

COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN COMO ESTRATEGIA DE PULIMIENTO PARA EFLUENTES SECUNDARIOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO MUNICIPALES

COAGULATION-FLOCCULATION AS A POLISHING STRATEGY FOR SECONDARY EFFLUENTS IN MUNICIPAL WASTEWATER TREATMENT PLANTS

Ivette Echeverría^{1,2,*} y Valeria Vargas¹

¹*Centro de Investigaciones en Ingeniería Civil y Ambiental (CIICA)
Universidad Privada Boliviana (UPB), Cochabamba, Bolivia*

²*Fundación Aguatuña, Cochabamba, Bolivia*

echeverria.ivette@upb.edu

(Recibido el 13 de junio 2025, aceptado para publicación el 28 de julio 2025)

RESUMEN

El tratamiento eficiente de aguas residuales municipales enfrenta desafíos tanto por las limitaciones de las tecnologías convencionales como por el rápido crecimiento urbano. Con el fin de mejorar la calidad del efluente secundario de la planta de tratamiento de aguas residuales de Pucara, en Sacaba, se realizaron ensayos de coagulación-floculación utilizando sulfato de aluminio, cloruro férrico y cloruro de polialuminio (PAC) acompañado de un floculante orgánico (FLOC). Este proceso facilita la remoción de sólidos coloidales y mejora la reducción de materia orgánica. Las pruebas se realizaron empleando un equipo de jarras de bajo costo construido con materiales locales. A pesar de que la planta actualmente alcanza una eficiencia cercana al 90 % en remoción de materia orgánica, su efluente (195 mg/L de DQO) no cumple con los límites reglamentarios para descargas al río Rocha (<60 mg/L de DQO). Las dosis óptimas fueron 60 ppm de sulfato de aluminio, 60 ppm de cloruro férrico y 40 ppm de PAC + 2 ppm de FLOC, logrando reducciones de turbiedad entre 73 % y 79 %, y DQO residual entre 93 y 141 mg/L. El cloruro férrico mostró el mejor desempeño general, con un requerimiento diario estimado de 187 kg y la necesidad de realizar modificaciones estructurales, lo que resalta la importancia de llevar a cabo un análisis de viabilidad técnica y económica. La producción estimada de lodos fue de 93 m³/día, lo que refuerza aún más la necesidad de evaluar la viabilidad de su gestión desde ambas perspectivas. La coagulación-floculación representa una alternativa para el pulimento de efluentes en contextos urbanos en expansión, siempre que se garantice una operación adecuada y se evalúe su sostenibilidad a largo plazo.

Palabras Clave: Aguas Residuales, Calidad del Efluente, Coagulación-floculación, Pulimento

ABSTRACT

Efficient treatment of municipal wastewater faces challenges due to both the limitations of conventional technologies and rapid urban growth. To improve the quality of the secondary effluent from the Pucara wastewater treatment plant (WWTP) in Sacaba, coagulation-flocculation tests were conducted using aluminum sulfate, ferric chloride, and polyaluminum chloride (PAC) combined with an organic flocculant (FLOC). This process enhances the removal of colloidal solids and improves the reduction of organic matter. The tests were carried out using a low-cost jar test apparatus built with locally available materials. Although the plant currently achieves close to 90% efficiency in organic matter removal, its effluent (195 mg/L COD) does not comply with regulatory limits for discharge into the Rocha River (<60 mg/L COD). The optimal doses were 60 ppm of aluminum sulfate, 60 ppm of ferric chloride, and 40 ppm of PAC + 2 ppm of FLOC, achieving turbidity reductions between 73% and 79%, and residual COD values ranging from 93 to 141 mg/L. Ferric chloride showed the best overall performance, with an estimated daily requirement of 187 kg and the need for structural modifications, which highlights the importance of conducting a technical and economic feasibility analysis. The estimated sludge production was 93 m³/day, further reinforcing the need to assess the viability of its management from both technical and economic perspectives. Coagulation-flocculation emerges as a viable alternative for polishing secondary effluents in expanding urban areas, provided that proper operation is ensured and long-term sustainability is carefully evaluated.

Keywords: Wastewater, Effluent Quality, Coagulation-flocculation, Polishing

1. INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas acuáticos saludables son fundamentales para el bienestar de la sociedad humana, ya que ofrecen una amplia gama de servicios ecosistémicos [1]. Entre los más importantes se encuentra la provisión de agua dulce para el consumo humano, la agricultura, la ganadería y la industria, así como el suministro de alimentos. Además, estos ecosistemas cumplen funciones importantes en la regulación del ciclo hidrológico, el soporte ecológico y aportan un notable valor estético, cultural y económico [2].

En los últimos años, la descarga incontrolada de aguas residuales a nivel global ha afectado negativamente a la salud de los ecosistemas acuáticos. Algunos de los ríos ubicados cerca de zonas densamente pobladas, especialmente en

países en desarrollo, se han convertido en cursos de aguas residuales. Aunque la mayoría de los ecosistemas acuáticos tienen una capacidad natural para diluir la contaminación hasta cierto punto, una contaminación severa ocasiona la alteración de las comunidades de fauna y flora [3].

Actualmente se estima que el 52,8% de las aguas residuales producidas a nivel mundial son tratadas en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) mientras que el 47,2% se descarga sin tratamiento [4]. La carencia de instalaciones de tratamiento se presenta mayormente en países en desarrollo [5].

El tratamiento de las aguas residuales debería lograr una calidad del agua que sea compatible con la sensibilidad del área de descarga, es decir, el cuerpo receptor y que además sea adecuada para el reúso previsto. En este sentido, en áreas donde las personas puedan tener contacto directo con el cuerpo receptor, la principal preocupación debería ser la concentración de patógenos. En cambio, en áreas con bajo riesgo de contacto humano, la eliminación de materia orgánica y nutrientes puede requerir una mayor atención. Según el contexto, todos estos parámetros pueden ser relevantes por lo que el tratamiento debe perseguir el objetivo de cumplir con los estándares de descarga vigentes a nivel local.

Por las características propias de las diversas tecnologías empleadas, los efluentes tratados difícilmente alcanzan los estándares establecidos por la normativa ambiental vigente. De hecho, alrededor del mundo son pocas las opciones tecnológicas que pueden alcanzar los estándares más estrictos de calidad, es decir, una concentración de DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno) menor a 20 mg/l. Entre estos están los procesos extensivos: humedales artificiales de una etapa y humedales artificiales híbridos; y, los procesos intensivos: los procesos de lodos activados, los reactores secuenciales por lotes, los filtros percoladores, los contactores biológicos rotatorios y la combinación entre reactores anaerobios y filtros percoladores [6] o algún otro proceso aeróbico como lodos activados [7].

Además de las limitaciones inherentes de las tecnologías existen otras particularidades que pueden comprometer la calidad del efluente. En Bolivia en particular, las deficiencias tienen que ver mayormente con la operación y mantenimiento. Un 29% de las PTAR presentan un funcionamiento deficiente relacionado con la falta de operación y mantenimiento. Por otro lado, un 37% de las PTAR están constituidas por procesos anaerobios, un 39,5 % emplean procesos naturales como el lagunaje para el tratamiento, un 21,8% solo tiene tratamiento primario y solo un 0,9% emplea procesos aeróbicos [8].

Los procesos anaerobios y procesos naturales no tienen la capacidad de alcanzar estándares más estrictos. Más allá, todas aquellas PTAR que emplean procesos biológicos son afectados por las temperaturas promedio más bajas que se presentan en muchas regiones de Bolivia [9], [10]. Finalmente, los estándares de calidad establecidos en el ámbito boliviano, establecidos en el reglamento en materia de contaminación hídrica (RMCH) de la Ley 1333 contienen parámetros muy exigentes para descargas, por ejemplo, la concentración de DBO en el efluente debería ser de <5 mg/l en cuerpos de agua de máxima calidad y <30 mg/l en cuerpos de calidad mínima. En este contexto se hace necesario experimentar procesos alternativos o complementarios a los existentes que permitan mejorar la calidad del agua residual tratada y poder cumplir con los requisitos normativos.

El empleo de insumos químicos en el tratamiento de las aguas residuales es una alternativa poco explorada debido a los costos que esto representa. En los procesos de coagulación-floculación empleando aditivos químicos el objetivo es la desestabilización de las partículas en suspensión de las aguas residuales, es decir, la neutralización de las cargas eléctricas superficiales de las partículas con adición de coagulantes como sales de hierro o aluminio seguida de adsorción de las partículas desestabilizadas a los flóculos formados por el coagulante y agregación de flóculos hasta un tamaño sedimentable [11]. De esta forma se puede remover la turbidez asociada a la materia orgánica de las aguas residuales.

Existen buenos resultados de la aplicación de coagulantes en el tratamiento de aguas residuales. Por ejemplo, un estudio de [12] reporta una disminución del 77% de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), 83% de la demanda química de oxígeno (DQO), 98,4% de la turbidez y 97% de los sólidos en suspensión (SST) con la aplicación de 340 mg/l de sulfato de aluminio $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ seguido de sedimentación en los afluentes a una PTAR municipal de una ciudad de Marruecos. Por otro lado, [13] reportó una eliminación del 50% de DBO, 80% de SST, 30% de nitrógeno total Kjeldahl (NKT) y más del 80% de fósforo P aplicando una dosis de 30 mg/l de cloruro férrico FeCl_3 y 0,5 mg/l de un polímero. Este tratamiento primario mejorado se aplicó a las aguas residuales generadas en el complejo del aeropuerto y sus instalaciones aledañas en Santiago de Chile. La coagulación floculación ha sido ampliamente utilizada para el tratamiento de efluentes industriales, por ejemplo, para el tratamiento de efluentes del proceso de teñido, efluentes de industrias lácteas, efluentes de destilería, de curtiduría, entre otros. Para el tratamiento de efluentes domésticos, existen algunos estudios realizados con objeto de reducir el contenido de fósforo que no se remueve biológicamente en las plantas de tratamiento. Se ha reportado hasta una eliminación del 90% del fósforo con la aplicación de 100-200 ppm de sulfato de aluminio [14].

El pulimento de los efluentes secundarios con la aplicación de coagulantes con objeto de reducir la concentración de materia orgánica ha sido poco explorado.

Una de las principales limitaciones para realizar ensayos de coagulación-floculación es el alto costo de los equipos de jarras (jar-test). El precio internacional de un equipo de laboratorio de gama media puede superar los 6.000 USD [15]. Asimismo, la contratación de servicios especializados para realizar estos ensayos también puede resultar costosa.

En este estudio, se construyó un equipo de jarras de bajo costo utilizando materiales locales. El objetivo fue evaluar procesos de coagulación-floculación como una alternativa de pulimento para los efluentes secundarios de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de Pucara, ubicada en el municipio de Sacaba.

2. MATERIAL Y METODOLOGÍA

2.1. Descripción del área de estudio

La PTAR de Pucara se encuentra ubicada en el municipio de Sacaba, en el departamento de Cochabamba. El municipio de Sacaba es la capital de la provincia de Chapare que limita al norte con los municipios de Cocapata y Morochata; al sur con los municipios de Tolata, Arbieto, Tiraque y San Benito; al este con los municipios de Villa Tunari y Colomi y al oeste con los municipios de Cercado y Tiquipaya (Figura 1). Se encuentra ubicado entre las coordenadas 16°45'18.546" y 17°31'35.125" de latitud sur, y 65°39'59.082" y 66°18'27.144" de longitud oeste. Su altitud varía entre 1.366 y 4.642 m.s.n.m. El clima es predominantemente semiárido con variaciones según la altitud y exposición topográfica. Se pueden encontrar pisos bioclimáticos termotropicales en los valles bajos, mesotropicales en los valles intermedios y supratropicales y orotropicales en las zonas altas. La temperatura promedio anual es de 17,4 °C con una máxima promedio que alcanza los 26,1 °C en los meses más cálidos (noviembre-diciembre) y una mínima promedio de 8,7 °C en los meses más fríos (junio-julio) con heladas en las zonas altas. La precipitación promedio anual es de 550 mm. En época de lluvias las precipitaciones alcanzan los 208 mm mensuales (diciembre a enero) y en época seca (junio-julio) la precipitación varía entre 12-17 mm mensuales [16].

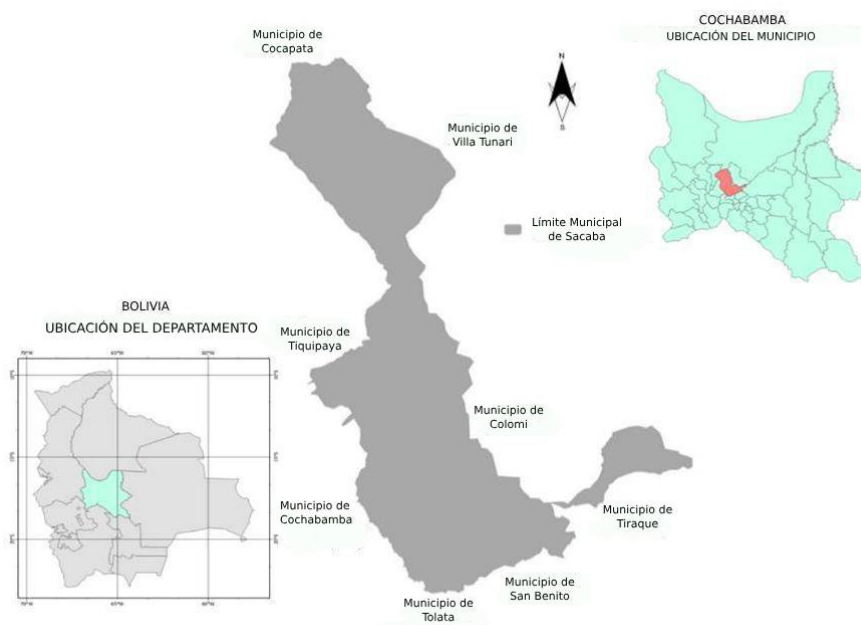


Figura 1: Ubicación del municipio de Sacaba

Actualmente, política y administrativamente la jurisdicción del municipio está constituida por 12 distritos, de los cuales 7 son urbanos y 5 son rurales. De estos, los distritos 1, 2, 3, 4, 6, 7 y Lava Lava son relativa y homogéneamente urbanos mientras que el resto son mayoritariamente rurales o mixtos.

Sacaba tiene una cobertura de alcantarillado del 64,34% del cual el 63,77% corresponde al área urbana y el 1,57% al área rural. Esta baja cobertura de saneamiento ha ocasionado contaminación hídrica, principalmente en las cuencas de Maylanco y el Rocha. Actualmente el municipio cuenta con cuatro plantas de tratamiento: la primera PTAR se encuentra en Pacata distrito III, la segunda PTAR se encuentra en el Abra distrito II, la tercera PTAR se encuentra en Curumbamba distrito VII, y la cuarta PTAR se encuentra en la zona de Pucara [16].

Este estudio se enfoca en los efluentes secundarios de la PTAR de Pucara que descarga sus aguas tratadas en la cuenca del río Rocha. Dicho cuerpo de agua en esta sección está clasificado como un cuerpo de calidad D [16], es decir, que es un cuerpo de agua de calidad mínima que requiere de un tratamiento fisicoquímico y bacteriológico completo.

2.2 Descripción de la PTAR de Pucara

La PTAR de Pucara, inaugurada en octubre de 2022, atiende a los habitantes de los distritos 1, 4 y 7 y parte del distrito de Lava Lava. Esta planta beneficia a una población de 50.000 habitantes y ha sido diseñada para un caudal de 80 l/s.

El proceso de tratamiento sigue el esquema ilustrado en la Figura 2, donde el agua que llega pasa primero por una etapa de pretratamiento compuesta por una reja autolimpiante y un tamiz filtrante para eliminar sólidos gruesos y finos. También se cuentan con rejas de limpieza manual ubicadas en un canal paralelo como alternativa para el desbaste cuando los equipos mecanizados entren en mantenimiento.

Después del desbaste, el agua ingresa a una cámara desgrasadora para la separación de aceites y grasas por flotación natural. A la salida de la desgrasadora, en un canal, se encuentra ubicado un medidor de caudal ultrasónico que permite medir el flujo de ingreso a la PTAR. Después del pre-tratamiento, el agua ingresa a reactores anaeróbicos de flujo ascendente (RAFA), donde se descompone la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Después el agua pasa a unos filtros percoladores circulares con un empaque plástico para la fijación de la biopelícula. En estos filtros la depuración biológica se da en medio aerobio.

El efluente de los filtros percoladores pasa a clarificadores longitudinales, donde se sedimentan los sólidos en suspensión restantes. Como pulido final, el agua clarificada atraviesa filtros de arena para retener partículas de hasta 5 micras. Luego pasa por un proceso de desinfección con lámparas UV para inactivar microorganismos patógenos sin alterar la química del agua [17].

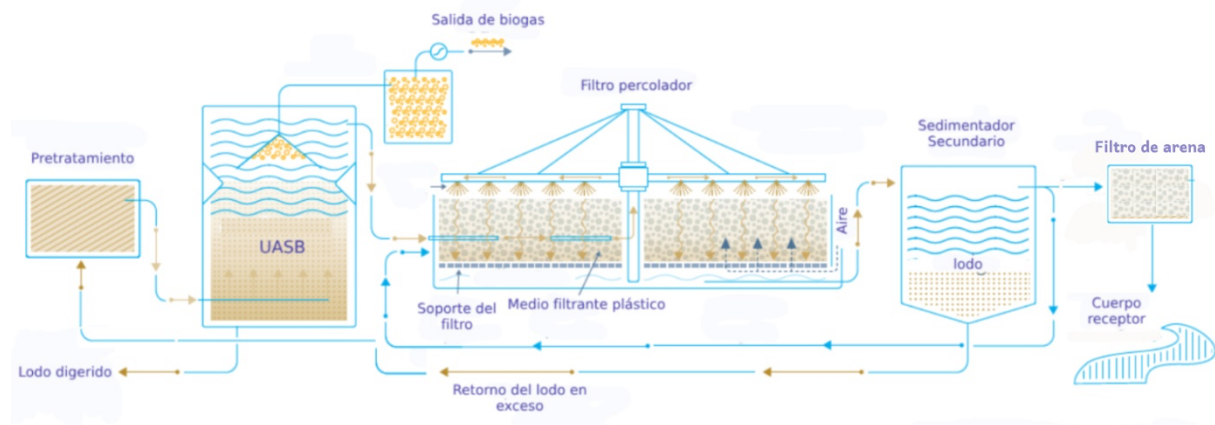


Figura 2: Esquema del tren de tratamiento PTAR Pucara (Adaptado de [6], [7])

2.3 Características de las aguas residuales

Las aguas residuales afluentes y efluentes de cada uno de los procesos que conforman la PTAR de Pucara fueron caracterizadas en un estudio previo aún no publicado realizado por el mismo grupo de investigadores. El periodo de monitoreo se extendió desde noviembre de 2023 hasta noviembre de 2024.

Los parámetros evaluados fueron: pH, conductividad, sólidos suspendidos totales (SST), DBO₅, DQO (total y disuelta), nitrógeno amoniacal (N-NH₃) y fósforo (P). Excepto la DBO₅, todas las muestras fueron analizadas en los laboratorios de la Universidad Privada Boliviana (UPB), siguiendo métodos estandarizados del *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* [18].

Un resumen de los resultados principales de la caracterización se presenta en la Tabla 1.

TABLA 1 - CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES PTAR PUCARA

Punto de monitoreo	n	Parámetro					
		pH	DBO5 (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	N-NH ₃ (mg/l)	P (mg/l)
Afluente	9	8,2 ± 0,2	499 ± 134	1370 ± 313	519 ± 112	123 ± 22	16 ± 2
Efluente del UASB	9	7,3 ± 0,2	151 ± 49	381 ± 103	111 ± 71	117 ± 14	15 ± 1
Efluente de los filtros percoladores	9	8,3 ± 0,1	106 ± 64	328 ± 160	143 ± 162	97 ± 21	14 ± 2
Efluente de los sedimentadores secundarios	9	8,2 ± 0,2	118 ± 60	209 ± 83	46 ± 20	98 ± 21	14 ± 1
Efluente del filtro de arena	9	8,2 ± 0,2	118 ± 51	195 ± 57	50 ± 29	101 ± 21	14 ± 1
		-	Eficiencia (%)				
			79,3	88,5	95,2	24,4	10,6

Aunque la PTAR presenta una eficiencia relativamente alta en términos de la remoción de materia orgánica, el efluente no cumple con los parámetros que especifica el RMCH para un cuerpo clasificado como tipo D.

2.3.1 Caudales afluentes a la PTAR

En el estudio previo mencionado, también se realizaron mediciones de los caudales afluentes a la PTAR. Los datos se registraron con una frecuencia horaria y en intervalos de 2 horas durante campañas de monitoreo de 24 horas, llevadas a cabo entre septiembre y noviembre de 2024. La Figura 3 presenta los valores promedio obtenidos durante dicho periodo de evaluación.

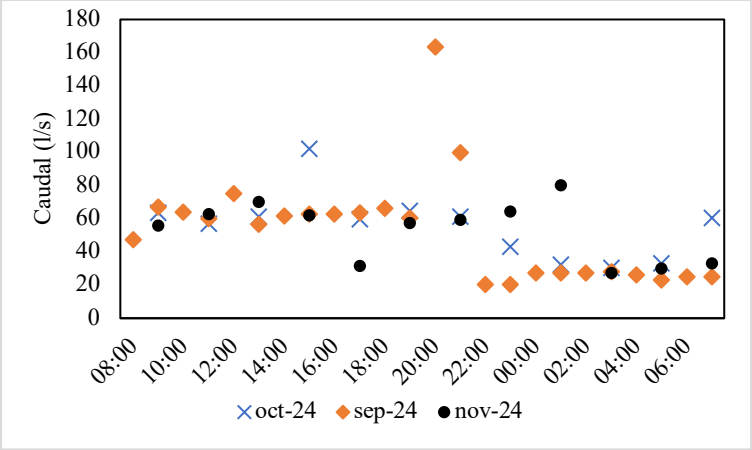


Figura 3: Caudales afluentes a la PTAR de Pucara

El promedio de los caudales afluentes a la PTAR es de 54 l/s.

2.4 Prueba de jarras

Una prueba de jarras es un procedimiento que se realiza en laboratorio para simular los procesos de coagulación-floculación durante el tratamiento de aguas. Estas pruebas permiten determinar experimentalmente las condiciones óptimas del proceso, es decir, las dosis y concentración de coagulantes, las necesidades de reactivos para el ajuste del pH, la intensidad y el tiempo de mezcla, tiempo de sedimentación, entre otros.

Experimentalmente, el procedimiento consiste en una serie de pasos. En primer lugar, se deben preparar las muestras y colocarlas en recipientes de vidrio de sección circular, usualmente con volúmenes de entre 1 y 2 litros. Los equipos de jarras suelen contar con entre 4 y 10 posiciones para estos recipientes.

Luego, se preparan todos los reactivos a utilizar, incluyendo coagulantes y reguladores de pH (ácidos o bases). Antes de comenzar las pruebas, es necesario determinar las dosis requeridas para ajustar el pH. Si es necesario, estos reactivos deben añadirse a las jarras antes de iniciar la agitación.

A continuación, las jarras se colocan en el equipo, que cuenta con agitadores de paletas en cada posición para permitir la mezcla a diferentes velocidades. Se inicia con un mezclado de homogeneización inmediatamente después de aplicar el coagulante en todas las jarras. Esta etapa se realiza durante 30 a 60 segundos a una velocidad de entre 200 y 300 rpm, con el objetivo de dispersar eficientemente el coagulante.

Posteriormente, se lleva a cabo una etapa de floculación rápida a velocidades entre 110 y 190 rpm, durante un tiempo definido según las condiciones operativas deseadas. Finalmente, se realiza una floculación lenta a una velocidad que puede variar entre 20 y 80 rpm.

La simulación del proceso de separación de los flóculos dependerá del tipo de tratamiento que se desea replicar. Puede emplearse una filtración directa (simulada mediante centrifugación), sedimentación, o una combinación de sedimentación seguida de filtración.

Para evaluar la efectividad del proceso, se deben medir algunos parámetros como la concentración residual del coagulante, la alcalinidad remanente, y especialmente las concentraciones de las impurezas objetivo. Estas últimas pueden determinarse de manera directa (por ejemplo, mediante la medición de la DQO) o indirecta (como la turbidez).

Una vez evaluado el proceso, los pasos se repiten variando las condiciones para optimizar los resultados.[19].

2.4.1 Construcción de un equipo de jarras

Para este estudio se construyó un equipo de jarras de bajo costo, montado sobre una estructura de melamina fijada con angulares metálicos cuyas dimensiones son $1,40 \times 0,60 \times 0,40$ m. El sistema cuenta con seis posiciones para recipientes de vidrio cilíndricos de 1 o 2 litros de capacidad.

Cada eje agitador, de 25 cm de longitud, está fabricado en acero inoxidable. Las paletas de los agitadores fueron impresas en 3D y miden 7 cm en su eje mayor y 2,5 cm en el eje menor.

El equipo incorpora seis motores de corriente continua de 12 V, conectados en paralelo a una fuente de alimentación de banco ajustable (0–30 V / 5 A DC). Cada motor está ubicado en una de las seis posiciones y acoplado al eje de las paletas de agitación mediante abrazaderas. A diferencia de un equipo de jarras convencional, en este diseño las paletas están fijadas a los motores, por lo que el ajuste de la altura entre las paletas y las jarras debe realizarse desplazando los recipientes. Para ello, se utilizan elevadores de laboratorio de placa rectangular tipo jack. Al interior de la estructura de melamina, se colocaron tiras de luces led para que la formación de los flóculos pueda apreciarse de mejor manera.

Para regular la velocidad de mezclado, se calibró la fuente de alimentación para permitir un rango de velocidad de agitación entre 20 y 120 rpm. Una fotografía del equipo de jarras montado se muestra en la Figura 4.

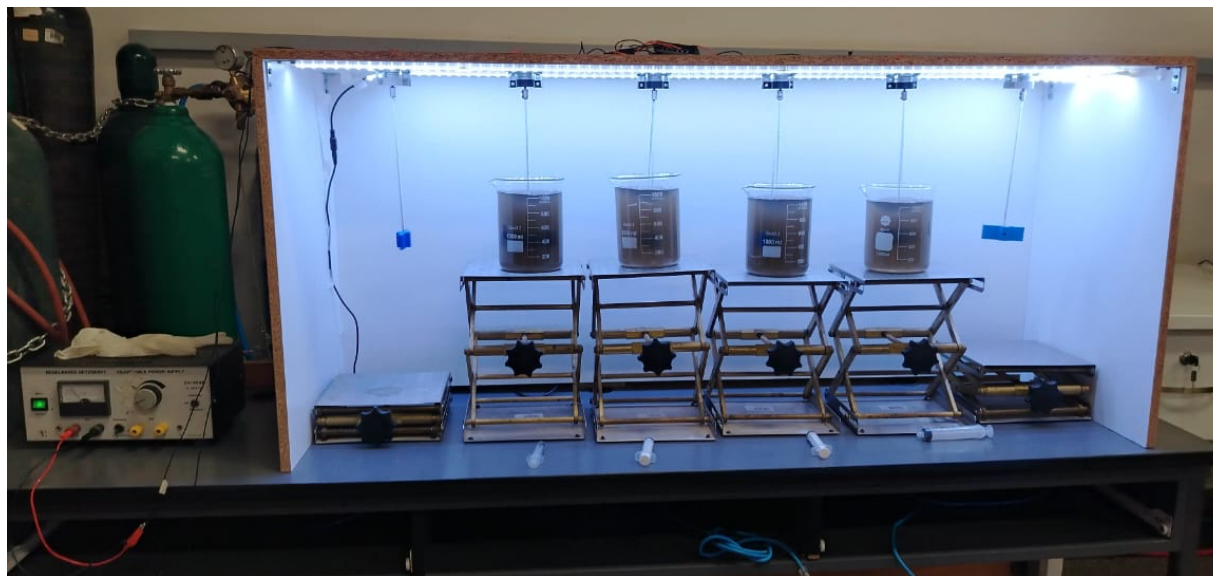


Figura 4: Equipo de jarras de bajo costo

Una estimación del costo del equipo de jarras se presenta a continuación en la Tabla 2.

TABLA 2 - COSTO ESTIMADO EQUIPO DE JARRAS

Item	Descripción	Cantidad	Costo unitario (Bs.)	Costo total (Bs.)
1	Estructura de melamina con angulares para la fijación	1	400	400
2	Fuente de alimentación de banco ajustable 0-30 V/5A DC	1	3500	3500
3	Motores 12 V DC	6	90	540
4	Agitador varilla de acero inoxidable más paleta impresa en 3d más abrazadera	6	40	240
5	Elevador de laboratorio tipo jack	6	500	3000
6	Luces led	1	60	60
Total				7740

El equipo tiene un costo estimado aproximado de 7740 Bs, que es un costo más económico en comparación a los precios de mercado. Este costo actualmente puede variar.

2.4.2 Coagulantes y floculantes

Para las pruebas se emplearon distintos tipos de coagulantes. El sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$, el cloruro férrico ($FeCl_3$) y el cloruro de polialuminio (PAC) combinado con un floculante de tipo orgánico (FLOC). Todos estos de grado comercial adquiridos localmente.

2.4.3 Enfoque experimental

Se ensayaron los procesos de coagulación-floculación en muestras del efluente proveniente de los filtros percoladores. Las muestras fueron colectadas en recipientes plásticos de 20 litros, preservadas en frío y transportadas a los laboratorios de la Universidad Privada Boliviana (UPB), donde los ensayos se realizaron dentro de la misma semana de muestreo.

Para los ensayos se utilizaron volúmenes de 1 litro de muestra en cada una de las seis posiciones disponibles del equipo de jarras. Inicialmente, se evaluaron dosis de 10, 20, 40, 60, 80 y 100 ppm para todos los coagulantes utilizados. En el caso del PAC, se adicionó además un floculante orgánico para alcanzar una concentración final de 2 ppm en cada jarra.

Las condiciones de mezcla consistieron en una agitación rápida de 60 segundos a 120 rpm, seguida de una agitación lenta de 20 minutos a 40 rpm, y un tiempo de sedimentación de 30 minutos. Para evaluar la eficiencia del proceso, se midió inicialmente la turbiedad mediante el análisis de muestras tomadas de la porción sobrenadante. Estas se extrajeron cuidadosamente con jeringas, introducidas hasta la mitad de la columna líquida, evitando así aspirar sedimentos o residuos flotantes. La eficiencia de remoción de turbiedad vinculada a la eficiencia del proceso se estimó a partir de la ecuación (1):

$$\% EF = \frac{Turbiedad_i - Turbiedad_f}{Turbiedad_i} * 100 \quad (1)$$

Donde:

% EF: Porcentaje de eficiencia en la remoción de turbiedad

Turbiedad_i: Turbiedad inicial (NTU)

Turbiedad_f: Turbiedad final (NTU)

Posteriormente, con base en los resultados obtenidos, se escogieron las jarras con mejor desempeño. En las jarras con los mejores resultados se midieron el pH, la turbidez, la DQO, y el volumen de lodos sedimentados. La toma de muestras para estos análisis se realizó siguiendo el mismo procedimiento previamente descrito, utilizando una jeringa para succionar cuidadosamente desde la porción media del sobrenadante, evitando arrastrar sedimentos o residuos flotantes. La eficiencia de remoción de DQO se estimó a partir de la ecuación (2):

$$\% EF = \frac{DQO_i - DQO_f}{DQO_i} * 100 \quad (2)$$

Donde:

% EF: Porcentaje de eficiencia en la remoción de DQO

DQO_i : Concentración DQO inicial (mg/l)

DQO_f : Concentración DQO final (mg/l)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El pH, la turbiedad y la DQO inicial de las muestras provenientes del efluente del filtro percolador fueron 8,2 y 68,7 NTU y 269 mg/l, respectivamente. Dado que el pH inicial de la muestra es relativamente elevado, no fue necesario la aplicación de reguladores de pH previo a la aplicación de coagulantes.

La variación de la turbiedad y el pH con la aplicación de distintas dosis de sulfato de aluminio como coagulante se presenta a continuación en la Tabla 3.

TABLA 3 - RESULTADO DE LOS ENSAYOS DE COAGULACIÓN CON LA APLICACIÓN DE SULFATO DE ALUMINIO

ID	Dosificación de $Al_2(SO_4)_3$ (ppm)	Turbiedad (NTU)	pH
Muestra cruda	0	68,7	8,2
Jarra 1	10	47,2	7,94
Jarra 2	20	25,1	7,82
Jarra 3	40	18,5	7,7
Jarra 4	60	14,4	7,66
Jarra 5	80	12,8	7,59
Jarra 6	100	10,4	7,55

La variación de la turbiedad con la aplicación de distintas dosis de cloruro de hierro como coagulante se presenta a continuación en la Tabla 4.

TABLA 4 - RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE COAGULACIÓN CON LA APLICACIÓN DE CLORURO FÉRRICO

ID	Dosificación de $FeCl_3$ (ppm)	Turbiedad (NTU)	pH
Muestra cruda	0	68,7	8,2
Jarra 1	10	39,3	7,73
Jarra 2	20	28,9	7,69
Jarra 3	40	21,4	7,62
Jarra 4	60	18,3	7,52
Jarra 5	80	18,8	7,46
Jarra 6	100	15,7	7,39

La variación de la turbiedad con la aplicación de distintas dosis de PAC como coagulante y FLOC como floculante se presenta a continuación en la Tabla 5.

TABLA 5 - RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE COAGULACIÓN CON LA APLICACIÓN DE PAC Y FLOC

ID	Dosificación de PAC (ppm)	Dosificación de FLOC (ppm)	Turbiedad (NTU)	pH
Muestra cruda	0	0	68,7	8,2
Jarra 1	10	2	23,3	7,84
Jarra 2	20	2	30,7	7,79
Jarra 3	40	2	14,28	7,74
Jarra 4	60	2	11,03	7,75
Jarra 5	80	2	10,75	7,71
Jarra 6	100	2	8,33	7,66

Los resultados de las pruebas realizadas muestran una disminución efectiva de la turbiedad con la aplicación de los tres coagulantes. Se observa un desempeño similar de los coagulantes con la aplicación de dosis altas. En la aplicación de dosis bajas, el PAC combinado con FLOC aparenta tener un mejor desempeño.

La variación del pH con la aplicación de los coagulantes se presenta gráficamente en la Figura 5.

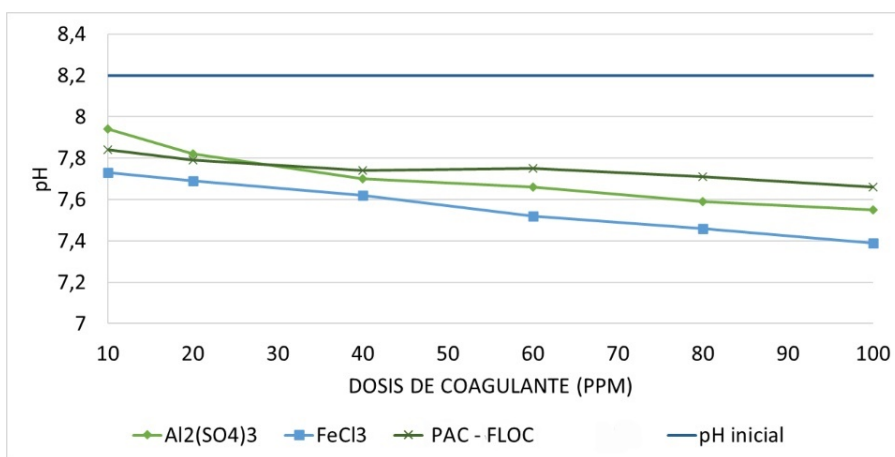


Figura 5: Variación del pH con la aplicación de coagulantes

Se observó que incluso con dosis altas el pH no desciende por debajo de 7,5. La normativa ambiental especifica que el pH de descarga de efluentes debe estar comprendido entre 6,5-9,0 por lo que la aplicación de cualquiera de estas dosis no resultaría un problema.

En la Figura 6 se puede apreciar una comparación de la eficiencia en la remoción de turbiedad tras la aplicación de los distintos coagulantes.

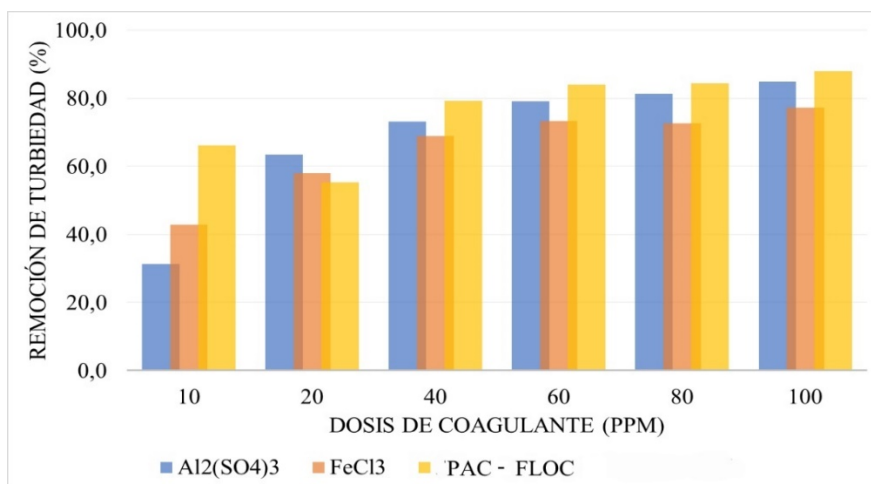


Figura 6: Comparación de la eficiencia de remoción de turbiedad tras la aplicación de coagulantes

De los resultados se aprecia que, con la aplicación de dosis de 60 y 80 ppm los resultados no varían significativamente. A una dosis de 60 ppm de sulfato de aluminio se alcanza una remoción de turbidez del 79 %. Con la misma dosis de cloruro férrico se alcanza una remoción de 73,4%. La efectividad a la misma dosis con la aplicación del PAC es del 84%. Mientras que el sulfato de aluminio y el cloruro férrico tienen una efectividad similar, el PAC muestra un desempeño un tanto superior. La remoción del 79 % que se alcanza con la aplicación de 40 ppm de PAC es comparable a la que se alcanza con la aplicación de 60 ppm de sulfato de aluminio.

Las dosis óptimas de sulfato de aluminio, cloruro férrico y PAC/FLOC se resumen en la Tabla 6 donde además se presenta la disminución de la DQO desde un valor inicial de 269 mg/l.

TABLA 6 - DOSIS ÓPTIMA Y REMOCIÓN DE DQO

Coagulante	Dosis óptima (ppm)	DQO final (mg/l)	Eficiencia de remoción (%)
Sulfato de aluminio	60	123	54,5
Cloruro férrico	60	93	65,6
PAC/FLOC	40	141	47,7

En este caso, se aprecia que, con una misma dosis el cloruro férrico logra una mejor calidad en el efluente. Aunque el PAC con una dosis de 40 ppm lograba una remoción comparable de turbiedad, el efluente obtenido en términos de DQO presenta desventajas respecto del sulfato de aluminio y cloruro férrico. Con respecto de la calidad inicial del afluente a la PTAR (1370 ± 313 mg DQO/l), la aplicación de cloruro férrico a una dosis de 60 ppm, mejoraría la eficiencia de un 88,5% a un 93,2%. La calidad obtenida de DQO (93 mg/l), aún no llega a cumplir con lo que establece el RMCH para un cuerpo de clasificación tipo D que demanda descargar el agua tratada con una DQO < 60 mg/l. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que las características del agua tratada corresponden a aquella que ha pasado por un proceso de sedimentación y que un proceso de filtración podría mejorar aún más esta calidad pudiendo llegarse a alcanzar valores cercanos a lo establecido por la normativa.

Por otro lado, se debe considerar que emplear procesos químicos para mejorar la calidad del efluente requiere de un estudio de sostenibilidad, no solo económica sino también técnica y ambiental. Si bien se aprecian los beneficios, es un hecho que la aplicación de insumos químicos representa un costo económico y requiere de mano de obra calificada. Además, con la aplicación de insumos químicos se generan lodos que necesitan ser dispuestos.

Una estimación de la cantidad de insumo requerido se presenta a continuación:

$$54 \frac{l}{s} \cdot \frac{40 \text{ mg FeCl}_3}{1 l} \cdot \frac{3600 s}{1 h} \cdot \frac{24 h}{1 \text{ día}} \cdot \frac{1 \text{ kg FeCl}_3}{10^6 \text{ mg FeCl}_3} = 186,6 \frac{\text{kg FeCl}_3}{\text{día}}$$

Para lograr una concentración de 60 ppm de cloruro férrico en el efluente del filtro percolador que permita mejorar la calidad del efluente, se requeriría la aplicación de una cantidad aproximada de 186 kg diarios. Esta concentración se

encuentra en el rango de aplicación de alumbre recomendado de 5-150 ppm [20]. Los lineamientos técnicos no restringen la cantidad de aplicación de cloruro férrico u otros coagulantes, sin embargo, si mencionan que los objetivos de la coagulación deben alcanzarse sin la aplicación de cantidades irrazonables de coagulantes [21].

La cantidad de lodo aproximada que se genera en la aplicación de 60 ppm de cloruro férrico es de 20 ml. Una estimación de la cantidad de lodo generado diariamente se presenta a continuación.

$$54 \frac{l}{s} \cdot \frac{20 \text{ ml lodo}}{1 l} \cdot \frac{1 \text{ m}^3 \text{ lodo}}{1 \times 10^6 \text{ ml lodo}} \cdot \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} = 93 \frac{\text{m}^3 \text{ lodo}}{\text{día}}$$

Se estima que la generación diaria de lodo húmedo alcanza los 93 m³. Este volumen elevado requiere ser reducido mediante procesos de espesamiento o deshidratación, con el fin de facilitar su manejo y disposición final.

Por otro lado, para implementar un proceso de precipitación química mediante coagulación, sería necesario adaptar el sedimentador secundario existente y convertirlo en un decantador tipo lamelar. Un decantador tipo lamelar contiene una serie de placas inclinadas o paralelas (lamelas) dispuestas en ángulo. Estas placas crean múltiples canales estrechos que acortan el recorrido de sedimentación y reducen la turbulencia. De esta forma, los flóculos formados con la adición del coagulante sedimentan rápidamente sobre las placas y se deslizan hacia el fondo donde se acumulan como lodo y el agua clarificada pasa a la siguiente etapa del tratamiento. En comparación con los sedimentadores convencionales, estos decantadores son más eficientes en la separación sólido-líquido y son más compactos [22].

Dado el alcance de las modificaciones y la necesidad de la gestión de lodos, es recomendable realizar un análisis detallado de costos.

4. CONCLUSIONES

Se realizaron ensayos de coagulación-floculación para mejorar la calidad del efluente secundario de la planta de tratamiento de aguas residuales de Pucara. Esta planta está conformada por un sistema de pretratamiento, reactores anaerobios de flujo ascendente, filtros percoladores, sedimentadores secundarios y filtros de arena. Aunque presenta una eficiencia notable en la remoción de materia orgánica (~90%), actualmente no cumple con los estándares exigidos por el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica de la Ley del Medio Ambiente N.º 1333 para descargas al río Rocha. Este cuerpo de agua está clasificado como tipo D, lo que exige una concentración de DQO inferior a 60 mg/L en el efluente tratado. Actualmente, el efluente de la PTAR contiene en promedio 195 mg/L de DQO.

Con el fin de reducir la carga orgánica, se ensayaron tres tipos de coagulantes: sulfato de aluminio, cloruro férrico y cloruro de polialuminio (PAC), este último acompañado de un floculante orgánico (FLOC). Se aplicaron dosis en el rango de 10 a 100 ppm para cada coagulante. Las dosis óptimas encontradas fueron: 60 ppm de sulfato de aluminio, 60 ppm de cloruro férrico, y 40 ppm de PAC más 2 ppm de FLOC.

Con estas dosis, se obtuvieron remociones de turbiedad del 79 %, 73,4 % y 79 %, respectivamente. En cuanto a la DQO residual, las concentraciones fueron de: 123 mg/L con sulfato de aluminio, 93 mg/L con cloruro férrico, y 141 mg/L con PAC-FLOC.

El cloruro férrico mostró el mejor desempeño global. Para el caudal promedio afluente a la planta de 54 l/s, se estimó un requerimiento diario de 187 kg de cloruro férrico, lo que permitiría mejorar la calidad del efluente en aproximadamente un 4,7 %. El uso de dosis más altas no se considera recomendable debido a los costos asociados, tanto por la adquisición de insumos como por la necesidad de mano de obra especializada y la modificación de la infraestructura existente. Esta última implicaría convertir el sedimentador secundario en un floculador lamelar. El volumen diario estimado del lodo húmedo producido fue de 93 m³, el cual requiere ser adecuadamente gestionado.

Dada la variabilidad en la composición de las aguas residuales, se recomienda contar con un equipo de jarras in situ que permita determinar las dosis óptimas de coagulantes de forma periódica. Un equipo de jarras de bajo costo, como el construido para este estudio, podría tener un costo aproximado de 7740 Bs (~1110 USD al tipo de cambio oficial), lo que representa una alternativa económica frente a los equipos comerciales disponibles en el mercado.

Los procesos de coagulación-floculación constituyen una estrategia viable para el pulimiento de efluentes secundarios, especialmente en contextos urbanos de rápido crecimiento donde se requiere fortalecer la calidad del tratamiento final. Al considerarse implementar estos procesos deben considerarse los requisitos de operación y mantenimiento y que se debe contar con personal debidamente capacitado.

REFERENCIAS

- [1] S. U. Bhat, U. Qayoom, S. U. Bhat, and U. Qayoom, "Implications of Sewage Discharge on Freshwater Ecosystems," in *Sewage - Recent Advances, New Perspectives and Applications*, IntechOpen, 2021. doi: 10.5772/intechopen.100770.
- [2] Millennium Ecosystem Assessment, Ed., *Ecosystems and human well-being: synthesis*. in The Millennium Ecosystem Assessment series. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [3] J. Mateo-Sagasta, S. M. Zadeh, H. Turrall, and J. Burke, "Water pollution from agriculture: a global review. Executive summary," 2017, Accessed: May 29, 2025. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/10568/88070>
- [4] E. R. Jones, M. T. H. van Vliet, M. Qadir, and M. F. P. Bierkens, "Country-level and gridded estimates of wastewater production, collection, treatment and reuse," *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 13, no. 2, pp. 237–254, Feb. 2021, doi: 10.5194/essd-13-237-2021.
- [5] M. Qadir *et al.*, "The challenges of wastewater irrigation in developing countries," *Agric. Water Manag.*, vol. 97, no. 4, pp. 561–568, Apr. 2010, doi: 10.1016/j.agwat.2008.11.004.
- [6] J.-M. Brault, K. Buchauer, and M. Gambrell, *Wastewater Treatment and Reuse: A Guide to Help Small Towns Select Appropriate Options*. World Bank, 2022. doi: 10.1596/37317.
- [7] C. A. De Lemos Chernicharo, T. Bressani-Ribeiro, and D. A. Nolasco, Eds., *Reactores Anaeróbicos para Tratamiento de Aguas Residuales: Diseño, Construcción y Operación*. IWA Publishing, 2024. doi: 10.2166/9781789064261.
- [8] Ministerio de Medio Ambiente y Agua, "Estrategia Nacional de Tratamiento de Aguas Residuales (ENTAR)," presented at the Presentación de la estrategia nacional de tratamiento de aguas residuales, La Paz-Bolivia, 2020.
- [9] O. Saavedra *et al.*, "Evaluation of a domestic wastewater treatment plant at an intermediate city in Cochabamba, Bolivia," *Water Pract. Technol.*, vol. 14, no. 4, pp. 908–920, Dec. 2019, doi: 10.2166/wpt.2019.071.
- [10] I. Echeverría, O. Saavedra, R. Escalera, G. Heredia, C. Yoshimura, and R. Montoya, "Small-Scale Operation of an Integrated Anaerobic Baffled Reactor and Biofilter: Factors Affecting Its Performance," *J. Environ. Eng.*, vol. 148, no. 11, p. 04022065, Nov. 2022, doi: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0002047.
- [11] J. Bratby, *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment*. IWA Publishing, 2016.
- [12] N. Al-Jadabi, M. Laaouan, M. Benbouzid, J. Mabrouki, and S. El Hajjaji, "Coagulation-flocculation technique for domestic wastewater treatment in the city of Ain Aouda, Rabat, Morocco," *E3S Web Conf.*, vol. 337, p. 02003, 2022, doi: 10.1051/e3sconf/202233702003.
- [13] Carrasco Quiroz, Carlos Alberto, "Tratamiento Físico Químico de Aguas Residuales," Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2007.
- [14] K. O. Iwuozor, "Prospects and Challenges of Using Coagulation-Flocculation method in the treatment of Effluents," *Adv. J. Chem.-Sect. A*, pp. 105–127, Jan. 2019, doi: 10.29088/SAMI/AJCA.2019.2.105127.
- [15] "6 Station Portable Jar Testing Apparatus (Flocculation Tester), 120VAC, A&F Machine (each)," Nova-Tech International. Accessed: Jul. 24, 2025. [Online]. Available: https://www.novatech-usa.com/AFM-JM-6?srsId=AfmBOooOQ_k1EZGM8iHbwb1nO5xrLlDjKbmub7ldVFdodjHmNiB9rZ0r&utm_source=chatgpt.com
- [16] Gobierno Autónomo Municipal de Sacaba, "Plan territorial de Desarrollo Integral para Vivir Bien del municipio de Sacaba 2021-2025." 2023. [Online]. Available: <https://www.sacaba.gob.bo/images/wsacaba/pdf/gaceta/poa/PTDI2021-2025.pdf>
- [17] Gobierno Autónomo Municipal de Sacaba, "Ficha técnica Planta de tratamiento de Aguas Residuales Pucara." 2022.
- [18] APHA, AWWA, and WEF, *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*, 22nd ed. Washington: American Public Health Association, 2012.
- [19] M. Pivokonský, K. Novotná, L. Čermáková, and R. Petříček, *Jar Tests for Water Treatment Optimization: How to Perform Jar Tests – a handbook*. IWA Publishing, 2022. doi: 10.2166/9781789062694.
- [20] United States Environmental Protection Agency, "Technologies for Upgrading Existing or Designing New Drinking Water Treatment Facilities," Office of Drinking Water, Center for Environmental Research Information, U.S. Environmental Protection Agency., Cincinnati, OH 45268, (EPA/625/4-89/023), 1990.
- [21] United States Environmental Protection Agency, "Enhanced Coagulation and Enhanced Precipitative Softening Guidance Manual," Office of Water, EPA 815-R-99-012, 1999.
- [22] V. Matamoros and V. Salvadó, "Evaluation of a coagulation/flocculation-lamellar clarifier and filtration-UV-chlorination reactor for removing emerging contaminants at full-scale wastewater treatment plants in Spain," *J. Environ. Manage.*, vol. 117, pp. 96–102, Mar. 2013, doi: 10.1016/j.jenvman.2012.12.021.