla de lodo postcoagulación (LPC) y estiércol mostraron producciones diferenciadas: T1 (relación 1:2) alcanzó un valor de 21.5 % y T2 (relación 2:3) obtuvo el mayor rendimiento con un 38.5 %. Estos resultados reflejan que el lodo aportado como sustrato no son suficientemente representativos como para afirmar de forma concluyente que el LPC es una fuente energética altamente eficiente.

Comparando con estudios previos, la producción fue considerablemente menor, en relación a lo reportado por Ezemagu et al. (2020) quienes lograron una producción de 336 ml de biogás utilizando solo LPC y hasta 631 ml al realizar co-digestión con estiércol bovino, bajo condiciones controladas de temperatura

mesofílica en un rango de 30°C a 35°C y con un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 40 días. En contraste, el presente estudio se desarrolló a temperatura 30 °C, con un TRH de solo 25 días, y sin un sistema de mezcla activo. Estas diferencias son críticas, ya que la digestión anaerobia es un proceso biológico altamente sensible a factores como temperatura, homogeneidad del sustrato y tiempo de permanencia en el reactor (Castillo-Leon et al., 2024).

Asimismo, Latifi et al. (2019) obtuvieron 0.631 m³ de biogás en un biodigestor piloto de 20 litros, utilizando lodos de matadero similares a los de este estudio, este rendimiento superior se atribuye al control de variables críticas como pH, temperatura de 34°C y un TRH de 40 días, condiciones que optimizaron la actividad de las arqueas metanogénicas (Agabo-García et al., 2022).

La composición química del lodo post coagulación fue un factor crítico, que presentó altos niveles de materia orgánica y nitrógeno total, que en teoría favorecen la producción de biogás (Sabooi & Hosseini, 2025), la baja relación C/N y la presencia de aluminio residual derivado del uso de sulfato de aluminio en la coagulación química podrían haber actuado como inhibidores microbiológicos. Sobre ello, Rhee et al. (2021), quienes obtuvieron una C/N de 17.4, demostró que una C/N inferior a 20 provoca la acumulación de amoníaco, mientras que presencia de metales como el aluminio afectan negativamente la actividad de las bacterias metanogénicas (Chowdhury et al., 2022).

En este contexto, si bien el resultado del aprovechamiento de lodos post coagulación fue de 38.5 %, continúa siendo modesto frente a lo reportado en la literatura, esto indica que el LPC posee un potencial teórico de valorización energética, pero que su aprovechamiento efectivo dependerá de la optimización de factores clave; mayor TRH, control de temperatura, adecuada proporción sustrato-inóculo y reducción o neutralización de compuestos inhibidores (Rhee et al., 2021).

Finalmente, como mencionan Latifi et al. (2019) la codigestión con residuos ricos en carbono mejora la relación C/N, diluye compuestos tóxicos y estabiliza el proceso. Ante ello, se recomienda optimizar esta combinación y explorar

pretratamientos del LPC para aumentar su biodegradabilidad y reducir la inhibición por metales pesados (Ojeda, 2019).

Los resultados de la caracterización del biogás obtenido en los tratamientos con lodos post coagulación (LPC) y estiércol de bovino (ESB) se presentan en la tabla 16.

Tabla 16

Caracterización de biogás.

| Parámetro | Unidad de medida | Rango de medición | T0 | T1 | T2 |
|---|-------------------------|--------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Metano (CH ₄) | % vol | 0-100 | 0 | 24 | 40 |
| Dióxido de carbono (CO ₂) | % vol | 0-100 | 0 | 12 | 22 |
| Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S) | ppm | 0-2000 | 0 | 18 | 19 |
| Oxígeno (O ₂) | % vol | 0.0-30.0 | 0 | 3 | 5 |

Nota. Elaboración propia.

La Tabla 16 presenta la caracterización del biogás obtenido a partir de la digestión anaerobia de lodos postcoagulación (LPC) en combinación con estiércol bovino (ESB). Los tratamientos evaluados fueron T0 (control), T1 (1:2) y T2 (2:3). Como era de esperarse, el tratamiento T0 no generó biogás, al no contar con sustrato biodegradable. En cambio, T1 y T2 produjeron biogás con composiciones diferenciadas, siendo T2 el de mayor rendimiento.

El contenido de metano fue de 24 % vol en T1 y 40 % vol en T2, lo cual refleja una mejora en la producción energética al presentar mayor proporción de LPC. No obstante, estos valores resultan inferiores al reportado por Cuba (2019) quien obtuvo hasta un 66 % de metano en una producción total de 1.9 litros de biogás, resultado atribuido a la incorporación de carbonato de calcio como aditivo, lo que favoreció la estabilidad del pH y optimizó la actividad de las arqueas metanogénicas. De manera similar, Ojeda (2019) registró un volumen de 3.33 litros de metano, resultado superior relacionado con un mayor tiempo de

retención y el uso de un sistema de digestión anaerobia más eficiente. Estos contrastes resaltan la importancia de ajustar las condiciones operativas como la relación carbono/nitrógeno, el pH, la temperatura y el tiempo de retención pueden estar limitando la actividad metanogénica (Tjutju et al., 2024).

Respecto al dióxido de carbono (CO_2), se obtuvo en el T1 y T2 con valores de 12 %vol y 22 %vol, respectivamente, este compuesto está directamente relacionado con la actividad microbiana durante la fase acidogénica de la digestión anaerobia, en la que se produce CO_2 como subproducto de la descomposición de compuestos orgánicos (Saboohi & Hosseini, 2025).

En cuanto al sulfuro de hidrógeno (H_2S), se registraron concentraciones de 18 ppm en T1 y 19 ppm en T2, niveles que, si bien son valores moderados, exceden los valores óptimos recomendados para un biogás de calidad energética (<10 ppm) debido a su carácter corrosivo y tóxico (Mortadi et al., 2025). Según Adou et al., (2020) este gas se genera por la reducción biológica de sulfatos presentes en el sustrato, especialmente en residuos ricos en compuestos nitrogenados y proteicos, como los lodos postcoagulación (LPC). Además Saboohi & Hosseini, (2025), indican que la adición controlada de ciertos compuestos orgánicos durante la digestión anaerobia puede no solo incrementar la producción de metano, sino también reducir significativamente la concentración de gases indeseables como el H_2S , mejorando así la calidad y estabilidad del biogás producido.

Por otro lado, se detectaron niveles de oxígeno (O_2) del 3 %vol en T1 y 5 %vol en T2, lo cual es problemático en condiciones anaerobias, ya que puede inhibir la actividad de las arqueas metanogénicas responsables de la producción de metano; esta presencia de O_2 podría atribuirse a filtraciones de aire durante la alimentación del reactor o fallos en el sellado del sistema, lo que también explicaría una reducción en la eficiencia global del proceso (Tjutju et al., 2024).

Las limitaciones que se presentaron en el presente estudio fueron, en relación al tratamiento por coagulación química, no se estudió en la estacionalidad el tiempo de estiaje y de avenida sobre el flujo y la composición del mismo. La caracterización de los efluentes del camal, se tuvieron que enviar a un laboratorio con la capacidad de determinación de los parámetros establecidos.

Respecto al aprovechamiento de lodos post coagulación para la obtención de biogás, la limitante que se identificó es que no se realizó la caracterización de LPC más el estiércol, sabiendo que solo se hizo una caracterización al lodo post coagulación. Sobre los sustratos, el estiércol no se hizo un pretratamiento, ni el análisis microbiológico, como lo establecen algunas investigaciones, así mejorar el rendimiento y conocer los microorganismos que interactúan en la digestión anaeróbica. Además, los biodigestores de tipo batch no se contempló una adecuada capacidad el cual afectó la producción de biogás.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Se concluye que el efluente de camal Macusani presenta una DQO de 3960 mg/l y DBO₅ es 1649 mg/l, pH de 6.25, una temperatura de 18.2°C, sólidos suspendidos totales (SST) con 990 mg/l, aceites y grasas de 32 mg/l, fósforo total de 112 mg/l y nitrógeno total de 60 mg/l.

Mediante el proceso de coagulación química con sulfato de aluminio, se logró una máxima remoción de materia orgánica de un 80,07% DQO, bajo una condición de pH 6, con una concentración de coagulante al 2% y una dosis de 3 ml.

La producción de biogás mediante digestión anaerobia de lodos generados en el proceso de coagulación química permitió su aprovechamiento, alcanzando un rendimiento máximo del 38,5% en el tratamiento T2 (2:3), con un volumen acumulado de 154 ml y la composición del biogás obtenido fue de 40% vol de metano (CH₄), 22% vol de dióxido de carbono (CO₂), 19 ppm de sulfuro de hidrógeno (H₂S) y 5% vol de oxígeno (O₂).

5.2. Recomendaciones

- Recolectar las muestras considerando la estacionalidad, ya que las variaciones climáticas pueden alterar la calidad del efluente, esta variabilidad influye en la carga contaminante y, por tanto, en la eficiencia del tratamiento.
- Considerar más parámetros para determinar las eficiencias de tratamiento e implementar un sistema de tratamiento continuo que combine la coagulación química con un proceso biológico, con el fin de mejorar la eficiencia en la eliminación de materia orgánica y nutrientes presentes en los efluentes del camal.
- Realizar tratamientos con coagulantes naturales para lograr mejores características fisicoquímicas de lodos post coagulación.
- Antes de iniciar la digestión anaerobia, se recomienda caracterizar tanto el sustrato como el inóculo, así como la mezcla de ambos, para garantizar condiciones óptimas para la producción de biogás.
- Evaluar la codigestión con otros materiales ricos en carbono para lograr el equilibrio de la relación de C/N.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abujazar, M. S. S., Karaağaç, S. U., Abu Amr, S. S., Alazaiza, M. Y. D., & Bashir, M. J. (2022). Recent advancement in the application of hybrid coagulants in coagulation-flocculation of wastewater: A review. *Journal of Cleaner Production*, 345(November 2021), 131133. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131133>
- Acosta-Bastar, A. L., & Hernández-Barajas, J. R. (2021). Dinámica de fluidos computacional del proceso de coagulación-floculación empleando almidón de malanga como floculante para potabilización de agua. *Revista Mesoamericana de Investigación*, 1, 40–46. <https://rmi.unach.mx/index.php/revistacientifica/article/view/10>
- Acosta-Espino, G. J., Alva-Diaz, L. E., & Domínguez-Genovez, E. M. (2022). Prunus persica as a complement to Aluminum sulfate in the removal of turbidity present in surface waters of the Moche River - Trujillo, 2019. *Proceedings of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology, 2022-July*. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.738>
- Adebayo, I. O., Olukowi, O. O., Zhiyuan, Z., & Zhang, Y. (2021). Comparisons of coagulation efficiency of conventional aluminium sulfate and enhanced composite aluminium sulfate/polydimethyldiallylammonium chloride coagulants coupled with rapid sand filtration. *Journal of Water Process Engineering*, 44, 102322. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102322>
- Adou, K. E., Alle, O. A., Kouakou, A. R., Adouby, K., Drogui, P., & Tyagi, R. D. (2020). Anaerobic mono-digestion of wastewater from the main slaughterhouse in Yamoussoukro (Côte d'Ivoire): Evaluation of biogas potential and removal of organic pollution. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(3), 103770. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103770>
- Agabo-García, C., Solera, R., & Perez, M. (2022). Anaerobic sequential batch reactor for co-digestion of slaughterhouse residues: Wastewater and activated sludge. *Energy*, 255, 124575. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124575>
- Ait-Hmane, A., Mandi, L., Ouazzani, N., Ouhammou, M., El Moussaoui, T., Ait hammou, H., & Assabbane, A. (2024). Treatment of olive mill wastewater by coagulation–flocculation with aluminum sulphate / aluminum polyhydroxichlorosulfate and effect on phytotoxicity. *Desalination and Water Treatment*, 318, 100340. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100340>

- Aleksić, N., Nešović, A., Šušteršič, V., Gordić, D., & Milovanović, D. (2020). Slaughterhouse water consumption and wastewater characteristics in the meat processing industry in Serbia. *Desalination and Water Treatment*, *190*, 98–112. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25745>
- Alfonso-Muniozguren, P., Cotillas, S., Boaventura, R. A. R., Moreira, F. C., Lee, J., & Vilar, V. J. P. (2020). Single and combined electrochemical oxidation driven processes for the treatment of slaughterhouse wastewater. *Journal of Cleaner Production*, *270*, 121858. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121858>
- AlJaberi, F. Y., Alardhi, S. M., Ahmed, S. A., Salman, A. D., Juzsakova, T., Cretescu, I., Le, P., Chung, W. J., Chang, S. W., & Nguyen, D. D. (2022). Can electrocoagulation technology be integrated with wastewater treatment systems to improve treatment efficiency? *Environmental Research*, *214*(February), 113890. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113890>
- Apaza, H. (2018). *Sistema combinado electrocoagulación-filtro biológico para la remoción de carga orgánica de los efluentes lácteos* [Universidad Nacional de la Molina]. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/3395/apaza-aquino-hugo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Arab, M., Akbarian, H., Gheibi, M., Akrami, M., Fathollahi-Fard, A. M., Hajiaghaei-Keshteli, M., & Tian, G. (2022). A soft-sensor for sustainable operation of coagulation and flocculation units. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, *115*, 105315. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105315>
- Araujo, L. E., Campos, L. J., & Chavarria, M. A. (2021). *Tratamiento de agua residual del camal conchucos mediante coagulación química seguido de electrocoagulación* [Universidad Nacional del Callao]. <http://hdl.handle.net/20.500.12952/6068>
- Arce-Villalobos, K., Sánchez-Gutiérrez, R., Centeno-Morales, J., Marín-León, R., & Rodríguez-Rodríguez, J. A. (2022). Calidad del agua superficial y presiones socioambientales en la microcuenca alta del río Poás. *Uniciencia*, *36*(1), 1–23. <https://doi.org/10.15359/ru.36-1.24>
- Arias, J. L., & Covinos, M. (2021). *Diseño y metodología de la investigación* (Enfoques Consulting EIRL (ed.)). https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w26022w/Arias_S2.pdf
- Azabache, Y., Murrieta, E., García, P., Ayala, M., Caceres, G., & Garcia, M. (2020). Treatment of residual water from a slaughterhouse: Efficiency of the coagulation -

- flocculation process. *Agroindustrial Science*, 10(1), 23–27.
<https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/agroindscience/article/view/2854>
- Azis, A., Basheer, F., Sengar, S., Irfanullah, Khan, S. U., & Farooqi, I. H. (2019). Tecnologías de tratamiento biológico de aguas residuales (anaeróbico-aeróbico) para la descarga segura de aguas residuales tratadas de matadero y procesamiento de carne. *Science of The Total Environment*, 686, 681–708.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.295>
- Aziz, A., Basheer, F., Sengar, A., Irfanullah, Khan, S. U., & Farooqi, I. H. (2019). Biological wastewater treatment (anaerobic-aerobic) technologies for safe discharge of treated slaughterhouse and meat processing wastewater. *Science of The Total Environment*, 686, 681–708. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.295>
- Baker, B. R., Mohamed, R., Al-Gheethi, A., & Aziz, H. A. (2021). Advanced technologies for poultry slaughterhouse wastewater treatment: A systematic review. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 42(6), 880–899.
<https://doi.org/10.1080/01932691.2020.1721007>
- Ballou, I., Kounbach, S., Naja, J., Bakher, Z. E., Laraki, K., Raibi, F., Saadi, R., & Kholtei, S. (2022). A new approach of aluminum extraction from drinking water treatment sludge using ammonium sulfate roasting process. *Minerals Engineering*, 189(March), 107859. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107859>
- Barrena, M., Gamarra, O., Milla, M., Fellenberg, T., & Ordinola, C. (2017). Optimización de la producción de biogas a escala de laboratorio a partir de estiércol de bovino, lactosuero y totora (*Scirpus californicus*). *INDES Revista de Investigación Para El Desarrollo Sustentable*, 3(2), 60. <https://doi.org/10.25127/indes.201502.007>
- Beltrán, L. C., & Lozano, L. N. (2023). *Caracterización de sintomatología en la exposición de riesgo químico, en planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en una industria bananera en la ciudad de Santa Marta* [Universidad Santo Tomás]. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/49976/2023BeltranLaura.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Benakcha, M., & Masmoudi, T. (2024). Effect of adding biochar from prickly pear skin to aluminium sulphate to improve the coagulation-flocculation process during the elimination of humic substances present in the Laghrous drainage canal Water, Zab El-gharbi region (SE Algeria). *Desalination and Water Treatment*, 317, 100141.
<https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100141>
- Bhunja, S., Bhowmik, A., & Mukherjee, J. (2022). Waste management of rural

- slaughterhouses in developing countries. In *Advanced Organic Waste Management* (pp. 425–449). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85792-5.00019-8>
- Binnie, C., Kimber, M., & Thomas, H. (2017). Overview of water treatment. In *Basic Water Treatment* (pp. 27–44). ICE Publishing. <https://doi.org/10.1680/bwtse.63341.027>
- Bluegold. (2020). *Comparativa de membranas para tratamiento de aguas*. <https://www.bluegold.es/es/comparativa-de-membranas-para-el-tratamiento-de-aguas/>
- Bogéa, N., Braga, R. M., & Andrade, M. (2022). Avaliação dos parâmetros físico-químicos de uma estação de tratamento de efluentes de um abatedouro frigorífico em São Luís – MA. *Research, Society and Development*, 11(9), 1–13. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i9.32056>
- Borja, D., Salazar Llangarí, K., & Brito Moina, H. (2019). Cuantificación de efluentes de aguas residuales del Camal Frigorífico Riobamba. *Ciencia Digital*, 3(2), 783–794. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v3i2.497>
- Bouchareb, N., Chouaib, R. A., Meriem, L., Abdelaziz, B., Salah, K., Sara, B., & Mohamed, C. (2025). Monitoring water quality in Beni Haroun Dam Northeastern Algeria: Application of Water Quality Index (WQI), Pollution Index (PI), and statistical analyses. *Desalination and Water Treatment*, 323, 101267. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2025.101267>
- Brichi, L., Valani, G. P., Lyra, G. P., Gomes, T. M., & Rossi, F. (2025). Slaughterhouse effluents and soil quality: A review. *Green Technologies and Sustainability*, 3(4), 100207. <https://doi.org/10.1016/j.grets.2025.100207>
- Casanovas, G., Della, F., Reymundo, F., & Serafini, R. (2019). *Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores*. <https://www.fao.org/publications/card/es/c/CA5082ES/>
- Castillo-Leon, N. Y., Tarazona-Romero, B. E., Gamarra, M. E. C., Acosta-Cardenas, O. A., Quizena-Fernandez, Y. P., & Alarcon-Guerrero, M. Y. (2024). Evaluation of the anaerobic digestion process for low and micro-scale biogas production: a review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1299(1), 012008. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1299/1/012008>
- Castro, K. (2024). *Evaluación de la cantidad y calidad de biogás con presencia de residuos de clortetraciclina en estiércol porcino* [Universidad Nacional de Moquegua]. <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/renati/1042650?mode=full>

- Castro, M. E. (2017). *Disminución de la carga orgánica del efluente del camal municipal el Porvenir mediante el tratamiento con sulfato de aluminio al 1 %* [Universidad César Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/22475>
- Charapaqui, J. (2019). *Dosificación de coagulantes y floculantes para la remoción de sedimentos del agua en el embalse Cuchoquesera, Ayacucho* [Universidad Nacional de la Molina]. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/4158/charapaqui-ancasi-juan.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Chernysh, Y., Chubur, V., & Roubík, H. (2024). Environmental Aspects of Biogas Production. In *Biogas Plants* (pp. 155–177). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119863946.ch8>
- Choudhury, A. R., Singh, N., Kulkarni, V. V., Vishal, Gupta, A., Fernandes, C. J., Sahoo, S., Palani, S. G., & Chakraborty, S. (2024). A comprehensive review of slaughterhouse wastewater treatment and concomitant resource recovery. In *Development in Wastewater Treatment Research and Processes* (pp. 385–418). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13884-3.00002-0>
- Chowdhury, M. W., Nabi, M. N., Arefin, M. A., Rashid, F., Islam, M. T., Gudimetla, P., & Muyeen, S. M. (2022). Recycling slaughterhouse wastes into potential energy and hydrogen sources: An approach for the future sustainable energy. *Bioresource Technology Reports*, 19(February), 101133. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101133>
- Concepción, H. G., Rascón, J., Gómez, K. J. L., Trujillo, F. Z., & Paredes, D. (2021). Eficiencia de la remoción de materia orgánica mediante electrocoagulación para tratar aguas residuales procedentes de mataderos. *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*, 5(2), 1–8. <https://doi.org/10.25127/aps.20212.763>
- Coox, N. N., Briones, G. A., & Mosquera, A. (2022). Evaluación de la eficacia de coagulantes sintéticos y naturales en el tratamiento de aguas residuales producidas en la producción de harina de pescado. *Publicaciones En Ciencias y Tecnología*, 16(2), 54–68. <https://doi.org/https://doi.org/10.5281/zenodo.6993155>
- Córdoba, V. E. (2016). *Estudio de la cinética de la digestión anaeróbica de residuos orgánicos y agroindustriales* [Universidad Nacional de San Martín]. https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/84167/CONICET_Digital_Nro.92ad98c9-303f-4735-b493-3e4ad6764bd1_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Córdova, E. A., & Caján, J. W. (2019). *Aplicación de sulfato de aluminio y tuna (Opuntia*

- ficus-indica*) para la remoción de materia orgánica y turbidez de las aguas residuales del camal municipal Tumán 2018 [Universidad Cesar Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/38710>
- Corrales, L. C., Santamaria, Y. N., Luccioli, D. A., & Castañeda, M. A. (2021). Evaluación de la calidad del agua de la vereda río Suárez de puente nacional, Santander. *Nova*, 19(37), 79–98. <https://doi.org/10.22490/24629448.5497>
- Costa, L. R. de C., & Fioravante, I. F. (2024). Evaluation the efficiency of individual organic coagulants and associated with aluminum sulfate in the removal of colloidal substances from Rio Doce, Minas Gerais, Brazil. *Cleaner Chemical Engineering*, 10, 100134. <https://doi.org/10.1016/j.clce.2024.100134>
- Cuba, I. B. (2019). *Generación del gas metano por biodigestión anaeróbica a partir de los lodos del tanque imhoff, de la planta de tratamiento de aguas residuales, provincia de Lampa - Puno* [Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez]. <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/2895762>
- Das, P. P., Sharma, M., & Purkait, M. K. (2022). Recent progress on electrocoagulation process for wastewater treatment: A review. *Separation and Purification Technology*, 292(April), 121058. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121058>
- Dayarathne, H. N. ., Angove, M. J., Aryal, R., Abuel-Naga, H., & Mainali, B. (2021). Removal of natural organic matter from source water: Review on coagulants, dual coagulation, alternative coagulants, and mechanisms. *Journal of Water Process Engineering*, 40, 101820. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101820>
- Djonga, W. G., Noubissié, E., & Noumi, G. B. (2019). Discoloration test of a slaughterhouse effluent by adsorption on two adsorbents produced from sawdust of *Khaya senegalensis* and *Pinus* sp. *Results in Engineering*, 4, 100068. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2019.100068>
- Djonga, W. G., Noubissié, E., & Noumi, G. B. (2021). Removal of nitrogen, phosphate and carbon loads from slaughterhouse effluent by adsorption on an adsorbent based on ayous sawdust (*Triplochyton scleroxylon*). *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 4, 100120. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100120>
- Dos Santos-Pereira, A. K., Teixeira, K. C., Pereira, D. H., & Cavallini, G. S. (2024). A critical review on slaughterhouse wastewater: Treatment methods and reuse possibilities. *Journal of Water Process Engineering*, 58, 104819. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.104819>

- Ejimofofor, M. I., Ezemagu, I. G., & Menkiti, M. C. (2020). Biogas production using coagulation sludge obtained from paint wastewater decontamination: Characterization and anaerobic digestion kinetics". *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 3(September), 100024. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2020.100024>
- Ejimofofor, M. I., Ezemagu, I. G., & Menkiti, M. C. (2021). Physiochemical, Instrumental and thermal characterization of the post coagulation sludge from paint industrial wastewater treatment. *South African Journal of Chemical Engineering*, 37(January), 150–160. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2021.05.008>
- El-taweel, R. M., Mohamed, N., Alrefaey, K. A., Husien, S., Abdel-Aziz, A. B., Salim, A. I., Mostafa, N. G., Said, L. A., Fahim, I. S., & Radwan, A. G. (2023). A review of coagulation explaining its definition, mechanism, coagulant types, and optimization models; RSM, and ANN. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 6, 100358. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2023.100358>
- Escalona-Domenech, R. Y., Infante-Mata, D. M., García-Alfaro, J. R., Ramírez-Marcial, N., Ortiz-Arrona, C. I., & Barba, E. (2022). Evaluación de la calidad del agua y de la ribera en la cuenca del río Margaritas, Chiapas, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 38, 37–56. <https://doi.org/10.20937/RICA.54092>
- Euroinnova. (2023). *¿Qué es un matadero?* Euroinnova Business School S.L. <https://www.euroinnova.com/blog/que-es-un-matadero>
- Ezemagu, I. G., Ejimofofor, M. I., & Menkiti, M. C. (2020). Thermodynamic studies of anaerobic digestion of post coagulation sludge from petroleum produced water and cow dung. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 3(May), 100037. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2020.100037>
- Fernández, S. (2020). *Diseño de experimentos: Diseño factorial*. https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/339723/TFM_Fernandez_Bao_Sheila.pdf
- FLOWEN. (2021). *Planta de tratamiento de aguas residuales en matadero y frigorífico*. <https://flowen.com.pe/planta-de-tratamiento-de-aguas-residuales-en-matadero-y-frigorifico/>
- García, A. Z., & Zevallos, K. M. (2021). *Optimización del proceso coagulación-floculación usando cloruro férrico y fosfato para la reducción de contaminantes del agua residual del camal Conchucos S.A., Lima* [Universidad Nacional del Callao]. <http://hdl.handle.net/20.500.12952/6201>

- Gnowe, W. D., Noubissié, E., & Noumi, G. B. (2020). Influence of time and oxygenation on the degradation of organic matter, nitrogen and phosphates during the biological treatment of slaughterhouse effluent. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2, 100048. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2020.100048>
- Gronerth, M. (2017). *Tratamiento de aguas residuales en el camal de Ahuashiyacu* [Universidad Nacional de San Martín]. <http://hdl.handle.net/11458/2578>
- Haddaji, C., Ennaciri, K., Driouich, A., Digua, K., & Souabi, S. (2022). Optimization of the coagulation-flocculation process for vegetable oil refinery wastewater using a full factorial design. *Process Safety and Environmental Protection*, 160, 803–816. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.02.068>
- Hernandez-Alvarez, U., Pinedo-Hernandez, J., Paternina-Urbe, R., & Marrugo-Negrete, J. L. (2021). Evaluación de calidad del agua en la quebrada Jui, afluente del río Sinú, Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 24(1), 1–10. <https://doi.org/10.31910/rudca.v24.n1.2021.1678>
- Hidroagua. (2021). *Ultrafiltración*. <https://www.hidroagua.com.mx/ultrafiltracion.html>
- Hilares, R., Atoche-Garay, D. F., Pagaza, D. A., Ahmed, M. A., Andrade, G. J., & Santos, J. C. (2021). Promising physicochemical technologies for poultry slaughterhouse wastewater treatment: A critical review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(2), 105174. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105174>
- Hsien, C., Low, J. S. C., Chung, S. Y., & Tan, D. Z. L. (2019). Quality-based water and wastewater classification for waste-to-resource matching. *Resources, Conservation and Recycling*, 151, 104477. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104477>
- Huamán, D. G. (2023). *Optimización del sulfato de aluminio para la remoción de la dco y dbo en aguas residuales domesticas de la ptar maria reich, miraflores, 2022* [Universidad Nacional Federico Villareal]. https://repositorio.unfv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.13084/7908/UNFV_FIGA_E_Huaman_Guzman_Diana_Titulo_profesional_2023.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Huerta, K. (2022). *El coagulante en el tratamiento de aguas*. CONTYQUIN. <https://contyquim.com/blog/el-coagulante-en-el-tratamiento-de-aguas>
- Inchuanaco, H. (2024). *Prueba de eficiencia en laboratorio de biofiltro de lombrices para mejora de parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos de aguas residuales de camal frigorífico sur export delicar SCRL - Puno* [Universidad Privada San Carlos]. https://repositorio.upsc.edu.pe/bitstream/handle/UPSC/1048/Hugo_Cesar_INCAH

UANACO_INCAHUANACO.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Ingelsson, M., Yasri, N., & Roberts, E. P. L. (2020). Electrode passivation, faradaic efficiency, and performance enhancement strategies in electrocoagulation—a review. *Water Research*, *187*, 116433. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116433>
- Janampa, Y., & Quiroz, M. L. (2021). *Remoción de carga orgánica de aguas residuales domésticas por el método de coagulación con sulfato de aluminio en el lugar agua de Vichi – Santa Ana - Huancavelica* [Universidad Nacional de Huancavelica]. <https://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/3946>
- Kang, C., Zhao, Y., Tang, C., & Addo-Bankas, O. (2022). Use of aluminum-based water treatment sludge as coagulant for animal farm wastewater treatment. *Journal of Water Process Engineering*, *46*(November 2021), 102645. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102645>
- Kim, S., & Chung, S. (2022). Causal impact analysis of enhanced phosphorus effluent standard on river water quality. *Journal of Environmental Management*, *320*, 115931. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115931>
- Knap-Bałdyga, A., Czajkowska, J., & Żubrowska-Sudoł, M. (2025). Coagulation in municipal water reclamation for industrial reuse: The process effectiveness and impact on chemical stability. *Desalination and Water Treatment*, *322*, 101205. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2025.101205>
- Kweiner-Tetteh, E., Rathilal, S., & Robinson, K. (2017). Treatment of industrial mineral oil wastewater – effects of coagulant type and dosage. *Water Practice and Technology*, *12*(1), 139–145. <https://doi.org/10.2166/wpt.2017.021>
- Latifi, P., Karrabi, M., & Danesh, S. (2019). Anaerobic co-digestion of poultry slaughterhouse wastes with sewage sludge in batch-mode bioreactors (effect of inoculum-substrate ratio and total solids). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *107*, 288–296. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.015>
- Lima, P. R., Almeida, I. V., & Vicentini, V. E. (2020). Os diferentes tipos de coagulantes naturais para o tratamento de água: uma revisão. *Evidência*, *20*(1), 9–22. <https://doi.org/10.18593/eba.24704>
- Liu, L., Lu, S., Jin, Z., Lou, J., Zhang, W., & Wang, D. (2025). Hydrolysis of Al13 and its coagulation mechanism: Role of speciation stability and transformation. *Water Research*, *281*, 123672. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.123672>
- Loganath, R., & Senophiyah-Mary, J. (2020). Critical review on the necessity of bioelectricity generation from slaughterhouse industry waste and wastewater using

- different anaerobic digestion reactors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110360. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110360>
- Madeira, L., Ribau Teixeira, M., Almeida, A., Santos, T., & Carvalho, F. (2023). Reuse of lime sludge from immediate one-step lime precipitation process as a coagulant (aid) in slaughterhouse wastewater treatment. *Journal of Environmental Management*, 342, 118278. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118278>
- Mahtab, A., Tariq, M., Shafiq, T., & Nasir, A. (2019). Coagulation/adsorption combined treatment of slaughterhouse wastewater. *Desalination and Water Treatment*, 12(1–3), 270–275. <https://doi.org/10.5004/dwt.2009.952>
- Malacatus, P. N., Bastidas, P. I., & Chuquitarco, P. A. (2019). Análisis químico y de peligrosidad de lodos del sistema de tratamiento de aguas residuales en la industria de palma. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 1(2), 24–32. <https://doi.org/10.29166/revfig.v1i2.1726>
- Malpartida, A. M. (2020). *Remoción de contaminantes orgánicos en efluentes provenientes de los camales* [Universidad Científica del Sur]. <https://hdl.handle.net/20.500.12805/1376>
- Marín, J. C., Pozo, L., Colina, G., Rincón, N., Behling, E., Díaz, A., & Fernández, N. (2007). Optimización de un método para la determinación simultánea de H₂ y CH₄ por cromatografía gas-sólido en biorreactores anaeróbicos. *Multiciencias*, 7(3), 266–275. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=90470304>
- Martínez, O. O., Pérez, L. A., & Martínez, S. E. (2020). Diseño de experimentos: métodos y aplicaciones. In *Diseño de experimentos: métodos y aplicaciones*. Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ciencias. <https://doi.org/10.36385/FCBOG-4-0>
- Meegoda, J., Li, B., Patel, K., & Wang, L. (2018). A Review of the Processes, Parameters, and Optimization of Anaerobic Digestion. *Revista Internacional de Investigación Ambiental y Salud Pública*, 15(10), 2224. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ijerph15102224>
- Mendoza, S. (2023). *Impacto de los efluentes residuales del camal en la calidad de agua del río Ilave – Puno, 2021* [Universidad Privada San Carlos]. <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/renati/676662>
- Minitab. (2024). *Diseños factoriales y factoriales fraccionados*. Soporte de Minitab. <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/help-and-how-to/statistical-modeling/doe/supporting-topics/factorial-and-screening-designs/factorial-and->

fractional-factorial-designs/

- Miyashiro, R., & Meliton, J. (2022). Estudio comparativo de los tratamientos de electrocoagulación y coagulación/ floculación para la Remoción De Contaminantes De Aguas Residuales Del Camal Conchucos, Lima, 2021 [Universidad Privada del Norte]. In *Universidad Privada del Norte*. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUPN_0462c8e072e05307b379ca0fd28e08b9
- Mogbo, O. N., Iorwua, M. B., Duweni, E. C., & Tiza, M. T. (2020). A study on the efficacy of bio-coagulants for turbid and waste water treatment. *Journal of Critical Review*, 7(18), 1307–1315.
- Morales, A. M., Ramírez-Caballero, G., & Barajas-Meneses, M. (2020). Prediciendo la dosis de sulfato de aluminio en el tratamiento de aguas. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 11(6), 339–367. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-06-08>
- Mortadi, A., El Hafidi, E., Labjar, N., Nasrellah, H., Chahid, E., Monkade, M., & El Moznine, R. (2025). Monitoring the coagulation mechanism and aluminum sulfate impact on textile wastewater treatment: Insights from impedance spectroscopy. *Journal of the Indian Chemical Society*, 102(1), 101501. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2024.101501>
- Nath, A., Mishra, A., & Pande, P. P. (2021). A review natural polymeric coagulants in wastewater treatment. *Materials Today: Proceedings*, 46, 6113–6117. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.551>
- Nayeri, D., & Mousavi, S. A. (2022). A comprehensive review on the coagulant recovery and reuse from drinking water treatment sludge. *Journal of Environmental Management*, 319(March 2021), 115649. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115649>
- Nidheesh, P. V., Oladipo, A. A., Yasri, N. G., Laiju, A. R., Cheela, V. R. S., Thiam, A., Asfaha, Y. G., Kanmani, S., & Roberts, E. (Ted) P. L. (2022). Emerging applications, reactor design and recent advances of electrocoagulation process. *Process Safety and Environmental Protection*, 166(July), 600–616. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.08.051>
- Núñez, Y. D., & Lupaca, C. (2021). Sistema de tratamiento de aguas residuales del matadero municipal de Tacna. *Ingeniería Investiga*, 3(1), 546–559. <https://doi.org/10.47796/ing.v3i1.480>
- Ojeda, L. (2019). *Análisis y alternativas de solución para la producción de biogás con*

- residuos sólidos de la laguna de oxidación Espinar-Puno, periodo 2018* [Universidad Nacional de Puno]. https://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14082/12672/Ojeda_Casilla_Lenin.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Onen, V., Beyazyuz, P., & Yel, E. (2018). Removal of Turbidity from Travertine Processing Wastewaters by Coagulants, Flocculants and Natural Materials. *Mine Water and the Environment*, 37(3), 482–492. <https://doi.org/10.1007/s10230-017-0499-4>
- Oré, A. (2017). *Influencia del sulfato de aluminio y pH en la remoción de la materia orgánica para el tratamiento del agua residual del camal municipal de Chupaca* [Universidad Nacional del Centro del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/3770>
- Ortiz, J., Solorzano, R., Córdova, A., & Laz, M. (2024). Estudio para el tratamiento de agua residual del camal de la ciudad de Portoviejo. *Avances En Química*, 1(19), 3–13. <http://erevistas.saber.ula.ve/index.php/avancesenquimica/article/view/20063/21921931731>
- Otero, A., Mendoza, M., Carreras, R., & Fernández, B. (2021). Biogas production from slaughterhouse waste: Effect of blood content and fat saponification. *Waste Management*, 133(August), 119–126. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.07.035>
- Owodunni, A. A., & Ismail, S. (2021). Revolutionary technique for sustainable plant-based green coagulants in industrial wastewater treatment—A review. *Journal of Water Process Engineering*, 42(2), 102096. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102096>
- Pachari, S. (2024). *Evaluación del proceso fenton en la remoción de materia orgánica de efluentes residuales del camal municipal de la provincia de Melgar, 2023* [Universidad Néstor Cáceres Velásquez]. <https://repositorio.uancv.edu.pe/items/82401987-6e6f-4501-b99b-843db2a4d827>
- Pardo, J. S., Moncada, D. K., Martínez, L. E., & Ayala, S. L. (2020). Evaluación de coagulantes naturales para el tratamiento de aguas residuales domésticas. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 11(1), 105–116. <https://doi.org/10.22490/21456453.3081>
- Pastor, D. F. R., del Rosario Pastor Torres, A. M., & Díaz, L. E. A. (2022). “Cassava

- starch and aluminum sulfate in the removal of chemical oxygen demand from water of the Pollo River, Otuzco.” *Proceedings of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology, 2022-July*, 1–9. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.496>
- Pastrana, A. (2021). *Coagulación de aguas superficiales mediante mezclas coagulantes de Crotalaria longirostrata (chipilín) y sulfato de aluminio* [Universidad Juárez Autónoma de Tabasco]. <https://ri.ujat.mx/handle/20.500.12107/3657>
- Pivokonsky, M., Novotna, K., Petricek, R., Cermakova, L., Prokopova, M., & Naceradska, J. (2024). Fundamental chemical aspects of coagulation in drinking water treatment – Back to basics. *Journal of Water Process Engineering*, 57, 104660. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104660>
- Qamar, M. O., Farooqi, I. H., Munshi, F. M., Alsabhan, A. H., Kamal, M. A., Khan, M. A., & Alwadai, A. S. (2022). Performance of full-scale slaughterhouse effluent treatment plant (SETP). *Journal of King Saud University - Science*, 34(3), 101891. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.101891>
- Rachid, E.-B., Abderrahim, S., Hafid, A., & Souad, R. (2024). Water treatment: Aluminum sulfate, polymer, and activated carbon between efficacy and overdosing. Case of Oum Er-Rbia River, Morocco. *Desalination and Water Treatment*, 317, 100273. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100273>
- Ramakodi, M. P., Santhosh, N., T., P., Mohan, S. V., & Basha, S. (2020). Production of protease enzyme from slaughterhouse effluent: An approach to generate value-added products from waste. *Bioresource Technology Reports*, 12, 100552. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100552>
- Ramalho, R. S. (2021). *Tratamiento de aguas residuales*. https://books.google.com.pe/books?id=30etGjzPXyWC&hl=es&source=gbs_navlinks_s
- Ramírez, L., & Sierra, L. (2018). Evaluation of chemical coagulants in the removal of suspended solids, chemical oxygen and algae in the Salguero pond system. *Revista Tecciencia*, 13(24), 91–99. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18180/tecciencia.2017.24.10>
- Rhee, C., Kim, D. W., Yu, S. Il, Lee, M. E., Shin, J., Kim, H.-W., Chung, J. W., & Shin, S. G. (2021). Biogas potential assessment and characterization of Korean slaughterhouse waste for anaerobic digestion. *Environmental Technology & Innovation*, 24, 101858. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101858>

- Saboohi, Z., & Hosseini, S. E. (2025). Advancements in Biogas Production: Process Optimization and Innovative Plant Operations. *Clean Energy*. <https://doi.org/10.1093/ce/zkae096>
- Salem, T. A. (2021). Changes in the physicochemical and biological characteristics in the lentic and lotic waters of the Nile river. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, 47(1), 21–27. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2020.12.003>
- Sánchez, Z., Martí-Herrero, J., Escalante, H., & Castro, L. (2023). Integration of mesophilic biogas plant in the animal slaughter process under real limitations: Techno-economic evaluation of a colombian bovine slaughterhouse. *Waste Management*, 160, 112–122. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.02.013>
- Sandoval, M. A., Espinoza, L. C., Coreño, O., García, V., Fuentes, R., Thiam, A., & Salazar, R. (2022). A comparative study of anodic oxidation and electrocoagulation for treating cattle slaughterhouse wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(5), 108306. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108306>
- Sau, A., Ghosh, S., Kandar, B., Ghanta, K. C., Baltrėnaitė-Gedienė, E., & Dutta, S. (2024). Enhanced slaughterhouse wastewater treatment: A comparative approach with phycoremediation and adsorption. *Journal of the Indian Chemical Society*, 101(12), 101499. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2024.101499>
- SENASA. (2021). *Guía de buenas prácticas de faenado de animales de abasto*. [https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2002708/Faenado animales abasto.pdf.pdf](https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2002708/Faenado_animales_abasto.pdf.pdf)
- Siddiki, S. Y. A., Uddin, M. N., Mofijur, M., Fattah, I. M. R., Ong, H. C., Lam, S. S., Kumar, P. S., & Ahmed, S. F. (2021). Theoretical calculation of biogas production and greenhouse gas emission reduction potential of livestock, poultry and slaughterhouse waste in Bangladesh. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(3), 105204. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105204>
- Sigmadaf. (2024). *Coagulación y floculación en el tratamiento de aguas residuales*. SIGMA GROUP. <https://sigmadafclarifiers.com/la-coagulacion-y-la-floculacion-en-el-tratamiento-de-separacion-de-materia-coloidal-en-los-vertidos/>
- Silva, F. M. da, Orssatto, F., Eyng, E., Frare, L. M., Baraldi, I. J., & Fleck, L. (2021). Evaluation of electrocoagulation in the post-treatment of anaerobic wastewater of slaughterhouse and packing plant. *Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 16, 1–11. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2745>
- Singh, S., Rai, S., Singh, P., & Mishra, V. K. (2022). Real-time water quality monitoring

- of river Ganga (India) using internet of things. *Ecological Informatics*, 71, 101770. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101770>
- Soto-Cabrera, A. I., Panimboza-Ojeda, A. P., Ilibay-Granda, C. G., Valverde-Lara, C. R., & Diéguez-Santana, K. (2020). Impacto ambiental de la operación del Centro de faenamiento de la ciudad de Puyo, Pastaza, Ecuador. *Prospectiva*, 18(1). <https://doi.org/10.15665/rp.v18i1.2101>
- Sukmana, H., Bellahsen, N., Pantoja, F., & Hodur, C. (2021). Adsorption and coagulation in wastewater treatment – Review. *Progress in Agricultural Engineering Sciences*, 17(1), 49–68. <https://doi.org/10.1556/446.2021.00029>
- Syaichurrozi, I., Sari, L. N., Apriantika, A. P., Jayanudin, Darsono, N., & Khaerudini, D. S. (2024). Effect of coagulation-sedimentation pretreatment on methane production from Indonesian palm oil mill effluent and kinetics. *Bioresource Technology Reports*, 26, 101820. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2024.101820>
- Taipe, A., & Paucar, M. (2024). *Análisis de la eficiencia de remoción de turbidez y materia orgánica con el sulfato de aluminio y la opuntia ficus-indica de las aguas residuales del camal Santo Domingo de Guzmán del distrito de Sicaya, Huancayo-2023* [Universidad Continental]. https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/16074/5/IV_FIN_107_TE_Taipe_Paucar_2024.pdf
- Tamayo, M. Á. (2021). *Evaluación de los procesos de coagulación-floculación en el tratamiento de aguas residuales en una empresa procesadora de plástico* [Universidad Agraria del Ecuador]. <http://181.198.35.98/Archivos/TAMAYO SEGARRA MIGUEL ÁNGEL.pdf>
- Teo, C. J., Karkou, E., Vlad, O., Vyrkou, A., Savvakis, N., Arampatzis, G., & Angelis-Dimakis, A. (2023). Life cycle environmental impact assessment of slaughterhouse wastewater treatment. *Chemical Engineering Research and Design*, 200, 550–565. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.11.016>
- Thomas, O., & Thomas, M.-F. (2022). Industrial wastewater. In *UV-Visible Spectrophotometry of Waters and Soils* (pp. 385–416). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90994-5.00013-7>
- TIMSA. (2017). *Coagulación y floculación del agua*. <https://www.timsa.com/coagulacion-floculacion-agua/>
- Tjutju, N. A. S., Ammenberg, J., & Lindfors, A. (2024). Biogas potential studies: A review of their scope, approach, and relevance. *Renewable and Sustainable Energy*

- Reviews*, 201, 114631. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114631>
- Toapanta-Casco, M. J., Roldan-Muentes, M. G., Cisneros-Pérez, N. I., & Moreira-Mendoza, C. A. (2021). Aplicación de sales inorgánicas en el tratamiento de aguas residuales industriales procedente de la refinación de aceites y grasas. *Dominio de Las Ciencias*, 7(1), 632–647. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.23857/dc.v7i1.1667>
- Torrado, G., & Pérez, F. J. (2022). Alternativas para tratar lodos originados en sistemas de tratamiento de aguas residuales: Una revisión. *Ingeniería*, 27(3), e17945. <https://doi.org/10.14483/23448393.17945>
- Tributino, A., Gutiérrez, L., Plazas, V., Hernández, A., & Arteaga, B. (2023). Determinación de la dosis óptima de coagulante de sulfato de aluminio: Prueba de frasco. *Jurnal Ilmu Pendidikan*, 15(1), 1–4. <https://josif.ifsuldeminas.edu.br/ojs/index.php/anais/article/view/1174/1206>
- Veall, F. (2022). *Estructura y funcionamiento de mataderos medianos en países en desarrollo*. FAO. <https://www.fao.org/4/t0566s/T0566S01.htm>
- Velasquez, A. (2017). *Reducción de carga orgánica en el tratamiento avanzado de aguas residuales del camal municipal de Chupaca mediante el método de electrocoagulación - Junín* [Universidad Alas Peruanas]. <https://hdl.handle.net/20.500.12990/1651>
- VIVIENDA. (2019). *Aprueban Valores Máximos Admisibles (VMA) de las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario*. https://www.vivienda.gob.pe/direcciones/Documentos/DS_2009_021.pdf
- Wang, M., Zhao, Y., & Wang, X. (2022). Preparation and assessment of granular substrate from wastewater post-coagulation sludge towards maximum phosphate adsorption and erosion wear resistance. *Resources, Conservation and Recycling*, 184, 106429. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106429>
- Wang, Q., Xia, C., Alagumalai, K., Thanh Nhi Le, T., Yuan, Y., Khademi, T., Berkani, M., & Lu, H. (2023). Biogas generation from biomass as a cleaner alternative towards a circular bioeconomy: Artificial intelligence, challenges, and future insights. *Fuel*, 333(P2), 126456. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126456>
- Yasri, N., Nightingale, M., Cleland, K. J., & Roberts, E. P. L. (2022). The impact of a magnetic field on electrode fouling during electrocoagulation. *Chemosphere*, 303(P3), 135207. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135207>
- Zamani, H., Golestani, H. A., Mousavi, S. M., Zhiani, R., & Hosseini, M. S. (2019).

- Slaughterhouse wastewater treatment using biological anaerobic and coagulation-flocculation hybrid process. *Desalination and Water Treatment*, 155, 64–71. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23914>
- Zanol, M. B., Lima, J. P. P., Assemany, P., & Aguiar, A. (2024). Assessment of characteristics and treatment processes of wastewater from slaughterhouses in the state of Minas Gerais, Brazil. *Journal of Environmental Management*, 358, 120862. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120862>
- ZEOMEDIA. (2023). *Productos químicos para el tratamiento de aguas residuales*. Zeolita Nacional Mexicana. <https://zeomediafilter.com/es/el-rol-de-los-floculantes-en-el-tratamiento-de-aguas-residuales/>
- Zhang, H., Lin, H., Li, Q., Cheng, C., Shen, H., Zhang, Z., Zhang, Z., & Wang, H. (2021). Removal of refractory organics in wastewater by coagulation/flocculation with green chlorine-free coagulants. *Science of The Total Environment*, 787, 147654. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147654>
- Zhao, C., Zhou, J., Yan, Y., Yang, L., Xing, G., Li, H., Wu, P., Wang, M., & Zheng, H. (2021). Application of coagulation/flocculation in oily wastewater treatment: A review. *Science of The Total Environment*, 765, 142795. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142795>

ANEXOS

Anexo 1

Toma de muestras y análisis de parámetros de campo.



Nota. Procedimiento para la recolección de muestras; (a) Identificación de punto de monitoreo, (b) Análisis de parámetros de campo, (c) Toma de muestras para procedimiento experimental y (d) Recolección de muestras para análisis fisicoquímico.

Anexo 2

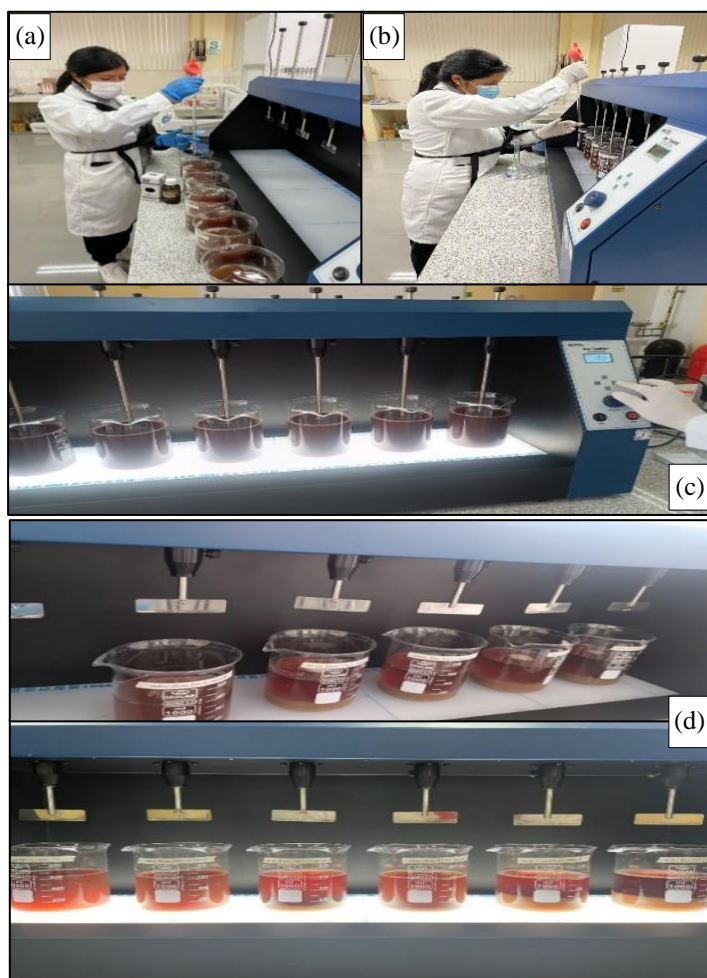
Análisis de muestras en laboratorio.



Nota. Caracterización de efluente de camal Macusani.

Anexo 3

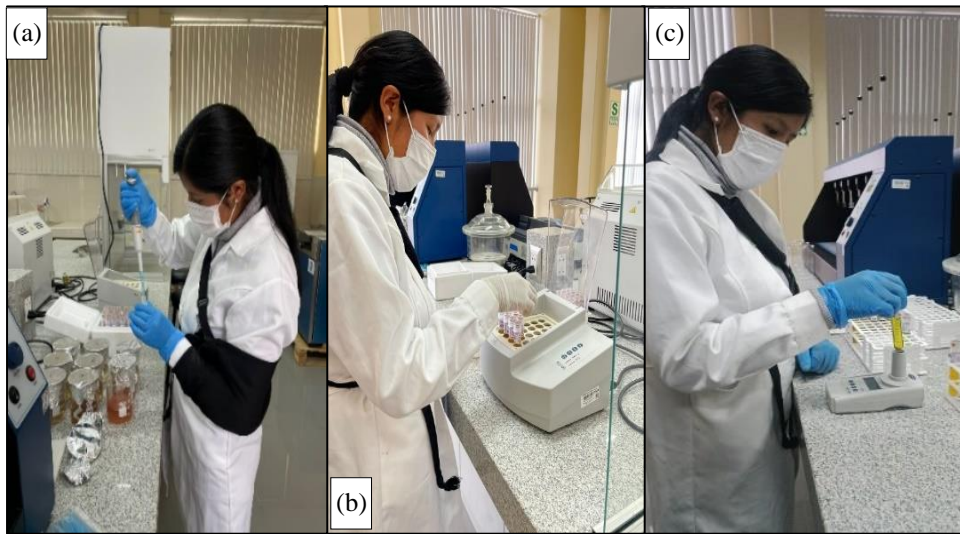
Proceso de coagulación química.



Nota. Experimentación del proceso de coagulación química; (a) Determinación de pH, (b) Incorporación de las dosis del coagulante sulfato de aluminio, (c) Prueba se jarras y (d) Resultado del proceso de coagulación química con sulfato de aluminio.

Anexo 4

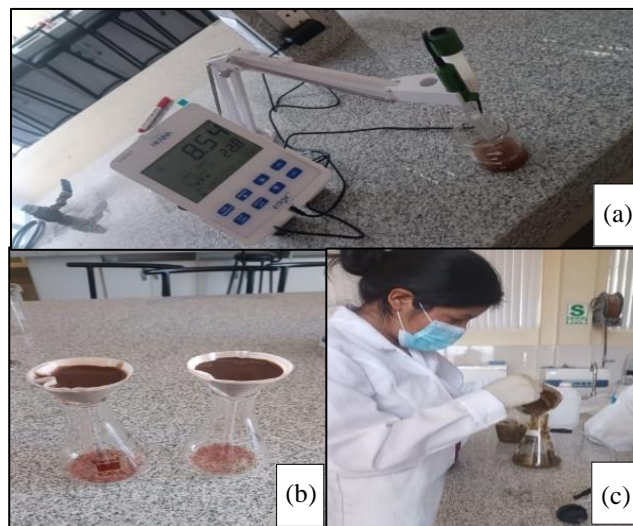
Determinación de demanda química de oxígeno (DQO).



Nota. Determinación de demanda química de oxígeno (DQO); (a) Adición de 2.5 ml de muestra en viales de determinación DQO, (b) Introducción de viales al termoreactor a una temperatura de 150 °C y (c) Lectura de DQO en el colorímetro.

Anexo 5

Proceso de obtención de lodos post coagulación.



Nota. Obtención de lodos post coagulación; (a) Caracterización de lodos, (b) Deshidratación de lodos por método gravimétrico y (c) Incorporación de lodos a los biodigestores.

Anexo 6

Producción y caracterización de biogás con lodos post coagulación.



Nota. Producción de biogás; (a) Acidificación de agua destilada al 2%, (b) Acondicionamiento de biodigestores tipo batch, (c) Inicio de la producción de biogás en laboratorio y (d) Caracterización de biogás.

Anexo 8

Informe de Laboratorio.



LAQUAMEQ E.I.R.L. LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICO AMBIENTAL

INFORME DE RESULTADOS N°: LO - 04723A

DATOS DEL SERVICIO

SOLICITANTE: Eulalia Silvia Ccoa Ceoito

PROYECTO : TRATAMIENTO DE EFLUENTE DE CAMAL MUNICIPAL POR COAGULACIÓN QUÍMICA Y APROVECHAMIENTO DE LODOS GENERADOS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

DATOS DEL ENSAYO

Producto : Agua residual – municipal

Numero de muestras : 01

Periodo de ensayo : 02 – 09/10/2023

Muestreado por : El cliente

Ubicación, fecha y hora de muestreo:

| Código | Dist. /Prov./ Depart. | Fecha y hora de muestreo |
|----------|------------------------|--------------------------|
| CM - 001 | Macusani/Carabaya/Puno | 01/10/2023 13:15 |



Jr. Deústua N° 522 Barrio 28 de Julio. Puno – San Román – Juliaca
www.laquameq.com – Cel. 920869679 - 979265920



LAQUAMEQ E.I.R.L.
LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICO AMBIENTAL

DATOS DEL RESULTADO

| Nº | PARAMETRO | UNIDAD | MÉTODO | CM - 001 |
|----|-------------------------------|--------|--|----------|
| 1 | Sólidos totales en suspensión | mg/l | SM 2540 D sólidos totales en suspensión secados a 103 - 105 °C | 990 |
| 3 | Aceites y grasas | mg/l | Método Soxhlet | 98 |
| 4 | Demanda química de oxígeno | mg/l | SM 5220 C Reflujo cerrado, método titulométrico | 3960 |
| 5 | Demanda bioquímica de oxígeno | mg/l | SM 5210 B Prueba de DBO de 5 días | 1649 |
| 6 | Fosforo total | mg/l | Método espectofotométrico | 112 |
| 7 | Nitrógeno total | mg/l | Método espectofotométrico | 60 |

Observación: Las muestras se analizaron tal como se recibió.

Fecha de emisión
2023-10-12

LAQUAMEQ E.I.R.L.
LABORATORIO Y EQUIPOS
Karen Kelly Quispe Quispe
CIP N.º 194084
GERENTE

Jr. Deústua N° 522 Barrio 28 de Julio, Puno - San Román - Juliaca
www.laquameq.com - Cel. 920869679 - 979265920



LAQUAMEQ E.I.R.L.
LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICO AMBIENTAL

INFORME DE RESULTADOS N°: LO - 08623

I. DATOS DEL SERVICIO

Proyecto : TRATAMIENTO DE EFLUENTE DE CAMAL MUNICIPAL POR COAGULACIÓN QUÍMICA Y APROVECHAMIENTO DE LODOS GENERADOS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

Solicitante : Eulalia Silvia Ceoa Ceoito

II. DATOS DEL ENSAYO

Producto : Lodo
Numero de muestras : 01
Fecha de ensayo : 16 - 23/11/2023
Muestreado por : El cliente
Ubicación, fecha y hora de muestreo:

| Código | Dist. /Prov./ Depart. | Ubicación | Fecha de muestreo | Hora de muestreo |
|-----------------|------------------------|-------------------------------|-------------------|------------------|
| M -1 Zona Norte | Juliaca/San Román/Puno | E: 382929.71 N: 8295944.72 | 15/12/2023 | 14:00 |

III. MÉTODO DE ENSAYO

| N° | PARAMETRO | UNIDAD | METODO |
|----|-------------------------|-------------|-------------------------------|
| 1 | Potencial de hidrogeno | Unid. de pH | Electrométrico |
| 2 | Humedad | % | Gravimétrico |
| 3 | Conductividad eléctrica | mS/cm | Electrométrico |
| 4 | Materia orgánica | % | Walkley Black |
| 5 | Nitrógeno total | % | Kjeldahl |
| 6 | Solidos volátiles | g/L | Calcinación |
| 7 | Solidos fijos | g/L | Calcinación |
| 8 | Solidos totales | g/L | Calcinación |
| 9 | Aluminio | mg/kg | Absorción Atómica (digestión) |



Jr. Deústua N° 522 Barrio 28 de Julio, Puno – San Román – Juliaca
www.laquameq.com – Cel. 920869679 - 979265920



LAQUAMEQ E.I.R.L.
LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICO AMBIENTAL

IV. RESULTADOS

| N° | PARAMETRO | UNIDAD | M - 1 Zona Norte |
|----|-------------------------|-------------|------------------|
| 1 | Potencial de hidrogeno | Unid. de pH | 5.98 |
| 2 | Humedad | % | 30.52 |
| 3 | Conductividad eléctrica | mS/cm | 2.58 |
| 4 | Materia orgánica | % | 95.91 |
| 5 | Nitrógeno total | % | 42 |
| 6 | Solidos volátiles | g/l. | 53 |
| 7 | Solidos fijos | g/l. | 38 |
| 8 | Solidos totales | g/l. | 43 |
| 9 | Aluminio | mg/kg | 137 |

V. OBSERVACIONES

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió

Juliaca, 30 de noviembre del 2023.


LAQUAMEQ E.I.R.L.
LABORATORIO Y EQUIPOS
Karen Kelly Quispe Quispe
CIP. N° 194084
GERENTE

Anexo 9

Matriz de consistencia.

Tabla 17

Matriz de consistencia

| Problema general | Objetivo general | Hipótesis general | Variable independiente | Unidad de medición | Instrumento |
|--|---|--|--|--|--|
| ¿El tratamiento por coagulación química al efluente del camal de Macusani permite aprovechar los lodos generados para la producción de biogás? | Evaluar el tratamiento por coagulación química al efluente del camal de Macusani y aprovechar los lodos generados para la producción de biogás. | El tratamiento del efluente del camal de Macusani mediante coagulación química permite una reducción eficiente de la demanda química de oxígeno superior al 75 %. Además, los lodos generados son aprovechados en la producción de biogás mediante digestión anaerobia. | pH: 6, 7 y 8 | Unidades de pH | pH-metro |
| | | | Concentración de coagulante: 0.5%, 1% y 2% | % peso-volumen ml | Balanza, fiola Pipeta |
| | | | Dosis de coagulante: 3ml, 5ml y 10ml | rpm min rpm min min | Equipo de prueba de jarras Equipo de prueba de jarras Equipo de prueba de jarras Equipo de prueba de jarras Equipo de prueba de jarras |
| | | | Proporción de lodo y estiércol | °C Días g g ml | Baño maría - Balanza Balanza Probeta |
| Problemas específicos | Objetivos específicos | Hipótesis específicas | Variable dependiente | Unidad de medición | Instrumento |
| <ul style="list-style-type: none"> ¿Cuáles son las características fisicoquímicas presentes en el efluente del camal de Macusani? ¿Cuál es la condición óptima bajo la interacción de factores de pH, concentración de coagulante, dosis de coagulante para la reducción de materia orgánica del efluente de camal Macusani? ¿Se puede aprovechar los lodos generados por coagulación química como sustrato para la producción de biogás? | <ul style="list-style-type: none"> Determinar las características fisicoquímicas presentes en el efluente del camal de Macusani. Evaluar la condición óptima bajo la interacción de factores de pH, concentración de coagulante, dosis de coagulante para la reducción de materia orgánica del efluente de camal Macusani. Aprovechar los lodos generados por coagulación química como sustrato para la producción de biogás | <ul style="list-style-type: none"> Las características fisicoquímicas del efluente del camal de Macusani presentan concentraciones elevadas de materia orgánica, con valores de DQO que superan los 3900 mg/L. La condición más óptima para la reducción de materia orgánica del efluente de camal Macusani se alcanza bajo la interacción de pH 6, concentración de coagulante del 2% y una dosis de coagulante de 5 ml. Los lodos generados por coagulación química pueden ser aprovechados como sustrato para la producción de biogás mediante digestión anaerobia, debido a su alto contenido de materia orgánica biodegradable y características fisicoquímicas favorables para la actividad microbiana. | Reducción de materia orgánica en función de la DQO | % Unidades de pH °C | Digestor, colorímetro, oxidación de viales pH-metro Potenciómetro |
| | | | Cantidad de biogás producido | ml % volumen % volumen ppm % volumen | Método de desplazamiento Detector multigas Detector multigas Detector multigas Detector multigas |

Anexo 10

Análisis estadístico.

Tabla 18

Análisis de varianza de para efectos principales.

| Analysis of Variance Table | | | | | | |
|----------------------------|----|--------|---------|---------|-----------------|-----|
| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) | |
| A | 2 | 2062.6 | 1031.3 | 502.39 | <2e-16 | *** |
| B | 2 | 1698.6 | 849.3 | 413.72 | <2e-16 | *** |
| C | 2 | 490.4 | 245.2 | 119.44 | 3.89e-14 | *** |
| A:B | 4 | 1031.5 | 257.9 | 125.62 | <2e-16 | *** |
| B:C | 4 | 1069.4 | 267.4 | 130.24 | <2e-16 | *** |
| A:C | 4 | 499.7 | 124.9 | 60.86 | 4.07e-13 | *** |
| A:B:C | 8 | 1097.4 | 137.2 | 66.82 | 8.67e-16 | *** |
| Residuals | 27 | 55.4 | 2.1 | | | |

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Tabla 19

Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para efecto simple a.b1.

| \$statistics | | | | | |
|--------------|----------|-----------|------------------|----------|----------|
| MSError | Df | Mean | CV | MSD | |
| 21.60181 | 27 | 59.97763 | 7.749181 | 6.653255 | |
| \$parameters | | | | | |
| test | name.t | ntr | StudentizedRange | alpha | |
| Tukey | A | 3 | 3.506426 | 0.05 | |
| \$means | | | | | |
| | Y | std | R | Min | Max |
| a1 | 73.15383 | 5.488967 | 6 | 67.65203 | 79.95919 |
| a2 | 50.24564 | 14.964242 | 6 | 37.74678 | 70.87260 |
| a3 | 56.53341 | 5.165248 | 6 | 51.08912 | 63.51130 |
| \$comparison | | | | | |
| NULL | | | | | |
| \$groups | | | | | |
| | T | Y | groups | | |
| 1 | a1 | 73.15383 | a | | |
| 2 | a3 | 56.53341 | b | | |
| 3 | a2 | 50.24564 | b | | |

Tabla 20*Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para efecto simple a.b2.*

| \$statistics | | | | | |
|---------------------|----------|-----------|--------|------------------|----------|
| MSError | Df | Mean | | CV | MSD |
| 21.60181 | 27 | 69.70322 | | 6.667948 | 6.653255 |
| \$parameters | | | | | |
| test | name.t | ntr | | StudentizedRange | alpha |
| Tukey | A | 3 | | 3.506426 | 0.05 |
| \$means | | | | | |
| | Y | std | R | Min | Max |
| a1 | 78.00385 | 1.193109 | 6 | 76.39357 | 79.03903 |
| a2 | 70.89177 | 12.098336 | 6 | 55.22985 | 79.61413 |
| a3 | 60.21406 | 13.315478 | 6 | 42.46261 | 72.59790 |
| \$comparison | | | | | |
| NULL | | | | | |
| \$groups | | | | | |
| | T | Y | groups | | |
| 1 | a1 | 78.00385 | a | | |
| 2 | a2 | 70.89177 | b | | |
| 3 | a3 | 60.21406 | c | | |

Tabla 21*Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para efecto simple a.b3.*

| \$statistics | | | | | |
|---------------------|----------|----------|--------|------------------|----------|
| MSError | Df | Mean | | CV | MSD |
| 21.60181 | 27 | 73.24329 | | 6.345667 | 6.653255 |
| \$parameters | | | | | |
| test | name.t | ntr | | StudentizedRange | alpha |
| Tukey | A | 3 | | 3.506426 | 0.05 |
| \$means | | | | | |
| | Y | std | R | Min | Max |
| a1 | 76.45108 | 2.897733 | 6 | 73.51806 | 80.30425 |
| a2 | 77.10286 | 2.089973 | 6 | 74.66826 | 80.30425 |
| a3 | 66.17594 | 4.886080 | 6 | 60.75082 | 72.59790 |
| \$comparison | | | | | |
| NULL | | | | | |
| \$groups | | | | | |
| | T | Y | groups | | |
| 1 | a2 | 77.10286 | a | | |
| 2 | a1 | 76.45108 | a | | |
| 3 | a3 | 66.17594 | b | | |

Tabla 22*Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para efecto simple a.c1.*

| \$statistics | | | | | |
|---------------------|----------|----------|--------|------------------|----------|
| MSError | Df | Mean | | CV | MSD |
| 21.60181 | 27 | 63.50491 | | 7.318765 | 6.653255 |
| \$parameters | | | | | |
| test | name.t | ntr | | StudentizedRange | alpha |
| Tukey | A | 3 | | 3.506426 | 0.05 |
| \$means | | | | | |
| | Y | std | R | Min | Max |
| a1 | 75.58842 | 5.88382 | 6 | 67.65203 | 80.30425 |
| a2 | 57.62610 | 18.02883 | 6 | 37.74678 | 80.30425 |
| a3 | 57.30021 | 11.01987 | 6 | 42.46261 | 66.61685 |
| \$comparison | | | | | |
| NULL | | | | | |
| \$groups | | | | | |
| | T | Y | groups | | |
| 1 | a1 | 75.58842 | a | | |
| 2 | a2 | 57.62610 | b | | |
| 3 | a3 | 57.30021 | b | | |

Tabla 23*Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para efecto simple a.c.2.*

| \$statistics | | | | | |
|---------------------|----------|-----------|--------|------------------|----------|
| MSError | Df | Mean | | CV | MSD |
| 21.60181 | 27 | 68.8214 | | 6.753386 | 6.653255 |
| \$parameters | | | | | |
| test | name.t | ntr | | StudentizedRange | alpha |
| Tukey | A | 3 | | 3.506426 | 0.05 |
| \$means | | | | | |
| | Y | std | R | Min | Max |
| a1 | 75.28170 | 3.411792 | 6 | 69.95243 | 78.92401 |
| a2 | 66.48266 | 18.519812 | 6 | 40.85232 | 79.61413 |
| a3 | 64.69985 | 7.707784 | 6 | 53.15948 | 72.59790 |
| \$comparison | | | | | |
| NULL | | | | | |
| \$groups | | | | | |
| | T | Y | groups | | |
| 1 | a1 | 75.28170 | a | | |
| 2 | a2 | 66.48266 | b | | |
| 3 | a3 | 64.69985 | b | | |

Tabla 24*Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para efecto simple a.c3.*

| \$statistics | | | | | |
|---------------------|----------|----------|--------|------------------|----------|
| MSError | Df | Mean | | CV | MSD |
| 21.60181 | 27 | 70.59783 | | 6.583454 | 6.653255 |
| \$parameters | | | | | |
| test | name.t | ntr | | StudentizedRange | alpha |
| Tukey | A | 3 | | 3.506426 | 0.05 |
| \$means | | | | | |
| | Y | std | R | Min | Max |
| a1 | 76.73863 | 2.644965 | 6 | 73.51806 | 79.95919 |
| a2 | 74.13150 | 4.165997 | 6 | 67.76705 | 78.57895 |
| a3 | 60.92335 | 8.424867 | 6 | 51.08912 | 72.59790 |
| \$comparison | | | | | |
| NULL | | | | | |
| \$groups | | | | | |
| | T | Y | groups | | |
| 1 | a1 | 76.73863 | a | | |
| 2 | a2 | 74.13150 | a | | |
| 3 | a3 | 60.92335 | b | | |

Tabla 25*Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para efecto simple b.a1.*

| \$statistics | | | | | |
|---------------------|----------|----------|--------|------------------|----------|
| MSError | Df | Mean | | CV | MSD |
| 21.60181 | 27 | 75.86958 | | 6.126006 | 6.653255 |
| \$parameters | | | | | |
| test | name.t | ntr | | StudentizedRange | alpha |
| Tukey | B | 3 | | 3.506426 | 0.05 |
| \$means | | | | | |
| | Y | std | R | Min | Max |
| b1 | 73.15383 | 5.488967 | 6 | 67.65203 | 79.95919 |
| b2 | 78.00385 | 1.193109 | 6 | 76.39357 | 79.03903 |
| b3 | 76.45108 | 2.897733 | 6 | 73.51806 | 80.30425 |
| \$comparison | | | | | |
| NULL | | | | | |
| \$groups | | | | | |
| | T | Y | groups | | |
| 1 | b2 | 78.00385 | a | | |
| 2 | b3 | 76.45108 | a | | |
| 3 | b1 | 73.15383 | a | | |

Tabla 26*Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para efecto simple b.a2.*

| \$statistics | | | | | |
|---------------------|----------|-----------|--------|------------------|----------|
| MSError | Df | Mean | | CV | MSD |
| 21.60181 | 27 | 66.08009 | | 7.033549 | 6.653255 |
| \$parameters | | | | | |
| test | name.t | ntr | | StudentizedRange | alpha |
| Tukey | B | 3 | | 3.506426 | 0.05 |
| \$means | | | | | |
| | Y | std | R | Min | Max |
| b1 | 50.24564 | 14.964242 | 6 | 37.74678 | 70.87260 |
| b2 | 70.89177 | 12.098336 | 6 | 55.22985 | 79.61413 |
| b3 | 77.10286 | 2.089973 | 6 | 74.66826 | 80.30425 |
| \$comparison | | | | | |
| NULL | | | | | |
| \$groups | | | | | |
| | T | Y | groups | | |
| 1 | b3 | 77.10286 | a | | |
| 2 | b2 | 70.89177 | a | | |
| 3 | b1 | 50.24564 | b | | |

Tabla 27*Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para efecto simple b.a3.*

| \$statistics | | | | | |
|---------------------|----------|-----------|--------|------------------|----------|
| MSError | Df | Mean | | CV | MSD |
| 21.60181 | 27 | 60.97447 | | 7.622494 | 6.653255 |
| \$parameters | | | | | |
| test | name.t | ntr | | StudentizedRange | alpha |
| Tukey | B | 3 | | 3.506426 | 0.05 |
| \$means | | | | | |
| | Y | std | R | Min | Max |
| b1 | 56.53341 | 5.165248 | 6 | 51.08912 | 63.5113 |
| b2 | 60.21406 | 13.315478 | 6 | 42.46261 | 72.5979 |
| b3 | 66.17594 | 4.886080 | 6 | 60.75082 | 72.5979 |
| \$comparison | | | | | |
| NULL | | | | | |
| \$groups | | | | | |
| | T | Y | groups | | |
| 1 | b3 | 66.17594 | a | | |
| 2 | b2 | 60.21406 | ab | | |
| 3 | b1 | 56.53341 | b | | |

Tabla 28*Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para efecto simple b.c1.*

| \$statistics | | | | | |
|---------------------|----------|-----------|--------|------------------|----------|
| MSError | Df | Mean | | CV | MSD |
| 21.60181 | 27 | 63.50491 | | 7.318765 | 6.653255 |
| \$parameters | | | | | |
| test | name.t | ntr | | StudentizedRange | alpha |
| Tukey | B | 3 | | 3.506426 | 0.05 |
| \$means | | | | | |
| | Y | std | R | Min | Max |
| b1 | 56.45673 | 13.943118 | 6 | 37.74678 | 68.45717 |
| b2 | 59.06386 | 16.095706 | 6 | 42.46261 | 79.03903 |
| b3 | 74.99415 | 6.986724 | 6 | 65.58167 | 80.30425 |
| \$comparison | | | | | |
| NULL | | | | | |
| \$groups | | | | | |
| | T | Y | groups | | |
| 1 | b3 | 74.99415 | a | | |
| 2 | b2 | 59.06386 | b | | |
| 3 | b1 | 56.45673 | b | | |

Tabla 29*Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para efecto simple b.c.2.*

| \$statistics | | | | | |
|---------------------|----------|-----------|--------|------------------|----------|
| MSError | Df | Mean | | CV | MSD |
| 21.60181 | 27 | 68.8214 | | 6.753386 | 6.653255 |
| \$parameters | | | | | |
| test | name.t | ntr | | StudentizedRange | alpha |
| Tukey | B | 3 | | 3.506426 | 0.05 |
| \$means | | | | | |
| | Y | std | R | Min | Max |
| b1 | 56.53341 | 13.159370 | 6 | 40.85232 | 73.28802 |
| b2 | 75.03249 | 6.174953 | 6 | 65.92673 | 79.61413 |
| b3 | 74.89830 | 2.822100 | 6 | 70.64256 | 77.77381 |
| \$comparison | | | | | |
| NULL | | | | | |
| \$groups | | | | | |
| | T | Y | groups | | |
| 1 | b2 | 75.03249 | a | | |
| 2 | b3 | 74.89830 | a | | |
| 3 | b1 | 56.53341 | b | | |

Tabla 30*Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para efecto simple b.c3.*

| \$statistics | | | | | |
|---------------------|----------|----------|--------|------------------|----------|
| MSError | Df | Mean | | CV | MSD |
| 21.60181 | 27 | 70.59783 | | 6.583454 | 6.653255 |
| \$parameters | | | | | |
| test | name.t | ntr | | StudentizedRange | alpha |
| Tukey | B | 3 | | 3.506426 | 0.05 |
| \$means | | | | | |
| | Y | std | R | Min | Max |
| b1 | 66.94274 | 12.73007 | 6 | 51.08912 | 79.95919 |
| b2 | 75.01332 | 4.07048 | 6 | 67.88207 | 78.57895 |
| b3 | 69.83741 | 7.00963 | 6 | 60.75082 | 74.89830 |
| \$comparison | | | | | |
| NULL | | | | | |
| \$groups | | | | | |
| | T | Y | groups | | |
| 1 | b2 | 75.01332 | a | | |
| 2 | b3 | 69.83741 | ab | | |
| 3 | b1 | 66.94274 | b | | |

Tabla 31*Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para efecto simple c.a1.*

| \$statistics | | | | | |
|---------------------|----------|----------|--------|------------------|----------|
| MSError | Df | Mean | | CV | MSD |
| 21.60181 | 27 | 75.86958 | | 6.126006 | 6.653255 |
| \$parameters | | | | | |
| test | name.t | ntr | | StudentizedRange | alpha |
| Tukey | C | 3 | | 3.506426 | 0.05 |
| \$means | | | | | |
| | Y | std | R | Min | Max |
| c1 | 75.58842 | 5.883820 | 6 | 67.65203 | 80.30425 |
| c2 | 75.28170 | 3.411792 | 6 | 69.95243 | 78.92401 |
| c3 | 76.73863 | 2.644965 | 6 | 73.51806 | 79.95919 |
| \$comparison | | | | | |
| NULL | | | | | |
| \$groups | | | | | |
| | T | Y | groups | | |
| 1 | c3 | 76.73863 | a | | |
| 2 | c1 | 75.58842 | a | | |
| 3 | c2 | 75.28170 | a | | |

Tabla 32*Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para efecto simple c.a2.*

| \$statistics | | | | | |
|---------------------|----------|-----------|--------|------------------|----------|
| MSError | Df | Mean | | CV | MSD |
| 21.60181 | 27 | 66.08009 | | 7.033549 | 6.653255 |
| \$parameters | | | | | |
| test | name.t | ntr | | StudentizedRange | alpha |
| Tukey | C | 3 | | 3.506426 | 0.05 |
| \$means | | | | | |
| | Y | std | R | Min | Max |
| c1 | 57.62610 | 18.028831 | 6 | 37.74678 | 80.30425 |
| c2 | 66.48266 | 18.519812 | 6 | 40.85232 | 79.61413 |
| c3 | 74.13150 | 4.165997 | 6 | 67.76705 | 78.57895 |
| \$comparison | | | | | |
| NULL | | | | | |
| \$groups | | | | | |
| | T | Y | groups | | |
| 1 | c3 | 74.13150 | a | | |
| 2 | c2 | 66.48266 | b | | |
| 3 | c1 | 57.62610 | c | | |

Tabla 33*Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para efecto simple c.a3.*

| \$statistics | | | | | |
|---------------------|----------|-----------|--------|------------------|----------|
| MSError | Df | Mean | | CV | MSD |
| 21.60181 | 27 | 60.97447 | | 7.622494 | 6.653255 |
| \$parameters | | | | | |
| test | name.t | ntr | | StudentizedRange | alpha |
| Tukey | C | 3 | | 3.506426 | 0.05 |
| \$means | | | | | |
| | Y | std | R | Min | Max |
| c1 | 57.30021 | 11.019872 | 6 | 42.46261 | 66.61685 |
| c2 | 64.69985 | 7.707784 | 6 | 53.15948 | 72.59790 |
| c3 | 60.92335 | 8.424867 | 6 | 51.08912 | 72.59790 |
| \$comparison | | | | | |
| NULL | | | | | |
| \$groups | | | | | |
| | T | Y | groups | | |
| 1 | c2 | 64.69985 | a | | |
| 2 | c3 | 60.92335 | ab | | |
| 3 | c1 | 57.30021 | b | | |

Tabla 34*Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para efecto simple c.b1.*

| \$statistics | | | | | |
|---------------------|----------|----------|--------|------------------|----------|
| MSError | Df | Mean | | CV | MSD |
| 21.60181 | 27 | 59.97763 | | 7.749181 | 6.653255 |
| \$parameters | | | | | |
| test | name.t | ntr | | StudentizedRange | alpha |
| Tukey | C | 3 | | 3.506426 | 0.05 |
| \$means | | | | | |
| | Y | std | R | Min | Max |
| c1 | 56.45673 | 13.94312 | 6 | 37.74678 | 68.45717 |
| c2 | 56.53341 | 13.15937 | 6 | 40.85232 | 73.28802 |
| c3 | 66.94274 | 12.73007 | 6 | 51.08912 | 79.95919 |
| \$comparison | | | | | |
| NULL | | | | | |
| \$groups | | | | | |
| | T | Y | groups | | |
| 1 | c3 | 66.94274 | a | | |
| 2 | c2 | 56.53341 | b | | |
| 3 | c1 | 56.45673 | b | | |

Tabla 35*Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para efecto simple c.b2.*

| \$statistics | | | | | |
|---------------------|----------|-----------|--------|------------------|----------|
| MSError | Df | Mean | | CV | MSD |
| 21.60181 | 27 | 69.70322 | | 6.667948 | 6.653255 |
| \$parameters | | | | | |
| test | name.t | ntr | | StudentizedRange | alpha |
| Tukey | C | 3 | | 3.506426 | 0.05 |
| \$means | | | | | |
| | Y | std | R | Min | Max |
| c1 | 59.06386 | 16.095706 | 6 | 42.46261 | 79.03903 |
| c2 | 75.03249 | 6.174953 | 6 | 65.92673 | 79.61413 |
| c3 | 75.01332 | 4.070480 | 6 | 67.88207 | 78.57895 |
| \$comparison | | | | | |
| NULL | | | | | |
| \$groups | | | | | |
| | T | Y | groups | | |
| 1 | c2 | 75.03249 | a | | |
| 2 | c3 | 75.01332 | a | | |
| 3 | c1 | 59.06386 | b | | |

Tabla 36*Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para efecto simple c.b3.*

| \$statistics | | | | | |
|---------------------|----------|----------|--------|------------------|----------|
| MSError | Df | Mean | | CV | MSD |
| 21.60181 | 27 | 73.24329 | | 6.345667 | 6.653255 |
| \$parameters | | | | | |
| test | name.t | ntr | | StudentizedRange | alpha |
| Tukey | C | 3 | | 3.506426 | 0.05 |
| \$means | | | | | |
| | Y | std | R | Min | Max |
| c1 | 74.99415 | 6.986724 | 6 | 65.58167 | 80.30425 |
| c2 | 74.89830 | 2.822100 | 6 | 70.64256 | 77.77381 |
| c3 | 69.83741 | 7.009630 | 6 | 60.75082 | 74.89830 |
| \$comparison | | | | | |
| NULL | | | | | |
| \$groups | | | | | |
| | T | Y | groups | | |
| 1 | c1 | 74.99415 | a | | |
| 2 | c2 | 74.89830 | a | | |
| 3 | c3 | 69.83741 | a | | |

Tabla 37*Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para factor A.*

| \$statistics | | | | | |
|---------------------|----------|-----------|--------|------------------|----------|
| MSError | Df | Mean | | CV | MSD |
| 2.0528 | 27 | 67.64138 | | 2.11817 | 1.184137 |
| \$parameters | | | | | |
| test | name.t | ntr | | StudentizedRange | alpha |
| Tukey | A | 3 | | 3.506426 | 0.05 |
| \$means | | | | | |
| | Y | std | R | Min | Max |
| a1 | 75.86958 | 4.009964 | 18 | 67.65203 | 80.30425 |
| a2 | 66.08009 | 15.803261 | 18 | 37.74678 | 80.30425 |
| a3 | 60.97447 | 9.150431 | 18 | 42.46261 | 72.59790 |
| \$comparison | | | | | |
| NULL | | | | | |
| \$groups | | | | | |
| | T | Y | groups | | |
| 1 | a1 | 75.86958 | a | | |
| 2 | a2 | 66.08009 | b | | |
| 3 | a3 | 60.97447 | c | | |

Tabla 38*Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para factor B.*

| \$statistics | | | | | |
|---------------------|----------|-----------|--------|------------------|----------|
| MSError | Df | Mean | | CV | MSD |
| 2.0528 | 27 | 67.64138 | | 2.11817 | 1.184137 |
| \$parameters | | | | | |
| test | name.t | ntr | | StudentizedRange | alpha |
| Tukey | B | 3 | | 3.506426 | 0.05 |
| \$means | | | | | |
| | Y | std | R | Min | Max |
| b1 | 59.97763 | 13.470675 | 18 | 37.74678 | 79.95919 |
| b2 | 69.70322 | 12.337460 | 18 | 42.46261 | 79.61413 |
| b3 | 73.24329 | 6.106866 | 18 | 60.75082 | 80.30425 |
| \$comparison | | | | | |
| NULL | | | | | |
| \$groups | | | | | |
| | T | Y | groups | | |
| 1 | b3 | 73.24329 | a | | |
| 2 | b2 | 69.70322 | b | | |
| 3 | b1 | 59.97763 | c | | |

Tabla 39*Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para factor C.*

| \$statistics | | | | | |
|---------------------|----------|-----------|--------|------------------|----------|
| MSError | Df | Mean | | CV | MSD |
| 2.0528 | 27 | 67.64138 | | 2.11817 | 1.184137 |
| \$parameters | | | | | |
| test | name.t | ntr | | StudentizedRange | alpha |
| Tukey | C | 3 | | 3.506426 | 0.05 |
| \$means | | | | | |
| | Y | std | R | Min | Max |
| c1 | 63.50491 | 14.792482 | 18 | 37.74678 | 80.30425 |
| c2 | 68.82140 | 12.017936 | 18 | 40.85232 | 79.61413 |
| c3 | 70.59783 | 8.876272 | 18 | 51.08912 | 79.95919 |
| \$comparison | | | | | |
| NULL | | | | | |
| \$groups | | | | | |
| | T | Y | groups | | |
| 1 | c3 | 70.59783 | a | | |
| 2 | c2 | 68.82140 | b | | |
| 3 | c1 | 63.50491 | c | | |

Tabla 40*Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para factor A:B.*

| \$statistics | | | | | |
|--------------|----------|-----------|---|------------------|----------|
| MSError | Df | Mean | | CV | MSD |
| 2.0528 | 27 | 67.64138 | | 2.11817 | 2.783292 |
| \$parameters | | | | | |
| test | name.t | ntr | | StudentizedRange | alpha |
| Tukey | A:B | 9 | | 4.7584 | 0.05 |
| \$means | | | | | |
| | Y | std | R | Min | Max |
| a1:b1 | 73.15383 | 5.488967 | 6 | 67.65203 | 79.95919 |
| a1:b2 | 78.00385 | 1.193109 | 6 | 76.39357 | 79.03903 |
| a1:b3 | 76.45108 | 2.897733 | 6 | 73.51806 | 80.30425 |
| a2:b1 | 50.24564 | 14.964242 | 6 | 37.74678 | 70.87260 |
| a2:b2 | 70.89177 | 12.098336 | 6 | 55.22985 | 79.61413 |
| a2:b3 | 77.10286 | 2.089973 | 6 | 74.66826 | 80.30425 |
| a3:b1 | 56.53341 | 5.165248 | 6 | 51.08912 | 63.51130 |
| a3:b2 | 60.21406 | 13.315478 | 6 | 42.46261 | 72.59790 |
| a3:b3 | 66.17594 | 4.886080 | 6 | 60.75082 | 72.59790 |
| \$comparison | | | | | |
| NULL | | | | | |
| \$groups | | | | | |
| | T | Y | | groups | |
| 1 | a1:b2 | 78.00385 | | a | |
| 2 | a2:b3 | 77.10286 | | a | |
| 3 | a1:b3 | 76.45108 | | a | |
| 4 | a1:b1 | 73.15383 | | b | |
| 5 | a2:b2 | 70.89177 | | b | |
| 6 | a3:b3 | 66.17594 | | c | |
| 7 | a3:b2 | 60.21406 | | d | |
| 8 | a3:b1 | 56.53341 | | e | |
| 9 | a2:b1 | 50.24564 | | f | |

Tabla 41*Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para factor B:C.*

| \$statistics | | | | | |
|--------------|----------|-----------|---|------------------|----------|
| MSError | Df | Mean | | CV | MSD |
| 2.0528 | 27 | 67.64138 | | 2.11817 | 2.783292 |
| \$parameters | | | | | |
| test | name.t | ntr | | StudentizedRange | alpha |
| Tukey | B:C | 9 | | 4.7584 | 0.05 |
| \$means | | | | | |
| | Y | std | R | Min | Max |
| b1:c1 | 56.45673 | 13.943118 | 6 | 37.74678 | 68.45717 |
| b1:c2 | 56.53341 | 13.159370 | 6 | 40.85232 | 73.28802 |
| b1:c3 | 66.94274 | 12.730074 | 6 | 51.08912 | 79.95919 |
| b2:c1 | 59.06386 | 16.095706 | 6 | 42.46261 | 79.03903 |
| b2:c2 | 75.03249 | 6.174953 | 6 | 65.92673 | 79.61413 |
| b2:c3 | 75.01332 | 4.070480 | 6 | 67.88207 | 78.57895 |
| b3:c1 | 74.99415 | 6.986724 | 6 | 65.58167 | 80.30425 |
| b3:c2 | 74.89830 | 2.822100 | 6 | 70.64256 | 77.77381 |
| b3:c3 | 69.83741 | 7.009630 | 6 | 60.75082 | 74.89830 |
| \$comparison | | | | | |
| NULL | | | | | |
| \$groups | | | | | |
| | T | Y | | groups | |
| 1 | b2:c2 | 75.03249 | | a | |
| 2 | b2:c3 | 75.01332 | | a | |
| 3 | b3:c1 | 74.99415 | | a | |
| 4 | b3:c2 | 74.89830 | | a | |
| 5 | b3:c3 | 69.83741 | | b | |
| 6 | b1:c3 | 66.94274 | | c | |
| 7 | b2:c1 | 59.06386 | | d | |
| 8 | b1:c2 | 56.53341 | | d | |
| 9 | b1:c1 | 56.45673 | | d | |

Tabla 42*Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para factor A:C.*

| \$statistics | | | | | |
|--------------|----------|-----------|---|------------------|----------|
| MSError | Df | Mean | | CV | MSD |
| 2.0528 | 27 | 67.64138 | | 2.11817 | 2.783292 |
| \$parameters | | | | | |
| test | name.t | ntr | | StudentizedRange | alpha |
| Tukey | A:C | 9 | | 4.7584 | 0.05 |
| \$means | | | | | |
| | Y | std | R | Min | Max |
| a1:c1 | 75.58842 | 5.883820 | 6 | 67.65203 | 80.30425 |
| a1:c2 | 75.28170 | 3.411792 | 6 | 69.95243 | 78.92401 |
| a1:c3 | 76.73863 | 2.644965 | 6 | 73.51806 | 79.95919 |
| a2:c1 | 57.62610 | 18.028831 | 6 | 37.74678 | 80.30425 |
| a2:c2 | 66.48266 | 18.519812 | 6 | 40.85232 | 79.61413 |
| a2:c3 | 74.13150 | 4.165997 | 6 | 67.76705 | 78.57895 |
| a3:c1 | 57.30021 | 11.019872 | 6 | 42.46261 | 66.61685 |
| a3:c2 | 64.69985 | 7.707784 | 6 | 53.15948 | 72.59790 |
| a3:c3 | 60.92335 | 8.424867 | 6 | 51.08912 | 72.59790 |
| \$comparison | | | | | |
| NULL | | | | | |
| \$groups | | | | | |
| | T | Y | | groups | |
| 1 | a1:c3 | 76.73863 | | a | |
| 2 | a1:c1 | 75.58842 | | a | |
| 3 | a1:c2 | 75.28170 | | a | |
| 4 | a2:c3 | 74.13150 | | a | |
| 5 | a2:c2 | 66.48266 | | b | |
| 6 | a3:c2 | 64.69985 | | b | |
| 7 | a3:c3 | 60.92335 | | c | |
| 8 | a2:c1 | 57.62610 | | d | |
| 9 | a3:c1 | 57.30021 | | d | |

Tabla 43

Análisis estadístico de prueba Tukey ($\alpha = 0.05$) para factor A:B:C.

| \$statistics | | | | | |
|---------------------|----------|------------|--------|------------------|----------|
| MSError | Df | Mean | | CV | MSD |
| 2.0528 | 27 | 67.64138 | | 2.11817 | 5.875594 |
| \$parameters | | | | | |
| test | name.t | ntr | | StudentizedRange | alpha |
| Tukey | A:B:C | 27 | | 5.799538 | 0.05 |
| \$means | | | | | |
| | Y | std | R | Min | Max |
| a1:b1:c1 | 68.05460 | 0.56932095 | 2 | 67.65203 | 68.45717 |
| a1:b1:c2 | 71.62023 | 2.35861538 | 2 | 69.95243 | 73.28802 |
| a1:b1:c3 | 79.78666 | 0.24399469 | 2 | 79.61413 | 79.95919 |
| a1:b2:c1 | 78.63646 | 0.56932095 | 2 | 78.23389 | 79.03903 |
| a1:b2:c2 | 78.86650 | 0.08133156 | 2 | 78.80899 | 78.92401 |
| a1:b2:c3 | 76.50859 | 0.16266313 | 2 | 76.39357 | 76.62361 |
| a1:b3:c1 | 80.07421 | 0.32532626 | 2 | 79.84417 | 80.30425 |
| a1:b3:c2 | 75.35838 | 0.32532626 | 2 | 75.12834 | 75.58842 |
| a1:b3:c3 | 73.92063 | 0.56932095 | 2 | 73.51806 | 74.32320 |
| a2:b1:c1 | 38.78196 | 1.46396817 | 2 | 37.74678 | 39.81714 |
| a2:b1:c2 | 42.63514 | 2.52127851 | 2 | 40.85232 | 44.41795 |
| a2:b1:c3 | 69.31982 | 2.19595225 | 2 | 67.76705 | 70.87260 |
| a2:b2:c1 | 55.28736 | 0.08133156 | 2 | 55.22985 | 55.34487 |
| a2:b2:c2 | 79.09654 | 0.73198408 | 2 | 78.57895 | 79.61413 |
| a2:b2:c3 | 78.29140 | 0.40665782 | 2 | 78.00385 | 78.57895 |
| a2:b3:c1 | 78.80899 | 2.11462069 | 2 | 77.31373 | 80.30425 |
| a2:b3:c2 | 77.71630 | 0.08133156 | 2 | 77.65879 | 77.77381 |
| a2:b3:c3 | 74.78328 | 0.16266313 | 2 | 74.66826 | 74.89830 |
| a3:b1:c1 | 62.53363 | 1.38263660 | 2 | 61.55596 | 63.51130 |
| a3:b1:c2 | 55.34487 | 3.09059946 | 2 | 53.15948 | 57.53025 |
| a3:b1:c3 | 51.72173 | 0.89464721 | 2 | 51.08912 | 52.35434 |
| a3:b2:c1 | 43.26775 | 1.13864191 | 2 | 42.46261 | 44.07289 |
| a3:b2:c2 | 67.13444 | 1.70796286 | 2 | 65.92673 | 68.34215 |
| a3:b2:c3 | 70.23998 | 3.33459416 | 2 | 67.88207 | 72.59790 |
| a3:b3:c1 | 66.09926 | 0.73198408 | 2 | 65.58167 | 66.61685 |
| a3:b3:c2 | 71.62023 | 1.38263660 | 2 | 70.64256 | 72.59790 |
| a3:b3:c3 | 60.80833 | 0.08133156 | 2 | 60.75082 | 60.86584 |
| \$comparison | | | | | |
| NULL | | | | | |
| \$groups | | | | | |
| | T | Y | groups | | |
| 1 | a1:b3:c1 | 80.07421 | a | | |
| 2 | a1:b1:c3 | 79.78666 | ab | | |

| | | | |
|----|----------|----------|-------|
| 3 | a2:b2:c2 | 79.09654 | ab |
| 4 | a1:b2:c2 | 78.86650 | ab |
| 5 | a2:b3:c1 | 78.80899 | ab |
| 6 | a1:b2:c1 | 78.63646 | ab |
| 7 | a2:b2:c3 | 78.29140 | ab |
| 8 | a2:b3:c2 | 77.71630 | ab |
| 9 | a1:b2:c3 | 76.50859 | abc |
| 10 | a1:b3:c2 | 75.35838 | abcd |
| 11 | a2:b3:c3 | 74.78328 | abcde |
| 12 | a1:b3:c3 | 73.92063 | bcdef |
| 13 | a1:b1:c2 | 71.62023 | cdefg |
| 14 | a3:b3:c2 | 71.62023 | cdefg |
| 15 | a3:b2:c3 | 70.23998 | defg |
| 16 | a2:b1:c3 | 69.31982 | efg |
| 17 | a1:b1:c1 | 68.05460 | fgh |
| 18 | a3:b2:c2 | 67.13444 | gh |
| 19 | a3:b3:c1 | 66.09926 | ghi |
| 20 | a3:b1:c1 | 62.53363 | hi |
| 21 | a3:b3:c3 | 60.80833 | ij |
| 22 | a3:b1:c2 | 55.34487 | jk |
| 23 | a2:b2:c1 | 55.28736 | jk |
| 24 | a3:b1:c3 | 51.72173 | k |
| 25 | a3:b2:c1 | 43.26775 | l |
| 26 | a2:b1:c2 | 42.63514 | l |
| 27 | a2:b1:c1 | 38.78196 | l |



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA