International Journal of Environmental Resilience Research and Science (IJERRS)
Revista Internacional Resiliência Ambiental Pesquisa e Ciência Sociedade 5.0 Resiliência Ambiental
ISSN 2675-3456

Tratamento de Efluentes de Laboratório de Análise Físico-químico SPECTROLAB

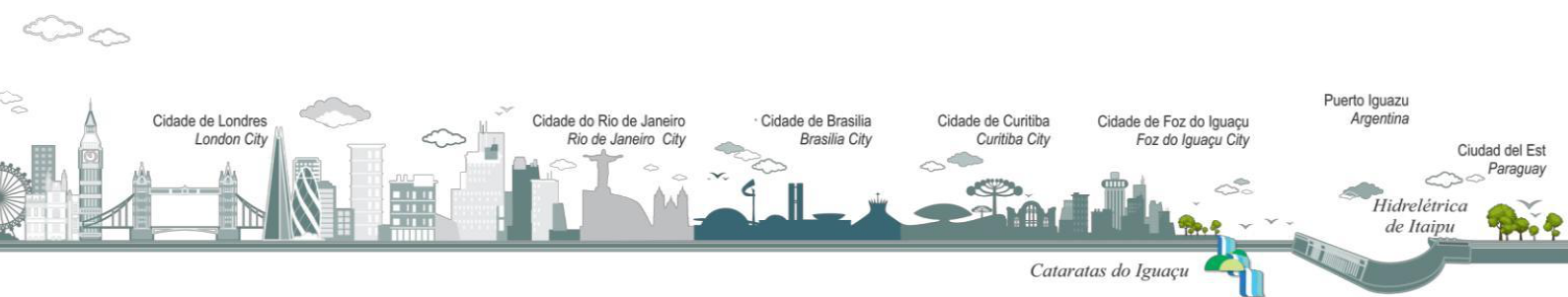
Treatment of Effluents from the Physical-Chemical Analysis Laboratory SPECTROLAB

Danitza Pilar Melean Guzman[1]
José Luis Zamorano Escalante [2]
Fernando Palú [3]
Camilo Freddy Mendoza Morejon [4]

Resumo: Os efluentes gerados em laboratórios de análise físico-química representam uma importante fonte de contaminação hídrica devido à presença de diversos contaminantes, como ácidos concentrados, metais pesados e sólidos suspensos. Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar a eficiência de tratamentos físico-químicos aplicados aos efluentes gerados no laboratório SPECTROLAB de Oruro/Bolívia, visando o cumprimento dos parâmetros estabelecidos pelo Regulamento em Matéria de Contaminação Hídrica (RMCH). A metodologia contemplou testes em jarras para avaliar, comparativamente, dois agentes neutralizantes (hidróxido de sódio e cal hidratada) em combinação com cloreto férrico como coagulante-floculante. Na sequência, caracterizou-se o efluente inicial por meio de análises físico-químicas, identificando-se pH extremamente ácido (2,94 no Ensaio 1 com $Ca(OH)_2$ e 2,49 no Ensaio 2 com NaOH), sólidos suspensos, ferro e DBO_5. Também foram realizados ensaios com diferentes concentrações de neutralizante e coagulante (40–240 ppm de $FeCl_3$), sob condições padronizadas de agitação. Os resultados demonstraram que o sistema com NaOH 1,5 g/100 mL foi significativamente superior ao sistema com cal, alcançando eficiências de remoção de 99,74% para turbidez, 99,72% para sólidos suspensos e 98,38% para ferro, com a dose ótima de $FeCl_3$ de 200 ppm. O efluente tratado final apresentou pH 7,1, turbidez de 0,17 NTU e conformidade com todos os parâmetros do RMCH. Conclui-se que o tratamento físico-químico proposto (neutralização com NaOH, seguida de coagulação, floculação e sedimentação) demonstrou ser eficaz, adaptável e ambientalmente viável para laboratórios de pequena escala.

Palavras-chave: Efluentes laboratoriais; Neutralização; Coagulação-floculação; Hidróxido de sódio; Cloreto férrico.

[1] Universidade do Oeste do Paraná. E-mail: dipiguzman777@gmail.com. https://orcid.org/0009-0008-9480-5753
[2] Universidade Técnica de Oruro, Bolívia, E-mail: joseluiszamorano@yahoo.es ORCID: https://orcid.org/0009-0008-3008-7617
[3] Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Brasil, E-mail: fpalu@uol.com.br ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7728-991X
[4] Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Brasil, E-mail: camilo_freddy@hotmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4071-0504



International Journal of Environmental Resilience Research and Science (IJERRS)
Revista Internacional Resiliência Ambiental Pesquisa e Ciência Sociedade 5.0 Resiliência Ambiental
ISSN 2675-3456

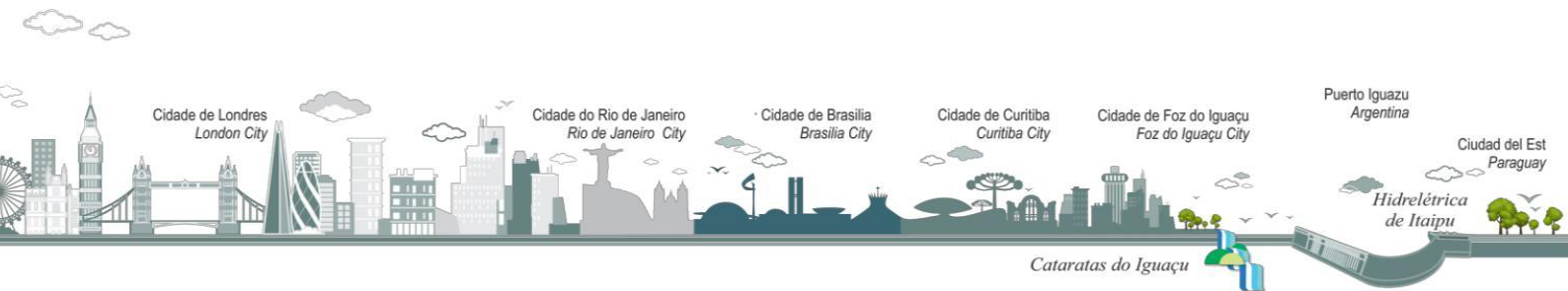
Abstract: The effluents generated in physicochemical analysis laboratories represent a significant source of water pollution due to the presence of concentrated acids, heavy metals, and suspended solids. The objective of this study was to evaluate the efficiency of physicochemical treatments applied to the effluents generated in the SPECTROLAB laboratory in Oruro, Bolivia, in order to comply with the parameters established by the Regulation on Water Pollution (RMCH). The methodology was carried out at the Water and Environment Laboratory of the Technical University of Oruro, using jar tests to comparatively assess two neutralizing agents (sodium hydroxide and hydrated lime) in combination with ferric chloride as a coagulant-flocculant. The initial effluent was characterized through physicochemical analysis, identifying an extremely acidic pH (2.94 in Trial 1 with $Ca(OH)_2$ and 2.49 in Trial 2 with NaOH), suspended solids, iron, and BOD_5. Tests were conducted with varying concentrations of neutralizers and coagulant (40–240 ppm of $FeCl_3$) under standardized stirring conditions. The results showed that the system using NaOH at 1.5 g/100 mL was significantly more effective than the lime-based system, achieving removal efficiencies of 99.74% for turbidity, 99.72% for suspended solids, and 98.38% for iron, with an optimal $FeCl_3$ dose of 200 ppm. The final treated effluent had a pH of 7.1, turbidity of 0.17 NTU, and met all RMCH parameters. It is concluded that the proposed physicochemical treatment (neutralization with NaOH followed by coagulation-flocculation-sedimentation) proved to be effective, adaptable, and environmentally viable for small-scale laboratory applications.

Key Words: Laboratory effluents; Neutralization; Coagulation–Flocculation; Sodium hydroxide; Ferric chloride

INTRODUÇÃO

O gerenciamento adequado dos efluentes líquidos gerados em laboratórios de análise físico-química representa um desafio técnico e ambiental de crescente relevância. A neutralização constitui uma etapa fundamental no tratamento desses efluentes, pois, antes do descarte em corpos hídricos, o efluente deve ter seu pH ajustado para evitar impactos ambientais no meio receptor (Ramalho, 1996). De acordo com o Regulamento em Matéria de Contaminação Hídrica (RMCH) da Bolívia, os valores de pH para descarte de efluentes tratados devem situar-se entre 6,0 e 9,0 (Bolivia, 1995), limites estabelecidos para proteger a biota aquática e a qualidade dos corpos receptores.

O laboratório Spectrolab, localizado na cidade de Oruro/Bolívia, realiza análises físico-químicas de amostras ambientais e industriais, utilizando reagentes ácidos concentrados, principalmente ácido sulfúrico e ácido clorídrico, em seus procedimentos analíticos de rotina. Esse perfil operacional explica a geração de efluentes com características altamente agressivas: pH extremamente ácido (≈ 2,8), elevada turbidez, elevadas concentrações de ferro e presença de

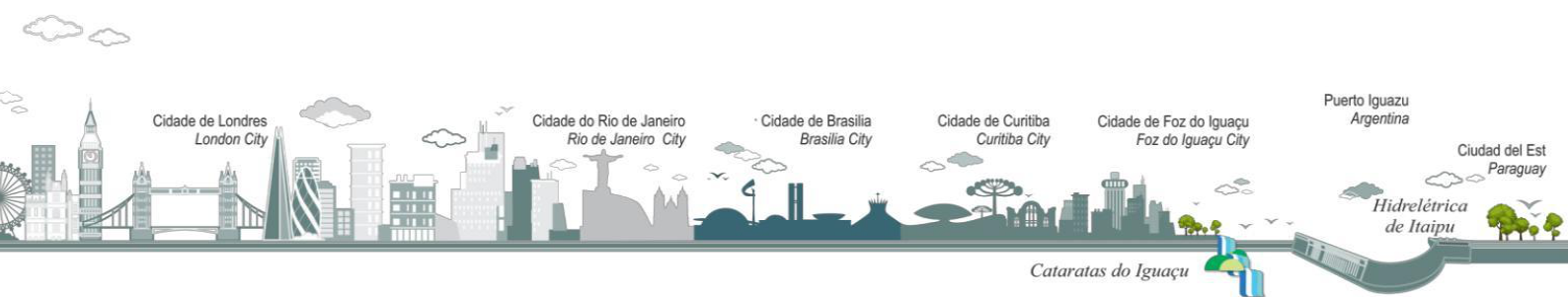


amônio. Tais características inviabilizam o descarte direto e exigem um sistema de tratamento específico, adaptado à escala e à realidade dos laboratórios de pequeno porte.

O tratamento dos efluentes do SPECTROLAB tem como referência normativa o Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH), aprovado pelo Decreto Supremo N° 24176/1995 da Bolívia, que estabelece os limites máximos permissíveis para descarte de efluentes em corpos hídricos receptores. O Anexo A-2 do RMCH define os seguintes limites para efluentes industriais: pH entre 6 e 9; sólidos suspensos até 60 mg/L; amônio (NH_4^+) até 4,0 mg/L; ferro total até 1,0 mg/L; e DBO_5 até 80 mg/L (Bolívia, 1995). O cumprimento integral desses parâmetros constitui o critério de avaliação de eficiência dos tratamentos propostos neste estudo.

Diante desse contexto, formula-se o seguinte problema de pesquisa: Qual é a eficiência de um sistema de tratamento físico-químico sequencial na remoção de contaminantes de efluentes ácidos provenientes de laboratórios de análise físico-química? A justificativa desta investigação reside na necessidade operacional e regulatória de desenvolver uma metodologia de tratamento em escala de bancada que assegure a gestão responsável dos resíduos líquidos de laboratório. As tecnologias convencionais de grande escala são frequentemente inviáveis, tanto economicamente quanto espacialmente, para laboratórios de pequeno porte (Ebling et al., 2004). A escolha do agente neutralizante é determinante para a eficiência do tratamento subsequente, sendo o NaOH reconhecido por proporcionar maior estabilidade de pH em comparação à cal hidratada (CUNHA et al., 2021). Portanto, justifica-se a avaliação rigorosa de um sistema integrado e sequencial que combina: neutralização (NaOH versus $Ca(OH)_2$) para estabilização química; coagulação-floculação-sedimentação com $FeCl_3$ para a remoção de sólidos e metais; e troca iônica como tratamento terciário de alta seletividade para a eliminação de amônio residual. Este enfoque sequencial é essencial para minimizar o consumo de reagentes e o uso de espaço físico, propondo uma alternativa sustentável e replicável para laboratórios com realidades semelhantes.

Nesse contexto, o objetivo geral deste estudo foi avaliar a eficiência de um sistema de tratamento físico-químico sequencial (neutralização com NaOH, coagulação/floculação/sedimentação com $FeCl_3$ e troca iônica) aplicado aos efluentes ácidos do laboratório Spectrolab, visando ao cumprimento dos parâmetros estabelecidos pelo RMCH.



International Journal of Environmental Resilience Research and Science (IJERRS)
Revista Internacional Resiliência Ambiental Pesquisa e Ciência Sociedade 5.0 Resiliência Ambiental
ISSN 2675-3456

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neutralização

Segundo Ramalho (1996), o tratamento de neutralização é utilizado nos seguintes casos: 1) antes da descarga de águas residuais em um meio receptor, pois a vida aquática é muito sensível a variações de pH fora de um intervalo próximo de 7; 2) antes da descarga de águas residuais industriais no sistema de esgoto municipal; e 3) antes do tratamento químico ou biológico, no qual o pH do sistema deve ser mantido entre 6,5 e 8,5 para garantir atividade biológica ideal. Estudos mais recentes confirmam que a neutralização com NaOH é preferencial em efluentes ácidos com alta concentração de metais, pois permite um controle preciso do pH e favorece a precipitação de hidróxidos metálicos (Chernyaev; Wilson; Lundström, 2025).

Os métodos de neutralização direta de águas residuais ácidas mais empregados são: 1) neutralização com hidróxido de sódio (NaOH); 2) neutralização com cal hidratada $Ca(OH)_2$; 3) leitos de calcário; 4) neutralização com carbonato de sódio; e 5) neutralização com amônia (Ramalho, 1996; Metcalf; Eddy, 2016).

No caso da precipitação do ferro como hidróxido, o processo ocorre por meio da reação da Equação 1 Chernyaev; Wilson; Lundström, 2025):

$$Fe^{3+}_{(aq)} + 3\,NaOH_{(aq)} \rightarrow Fe(OH)_{3\,(s)} \downarrow + 3\,Na^{+}_{(aq)} \quad (1)$$

Coagulação

A coagulação é um processo físico-químico que visa neutralizar as cargas elétricas das partículas coloidais, transformando impurezas em suspensão em agregados removíveis por sedimentação e filtração. Segundo Hussain et al. (2016), o processo de coagulação–floculação é considerado um dos tratamentos mais eficazes e amplamente utilizados para efluentes industriais, devido à sua simplicidade operacional e à alta eficiência na remoção de sólidos suspensos, cor e metais. A coagulação e a floculação ocorrem em etapas sucessivas, de modo que, uma vez desestabilizadas as partículas, as colisões entre elas permitem o crescimento dos microflocos,

Cidade de Londres London City · Cidade do Rio de Janeiro Rio de Janeiro City · Cidade de Brasilia Brasilia City · Cidade de Curitiba Curitiba City · Cidade de Foz do Iguaçu Foz do Iguaçu City · Puerto Iguazu Argentina · Ciudad del Est Paraguay · Hidrelétrica de Itaipu · Cataratas do Iguaçu

quase invisíveis a olho nu, até formarem flocos maiores (Lorenzo-Acosta, 2006, p. 11).

Floculação

A floculação é o processo que sucede à coagulação e consiste na agitação controlada e lenta da massa coagulada, permitindo o crescimento e aglomeração dos flocos recém-formados até atingirem tamanho e peso suficientes para sedimentação (Metcalf; Eddy, 2016). Para favorecer o crescimento do floco, é necessária agitação homogênea e lenta, tipicamente entre 20 e 40 rpm visando aumentar a probabilidade de colisão entre partículas eletricamente descarregadas e partículas do floco (Lorenzo-Acosta, 2006, p. 12). Estudos recentes demonstram que velocidades de floculação excessivamente altas ou baixas comprometem a eficiência de remoção, sendo a faixa de 30 rpm frequentemente reportada como ótima para efluentes de alta carga (El Mouhri et al., 2024).

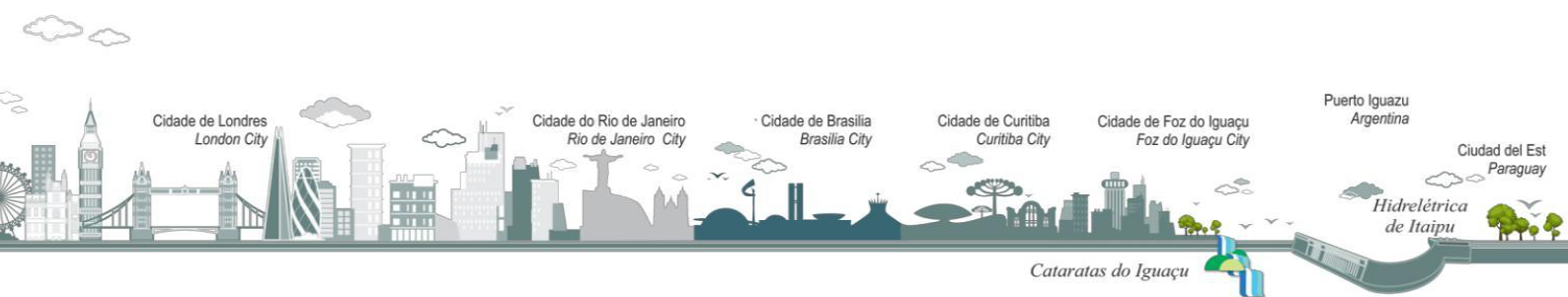
Reagentes Químicos

As partículas formadas durante o processo de coagulação ainda podem apresentar tamanho reduzido ou baixa densidade, o que dificulta sua decantação. O tamanho das partículas pode ser aumentado com a adição de produtos químicos com moléculas de alto peso molecular e solúveis em água que, por dissociação eletrolítica, geram formas iônicas múltiplas, capazes de atuar como pontes de ligação entre as partículas coaguladas (Crittenden et al., 2012).

Entre os agentes químicos mais utilizados, destacam-se: sulfato de alumínio; cal; sulfato de ferro e cal; cloreto férrico e cal; e sulfato férrico e cal (Tzoupanos; Zouboulis, 2008).

No estudo de Abdollahzadeh Sharghi e Davarpanah (2022), o cloreto férrico foi considerado um dos coagulantes mais eficazes para a remoção de tensoativos aniônicos e de DQO, em comparação com coagulantes à base de alumínio, o que confirma sua superioridade em efluentes de alta carga orgânica e metálica.

O $FeCl_3$ é um reagente coagulante que, ao ser dissolvido em água, dissocia-se em íons férricos e cloreto, conforme a Equação 2. O Fe^{3+} resultante possui elevada carga nuclear efetiva, o que o torna altamente susceptível à hidrólise. Em solução aquosa, forma o aquocomplexo $[Fe(H_2O)_6]^{3+}$, que sofre hidrólise progressiva, gerando espécies hidrolisadas, como $[Fe(H_2O)_5OH]^{2+}$.



International Journal of Environmental Resilience Research and Science (IJERRS)
Revista Internacional Resiliência Ambiental Pesquisa e Ciência Sociedade 5.0 Resiliência Ambiental
ISSN 2675-3456

Na presença de bicarbonatos, o Fe^{3+} reage para produzir hidróxido férrico $Fe(OH)_3$ precipitado, conforme a Equação 3, que é o principal agente de varredura no processo de coagulação na equação 2 (Crittenden et al., 2012; Vers et al., 2022) e equação 3 (Crittenden et al., 2012).

$$FeCl_{3(aq)} \rightarrow Fe^{3+}_{(aq)} + 3Cl^{-}_{(aq)} \quad (2)$$

$$FeCl_3 \cdot 6H_2O + 3HCO_3{}^{-}{}_{(aq)} \rightarrow Fe(OH)_{3(s)} + 3Cl^{-} + 3CO_{2(g)} + 6H_2O \quad (3)$$

Técnicas clássicas de remoção de metais tóxicos

As técnicas de remoção de metais tóxicos de efluentes aquosos incluem: precipitação química, coagulação-floculação, troca iônica e adsorção. Entre esses processos, a troca iônica e a precipitação química destacam-se como os mais utilizados em escala laboratorial e industrial, sendo as principais vantagens da troca iônica: recuperação seletiva do metal, alta eficiência e capacidade de atender a especificações rigorosas de descarte (Abo-Farha et al., 2009; Fu; Wang, 2011).

Troca Iônica

A troca iônica é uma operação de separação baseada na transferência de íons entre o fluido e o sólido. No processo de troca iônica, ocorre uma reação química na qual íons móveis hidratados de um sólido são trocados por íons de mesma carga presentes em um fluido. Esse processo consiste em fazer o fluido passar por um trocador iônico sólido, do tipo catiônico e/ou aniônico, substituindo os cátions e/ou ânions por íons hidrogênio (H^+) e/ou hidroxila (OH^-), respectivamente (Ávila Berenice, 2014).

Resina de Troca Iônica

As resinas sintéticas de troca iônica são substâncias granuladas e insolúveis, compostas por uma matriz polimérica reticulada por ação de um agente entrecruzante, com grupos inorgânicos. A

Cidade de Londres London City
Cidade do Rio de Janeiro Rio de Janeiro City
Cidade de Brasilia Brasilia City
Cidade de Curitiba Curitiba City
Cidade de Foz do Iguaçu Foz do Iguaçu City
Puerto Iguazu Argentina
Ciudad del Est Paraguay
Hidrelétrica de Itaipu
Cataratas do Iguaçu

vantagem das resinas de troca iônica é sua capacidade de recuperar a funcionalidade original por meio de tratamento com solução ácida, básica ou salina (dependendo da resina e do uso), que desloca os íons retidos e os substitui por íons desejados. Esse procedimento, denominado regeneração, é executado quando a resina atinge sua capacidade máxima de troca, permitindo, assim, seu uso repetido" (Nevarez, 2009).

Tipos de Resinas de Troca Iônica segundo o Grupo Funcional

Os trocadores iônicos classificam-se conforme o tipo de grupo funcional ativo (Bochenek et al., 2011; Crittenden et al., 2012):

a) Resinas catiônicas de ácido forte, produzidas por sulfonação do polímero com ácido sulfúrico. O grupo funcional é o ácido sulfônico, $-SO_3H$;

b) Resinas Catiônicas de Ácido Fraco, no qual o grupo funcional é o ácido carboxílico COOH, presente em um dos componentes dos copolímeros, principalmente ácido acrílico ou metacrílico;

c) Resinas Aniônicas de Base Forte obtidas a partir da reação de copolímeros de estireno-divinilbenzeno clorometilados com aminas terciárias, no qual o grupo funcional é um sal de amônio quaternário R_4N^+;

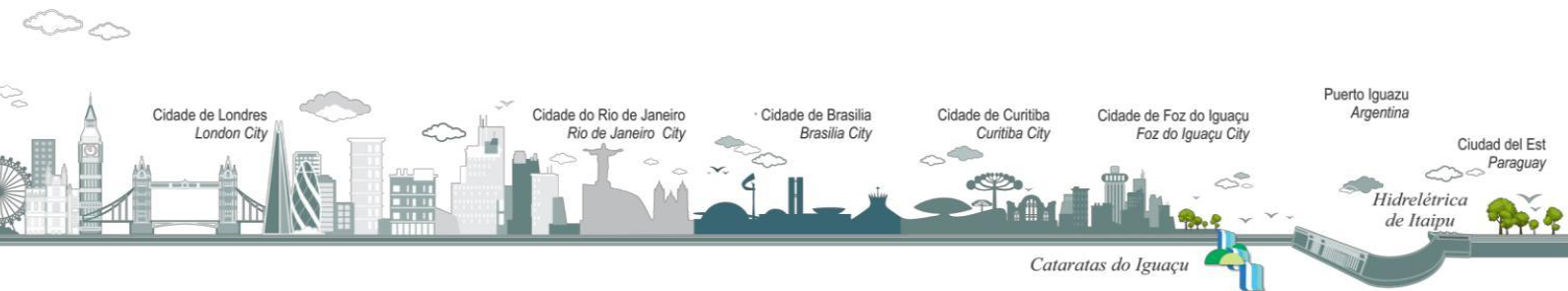
d) Resinas Aniônicas de Base Fraca que funcionam com grupos de amina primária $–NH_2$, secundária –NHR e terciária $–NR_2$, os quais são aplicadas na adsorção de ácidos fortes com boa capacidade, embora apresentem cinética lenta; e

e) Resinas Quelantes que, entre os materiais utilizados nos processos de troca iônica, empregam resinas catiônicas de ácido forte (SAC) para a separação de metais pesados tóxicos e de cátions inorgânicos de soluções aquosas (Bochenek ET AL., 2011).

A reação do trocador catiônico pode ser representada pela equação 4.

$$z_A[R^-]B^{z+} + A^{z+} \rightleftarrows z_B[R^-]A^{z+} + B^{z+} \quad (4)$$

Nessa equação, R^- representa o grupo iônico ligado à resina de troca iônica; A e B são os iones que estão sendo trocados; zA e zB representam a valência do íon de troca, e o superíndice z indica a valência das espécies A ou B. A troca iônica é um processo estequiométrico, portanto, os meios de troca iônica continuarão trocando íons até que o equilíbrio seja alcançado. Isso ocorre



para atender ao princípio da eletroneutralidade (Crittenden ET AL., 2012).

Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO_5)

A DBO_5 é um parâmetro biológico que quantifica a quantidade de oxigênio dissolvido consumido por microrganismos aeróbios na degradação da matéria orgânica presente em um efluente ao longo de cinco dias a 20 °C (Metcalf; EDDY, 2016). É considerado o principal indicador de carga orgânica biodegradável em efluentes, sendo amplamente utilizado para monitorar a qualidade de corpos hídricos receptores e verificar a conformidade com os limites regulatórios de descarte (Dutta et al., 2023). Valores elevados de DBO_5 indicam alto potencial de depleção do oxigênio dissolvido no corpo receptor, com impacto direto sobre a biota aquática

Amônio (NH_4^+)

O amônio (NH_4^+) é gerado em laboratórios de análise físico-química por meio do uso de reagentes nitrogenados e da degradação de compostos orgânicos presentes nos efluentes. Em corpos hídricos, o acúmulo de amônio promove eutrofização e representa toxicidade direta à biota aquática, sendo sua concentração regulada por normas ambientais (Jørgensen; Weatherley, 2003). A troca iônica com resinas catiônicas de ácido forte é reconhecida como o método de maior seletividade para a remoção de NH_4^+ em efluentes complexos, permitindo reduzir sua concentração a valores inferiores a 4 mg/L, conforme estabelecido pelo RMCH (Guida et al., 2020; Crittenden et al., 2012).

METODOLOGIA

Esta pesquisa caracteriza-se como experimental, de natureza quantitativa e de caráter descritivo, desenvolvida no Laboratório de Águas e Meio Ambiente da Universidade Técnica de Oruro (UTO). Os procedimentos técnicos empregados incluíram: 1) pesquisa bibliográfica para fundamentação teórica; 2) caracterização físico-química do efluente bruto; 3) testes em jarras para otimização de parâmetros; e 4) análise comparativa dos tratamentos (ASTM, 2019).

As amostras de efluente foram coletadas diretamente do laboratório SPECTROLAB, no

Cidade de Londres London City
Cidade do Rio de Janeiro Rio de Janeiro City
Cidade de Brasilia Brasilia City
Cidade de Curitiba Curitiba City
Cidade de Foz do Iguaçu Foz do Iguaçu City
Puerto Iguazu Argentina
Ciudad del Est Paraguay
Hidrelétrica de Itaipu
Cataratas do Iguaçu

volume total de 20 litros, armazenadas em recipiente de polietileno de alta densidade e mantidas sob refrigeração a 4 °C até o início dos ensaios, conforme as recomendações do Standard Methods (Apha; Awwa; Wef, 2017).

Ensaio 1 – Neutralização com Cal Hidratada $Ca(OH)_2$

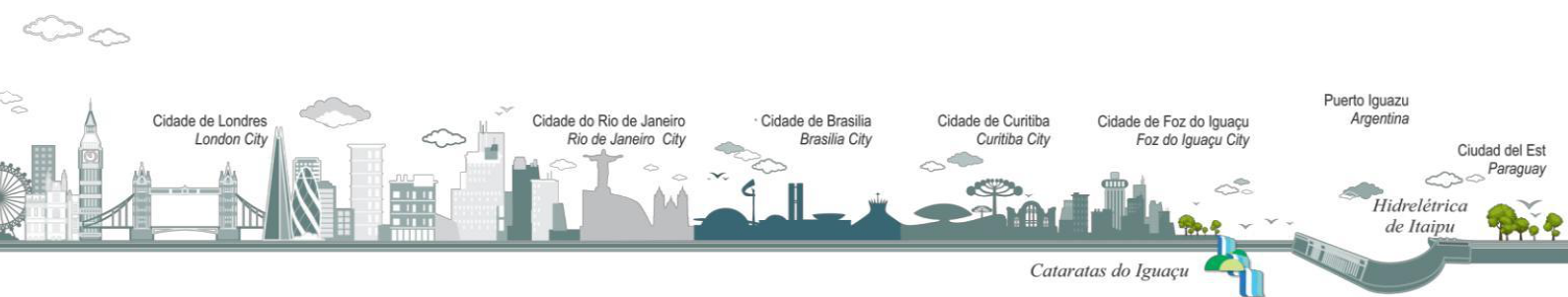
No primeiro ensaio, foram utilizados 1,5 L de efluente por jarro (4 jarros), com equipamento de jarras PHIPPS&BIRD (200–240 V, 50/60 Hz, 550 W, paletas de 8 cm de diâmetro). A solução neutralizante foi preparada a partir de uma solução-mãe de cal (10 g/L em água destilada), testando-se as concentrações de 0,22 g/L, 0,50 g/L e 0,90 g/L de $Ca(OH)_2$. A adição foi realizada gota a gota sob agitação rápida (100 rpm), com monitoramento contínuo do pH por meio de eletrodo digital até atingir o valor-alvo. Na etapa subsequente de coagulação/floculação, utilizou-se solução de $FeCl_3$ a 0,9% (m/v) nas dosagens de 40, 60, 80 e 100 ppm.

Ensaio 2 – Neutralização com Hidróxido de Sódio (NaOH)

No segundo ensaio, utilizaram-se 0,8 L de efluente por jarro (4 jarros), com o mesmo equipamento do Ensaio 1. A solução de NaOH foi preparada a 1,5 g/100 mL, testando-se as concentrações de 0,5%, 1,0% e 1,5% (m/v). A adição também foi realizada gota a gota, sob agitação rápida (100 rpm), com monitoramento do pH. Na etapa de coagulação/floculação, utilizou-se $FeCl_3$ a 10% (m/v) nas dosagens de 180, 200, 220 e 240 ppm.

Para ambos os ensaios, os parâmetros de agitação foram mantidos constantes: agitação rápida (coagulação) por 1 minuto a 100 rpm e agitação lenta (floculação) por 15 minutos a 40 rpm, seguidas de sedimentação por 60 minutos, conforme o protocolo ASTM D2035-19 (ASTM, 2019). O ensaio em jarros constitui uma metodologia amplamente consolidada para a otimização de processos de coagulação/floculação com cloreto férrico em efluentes industriais (Verma et al., 2018; Tzoupanos; Zouboulis, 2008).

Os ensaios 1 e 2 foram conduzidos com volumes de amostra e faixas de dosagem de $FeCl_3$ distintos, em razão de restrições de volume na segunda coleta e da necessidade de ajuste do coagulante conforme o pH obtido após cada neutralizante. Portanto, os ensaios têm caráter exploratório-comparativo independente, não constituindo experimentos paralelos com controle



idêntico de todas as variáveis. Essa limitação é reconhecida e discutida nas Considerações Finais.

Determinação da Eficiência de Remoção de Solidos Suspensos

A concentração de sólidos suspensos (SS) foi calculada em mg/L, e a eficiência de remoção (equação 5) foi determinada comparando as concentrações iniciais $(Concentraciones_{ssi})$ e finais $(Concentraciones_{ssf})$.

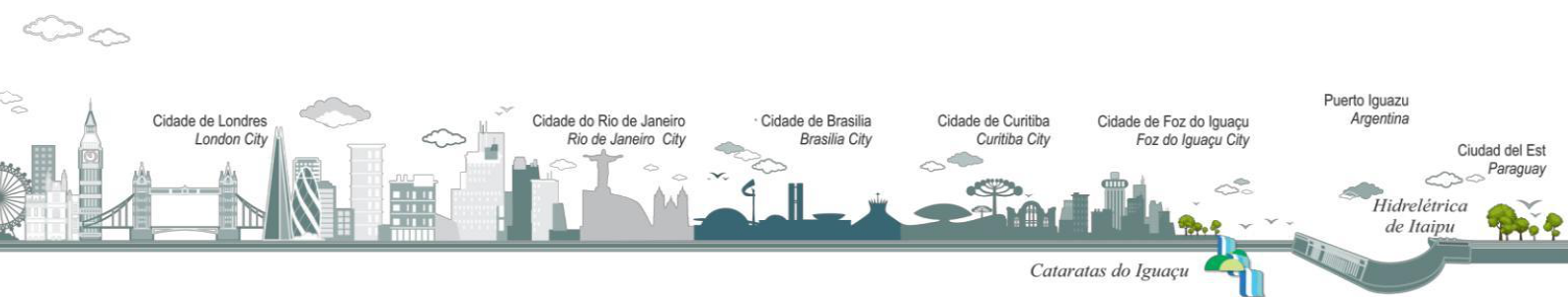
$$Eficiência\ de\ Remoção\% = \frac{(Concentracion_{SS})_i - (Concentracion_{SS})_f}{(Concentracion_{SS})_i} \times 100 \qquad (5)$$

Todos os parâmetros físico-químicos foram determinados segundo os procedimentos padronizados descritos no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (Apha; Awwa; Wef, 2017):

- pH: método potenciométrico (APHA 4500-H^+ B), eletrodo combinado calibrado em tampão pH 4,0 e 7,0
- Turbidez: método nefelométrico (APHA 2130 B), turbidímetro calibrado com padrões de formazina, resultados em NTU
- DBO_5: método de 5 dias a 20 °C (APHA 5210 B), oxigênio dissolvido por eletrodo de membrana
- Ferro total: método colorimétrico da fenantrolina (APHA 3500-Fe B)
- Sólidos Suspensos Totais: método gravimétrico, filtração e secagem a 103–105 °C (APHA 2540 D)
- Amônio (NH_4^+): método do eletrodo seletivo de íons (APHA 4500-NH_3 D)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1, é apresentado o Esquema de Fluxo Otimizado para o Pré-tratamento (Neutralização com $Ca(OH)_2$), Tratamento Primário (Coagulação/Floculação e Sedimentação) e



Tratamento terciário (trocador iônico). A eficácia do sistema de tratamento físico-químico foi avaliada por meio de quatro vias experimentais, iniciando-se pela etapa de neutralização do efluente ácido inicial (pH ≈ 2,94). Nessa etapa, utilizou-se cal hidratada $Ca(OH)_2$ como agente neutralizante. A concentração de 0,5 g/L de $Ca(OH)_2$ foi selecionada como dose ótima, pois permitiu ajustar o pH do efluente a 7,61 sem provocar precipitação excessiva de $CaCO_3$. As concentrações de 0,22 g/L e 0,9 g/L foram excluídas devido a problemas operacionais críticos: a dosagem de 0,22 g/L exigiu um volume excessivo (45 mL), enquanto a de 0,9 g/L (apenas 15 mL) provocou uma alcalinização muito rápida, dificultando o controle do pH.

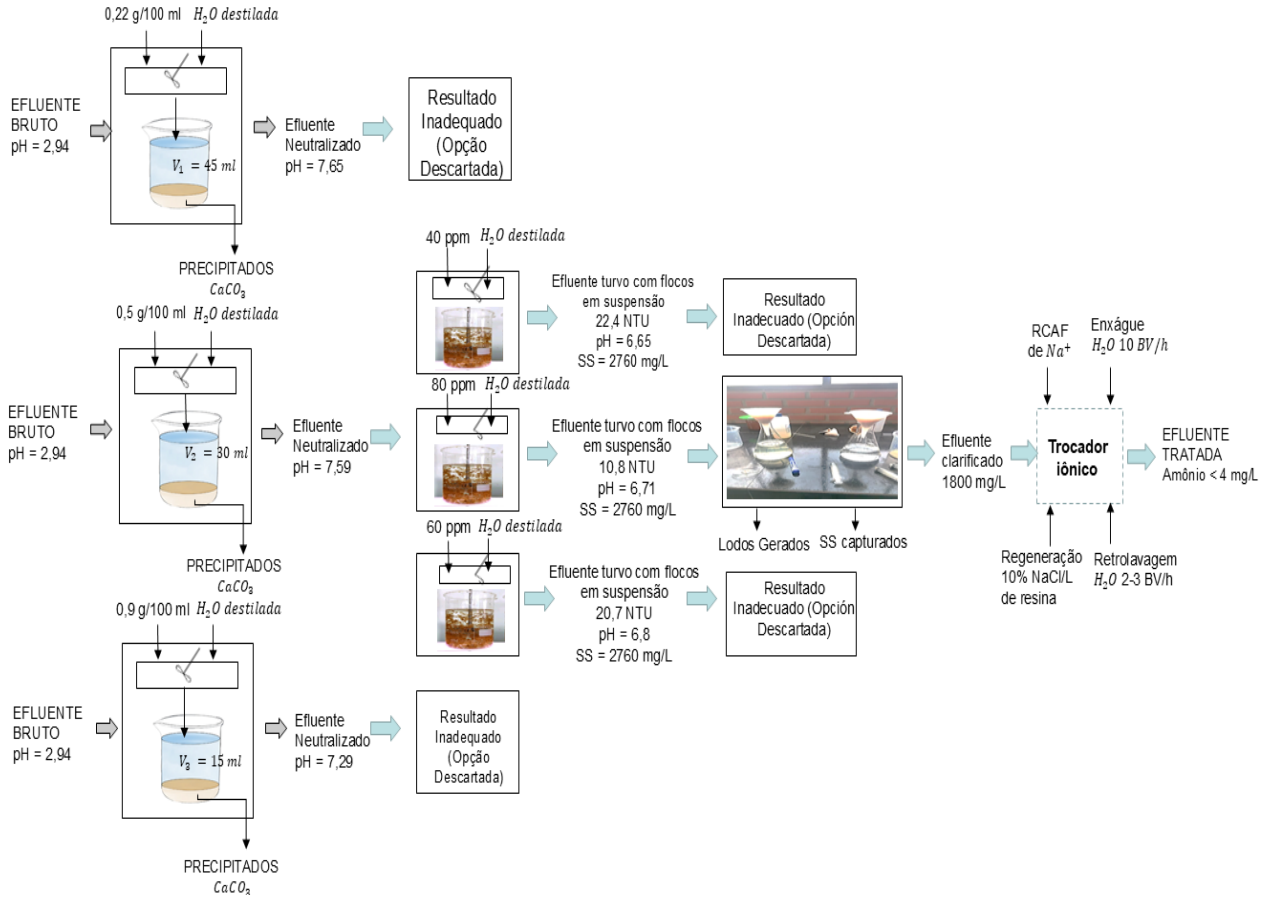
O efluente neutralizado com a dose ótima de cal foi submetido a ensaios em jarros para o tratamento primário de coagulação/floculação com cloreto férrico ($FeCl_3$). Foram testadas as concentrações de 40, 60, 80 e 100 ppm de $FeCl_3$ a 0,9% (m/v). A dose de 60 ppm resultou em um efluente com turbidez de 20,7 NTU, pH de 6,8 e sólidos suspensos totais de 2760 mg/L.

Posteriormente, o efluente turvo foi submetido à etapa de sedimentação (60 minutos), seguida de filtração e de pesagem. A remoção de sólidos suspensos, com o sistema neutralizado com cal, foi baixa, resultando em concentração final de 1800 mg/L de SS, valor 30 vezes acima do limite de 60 mg/L do RMCH (Bolívia, 1995) e superior ao padrão internacional de 30 mg/L para descarte em corpos hídricos superficiais (Apha; Awwa; Wef, 2017). Valores de SS superiores a 220 mg/L são classificados na literatura como característicos de efluentes de alta carga, impróprios para descarte direto sem tratamento complementar (Metcalf; Eddy, 2016). Esses resultados demonstram a ineficiência da cal hidratada como agente neutralizante nesta sequência de tratamento, o que inviabiliza a continuidade do tratamento.

Cidade de Londres London City
Cidade do Rio de Janeiro Rio de Janeiro City
Cidade de Brasilia Brasilia City
Cidade de Curitiba Curitiba City
Cidade de Foz do Iguaçu Foz do Iguaçu City
Puerto Iguazu Argentina
Ciudad del Est Paraguay
Hidrelétrica de Itaipu
Cataratas do Iguaçu

International Journal of Environmental Resilience Research and Science (IJERRS)
Revista Internacional Resiliência Ambiental Pesquisa e Ciência Sociedade 5.0 Resiliência Ambiental
ISSN 2675-3456

Figura 1 – Esquema do Fluxo Otimizado para o Pré-tratamento (Neutralização com $Ca(OH)_2$), Tratamento Primário (Coagulação/Floculação e Sedimentação) e Tratamento Terciário (Troca iônica)



Fonte: Elaborada pelos autores, 2025. Limite de NH_4^+ conforme RMCH, Anexo A-2 (Bolívia, Decreto Supremo N° 24176/1995).

Diante dos resultados insatisfatórios obtidos com $Ca(OH)_2$, procedeu-se à avaliação do hidróxido de sódio (NaOH) como agente neutralizante alternativo. Na Figura 2, é apresentado o Esquema de Fluxo Otimizado para o Pré-tratamento (Neutralização com NaOH), Tratamento Primário (Coagulação/Floculação e Sedimentação) e Tratamento Terciário (Troca Iônica).

Em substituição à cal hidratada, avaliou-se o hidróxido de sódio (NaOH) como agente neutralizante, testando três concentrações distintas a partir de um efluente com pH inicial de 2,49.

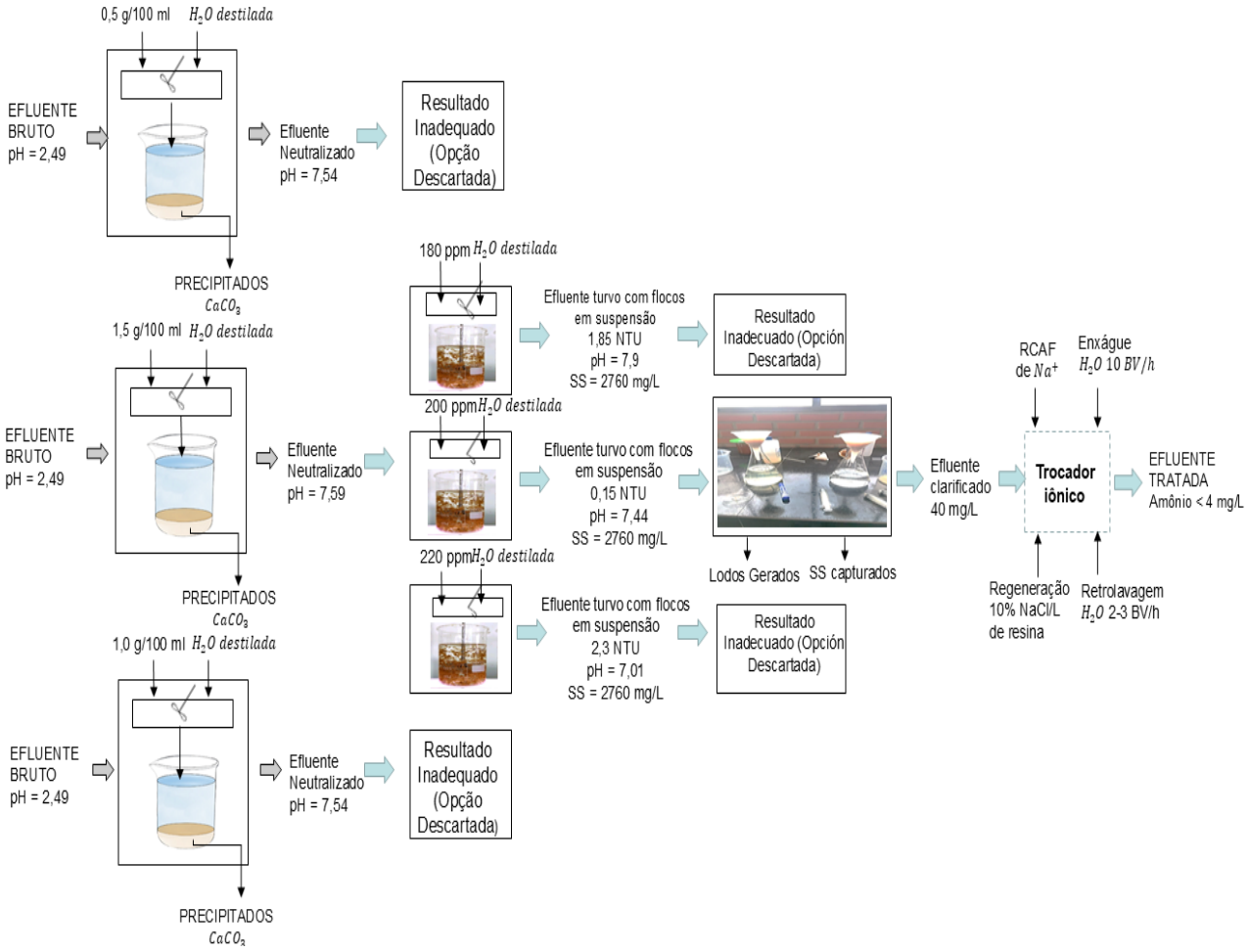
A concentração de 1,5 g/100 mL de NaOH foi selecionada como dose ótima, pois permitiu

Cidade de Londres London City
Cidade do Rio de Janeiro Rio de Janeiro City
Cidade de Brasilia Brasilia City
Cidade de Curitiba Curitiba City
Cidade de Foz do Iguaçu Foz do Iguaçu City
Puerto Iguazu Argentina
Ciudad del Est Paraguay
Hidrelétrica de Itaipu
Cataratas do Iguaçu

International Journal of Environmental Resilience Research and Science (IJERRS)
Revista Internacional Resiliência Ambiental Pesquisa e Ciência Sociedade 5.0 Resiliência Ambiental
ISSN 2675-3456

ajustar o pH do efluente a 7,59, sem formação de precipitados nem aumento da turbidez. As concentrações de 0,5 g/100 mL e 1,0 g/100 mL foram excluídas por não atenderem aos critérios de estabilidade necessários às fases subsequentes.

Figura 2 – Esquema do Fluxo Otimizado para o Pré-tratamento por Neutralização com NaOH e Tratamento Primário de Coagulação/Floculação e Sedimentação



Fonte: Elaborada pelos autores, 2025. Limite de NH_4^+ conforme RMCH, Anexo A-2 (Bolívia, Decreto Supremo N° 24176/1995).

O efluente neutralizado com a dose ótima de soda cáustica foi submetido a ensaios em jarros para o tratamento primário de coagulação/floculação com cloreto férrico ($FeCl_3$). Foram testadas as

Cidade de Londres London City
Cidade do Rio de Janeiro Rio de Janeiro City
Cidade de Brasilia Brasilia City
Cidade de Curitiba Curitiba City
Cidade de Foz do Iguaçu Foz do Iguaçu City
Puerto Iguazu Argentina
Ciudad del Est Paraguay
Hidrelétrica de Itaipu
Cataratas do Iguaçu

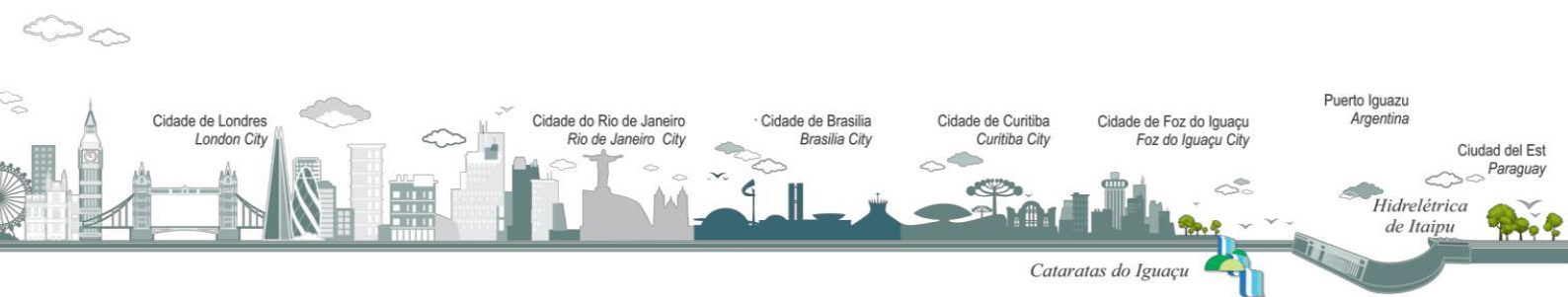
concentrações de 180, 200 e 220 ppm. A dose de 200 ppm de $FeCl_3$ resultou em um efluente clarificado com turbidez de 0,15 NTU, pH de 7,44 e sólidos suspensos totais inferiores a 1 mg/L, confirmando a eficiência do processo otimizado por ensaio em jarros (Verma et al., 2018), compatível com os limites do RMCH (Bolívia, 1995).

Posteriormente, o efluente turvo foi submetido à etapa de sedimentação (60 minutos), seguida de filtração/pesagem. A remoção de sólidos suspensos, com o sistema neutralizado com NaOH, foi eficaz, resultando em concentração final de 40 mg/L de SS, abaixo do limite permissível de 60 mg/L estabelecido pelo RMCH (Bolívia, 1995), o que culminou em um efluente adequado às etapas subsequentes.

Por fim, o efluente clarificado será submetido à Troca Iônica, utilizando uma resina catiônica de ácido forte na forma sódica (1,7 eq/L) para a remoção de NH_4^+. Este passo é justificado pela persistência do amônio, que permaneceu em 63,85 mg/L após o tratamento primário, o que representa 15,96 vezes o limite normativo. O tratamento terciário, validado por literatura de engenharia (Abo-Farha et al., 2009; Crittenden et al., 2012), utiliza regeneração com 100 g de NaCl por litro de resina, e é projetado para garantir a concentração final de NH_4^+ abaixo de 4 mg/L, essencial para o cumprimento da Norma RMCH (Bolívia, 1995).

Para garantir a confiabilidade dos resultados, todas as análises físico-químicas foram realizadas em duplicata, adotando-se a média aritmética dos valores obtidos. Os equipamentos utilizados foram submetidos à calibração prévia com padrões certificados, conforme procedimento descrito na Metodologia (Apha; Awwa; Wef, 2017). Os resultados finais do ensaio com NaOH foram submetidos à verificação analítica pelo próprio laboratório SPECTROLAB, que confirmou os valores por meio de análises independentes dos parâmetros de pH, turbidez e ferro total. A concordância entre as medições internas e as de verificação foi considerada satisfatória, com variação máxima de ±5%, dentro do critério de aceitação estabelecido pelo Standard Methods (Apha; Awwa; Wef, 2017).

Na Tabela 1, apresentam-se os valores iniciais, intermediários e finais dos parâmetros físico-químicos analisados pelo SPECTROLAB, comparados aos limites permissíveis do Anexo A-2 do RMCH (BOLÍVIA, 1995). Os resultados evidenciam que o tratamento primário sequencial com NaOH + $FeCl_3$ foi eficaz na remoção de ferro (de 22,010 para 0,299 mg/L), de sólidos suspensos (de 449 para <1 mg/L), de DBO_5 (de 151 para 56 mg/L) e no ajuste do pH (de 4,2 para 7,1). Contudo, a concentração de amônio (NH_4^+) reduziu-se apenas de 78,90 para 63,85 mg/L, permanecendo



15,96 vezes acima do limite permissível de 4,0 mg/L, o que justifica a necessidade de uma etapa de tratamento terciário por troca iônica.

Tabela 1 – Resultados Iniciais e Finais dos Parâmetros Analisados pelo Laboratório SPECTROLAB

PARÂMETRO	UNIDADE	LIMITE RMCH ANEXO A-2	AMOSTRA INICIAL	AMOSTRA INTERMEDIÁRIA	AMOSTRA FINAL
pH	-	6-9	4,2	2,8	7,1
Turbidez	NTU	----- (1)	43,90	64,75	0,17
Sólidos Suspendidos	mg/L	60.0	449	364	<1
Amônio	mg/L	4.0	78,90	70,44	63,85 *
Ferro	mg/L	1.0	22,010	18,436	0,299
DBO_5	mg/L	80.0	151	233	56

Fonte: Dados analíticos fornecidos pelo Laboratório SPECTROLAB (Oruro, 2025); organização e interpretação elaboradas pelos autores. Limites permissíveis conforme RMCH, Anexo A-2 (BOLÍVIA, Decreto Supremo N° 24176/1995).

(1) O RMCH não estabelece um limite numérico específico para a turbidez.

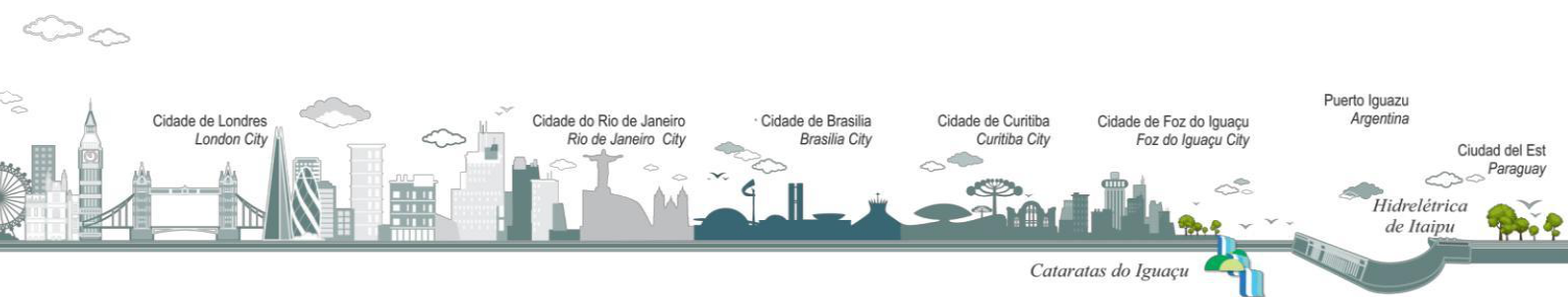
(*) NH_4^+ final (63,85 mg/L) permanece acima do limite de 4,0 mg/L, justificando o tratamento terciário por troca iônica

Em síntese, os resultados confirmam que o tratamento primário (sequência NaOH) foi eficaz na remoção de metais e sólidos, mas demonstram, de forma irrefutável, que o processo de troca iônica é indispensável para que o efluente do laboratório atenda plenamente à Norma RMCH.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos demonstram que o sistema de tratamento físico-químico proposto é eficaz para o tratamento de efluentes ácidos gerados no laboratório SPECTROLAB. A neutralização com hidróxido de sódio (NaOH) na concentração de 1,5 g/100 mL apresentou desempenho superior ao uso de cal hidratada [$Ca(OH)_2$], proporcionando maior estabilidade de pH e ausência de precipitação excessiva, o que viabilizou a atuação eficiente do coagulante cloreto férrico ($FeCl_3$) a 200 ppm. O processo de coagulação/floculação e sedimentação resultou em efluente com pH 7,1; turbidez de 0,17 NTU; sólidos suspensos inferiores a 1 mg/L; ferro de 0,299 mg/L e DBO_5 de 56 mg/L parâmetros que atendem plenamente aos limites estabelecidos pelo Anexo A-2 da Norma RMCH (Bolívia, 1995).

Em relação ao consumo de reagentes, o processo de neutralização demandou 1,5 g de



NaOH por 100 mL de efluente, enquanto a etapa de coagulação/floculação requereu 200 ppm de $FeCl_3$ a 0,9% (m/v). O tempo total de tratamento físico-químico, compreendendo as etapas de neutralização, coagulação/floculação e sedimentação, foi de aproximadamente 90 minutos por batelada, o que é compatível com a rotina operacional de laboratórios de pequeno porte (Metcalf; Eddy, 2016).

Entretanto, o parâmetro amônio (NH_4^+), com valor final de 63,85 mg/L, permaneceu 15,96 vezes acima do limite permissível de 4,0 mg/L estabelecido pela Norma RMCH (BOLÍVIA, 1995), evidenciando a necessidade de integrar um processo terciário. A aplicação de troca iônica, utilizando resina catiônica de ácido forte na forma sódica (1,7 eq/L), demonstrou ser a solução mais adequada para garantir o cumprimento integral da norma ambiental vigente, sendo projetada para reduzir NH_4^+ a valores inferiores a 4 mg/L mediante regeneração com 100 g de NaCl por litro de resina (Abo-Farha et al., 2009; Crittenden et al., 2012).

Como limitações desta pesquisa, destaca-se que os Ensaios 1 e 2 foram conduzidos com volumes de amostra distintos (1,5 L por jarro no Ensaio 1 com $Ca(OH)_2$ e 0,8 L por jarro no Ensaio 2 com NaOH) e faixas de dosagem de $FeCl_3$ diferentes (40–100 ppm e 180–240 ppm, respectivamente), em razão de restrições de volume na segunda coleta e da necessidade de ajuste do coagulante conforme o pH resultante de cada neutralizante. Por esse motivo, os ensaios têm caráter exploratório-comparativo independente, não constituindo experimentos paralelos com controle idêntico de todas as variáveis, o que não invalida a avaliação qualitativa da eficiência de cada sistema, mas impede uma comparação quantitativa direta entre os tratamentos. Os ensaios foram realizados em escala de bancada, o que pode não refletir integralmente o comportamento do sistema em condições operacionais mais amplas. Adicionalmente, o laboratório SPECTROLAB gera efluentes ácidos de forma intermitente, com volume estimado de 2 a 5 litros por semana, provenientes de análises de pH, titulações e digestões ácidas. A extrapolação do método para escala real exige validação em estudo piloto, considerando variações na composição do efluente ao longo do tempo. Ressalta-se, ainda, que a presença de outros metais em solução aquosa, como cobre, zinco e chumbo, pode interferir na eficiência de remoção do ferro, não sendo possível afirmar com absoluta certeza que a redução observada (de 22,010 para 0,299 mg/L) se deve exclusivamente à ação do $FeCl_3$, sem a realização de análises multielementares adicionais (Apha; Awwa; Wef, 2017).

Em síntese, conclui-se que o tratamento físico-químico sequencial, envolvendo

Cidade de Londres London City
Cidade do Rio de Janeiro Rio de Janeiro City
Cidade de Brasilia Brasilia City
Cidade de Curitiba Curitiba City
Cidade de Foz do Iguaçu Foz do Iguaçu City
Puerto Iguazu Argentina
Ciudad del Est Paraguay
Hidrelétrica de Itaipu
Cataratas do Iguaçu

neutralização com NaOH, coagulação/floculação com $FeCl_3$, sedimentação e troca iônica, constitui uma alternativa viável, eficiente e replicável para laboratórios de pequeno porte, assegurando conformidade regulatória e contribuindo para a gestão ambiental responsável. Propõe-se, como trabalhos futuros, a realização de estudos em escala piloto, a avaliação da durabilidade das resinas de troca iônica durante ciclos repetitivos de regeneração e a determinação de parâmetros multielementares para confirmar a seletividade do processo de remoção de ferro.

AGRADECIMENTO: Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Rural Sustentável e ao VI Workshop Internacional em Pesquisa e Resiliência Climática pela oportunidade de apresentação. À UNIOESTE pelo apoio institucional e à CAPES pelo financiamento da minha bolsa de mestrado em Engenharia Química.

REFERÊNCIAS

ABO-FARHA, S. A. et al. Removal of some heavy metal cations by synthetic resin purolite C100. **Journal of Hazardous Materials**, v. 169, n. 1-3, p. 190-194, 2009. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.03.086.

ABDOLLAHZADEH SHARGHI, E.; DAVARPANAH, L. Optimization of chemical coagulation–flocculation process of detergent manufacturing plant wastewater treatment for full scale applications: a case study. **Desalination and Water Treatment**, v. 262, p. 38-50, 2022. DOI: https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28370.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WATER ENVIRONMENT FEDERATION. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. Rice, E. W.; Baird, R. B.; Eaton, A. D. (ed.). 23. ed. Washington, DC: APHA Press, 2017. ISBN: 9780875532875.

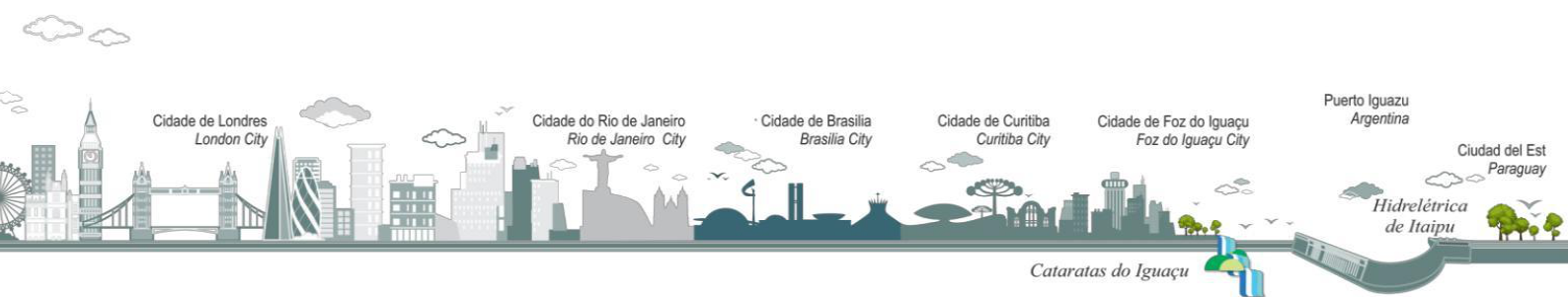
ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D2035-19: Standard Practice for Coagulation-Flocculation Jar Test of Water**. West Conshohocken: ASTM International, 2019.

ÁVILA BERENICE, R**. El intercambio iónico, su descripción y comportamiento químico**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Engenharia Química Industrial) – Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, 2014. Disponível em: https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/17311/25-1-16715.pdf. Acesso em: 13 out. 2025.

BOCHENEK, N. et al. Chelating ion exchange resins: their properties and applications. **Separation and Purification Reviews**, v. 40, n. 2, p. 151-180, 2011.

BOLIVIA. **Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH).** Decreto Supremo N° 24176. La Paz: Ministerio de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente, 1995. Disponível em: https://www.consultores-ambientales.com.bo/wp-content/uploads/2016/04/4.-Reglamento-en-Mareria-de-Contaminacion-Hidrica-RMCH.pdf. Acesso em: 14 out. 2025.

CHERNYAEV, A.; WILSON, B. P.; LUNDSTRÖM, M. Study on valuable metal incorporation in the Fe–Al



precipitate during neutralization of LIB leach solution. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, p. 1-10, 2025.

CRITTENDEN, J. C. et al. **MWH's Water Treatment: Principles and Design**. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012.

CUNHA, J. R. et al. Neutralization of acidic wastewater from a steel plant by using CaO and NaOH: a comparative study. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 38120-38131, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s11356-021-13434-5.

DE S. GUIDA, M. et al. Preparation and evaluation of zeolites for ammonium removal from wastewater. **Scientific Reports**, v. 10, n. 12240, 2020. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-020-69348-6.

DUTTA, S. et al. Predicting biochemical oxygen demand in wastewater treatment using machine learning. **Water**, v. 15, n. 20, p. 3690, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/w15203690.

EBLING, J. M. et al. Application of chemical coagulation aids for the removal of suspended solids (TSS) and phosphorus from the microscreen effluent discharge of an intensive recirculating aquaculture system**. North American Journal of Aquaculture**, v. 66, n. 3, p. 198-207, 2004.

EL MOUHRI, G. et al. Evaluating the effectiveness of coagulation–flocculation treatment on a wastewater from the moroccan leather tanning industry: an ecological approach. **Heliyon**, v. 10, n. 5, e27056, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27056.

FU, F.; WANG, Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters: a review. **Journal of Environmental Management**, v. 92, n. 3, p. 407-418, 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011.

HUSSAIN, C. M. et al. Recent advancement of coagulation–flocculation and its application in wastewater treatment. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 55, n. 16, p. 4363-4380, 2016. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b04703.

JØRGENSEN, T. C.; WEATHERLEY, L. R. Ammonia removal from wastewater by ion exchange in the presence of organic contaminants. **Water Research**, v. 37, n. 8, p. 1723-1728, 2003. DOI: https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00571-7.

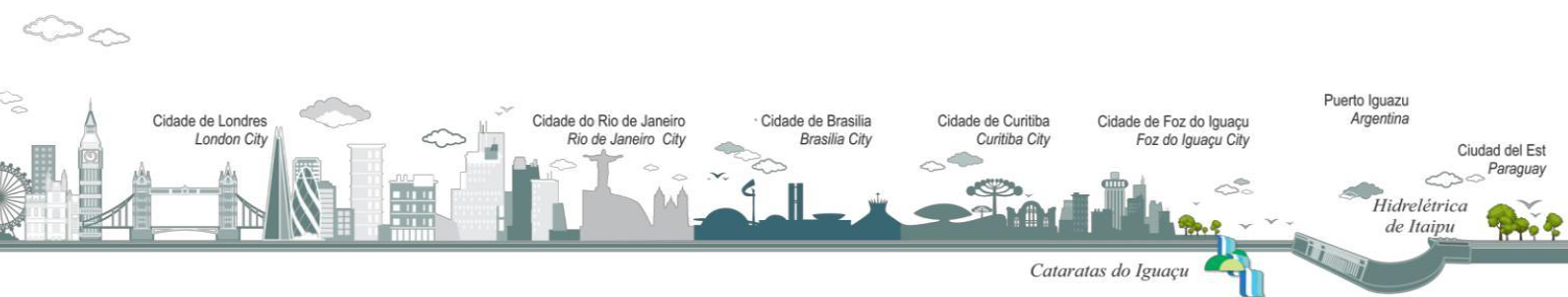
LORENZO-ACOSTA, Y. Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación**. ICIDCA — Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar**, v. 40, n. 2, p. 10-17, 2006. Disponível em: https://www.redalyc.org/pdf/2231/223120664002.pdf. Acesso em: 13 out. 2025.

METCALF, L.; EDDY, H. **Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery**. 5. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2016. ISBN: 978-0073401188.

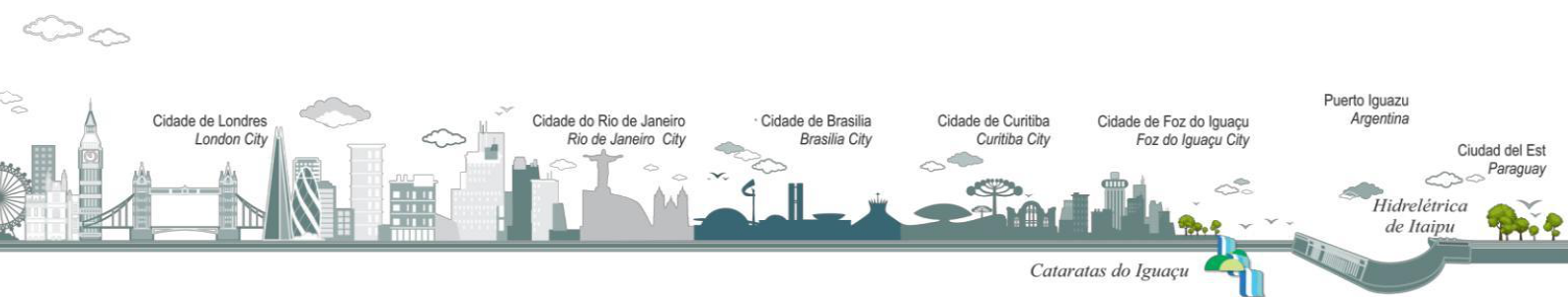
NEVÁREZ RIVADENEIRA, M. E. **Optimización del proceso de regeneración de resinas de intercambio iónico para ser utilizadas en el desmineralizador de agua de Refinería Estatal Esmeraldas**. 2009. Trabalho de Conclusão de Curso – Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, [s.l.], 2009. Disponível em: https://es.scribd.com/document/373820686/1-Optimizacion-Del-Proceso-de-Regeneracion. Acesso em: 13 out. 2025.

RAMALHO, R. **Tratamiento de Aguas Residuales**. 2. ed. Barcelona: Editorial Reverté, 1996.

TZOUPANOS, N. D.; ZOUBOULIS, A. I. Coagulation-flocculation processes in water/wastewater treatment: the application of new generation of chemical reagents. In: **IASME/WSEAS International Conference on**



Heat Transfer, Thermal Engineering and Environment, 6., 2008. Disponível em: https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/TZOUPANOS%20and%20ZOUBOULIS%202008.pdf. Acesso em: 13 out. 2025.

VERMA, S. et al. Optimization of coagulation-flocculation process using ferric chloride for treatment of industrial wastewater. **Environmental Technology & Innovation**, v. 9, p. 57-65, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.eti.2017.11.003.

VERS, N. V. et al. Coagulation and flocculation of dye wastewater by $FeCl_3$ combined with natural polymer derivative flocculant. **Desalination and Water Treatment**, v. 250, p. 181-191, 2022. DOI: https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28285.