

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS - UFAL
CENTRO DE TECNOLOGIA - CTEC
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

SÉRGIO EWERTON DA SILVA ARAÚJO

**POTENCIALIDADE DA COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO/DECANTAÇÃO COMO
ALTERNATIVA DE PÓS-TRATAMENTO DE LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO**

Maceió-AL

2023

SÉRGIO EWERTON DA SILVA ARAÚJO

**POTENCIALIDADE DA COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO/DECANTAÇÃO COMO
ALTERNATIVA DE PÓS-TRATAMENTO DE LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
colegiado do curso de Engenharia Civil da
Universidade Federal de Alagoas, como parte dos
requisitos para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Nélia Henriques Callado

Coorientadora: Prof^ª. Dr^ª. Elizabeth R. H. da Costa

Maceió-AL

2023

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária: Helena Cristina Pimentel do Vale CRB4 - 661

- A663p Araújo, Sérgio Ewerton da Silva.
Potencialidade da coagulação/floculação/decantação como alternativa de pós-tratamento de efluente de aterro sanitário / Sérgio Ewerton da Silva Araújo. – 2023.
145 f. : il.
- Orientadora: Nélia Henriques Callado.
Coorientadora: Elizabeth R. H. da Costa Lucas Meili.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2023.
- Bibliografia: f. 103-105.
Apêndices: f. 106-145.
1. Aterro sanitário. 2. Tratamento de efluente. 3. Coagulação-floculação-decantação. I. Título.

CDU: 628.472.3

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à Deus por tudo que fez por mim durante toda minha vida. Sem sua benção, proteção e orientação eu não teria chegado até aqui. Sou grato por estar sempre comigo, me ajudando nas dificuldades e por sua presença nos momentos de vitória.

Agradeço aos meus pais, Jailene e José Sérgio, por todo amor que recebo, por serem meus suportes nos momentos difíceis, por serem meus guias quando estou perdido e por serem a luz que iluminam meu dia. Amo vocês, mãe e pai!

Agradeço aos meus amigos Alícia, Andressa, Bruno, Gabi e Karla por estarem comigo durante minha trajetória na graduação, nos trabalhos em grupo, nos surtos pré e pós provas, na alegria e na tristeza, nos divertindo e chorando juntos. Sou grato por ter vocês na minha vida, pelos incentivos diários, momentos preciosos compartilhados juntos, apoio emocional e por acreditarem em mim. Obrigado por tudo!

Agradeço, especialmente, meu amigo Bruno, por ser minha dupla nos estudos e na vida, desde 2014, quando nos conhecemos no ensino médio na turma do IFAL. Bruno, obrigado pelas conversas, risadas, rolês para comer, por estar sempre ao meu lado, sendo meu apoio para todas as horas e parceiro nas comemorações. Destaco que a realização deste trabalho não seria possível sem você, sem sua ajuda nas coletas de 200 litros de chorume, para subir a escada do LSA carregando 10 bombonas, cada uma com 20 litros de amostra, e nas análises em laboratório, de 8 horas da manhã até às 18h, 19h, 20h, 21h... mesmo cansados, com sono, com fome, com sede, controlando as idas ao banheiro para não perder o tempo das análises, nos dias de sol, chuva, sábado, domingo, feriado e, até mesmo, no dia do seu aniversário.

Agradeço às minhas orientadoras, Nélia e Beth, por toda dedicação, direcionamento e conhecimento transmitidos. Nélia, ao longo de todos seus ensinamentos, dentro e fora da sala de aula, e da nossa jornada de pesquisa, você se tornou minha maior inspiração profissional, sua inteligência e paixão pelo saneamento tornam esta área de estudo fascinante. Beth, apesar da distância, você não mediu esforços para me orientar e tornar este trabalho cada vez melhor, obrigado por fazer parte e por também ser uma inspiração.

Agradeço também à equipe do LSA, Nadjane e Quitéria, por todo empenho e colaboração no laboratório, explicação nos procedimentos das análises e paciência para tirar todas as dúvidas, ajudando na obtenção e interpretação dos meus resultados.

Por fim, agradeço à CTR de Maceió-AL, em especial aos colaboradores da ETE, por toda disponibilidade, apoio técnico e informações fornecidas, tornando minha pesquisa possível.

RESUMO

O tratamento de lixiviados é um dos maiores desafios da operação de aterros sanitários, tendo em vista sua composição complexa e variabilidade sazonal. A geração e caracterização de lixiviado pode sofrer influência de fatores climatológicos e hidrogeológicos, além de fatores relativos à camada de cobertura, dos resíduos depositados e do tipo de operação do aterro. Nos aterros sanitários, frequentemente, emprega-se um conjunto de técnicas de tratamento, biológicas e/ou físico-químicas, no tratamento de lixiviados, visando enquadrá-lo nos padrões de lançamento de efluentes em corpos hídricos segundo a legislação vigente. O aterro sanitário do município de Maceió-AL dispõe de uma ETE composta por processos de tratamento biológicos (1 lagoa anaeróbia, 2 lagoas pré-aeradas e 1 lagoa aerada facultativa) e físico-químicos (coagulação-floculação-decantação, filtração e osmose reversa). Visto isso, o objetivo deste trabalho foi estudar, em escala de bancada, o tratamento por coag-floc-dec do lixiviado pré-tratado biologicamente do aterro sanitário de Maceió-AL, utilizando o mesmo coagulante, com e sem o polímero aniônico como auxiliar de floculação, utilizados em escala real. Foram analisadas amostras mensais, coletadas no período de out/22 a fev/23 (totalizando 4 coletas), realizando os ensaios de bancada com diferentes faixas de pH x dosagens de PAC, nas velocidades de sedimentação de 1 cm/min e 0,5 cm/min. Em duas coletas aplicou-se apenas o PAC nos ensaios de bancada, e nas outras duas foi testado em conjunto com o PAC o polímero aniônico. Os parâmetros físico-químicos avaliados foram pH, cor aparente, turbidez, DQO e N-amoniaco. Em geral, os ensaios de bancada apresentaram melhor desempenho com velocidade de sedimentação de 0,5 cm/min e maiores remoção dos parâmetros físico-químicos utilizando apenas o PAC. Ao longo das análises utilizando apenas o PAC, verificou-se eficiência de remoção de até 77% de cor aparente e 94% de turbidez. Já nas análises utilizando o PAC em conjunto com o polímero aniônico, houve eficiência de remoção de cor aparente de até 41% e 85% de turbidez. Quanto à remoção de DQO e N-amoniaco, as amostras remanescentes avaliadas, resultantes dos ensaios utilizando apenas o PAC, demonstraram desempenho de até 35% de remoção de DQO e até 48% de remoção de N-amoniaco. Já nas amostras remanescentes dos ensaios utilizando o PAC em conjunto com o polímero aniônico, houve redução de até 35% de DQO e 39% de N-amoniaco.

Palavras-chave: aterro sanitário; tratamento de lixiviado; coagulação-floculação-decantação.

ABSTRACT

The treatment of leachate is one of the biggest challenges in the operation of sanitary landfills, in view of its complex composition and seasonal variability. The generation and characterization of leachate can be influenced by climatological and hydrogeological factors, in addition to factors related to the cover layer, deposited waste and the type of landfill operation. In sanitary landfills, a set of biological and/or physical-chemical treatment techniques is often used in the treatment of leachate, aiming to fit it into the standards for releasing effluents into water bodies according to current legislation. The sanitary landfill in the city of Maceió-AL has an ETP composed of biological treatment processes (1 anaerobic lagoon, 2 pre-aerated lagoons and 1 optionally aerated lagoon) and physical-chemical processes (coagulation-flocculation-decantation, filtration and reverse osmosis). In view of this, the objective of this work was to study, on a bench scale, the treatment by coag-floc-dec of the biologically pre-treated leachate from the Maceió-AL landfill, using the same coagulant, with and without the anionic polymer as an auxiliary of flocculation, used in real scale. Monthly samples were analyzed, collected from Oct/22 to Feb/23 (totaling 4 collections), performing bench tests with different pH ranges x PAC dosages, at sedimentation velocities of 1 cm/min and 0.5 cm/min. In two collections, only the PAC was applied in the bench tests, and in the other two, the anionic polymer was tested together with the PAC. The physical-chemical parameters evaluated were pH, apparent color, turbidity, COD and N-ammoniacal. In general, the bench tests showed better performance with a sedimentation velocity of 0.5 cm/min and greater removal of physicochemical parameters using only the PAC. Throughout the analyzes using only the PAC, removal efficiency of up to 77% of apparent color and 94% of turbidity was verified. In the analyzes using the PAC in conjunction with the anionic polymer, there was apparent color removal efficiency of up to 41% and 85% of turbidity. As for COD and N-ammoniacal removal, the remaining samples evaluated, resulting from tests using only the PAC, demonstrated performance of up to 35% of COD removal and up to 48% of N-ammoniacal removal. In the remaining samples of the tests using the PAC in conjunction with the anionic polymer, there was a reduction of up to 35% of COD and 39% of N-ammoniacal.

Keywords: landfill; leachate treatment; coagulation-flocculation-decantation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Configuração esquemática da dupla camada elétrica de uma partícula coloidal.....	30
Figura 2 – Esquematização de um modelo do processo de coagulação e floculação.....	31
Figura 3 – Vista aérea do aterro sanitário de Maceió-AL.....	36
Figura 4 – Vista aérea da ETE do aterro sanitário de Maceió-AL.....	37
Figura 5 – Fluxograma do processo da ETE do aterro sanitário de Maceió-AL.....	37
Figura 6 – Fluxograma das etapas metodológicas do TCC.....	40
Figura 7 – Equipamento jar test utilizado nos ensaios de bancada.....	41

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação de resíduos sólidos quanto à periculosidade.....	21
Quadro 2 – Aplicação do PAC comercial e do polímero aniônico nos ensaios de bancada.....	41
Quadro 3 – Método das análises físico-químicas dos parâmetros avaliados.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dimensões das lagoas do aterro sanitário de Maceió-AL.....	38
Tabela 2 – Dosagens de PAC comercial para realização dos ensaios de bancada.....	43
Tabela 3 – pH natural da amostra em cada coleta.....	53
Tabela 4 – Dosagens de H ₂ SO ₄ utilizadas para reduzir o pH da amostra.....	53
Tabela 5 – Dosagens de NaOH utilizadas para elevar o pH da amostra.....	54
Tabela 6 – Melhores pares de pH x mg.PAC/L para cor aparente e $V_s = 1$ cm/min (Out/22)..	56
Tabela 7 – Pares de pH natural x mg.PAC/L para cor aparente e $V_s = 1$ cm/min (Out/22).....	57
Tabela 8 – Melhores pares de pH x mg.PAC/L para turbidez e $V_s = 1$ cm/min (Out/22).....	59
Tabela 9 – Pares de pH natural x mg.PAC/L para turbidez e $V_s = 1$ cm/min (Out/22).....	59
Tabela 10 – Melhores pares de pH x mg.PAC/L para cor ap. e $V_s = 1$ cm/min (Nov/22).....	62
Tabela 11 – Pares de pH natural x mg.PAC/L para cor ap. e $V_s = 1$ cm/min (Nov/22).....	62
Tabela 12 – Melhores pares de pH x mg.PAC/L para cor ap. e $V_s = 0,5$ cm/min (Nov/22).....	64
Tabela 13 – Pares de pH natural x mg.PAC/L para cor ap. e $V_s = 0,5$ cm/min (Nov/22).....	65
Tabela 14 – Melhores pares de pH x mg.PAC/L para turbidez e $V_s = 1$ cm/min (Nov/22).....	67
Tabela 15 – Pares de pH natural x mg.PAC/L para turbidez e $V_s = 1$ cm/min (Nov/22).....	67
Tabela 16 – Melhores pares de pH x mg.PAC/L para turbidez e $V_s = 0,5$ cm/min (Nov/22)..	69
Tabela 17 – Pares de pH natural x mg.PAC/L para turbidez e $V_s = 0,5$ cm/min (Nov/22).....	69
Tabela 18 – Melhores pares de pH x mg.PAC/L para cor ap. e $V_s = 1$ cm/min (Jan/23).....	72
Tabela 19 – Pares de pH natural x mg.PAC/L para cor ap. e $V_s = 1$ cm/min (Jan/23).....	72
Tabela 20 – Melhores pares de pH x mg.PAC/L para cor ap. e $V_s = 0,5$ cm/min (Jan/23).....	74
Tabela 21 – Pares de pH natural x mg.PAC/L para cor ap. e $V_s = 0,5$ cm/min (Jan/23).....	74
Tabela 22 – Melhores pares de pH x mg.PAC/L para turbidez e $V_s = 1$ cm/min (Jan/23).....	75
Tabela 23 – Pares de pH natural x mg.PAC/L para turbidez e $V_s = 1$ cm/min (Jan/23).....	77
Tabela 24 – Melhores pares de pH x mg.PAC/L para turbidez e $V_s = 0,5$ cm/min (Jan/23)....	77
Tabela 25 – Pares de pH natural x mg.PAC/L para turbidez e $V_s = 0,5$ cm/min (Jan/23).....	79
Tabela 26 – Melhores pares de pH x mg.PAC/L para cor ap. e $V_s = 1$ cm/min (Fev/23).....	81

Tabela 27 – Pares de pH natural x mg.PAC/L para cor ap. e $V_s = 1$ cm/min (Fev/23).....	81
Tabela 28 – Melhores pares de pH x mg.PAC/L para cor ap. e $V_s = 0,5$ cm/min (Fev/23).....	82
Tabela 29 – Pares de pH natural x mg.PAC/L para cor ap. e $V_s = 0,5$ cm/min (Fev/23).....	84
Tabela 30 – Melhores pares de pH x mg.PAC/L para turbidez e $V_s = 1$ cm/min (Fev/23).....	86
Tabela 31 – Pares de pH natural x mg.PAC/L para turbidez e $V_s = 1$ cm/min (Fev/23).....	86
Tabela 32 – Melhores pares de pH x mg.PAC/L para turbidez e $V_s = 0,5$ cm/min (Fev/23)...	88
Tabela 33 – Pares de pH natural x mg.PAC/L para turbidez e $V_s = 0,5$ cm/min (Fev/23).....	89
Tabela 34 – Amostras do jar test para análise de DQO e N-amoniacoal (Out/22).....	90
Tabela 35 – Balanço de massa de DQO (Out/22).....	90
Tabela 36 – Balanço de massa de N-amoniacoal (Out/22).....	90
Tabela 37 – Amostras do jar test para análise de DQO e N-amoniacoal (Nov/22).....	92
Tabela 38 – Balanço de massa de DQO (Nov/22).....	92
Tabela 39 – Balanço de massa de N-amoniacoal (Nov/22).....	92
Tabela 40 – Amostras do jar test para análise de DQO e N-amoniacoal (Jan/23).....	95
Tabela 41 – Balanço de massa de DQO (Jan/23).....	95
Tabela 42 – Balanço de massa de N-amoniacoal (Jan/23).....	95
Tabela 43 – Amostras do jar test para análise de DQO e N-amoniacoal (Fev/23).....	98
Tabela 44 – Balanço de massa de DQO (Fev/23).....	98
Tabela 45 – Balanço de massa de N-amoniacoal (Fev/23).....	98

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Geração de RSU no Brasil nos últimos 5 anos.....	22
Gráfico 2 – Geração per capita de RSU no Brasil nos últimos 5 anos.....	22
Gráfico 3 – Coleta de RSU no Brasil nos últimos 5 anos.....	23
Gráfico 4 – Coleta per capita de RSU no Brasil nos últimos 5 anos.....	24
Gráfico 5 – Cobertura de coleta de RSU no Brasil nos últimos 5 anos.....	24
Gráfico 6 – Resumo do panorama de RSU no Brasil nos últimos 5 anos.....	25
Gráfico 7 – Disposição final de RSU no Brasil nos últimos 5 anos.....	26
Gráfico 8 – Percentual da disposição final de RSU no Brasil nos últimos 5 anos.....	26
Gráfico 9 – Resultados da cor aparente do lixiviado pré-tratado.....	47
Gráfico 10 – Resultados da turbidez do lixiviado pré-tratado.....	47
Gráfico 11 – Resultados do pH do lixiviado pré-tratado.....	49
Gráfico 12 – Resultados da alcalinidade do lixiviado pré-tratado.....	49
Gráfico 13 – Resultados da DQO do lixiviado pré-tratado.....	51
Gráfico 14 – Resultados do N-amoniaco do lixiviado pré-tratado.....	52
Gráfico 15 – Diagrama de coagulação para cor aparente (uC) e $V_s = 1$ cm/min (Out/22).....	55
Gráfico 16 – Remoção de cor aparente com $V_s = 1$ cm/min (Out/22).....	55
Gráfico 17 – Diagrama de coagulação para turbidez (NTU) e $V_s = 1$ cm/min (Out/22).....	58
Gráfico 18 – Remoção de turbidez com $V_s = 1$ cm/min (Out/22).....	58
Gráfico 19 – Diagrama de coag. para cor aparente (uC) e $V_s = 1$ cm/min (Nov/22).....	61
Gráfico 20 – Remoção de cor aparente com $V_s = 1$ cm/min (Nov/22).....	61
Gráfico 21 – Diagrama de coagulação para cor aparente (uC) e $V_s = 0,5$ cm/min (Nov/22).....	63
Gráfico 22 – Remoção de cor aparente com $V_s = 0,5$ cm/min (Nov/22).....	63
Gráfico 23 – Diagrama de coagulação para turbidez (NTU) e $V_s = 1$ cm/min (Nov/22).....	66
Gráfico 24 – Remoção de turbidez com $V_s = 1$ cm/min (Nov/22).....	66
Gráfico 25 – Diagrama de coagulação para turbidez (NTU) e $V_s = 0,5$ cm/min (Nov/22).....	68
Gráfico 26 – Remoção de turbidez com $V_s = 0,5$ cm/min (Nov/22).....	68

Gráfico 27 – Diagrama de coagulação para cor aparente (uC) e $V_s = 1$ cm/min (Jan/23).....	71
Gráfico 28 – Remoção de cor aparente com $V_s = 1$ cm/min (Jan/23).....	71
Gráfico 29 – Diagrama de coagulação para cor aparente (uC) e $V_s = 0,5$ cm/min (Jan/23)....	73
Gráfico 30 – Remoção de cor aparente com $V_s = 0,5$ cm/min (Jan/23).....	73
Gráfico 31 – Diagrama de coagulação para turbidez (NTU) e $V_s = 1$ cm/min (Jan/23).....	76
Gráfico 32 – Remoção de turbidez com $V_s = 1$ cm/min (Jan/23).....	76
Gráfico 33 – Diagrama de coagulação para turbidez (NTU) e $V_s = 0,5$ cm/min (Jan/23).....	78
Gráfico 34 – Remoção de turbidez com $V_s = 0,5$ cm/min (Jan/23).....	78
Gráfico 35 – Diagrama de coagulação para cor aparente (uC) e $V_s = 1$ cm/min (Fev/23).....	80
Gráfico 36 – Remoção de cor aparente com $V_s = 1$ cm/min (Fev/23).....	80
Gráfico 37 – Diagrama de coagulação para cor aparente (uC) e $V_s = 0,5$ cm/min (Fev/23)....	83
Gráfico 38 – Remoção de cor aparente com $V_s = 0,5$ cm/min (Fev/23).....	83
Gráfico 39 – Diagrama de coagulação para turbidez (NTU) e $V_s = 1$ cm/min (Fev/23).....	85
Gráfico 40 – Remoção de turbidez com $V_s = 1$ cm/min (Fev/23).....	85
Gráfico 41 – Diagrama de coagulação para turbidez (NTU) e $V_s = 0,5$ cm/min (Fev/23).....	87
Gráfico 42 – Remoção de turbidez com $V_s = 0,5$ cm/min (Fev/23).....	87
Gráfico 43 – Remoção de DQO das amostras 1 e 2 (Out/22).....	91
Gráfico 44 – Remoção de N-amoniaco das amostras 1 e 2 (Out/22).....	91
Gráfico 45 – Remoção de DQO das amostras 1 e 2 (Nov/22).....	93
Gráfico 46 – Remoção de N-amoniaco das amostras 1 e 2 (Nov/22).....	93
Gráfico 47 – Remoção de DQO das amostras 3 e 4 (Nov/22).....	94
Gráfico 48 – Remoção de N-amoniaco das amostras 3 e 4 (Nov/22).....	94
Gráfico 49 – Remoção de DQO das amostras 1 e 2 (Jan/23).....	96
Gráfico 50 – Remoção de N-amoniaco das amostras 1 e 2 (Jan/23).....	96
Gráfico 51 – Remoção de DQO das amostras 3 e 4 (Jan/23).....	97
Gráfico 52 – Remoção de N-amoniaco das amostras 3 e 4 (Jan/23).....	97
Gráfico 53 – Remoção de DQO das amostras 1 e 2 (Fev/23).....	99

Gráfico 54 – Remoção de N-amoniaco das amostras 1 e 2 (Fev/23).....	99
Gráfico 55 – Remoção de DQO das amostras 3 e 4 (Fev/23).....	100
Gráfico 56 – Remoção de N-amoniaco das amostras 3 e 4 (Fev/23).....	100

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
AL	Alagoas
APHA	American Public Health Association
AWWA	American Water Works Association
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
COT	Carbono Orgânico Total
CTEC	Centro de Tecnologia
CTR	Central de Tratamento de Resíduos
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EE	Estação Elevatória
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
FAU	Unidades de Atenuação da Formazina
N-amoniacal	Nitrogênio Amoniacal
NBR	Norma Brasileira
NTU	Unidade Nefelométrica de Turbidez
LSA	Laboratório de Saneamento Ambiental
PAC	Policloreto de Alumínio
pH	Potencial Hidrogeniônico
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
UFAL	Universidade Federal de Alagoas
Vs	Velocidade de Sedimentação
WEF	Water Environment Federation

LISTA DE SÍMBOLOS

Al_2O_3	Óxido de Alumínio
Ca^{2+}	Íon Cálcio
Cd^{2+}	Íon Cádmio
Cl^-	Íon Cloreto
Cr^{3+}	Íon Cromo
Cu^{2+}	Íon Cobre
Fe^{2+}	Íon Ferro
HCO_3^-	Íon Hidrogenocarbonato
H_2SO_4	Ácido Sulfúrico
K^+	Íon Potássio
Na^+	Íon Sódio
NaOH	Hidróxido de Sódio
NH_4^+	Íon Amônio
Ni^{2+}	Íon Níquel
N-NH_3	Nitrogênio Amoniacal
Mg^{2+}	Íon Magnésio
Mn^{2+}	Íon Manganês
Pb^{2+}	Íon Chumbo
SO_4^{2-}	Íon Sulfato
Zn^{2+}	Íon Zinco

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	17
1.1. Considerações Iniciais.....	17
1.2. Objetivos.....	18
1.2.1. Objetivo Geral.....	18
1.2.2. Objetivos Específicos.....	18
1.3. Justificativa.....	19
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	20
2.1. Resíduos Sólidos Urbanos.....	20
2.1.1. Geração de RSU.....	21
2.1.2. Coleta de RSU.....	23
2.1.3. Disposição Final de RSU.....	25
2.2. Lixiviado.....	27
2.2.1. Caracterização.....	27
2.2.2. Classificação.....	28
2.3. Sistemas de Tratamento de Lixiviado.....	28
2.3.1. Tratamento Biológico.....	28
2.3.2. Tratamento Físico-Químico.....	29
2.4. Coagulação-Floculação-Decantação.....	30
2.4.1. Coagulação.....	31
2.4.2. Floculação.....	32
2.4.3. Decantação.....	33
2.4.4. Uso de Polímeros como Auxiliares de Coagulação-Floculação.....	33
2.4.5. Estudos Aplicados no Tratamento de Lixiviado.....	33
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	36
3.1. Descrição da Área de Estudo.....	36
3.1.1. Pré-tratamento.....	38
3.1.2. Pós-tratamento.....	38
3.2. Planejamento Metodológico.....	39
3.2.1. Coleta da Amostra.....	40
3.3. Ensaio de Bancada.....	41
3.3.1. Equipamento.....	41
3.3.2. Sistema de Agitação.....	42
3.3.3. Preparação das Amostras.....	42
3.3.4. Dosagens do Coagulante e Polímero.....	42
3.3.5. Montagem dos Diagramas de Coagulação.....	43
3.4. Análises Físico-Químicas.....	43
3.4.1. Potencial Hidrogeniônico.....	44
3.4.2. Alcalinidade.....	44
3.4.3. Cor Aparente.....	44
3.4.4. Turbidez.....	44

3.4.5. Demanda Química de Oxigênio.....	45
3.4.6. Nitrogênio Amoniacal.....	45
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	46
4.1. Caracterização do Lixiviado Pré-tratado no Aterro Sanitário de Maceió-AL.....	46
4.1.1. Cor Aparente e Turbidez.....	46
4.1.2. pH e Alcalinidade.....	48
4.1.3. DQO.....	50
4.1.4. N-amoniaco.....	51
4.2. Ensaios de Bancada.....	52
4.2.1. Outubro de 2022.....	54
4.2.2. Novembro de 2022.....	60
4.2.3. Janeiro de 2023.....	70
4.2.4. Fevereiro de 2023.....	79
4.3. Remoção de DQO e N-amoniaco.....	89
4.3.1. Outubro de 2022.....	89
4.3.2. Novembro de 2022.....	91
4.3.3. Janeiro de 2023.....	94
4.3.4. Fevereiro de 2023.....	97
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	101
REFERÊNCIAS.....	103
APÊNDICE A – Resultados da Caracterização do Lixiviado Pré-tratado.....	106
APÊNDICE B – Resultados dos Ensaios de Bancada de Outubro/2022.....	107
APÊNDICE C – Resultados dos Ensaios de Bancada de Novembro/2022.....	112
APÊNDICE D – Resultados dos Ensaios de Bancada de Janeiro/2023.....	122
APÊNDICE E – Resultados dos Ensaios de Bancada de Fevereiro/2023.....	132
APÊNDICE F – Resultados das Análises de DQO e N-amoniaco de Out/2022.....	142
APÊNDICE G – Resultados das Análises de DQO e N-amoniaco de Nov/2022.....	143
APÊNDICE H – Resultados das Análises de DQO e N-amoniaco de Jan/2023.....	144
APÊNDICE I – Resultados das Análises de DQO e N-amoniaco de Fev/2023.....	145

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais

A produção de resíduos remonta aos primórdios da civilização. Nessa época, sua composição era basicamente de matéria orgânica, com degradação relativamente fácil, através de processos naturais, voltando a fazer parte da natureza. Devido ao aumento populacional e a revolução industrial, e, conseqüentemente, à mudança de hábitos e estilo de vida da sociedade, houve um aumento na produção e na diversidade de resíduos, provocando problemas ambientais, sociais, políticos e econômicos. Com isso, houve um despertar da humanidade para a importância da criação de políticas ambientais, com o intuito de minimizar a degradação ambiental e conservar os recursos naturais do planeta.

De acordo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2022), a geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) no país, durante o ano de 2022, atingiu aproximadamente um total de 81,8 milhões de toneladas, ou 224 mil toneladas diárias. Sob esse aspecto, cada brasileiro gerou, em média, 1,043 kg de RSU por dia. Regionalmente, em 2022, a região com maior geração de RSU foi o Sudeste, com cerca de 40,64 milhões de toneladas geradas no ano (representando 49,7% da geração do país). Seguidamente, tem-se a região Nordeste, com cerca de 20,20 milhões de toneladas (representando 24,7% da geração do país), a região Sul, com cerca de 8,67 milhões de toneladas (representando 10,6% da geração do país), a região Norte, com cerca de 6,17 milhões de toneladas (representando 7,5% da geração do país) e a região Centro-Oeste, com cerca de 6,13 milhões de toneladas (representando 7,5% da geração do país).

Objetivando a amenização dos problemas ambientais causados pela geração de resíduos, criaram-se, dentre outras abordagens, os aterros sanitários como uma destinação ambientalmente adequada dos RSU. A NBR 8419 (ABNT, 1992) define o aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos como uma técnica de disposição destes resíduos no solo, de tal modo que não cause danos à saúde pública e à segurança, utilizando princípios de engenharia para confinar estes resíduos de forma compacta e cobertos com uma camada de solo na conclusão de cada jornada de trabalho, ou, quando necessário, a intervalos menores.

Um dos subprodutos do aterro sanitário, gerado através da decomposição da matéria orgânica aterrada, é o chorume, que juntamente com outros líquidos percolados formam o lixiviado, possuindo elevado potencial de contaminação ambiental. De acordo com Kjeldsen *et al.* (2002), os principais impactos ambientais no lançamento de lixiviados em corpos

hídricos estão associados à diminuição do teor de oxigênio dissolvido, mudanças na fauna e na flora do meio (eutrofização) e toxicidade da amônia.

Nesse sentido, diversas técnicas são empregadas para o tratamento de lixiviado, podendo envolver tanto processos biológicos, quanto processos físico-químicos. Quando o lixiviado é considerado maduro, apresentando alta concentração de nitrogênio amoniacal e baixa relação DBO/DQO, faz-se necessário o emprego de processos físico-químicos associados com processos biológicos. Isso se deve porque o tratamento biológico não é suficiente para o tratamento do lixiviado maduro (TELLES, 2010).

Desse modo, é essencial que sejam realizados estudos de técnicas de tratamento de lixiviado, a fim de investigar métodos de diminuição do potencial poluidor do efluente e enquadrá-lo nos limites de lançamento da legislação ambiental para descarte em corpos de água. No Brasil, a legislação em vigor para lançamento de efluentes em corpos hídricos é a Resolução CONAMA nº 430, de 2011. Assim, a partir da caracterização do chorume bruto, define-se o sistema de tratamento de lixiviado do aterro sanitário que apresenta melhor eficiência na remoção de seus compostos tóxicos, analisando, também, a relação custo-benefício de todo o processo.

Em Maceió, o aterro sanitário possui um sistema de tratamento de lixiviados que engloba processos biológicos com lagoas (1 lagoa anaeróbia, 2 lagoas pré-aeradas e 1 lagoa aerada facultativa) e físico-químicos (coagulação-floculação-decantação, filtração e osmose reversa), e tem como desafio a remoção de DQO e N-amoniacal, de forma que o efluente tratado possa ser descartado num corpo de água doce denominado Riacho Doce.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

Estudar, em escala de bancada, a melhor relação do pH x dosagem do coagulante, com e sem polímero aniônico como auxiliar de floculação, simulando o processo de coagulação-floculação-decantação em escala real, do lixiviado pré-tratado biologicamente do aterro sanitário do município de Maceió/AL.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Determinar as características físico-químicas de pH, alcalinidade, cor aparente, turbidez, DQO e N-amoniacal do lixiviado pré-tratado biologicamente no aterro sanitário do município de Maceió-AL;

- Estudar diferentes dosagens do coagulante e faixas de pH, com e sem aplicação de polímero aniônico, em diferentes velocidades de sedimentação, no processo de coagulação-floculação-decantação;
- Construir o diagrama de coagulação para as características de cor aparente e turbidez remanescentes do efluente tratado, buscando identificar pontos que demonstrem melhor desempenho na remoção de cor aparente e turbidez do efluente tratado;
- Determinar as características físico-químicas de DQO e N-amoniacal dos pontos que apresentarem maior remoção de cor aparente e turbidez do diagrama de coagulação, a fim de verificar se atendem aos padrões de lançamento;
- Identificar pontos, determinados pela faixa de pH de coagulação x dosagem de coagulante, que resultam em melhor desempenho no tratamento do efluente, para remoção de DQO e N-amoniacal.

1.3. Justificativa

Diante das limitações de reduzir o potencial poluidor do lixiviado de aterros sanitários utilizando uma tecnologia isolada em seu tratamento, diversos trabalhos científicos têm proposto a aplicação de processos integrados (MORAIS; SIRTORI; PERALTA-ZAMORA, 2006). Dessa forma, o processo de coag-floc-dec tem se demonstrado como uma alternativa no tratamento desse tipo de efluente, associado a outras tecnologias (FELICI *et al.*, 2013).

Para que a técnica de coagulação-floculação-decantação seja bem empregada no tratamento de lixiviado maduros de aterros sanitários, é necessário investigar as melhores condições operacionais deste tipo de tratamento. Di Bernardo e Dantas (2005), estudando o processo de coag-floc-dec aplicado no tratamento de água bruta, afirmam que os principais fatores que influenciam esse processo são as características do líquido a ser tratado, a natureza química e a dosagem do coagulante, o pH de coagulação e as condições de velocidade e tempo de mistura na coagulação e floculação.

Sendo assim, compreende-se que no processo de tratamento do lixiviado utilizando a coag-floc-dec é necessário realizar monitoramentos e adequações frequentes no sistema, a fim de maximizar a eficiência na remoção dos compostos tóxicos do efluente.

Vale destacar que este trabalho faz parte de um projeto de monitoramento ambiental do aterro sanitário de Maceió-AL, desenvolvido por meio de um convênio entre a Central de Tratamento de Resíduos (CTR) e a Universidade Federal de Alagoas (UFAL).

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Resíduos Sólidos Urbanos

De acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004), resíduos sólidos são resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. A NBR 10004 (ABNT, 2004) destaca que os resíduos sólidos também incluem lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, assim como, também, líquidos cujas características tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotamento sanitário ou em corpos hídricos, ou que exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis frente à melhor tecnologia disponível.

Os resíduos sólidos apresentam grande diversidade e complexidade, sendo que suas características físicas, químicas e biológicas variam de acordo com a fonte ou atividade geradora. Além disso, a geração dos resíduos sólidos sofre influência de fatores econômicos, sociais, geográficos, educacionais, culturais, tecnológicos e legais, tanto em relação à quantidade gerada quanto à sua composição qualitativa (CASTILHOS JUNIOR, 2006).

O conhecimento das características e da classificação dos resíduos sólidos é um fator importante para o prognóstico de estratégias de gerenciamento de resíduos. As principais características de interesse para as estratégias de gerenciamento são: taxa de geração, composição gravimétrica, peso específico, carbono, nitrogênio, potássio, enxofre, teor de sólidos totais fixos, sólidos voláteis, teor de umidade, tamanho da partícula, compressividade, poder calorífico e pH. Além disso, também deve ser avaliada a presença de microorganismos patogênicos ou de substâncias constituintes que, respectivamente, podem tornar os resíduos contaminados biologicamente ou quimicamente. Em relação à classificação, os resíduos sólidos podem ser agrupados por uma característica que seja de interesse para o gerenciamento. Algumas das formas mais usuais de classificação são: segundo à origem, grau de periculosidade à saúde pública e ao meio ambiente, grau de biodegradabilidade, fração seca e úmida, fração reciclável e não reciclável, entre outras (CASTILHOS JUNIOR, 2006).

A NBR 10004 (ABNT, 2004) classifica os resíduos sólidos quanto a sua periculosidade à saúde pública e ao meio ambiente em dois grupos, perigosos (classe I) e não perigosos (classe II), sendo este último subdividido em não inerte (classe II A) e inerte (classe II B). No Quadro 1 está apresentada a classificação, bem como sua especificação, dos resíduos sólidos quanto à periculosidade.

Quadro 1 – Classificação de resíduos sólidos quanto à periculosidade

Categoria		Especificação
Classe I (Perigosos)		São aqueles que apresentam periculosidade, ou uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.
Classe II (Não Perigosos)	Classe II A (Não Inertes)	São aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I ou de resíduos classe II B, podendo apresentar propriedades como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
	Classe II B (Inertes)	São aqueles que, quando selecionado uma amostra, conforme a NBR 10007 (ABNT, 2004), e submetidos ao um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, segundo NBR 10006 (ABNT, 2004), não tiverem nenhum de seus componentes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

Fonte: ABNT NBR 10004 (2004)

Tratando-se especificamente dos resíduos sólidos urbanos (RSU), a NBR 8419 (ABNT, 1992) define que são resíduos sólidos gerados num meio urbano, excetuados os resíduos industriais perigosos, hospitalares sépticos e de aeroportos e portos.

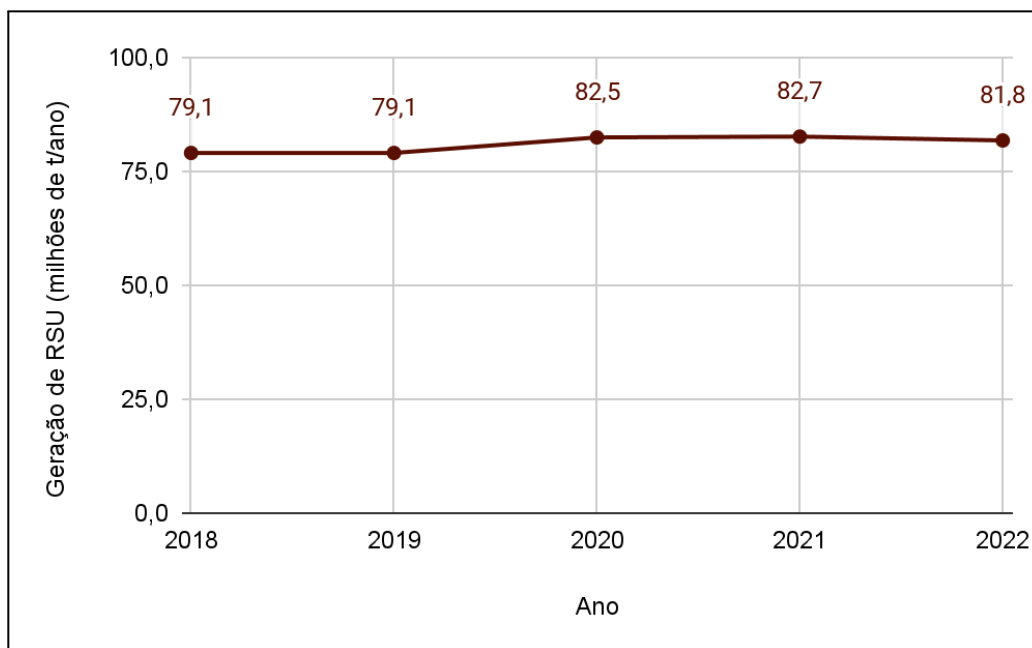
Os RSU são constituídos por um aglomerado de substâncias diversificadas que podem ser de fácil, moderada e difícil degradação, e, até mesmo, não degradáveis. Sua composição varia de acordo com cada região, influenciada por fatores econômicos, geográficos, sociais, culturais e climáticos. Como os RSU possuem propriedades que os caracterizam como uma fonte de poluição ambiental, sua destinação ambientalmente adequada e seu tratamento são fundamentais para a preservação do meio ambiente e para a saúde pública (TELLES, 2010).

2.1.1. Geração de RSU

De acordo com a ABRELPE (2022), a geração de RSU no Brasil, durante o ano de 2022, atingiu aproximadamente um total de 81,8 milhões de toneladas, correspondendo a 224 mil toneladas diárias. Em termos de geração *per capita*, a geração de RSU no país, em 2022, foi de 1,043 kg/hab/dia, o que representa 381 kg/hab/ano. Já em 2021, a geração de RSU no Brasil atingiu, aproximadamente, a marca de 82,7 milhões de toneladas, correspondendo a 226 mil toneladas diárias. Com relação à geração *per capita* de RSU no país, em 2022, foi de 1,062 kg/hab/dia, o que representa 387 kg/hab/ano.

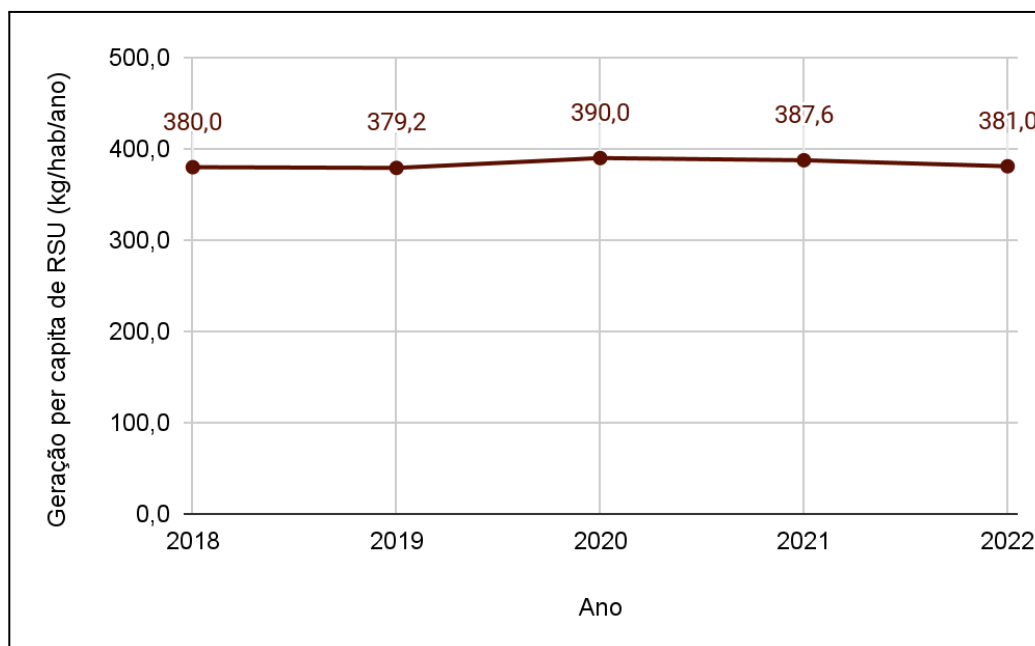
No Gráfico 1 está apresentada a evolução da geração de resíduos sólidos urbanos no Brasil nos últimos 5 anos. Analogamente, no Gráfico 2 está apresentada a evolução da geração *per capita* de resíduos sólidos urbanos no Brasil nos últimos 5 anos.

Gráfico 1 – Geração de RSU no Brasil nos últimos 5 anos



Fonte: ABRELPE (2019, 2020, 2021, 2022)

Gráfico 2 – Geração *per capita* de RSU no Brasil nos últimos 5 anos



Fonte: ABRELPE (2019, 2020, 2021, 2022)

Entre 2018 e 2022, a geração de RSU no Brasil registrou um incremento, passando de 79,1 milhões para 81,8 milhões de toneladas por ano. Entretanto, em comparação com os anos de 2020 e 2021, a geração de RSU em 2022 registrou um decréscimo, ficando abaixo da

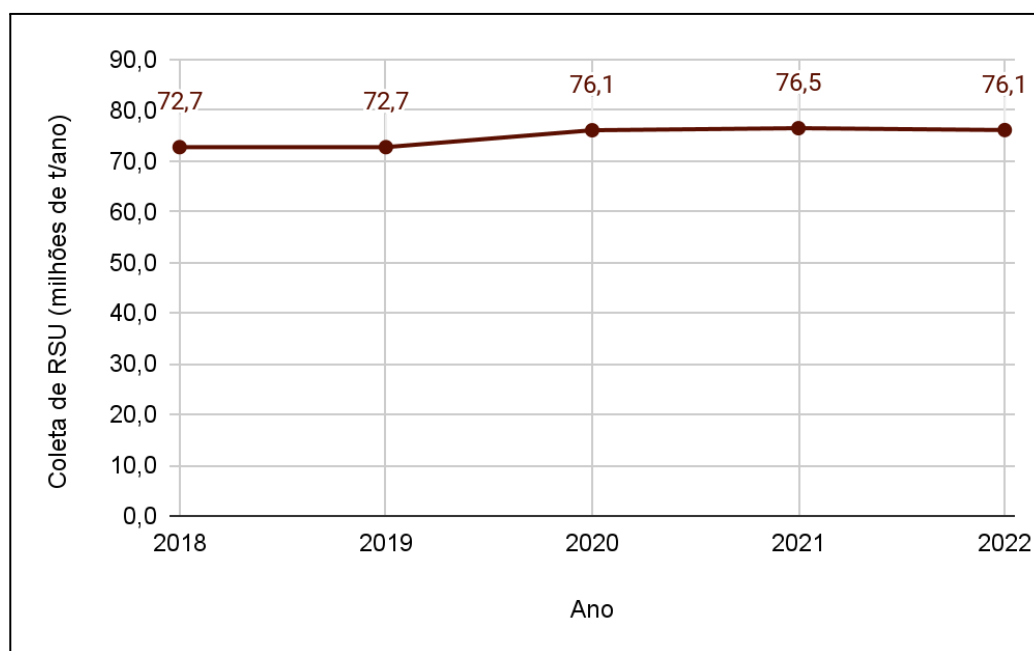
faixa de 82 milhões de toneladas. Por sua vez, a geração *per capita* de RSU no país aumentou de 380 kg/hab/ano para 381 kg/hab/ano, havendo acréscimo e decréscimo ao longo dos últimos 5 anos (ABRELPE, 2019, 2020, 2021, 2022).

2.1.2. Coleta de RSU

Tratando-se da coleta de RSU, em 2022 foram coletados um total de 76,1 milhões de toneladas, equivalente a cobertura de coleta de 93%. Em termos de coleta *per capita* de RSU no país, no ano de 2022, foi de 0,971 kg/hab/dia, o que representa 354 kg/hab/ano. Em relação ao ano de 2021, a coleta de RSU no Brasil atingiu, aproximadamente, um total de 76,4 milhões de toneladas. Por sua vez, a coleta *per capita* de RSU no país, em 2021, foi de 0,982 kg/hab/dia, o que representa 358 kg/hab/ano (ABRELPE, 2022).

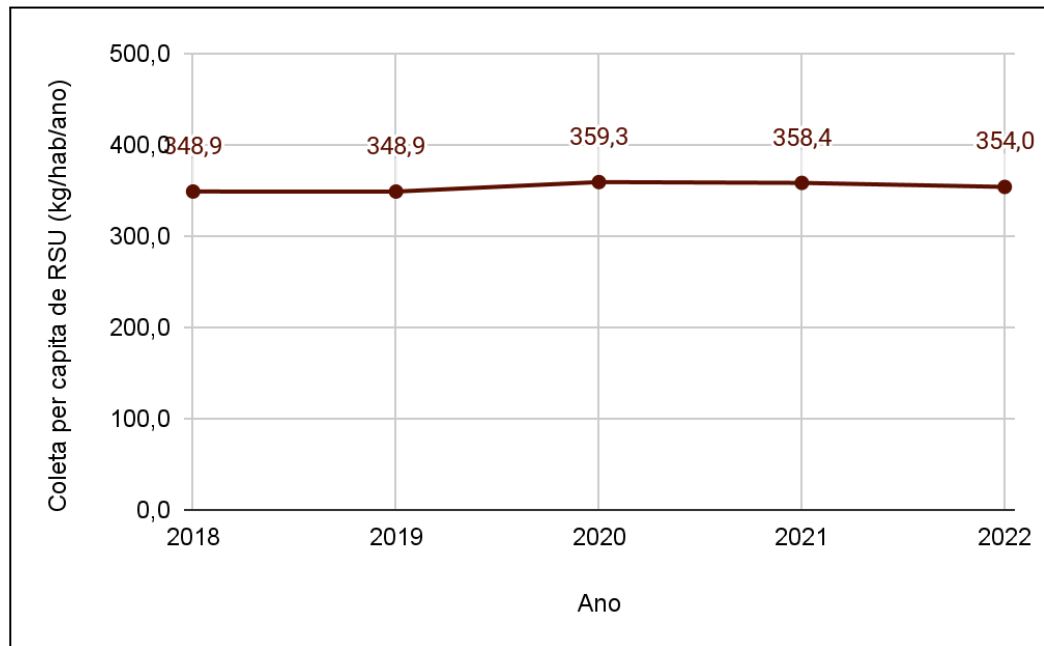
No Gráfico 3 está apresentada a evolução da coleta de resíduos sólidos urbanos no Brasil nos últimos 5 anos. Analogamente, no Gráfico 4 está apresentada a evolução da coleta *per capita* de resíduos sólidos urbanos no Brasil nos últimos 5 anos.

Gráfico 3 – Coleta de RSU no Brasil nos últimos 5 anos



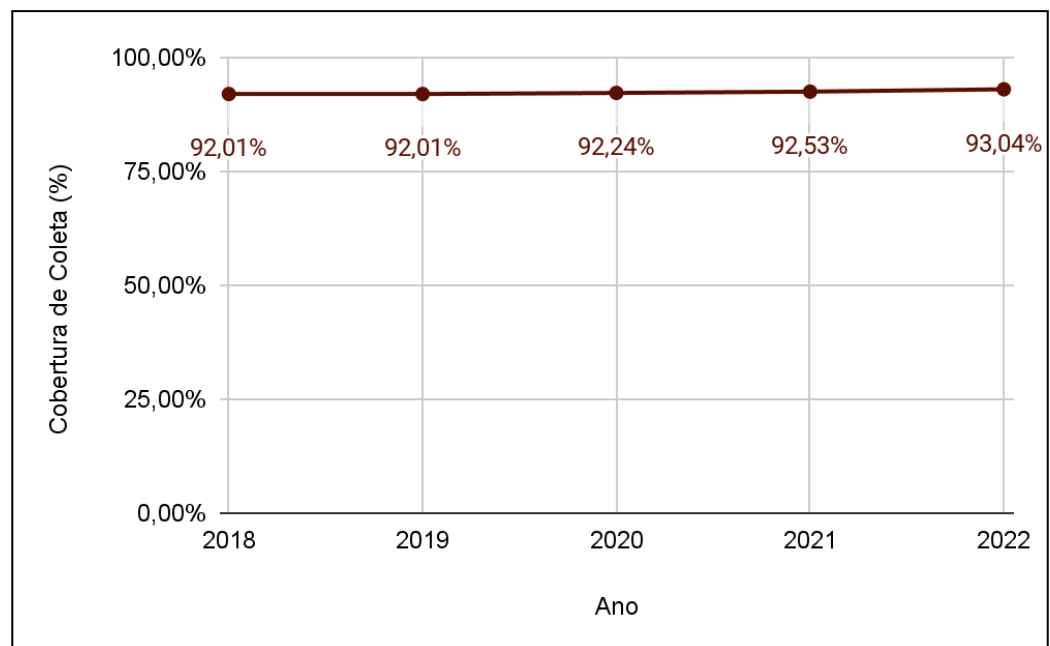
Fonte: ABRELPE (2019, 2020, 2021, 2022)

Complementando, no Gráfico 5 está apresentada a evolução do percentual da cobertura de coleta de resíduos sólidos urbanos no Brasil nos últimos 5 anos.

Gráfico 4 – Coleta *per capita* de RSU no Brasil nos últimos 5 anos

Fonte: ABRELPE (2019, 2020, 2021, 2022)

Gráfico 5 – Cobertura de coleta de RSU no Brasil nos últimos 5 anos



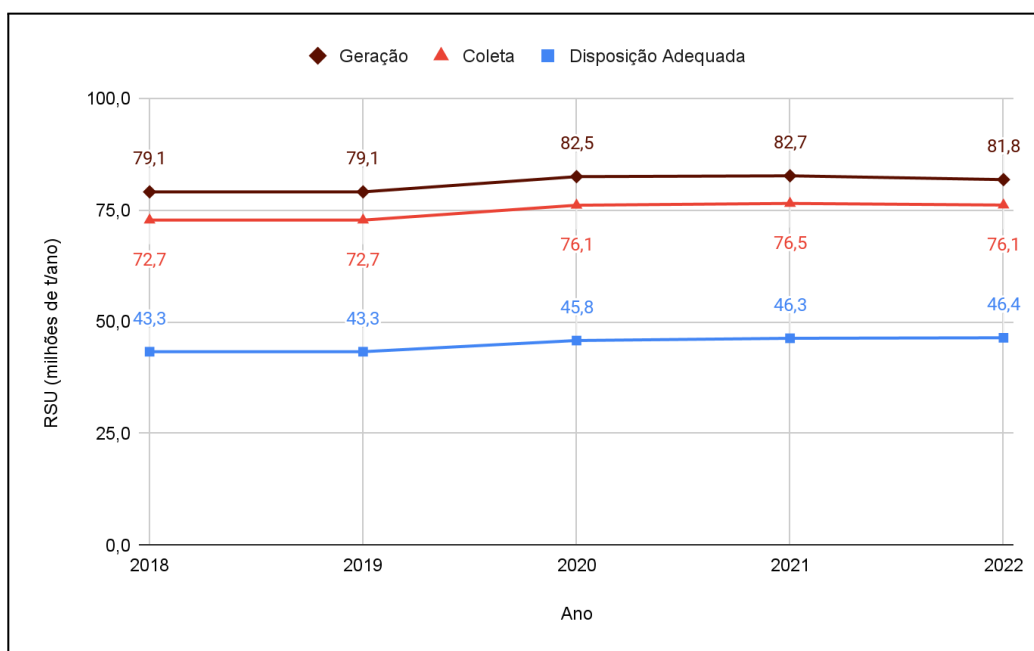
Fonte: ABRELPE (2019, 2020, 2021, 2022)

Entre 2018 e 2022, a quantidade de RSU coletados cresceu de 72,7 milhões de toneladas para 76,1 milhões de toneladas e, no mesmo período, a cobertura de coleta passou de 92,01% para 93,04%. Por sua vez, a coleta *per capita* de RSU no país aumentou de 348,9 kg/hab/ano para 354,0 kg/hab/ano, apresentando, também, acréscimo e decréscimo na massa *per capita* coletada ao longo dos últimos 5 anos (ABRELPE, 2019, 2020, 2021, 2022).

2.1.3. Disposição Final de RSU

A disposição final dos resíduos sólidos é uma das alternativas de destinação final ambientalmente adequada previstas na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Para isso, devem ser observadas as normas operacionais específicas da técnica de disposição final adotada, de modo que sua instalação e operação evite danos ou riscos à saúde pública e à segurança, além de diminuir os impactos ambientais adversos (ABRELPE, 2022). Entretanto, no Brasil, ao comparar a quantidade de RSU dispostos ambientalmente adequados com a quantidade gerada e coletada (Gráfico 6), percebe-se que o país ainda tem muito a evoluir no quesito de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos.

Gráfico 6 – Resumo do panorama de RSU no Brasil nos últimos 5 anos

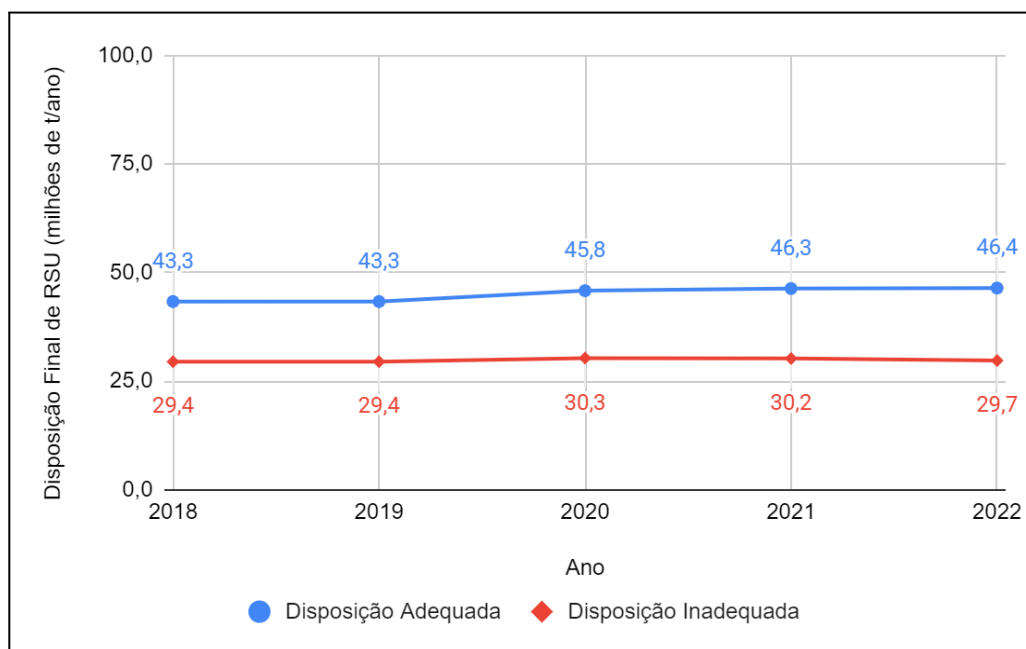


Fonte: ABRELPE (2019, 2020, 2021, 2022)

Segundo a ABRELPE (2022), do total de resíduos coletados em 2022, apenas 61% tiveram disposição final adequada (aterros sanitários) e 39% seguiram para disposição inadequada (lixões e aterros controlados). Já no ano de 2021, 60,5% tiveram disposição final em aterros sanitários e 39,5% foram para lixões e aterros controlados.

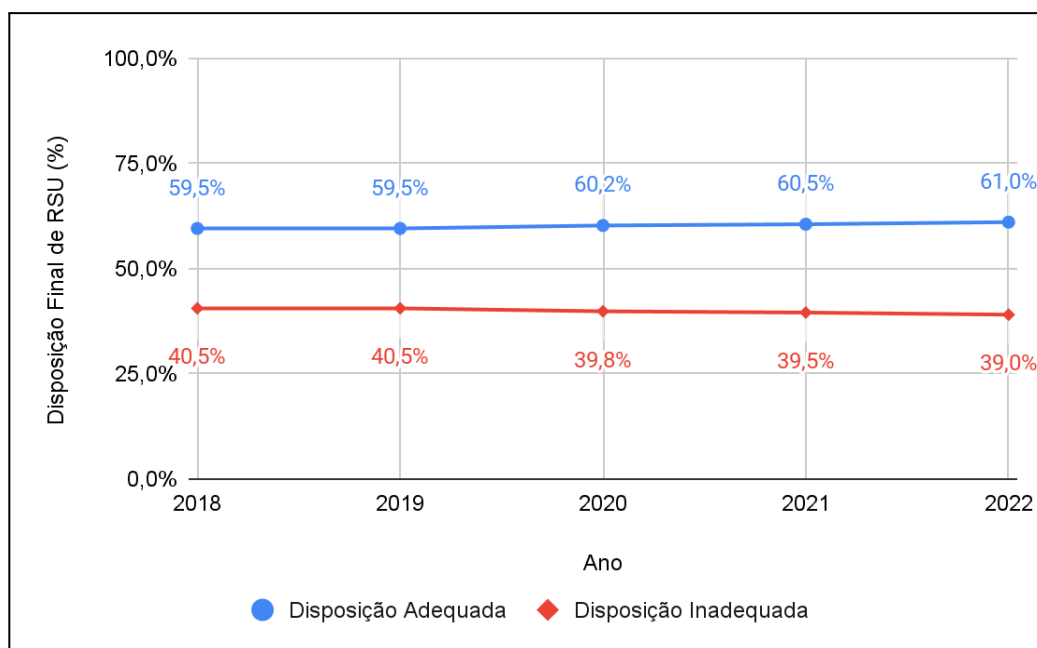
No Gráfico 7 está apresentada uma comparação da disposição final de RSU no Brasil, em relação à disposição final ambientalmente adequada e inadequada, nos últimos 5 anos. De maneira similar, no Gráfico 8 está apresentado um comparativo percentual da disposição final de RSU no Brasil nos últimos 5 anos.

Gráfico 7 – Disposição final de RSU no Brasil nos últimos 5 anos



Fonte: ABRELPE (2019, 2020, 2021, 2022)

Gráfico 8 – Percentual da disposição final de RSU no Brasil nos últimos 5 anos



Fonte: ABRELPE (2019, 2020, 2021, 2022)

No Brasil, a maior parte dos RSU coletados continua sendo encaminhada para aterros sanitários. Todavia, áreas de disposição inadequada ainda continuam em operação em todas as regiões do país. Entre 2018 e 2022, a disposição final adequada dos RSU passou de 59,5% para 61,0% do total coletado. No mesmo período, a disposição final inadequada dos RSU diminuiu de 40,5% para 39,0% do total coletado (ABRELPE, 2019, 2020, 2021, 2022).

2.2. Lixiviado

Os lixiviados de aterros sanitários são gerados a partir da interação entre o processo de biodegradação da matéria orgânica dos resíduos depositados e da infiltração de águas pluviais que solubilizam componentes orgânicos e inorgânicos. Desse modo, o volume de águas pluviais infiltradas é o fator determinante na vazão de lixiviados de um aterro sanitário, enquanto que o fator determinante das características físicas, químicas e microbiológicas do lixiviado são as características dos resíduos aterrados (GOMES, 2009).

Segundo a NBR 8419 (ABNT, 1992), o chorume pode ser definido como um líquido produzido pela decomposição de substâncias contidas nos resíduos sólidos, de cor escura, mau cheiro e elevada demanda bioquímica de oxigênio.

Moravia (2007) define lixiviado de aterro sanitário como sendo um líquido oriundo da umidade natural e da água presente na matéria orgânica dos resíduos, da consequência da degradação biológica dos materiais orgânicos e da água que infiltra na camada de cobertura e interior das células do aterro, em conjunto com materiais dissolvidos ou suspensos provenientes da massa de resíduos.

Ainda segundo Moravia (2007) a geração de lixiviado pode sofrer influência de fatores climatológicos (precipitação pluviométrica, evapotranspiração e temperatura), hidrogeológicos (escoamento superficial, infiltração, topografia, geologia e recirculação do lixiviado), relativos às características da camada de cobertura (umidade, vegetação, declividade), relativos às características dos resíduos (composição gravimétrica, compactação, permeabilidade, granulometria, peso específico etc.) e relativos ao tipo de operação do aterro (características de permeabilidade, idade e profundidade).

Devido à sua complexidade, a adequação do lixiviado tratado à legislação ambiental vigente não é uma tarefa fácil, sobretudo devido à sua variabilidade, tanto de características intrínsecas quanto em função da dinâmica de funcionamento do aterro sanitário, que pode gerar lixiviados distintos a cada período de tempo (GOMES, 2009).

2.2.1. Caracterização

Os lixiviados de aterros sanitários são constituídos, basicamente, por uma mistura de substâncias orgânicas e inorgânicas, compostos em solução e em estado coloidal, além de apresentar diversas espécies de microorganismos (ANDRADE, 2002).

Segundo Christensen *et al.* (1994 *apud* KJELDSEN *et al.*, 2002), os lixiviados podem ser caracterizados como uma solução aquosa com quatro grupos de poluentes: matéria orgânica dissolvida (quantificada como DQO ou COT, ácidos graxos voláteis e compostos

orgânicos mais refratários como ácidos húmicos e fúlvicos), macrocomponentes inorgânicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-), metais pesados (Cd^{2+} , Cr^{3+} , Cu^{2+} , Pb^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+}), e compostos orgânicos xenobióticos originários de produtos químicos domésticos ou industriais presentes em baixas concentrações (incluem, entre outros, hidrocarbonetos aromáticos, fenóis, alifáticos clorados, pesticidas e plastificantes).

Outros compostos podem ser encontrados em lixiviados de aterros sanitários, porém, em geral, em baixas concentrações, tais como: borato, sulfeto, arseniato, selenato, bário, lítio, mercúrio e cobalto (CHRISTENSEN *et al.*, 1994 *apud* KJELDSEN *et al.*, 2002).

2.2.2. Classificação

As principais diferenças nas características do lixiviado, permite classificá-lo em dois tipos: lixiviado novo e lixiviado maduro. Esta classificação está associada às fases de degradação e não a idades pré-definidas do aterro sanitário (SOUTO, 2009).

O lixiviado é considerado novo quando possui compostos orgânicos biodegradáveis, baixa concentração de nitrogênio amoniacal e elevada concentração de ácidos graxos voláteis de baixa massa molecular. Em contrapartida, o lixiviado maduro apresenta baixa concentração de material orgânico biodegradável, elevada concentração de nitrogênio amoniacal e de compostos orgânicos refratários (MORAVIA, 2007).

2.3. Sistemas de Tratamento de Lixiviado

Segundo Fleck (2003), projetar uma estação de tratamento de lixiviados não é uma tarefa simples, tendo em vista que os efluentes líquidos de aterros sanitários não apresentam um padrão na sua composição química, física e biológica. Vale ressaltar que, paralelo ao período de operação de um aterro sanitário, além das modificações nas características do próprio lixiviado e nas leis e regulamentações, novas tecnologias de tratamento surgirão enquanto outras evoluirão (QASIM; CHIANG, 1994 *apud* FLECK, 2003).

As tecnologias utilizadas no tratamento de lixiviados podem ser classificadas basicamente em dois grandes grupos: biológicos e físico-químicos (FLECK, 2003).

2.3.1. Tratamento Biológico

O tratamento biológico de lixiviado de aterros sanitários tem como finalidade transformar os constituintes orgânicos do efluente em compostos estáveis, por meio do seu contato com uma cultura de microrganismos (FELICI, 2010).

Esse processo de tratamento baseia-se no fato de que os microrganismos vivos utilizam-se dos compostos com potencial energético e com potencial oxidativo (aceptores de elétrons), presentes no efluente, para suas funções vitais. Sob esse aspecto, os compostos com potencial energético são oxidados e convertidos em subprodutos menos energético, e os compostos com potencial oxidativo são reduzidos. Além disso, esses microrganismos absorvem outros compostos presentes no efluente, removendo-os do meio, e atuam em processos físicos como filtração e adsorção (FLECK, 2003).

Felici (2010) salienta que esses microrganismos podem ser subdivididos em três grupos principais: os aeróbios, que utilizam o oxigênio molecular comoceptor de elétrons e oxidam a matéria orgânica, gerando, conseqüentemente, produtos termodinamicamente estáveis (água e gás carbônico) e novas células; os facultativos, que são capazes de degradar a matéria orgânica na presença ou na ausência de oxigênio; e os anaeróbios, que têm a capacidade de metabolizar a matéria orgânica sem a presença de oxigênio.

Assim, de acordo com Moraes (2005), além da recirculação do lixiviado no próprio aterro sanitário, o tratamento biológico desse efluente pode ser realizado por sistemas aeróbios (lodos ativados, lagoas aeradas, filtros biológicos), anaeróbios (reator anaeróbio de fluxo ascendente, lagoas anaeróbias, filtro anaeróbio) e facultativos (lagoas facultativas).

Telles (2010) destaca que os sistemas de tratamento biológico são bastante eficientes quando o lixiviado é novo e ineficientes quando o lixiviado é maduro.

2.3.2. Tratamento Físico-Químico

Segundo Fleck (2003), o tratamento físico-químico de lixiviado de aterros sanitários tem como objetivo a remoção dos compostos poluentes do efluente através do contato com meios físicos com ou sem demanda energética associada, adicionando forças de caráter físico ou químico, além da retenção mecânica, ou por alteração das características do efluente, devido à adição de produtos químicos.

Os processos físico-químicos podem ser utilizados tanto no pré-tratamento quanto no pós-tratamento de lixiviados, quando associados ao tratamento biológico. Quando usado como pré-tratamento, tem a finalidade de diminuir a concentração de nitrogênio amoniacal do efluente, viabilizando o tratamento biológico. Por outro lado, quando utilizado no pós-tratamento, tem como intuito a remoção de compostos recalcitrantes (FELICI, 2010).

Os métodos de coagulação, floculação, decantação, flotação, separação por membranas, adsorção e oxidação química são os principais processos físico-químicos

aplicados no tratamento de lixiviados para a diminuição da carga poluente destes efluentes (CASTILHOS JUNIOR *et al.*, 2006).

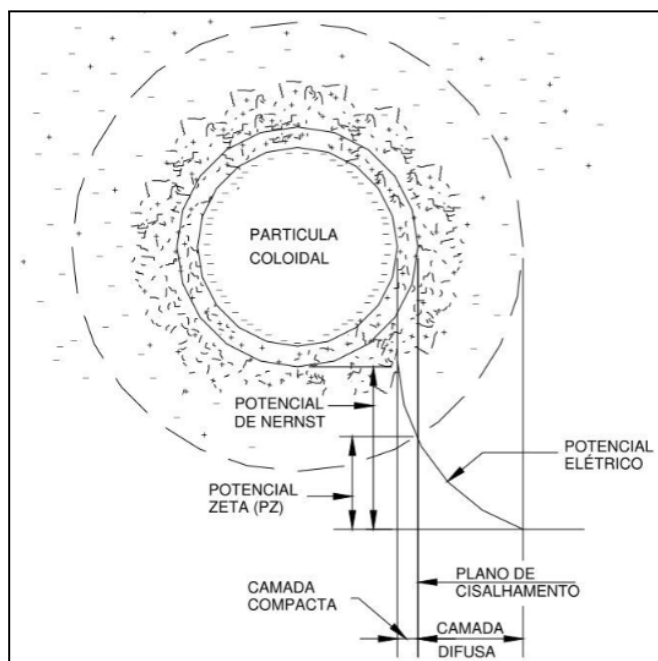
2.4. Coagulação-Floculação-Decantação

Para Fleck (2003), a coagulação, a floculação e a decantação podem ser consideradas como um conjunto integrado de processos físico-químicos para a remoção de sólidos suspensos, partículas coloidais e partículas dissolvidas no meio líquido.

Segundo Di Bernardo e Dantas (2005), a variedade de impurezas contidas na água, destacando-se partículas coloidais, substâncias húmicas e microorganismos em geral, apresentam carga superficial negativa, impedindo que as mesmas se aproximarem uma das outras, permanecendo no meio líquido se suas características não forem alteradas.

A carga superficial de uma partícula coloidal, juntamente com o movimento browniano, que a mantém em constante movimento, conduz à formação da dupla camada elétrica, formada pelas cargas superficiais e pelo excesso de íons com carga oposta adsorvidos na partícula e por íons de mesma carga distribuídos de maneira difusa no meio polar. Essa dupla camada elétrica, representada esquematicamente na Figura 1, é conhecida como conjunto das camadas compacta e difusa (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Figura 1 – Configuração esquemática da dupla camada elétrica de uma partícula coloidal



Fonte: Di Bernardo e Dantas (2005)

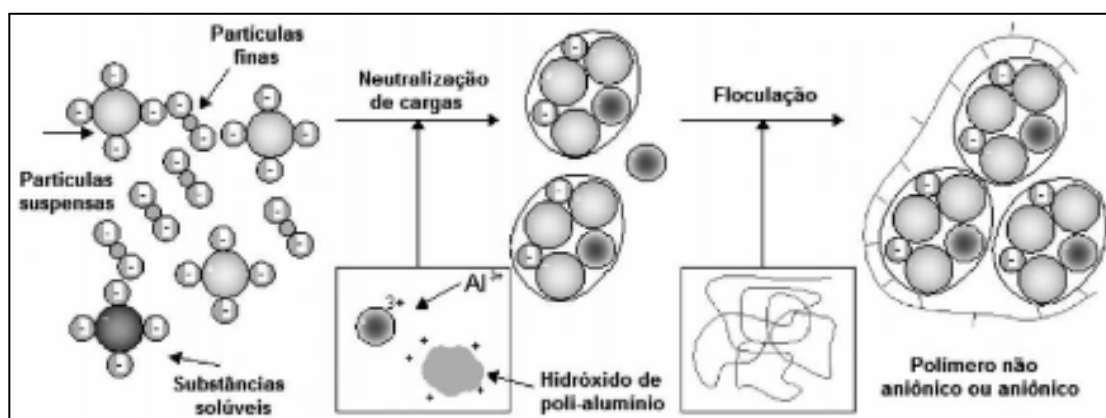
Ainda de acordo com Di Bernardo e Dantas (2005), quando duas partículas coloidais semelhantes se aproximam uma da outra, ocorre interação entre as camadas difusas, propiciando forças de repulsão devido à força eletrostática das partículas. Além disso,

também existem forças de atração entre elas, denominadas forças de van der Waals. A interação entre as forças de repulsão e atração entre as partículas impede sua agregação e contribui para a estabilidade do sistema.

Sob esse aspecto, a coagulação é uma técnica que propicia a atração entre as partículas coloidais, devido à adição de produtos químicos (eletrólitos), chamados de coagulantes, que desestabilizam as partículas coloidais não-sedimentáveis. Por sua vez, estas partículas desestabilizadas tendem a se aglomerar, formando partículas sedimentáveis (flocos), que são mais suscetíveis à remoção por gravidade (sedimentação). Os sistemas de coagulação e floculação funcionam através de um mecanismo de agitação que tem como intuito facilitar o contato entre as partículas (FLECK, 2003; TELLES, 2010).

Na Figura 2 está apresentado um modelo esquemático de coagulação e floculação, utilizando como coagulante o hidróxido de poli-alumínio.

Figura 2 – Esquematização de um modelo do processo de coagulação e floculação



Fonte: Bassin e Dezotti (2008)

2.4.1. Coagulação

O principal objetivo da coagulação é aglomerar as impurezas em estado coloidal e dissolvidas no líquido a ser tratado, em partículas maiores que possam ser removidas por sedimentação ou filtração. Esse fenômeno de aglomeração ocorre devido à desestabilização das cargas superficiais das partículas, através da redução das forças de repulsão entre as partículas com cargas negativas, promovida pela adição de coagulantes, habitualmente com sais de ferro ou de alumínio ou de polímeros sintéticos. Através de mecanismos de ligação e adsorção na superfície da partícula coloidal, os coagulantes neutralizam as forças elétricas superficiais e anulam as forças de repulsão (BASSIN; DEZOTTI, 2008; PAVANELLI, 2001).

Para Di Bernardo e Dantas (2005), a coagulação resulta de dois fenômenos: o primeiro, essencialmente químico, se refere às reações do coagulante com a água e à

formação de espécies hidrolisadas com carga positiva, e dependente da concentração do metal e pH final da mistura; o segundo, fundamentalmente físico, consiste no transporte das espécies hidrolisadas para propiciar o contato entre as impurezas presentes na água. Neste caso, entende-se a água como o líquido a ser tratado.

Ainda conforme Di Bernardo e Dantas (2005), a coagulação pode ser considerada como o resultado individual ou combinado de quatro mecanismos distintos: compressão da dupla camada elétrica; adsorção e neutralização; varredura; adsorção e formação de pontes. Entretanto, Felici (2010) destaca que para os coagulantes químicos geralmente empregados como os sais de ferro ou alumínio, os mecanismos da coagulação predominantes são de adsorção-neutralização e varredura.

O mecanismo de adsorção-neutralização de carga é fundamental quando o tratamento do líquido é realizado por meio de umas das tecnologias da filtração direta logo após a coagulação, pois não necessita da produção de flocos para posterior sedimentação ou flotação, mas de partículas desestabilizadas que serão retidas no meio granular dos filtros. Já no mecanismo de varredura, os flocos obtidos são maiores e sedimentam ou flutam mais facilmente que os flocos obtidos no mecanismo de adsorção-neutralização de cargas, sendo bastante utilizado em estações de tratamento de água ou efluentes em que se têm a floculação e a sedimentação (ou flotação) antecedendo a filtração direta. O mecanismo de adsorção e neutralização de cargas é caracterizado pela utilização de baixas dosagens de coagulantes, enquanto que no mecanismo de varredura se utiliza altas dosagens de coagulante (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Com o intuito de criar condições para que, em poucos segundos, o coagulante seja homogeneizado no efluente, o mecanismo de agitação na coagulação baseia-se na mistura rápida, variando desde décimos de segundo a cerca de 100 segundos, dependendo das características como pH, temperatura, condutividade elétrica, concentração de impurezas, entre outras. Em uma estação de tratamento de água, a coagulação se inicia na câmara de mistura rápida, podendo ser auxiliada por agitadores, embora a própria hidrodinâmica da câmara auxilie no processo de mistura. Qualquer dispositivo capaz de auxiliar agitação intensa pode ser utilizado para mistura rápida, como o uso de ressalto hidráulico e vertedores (BASSIN; DEZOTTI, 2008; DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

2.4.2. Floculação

A floculação acontece subsequentemente à etapa de coagulação. Essa etapa baseia-se na aglomeração das partículas coloidais descarregadas formadas na coagulação, provocada

pela colisão entre elas, de modo a produzir outras de maior volume e densidade, chamadas de flocos (CASTILHOS JUNIOR *et al.*, 2006). A etapa de floculação é favorecida pela agitação suave, que facilita o contato entre os coágulos e evita a quebra dos flocos formados, sendo conduzida em sistemas mecanizados ou hidráulicos (BASSIN; DEZOTTI, 2008; DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

2.4.3. Decantação

A decantação é a etapa seguinte à floculação, caracterizada como um fenômeno físico de separação dos flocos do meio aquoso (separação sólido-líquido), através da ação da força gravitacional sobre as partículas formadas, fazendo com que os flocos sedimentem. Em uma estação de tratamento de efluentes, essa etapa ocorre em uma unidade chamada de decantador. Durante o trajeto da sedimentação, os flocos vão arrastando as partículas que vem ao seu encontro, até atingirem o fundo do decantador, formando o lodo de fundo (BASSIN; DEZOTTI, 2008; CASTILHOS JUNIOR *et al.*, 2006).

2.4.4. Uso de Polímeros como Auxiliares de Coagulação-Floculação

Di Bernardo e Dantas (2005) cita que para auxiliar no processo de coagulação e floculação podem ser utilizadas substâncias conhecidas como polímeros (polieletrólitos), tanto sintéticos como naturais (amidos em geral). Os polímeros sintéticos podem ser classificados em catiônicos (apresenta sítios ionizáveis positivos), aniônicos (apresenta sítios ionizáveis negativos), não iônicos (não apresenta sítios ionizáveis) e anfotéricos (apresenta sítios ionizáveis positivos e negativos).

Ainda segundo Di Bernardo e Dantas (2005), como auxiliar de coagulação, têm-se os polímeros catiônicos, que permitem, em muitas situações, reduzir a dosagem do coagulante primário quando este é um sal de alumínio ou ferro. Como auxiliar da floculação, os polímeros são empregados com a finalidade de aumentar a velocidade de sedimentação dos flocos, reduzir a ação da força de cisalhamento nos flocos durante a veiculação da água floculada e diminuir a dosagem de coagulante primário, além de aumentar as forças atuantes nos flocos presentes no manto de lodo (em floculadores ou decantadores de manto de lodo).

2.4.5. Estudos Aplicados no Tratamento de Lixiviado

Diversos trabalhos têm estudado, em escala de bancada, a aplicação da técnica de tratamento físico-químico de coag-floc-dec como alternativa de tratamento de lixiviados de

aterros sanitários. A seguir, estão citados alguns destes estudos, com ênfase no coagulante utilizado e suas dosagens, bem como os ajustes no pH.

Felici (2010) utilizou o lixiviado pré-tratado biologicamente, por processo de lodo ativado, proveniente do aterro sanitário do município de Londrina, Paraná. Utilizou em seus estudos os coagulantes PAC e cloreto férrico. Para o PAC, os melhores resultados foram obtidos com dosagem de 470,7 mg/L (50 a 700 mg/L) do coagulante e pH de 4,9, com remoção de cor verdadeira e de DQO da ordem de 97% e 73%, respectivamente. Já em relação ao cloreto férrico, a melhor dosagem foi de 400 mg/L (300 a 700 mg/L) do coagulante e pH 3,0, com remoção de cor verdadeira de 98% e DQO 81%.

Gewehr (2012) trabalhou com o lixiviado bruto, desprovido de tratamento prévio, do aterro sanitário da Central de Resíduos do Recreio, localizada no município de Minas do Leão, Rio Grande do Sul. Em seus estudos, foram testados os coagulantes PAC, cloreto férrico, sulfato férrico e tanino. No processo de coag-floc-dec com o lixiviado bruto, as dosagens dos coagulantes e os ajustes de pH utilizados foram os seguintes: 1000 a 6000 mg/L de PAC e pH = 6,2; 344 a 2066 mg/L de cloreto férrico e pH = 6,2; 500 a 5000 mg/L de sulfato férrico e pH = 6,0; 5000 a 20000 mg/L de tanino e pH = 8,2 (original do lixiviado bruto). Fixado o pH, as dosagens ótimas verificadas no estudo para o lixiviado bruto foram de 2200 mg/L de PAC (remoção de 88% de "turbidez não filtrada", 98% de "turbidez filtrada", 94% de cor verdadeira e 60% de DQO), 1102 mg/L de cloreto férrico (remoção de 88% de "turbidez não filtrada", 98% de "turbidez filtrada", 97% de cor verdadeira e 63% de DQO), 1200 mg/L de sulfato férrico (remoção de 92% de "turbidez não filtrada", 97% de "turbidez filtrada", 95% de cor verdadeira e 59% de DQO) e 14000 mg/L de tanino (remoção de 93% de "turbidez não filtrada", 92% de "turbidez filtrada", 82% de cor verdadeira e 21% de DQO). Vale destacar que para a "turbidez filtrada" e a cor verdadeira, as amostras foram filtradas utilizando microfiltros de fibra de vidro GF-3 47 mm da marca Macherey-Nagel.

Gewehr (2012) ainda trabalhou com o lixiviado bruto com tratamento biológico em reatores sequenciais em batelada. As dosagens dos coagulantes e os ajustes de pH, para o tratamento de coag-floc-dec com o lixiviado tratado biologicamente, foram: 500 a 4000 mg/L de PAC e pH = 7,5; 344 a 1722 mg/L de cloreto férrico e pH = 6,3; 500 a 2000 mg/L de sulfato férrico e pH = 6,0; 6000 a 16000 mg/L de tanino e pH = 5,5. Fixado o pH, as dosagens ótimas verificadas no estudo para o lixiviado tratado biologicamente foram de 1300 mg/L de PAC (remoção de 90% de "turbidez não filtrada", 96% de "turbidez filtrada", 90% de cor verdadeira e 65% de DQO), 826 mg/L de cloreto férrico (remoção de 91% de "turbidez não filtrada", 93% de "turbidez filtrada", 94% de cor verdadeira e 77% de DQO), 900 mg/L de

sulfato férrico (remoção de 91% de "turbidez não filtrada", 95% de "turbidez filtrada", 95% de cor verdadeira e 82% de DQO) e 12000 mg/L de tanino (remoção de 87% de "turbidez não filtrada", 91% de "turbidez filtrada", 90% de cor verdadeira e 19% de DQO).

Máximo (2007) estudou o lixiviado proveniente do Aterro Metropolitano da Grande Florianópolis, situado em Biguaçu, Santa Catarina, utilizando cloreto férrico (dosagens de 400 a 1500 mg/L e pH 8,74), sulfato de alumínio (dosagens de 900 a 1500 mg/L e pH 8,10/8,11) e tanino (dosagens de 600 a 2400 mg/L fixado o pH 8,73) como coagulantes. O cloreto férrico e o tanino apresentaram desempenhos semelhantes no processo de coag-floc-dec, sendo que o tanino teve melhor eficiência na remoção de nitrato (28%) e COT (50%). Já o cloreto férrico apresentou melhor eficiência de remoção no fósforo total (62%) e nitrogênio amoniacal (28%). Quanto ao sulfato de alumínio, teve melhor eficiência na remoção de COT (54%) e fósforo total (54%), apresentando as menores remoções de DQO (28%), nitrogênio amoniacal (2%) e nitrato (15%).

Pedroso (2012) caracterizou o lixiviado gerado pelo aterro sanitário de Maringá, Paraná, realizando o pré-tratamento por meio da coag-floc-dec, utilizando como coagulante o tanino. As dosagens do coagulante variaram de 500 a 1500 mg/L, considerando três níveis de pH (natural, 4,0 e 9,0). O processo apresentou eficiência na remoção da cor aparente em até 59,97%, da turbidez de até 94,87% e de compostos absorvidos a 254 nm em até 31,69%, obtidos quando os ensaios foram desenvolvidos com pH 9,0 e com dosagens de coagulante de 1100 e 1500 mg/L. O autor ainda avaliou o tratamento do lixiviado pela técnica de ozonização, com e sem o processo de coag-floc-dec como pré-tratamento. Com isso, constatou que o lixiviado tratado por ozonização apresentou melhores resultados quando foi pré-tratado por coag-floc-dec, alcançando remoções de cor em até 96,66%, de turbidez de 88,34%, de compostos absorvidos a 254 nm em 85,11% e de DQO de 89%.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Descrição da Área de Estudo

Localizada no bairro Benedito Bentes, a Central de Tratamento de Resíduos (CTR) da cidade de Maceió-AL, inaugurada no ano de 2010, é composta por células para destinação ambientalmente adequada de resíduos urbanos, animais mortos, resíduos da construção civil e poda. Dentre suas células, àquela destinada para o recebimento e tratamento de resíduos sólidos urbanos é conhecida, comumente, como aterro sanitário (Figura 3).

Figura 3 – Vista aérea do aterro sanitário de Maceió-AL



Fonte: Google Earth (2023)

Por apresentar geração de lixiviado maduro, o aterro sanitário de Maceió-AL utiliza conjuntamente técnicas de tratamento biológicos (pré-tratamento) e físico-químicos (pós-tratamento) em sua operação, para que o efluente final tratado alcance os limites da Resolução CONAMA nº 430, de 2011. O tratamento biológico é constituído por lagoa anaeróbia, lagoas pré-aeradas e lagoa aerada facultativa. Já o tratamento físico-químico envolve os processos de coagulação-floculação-decantação, filtração e osmose reversa.

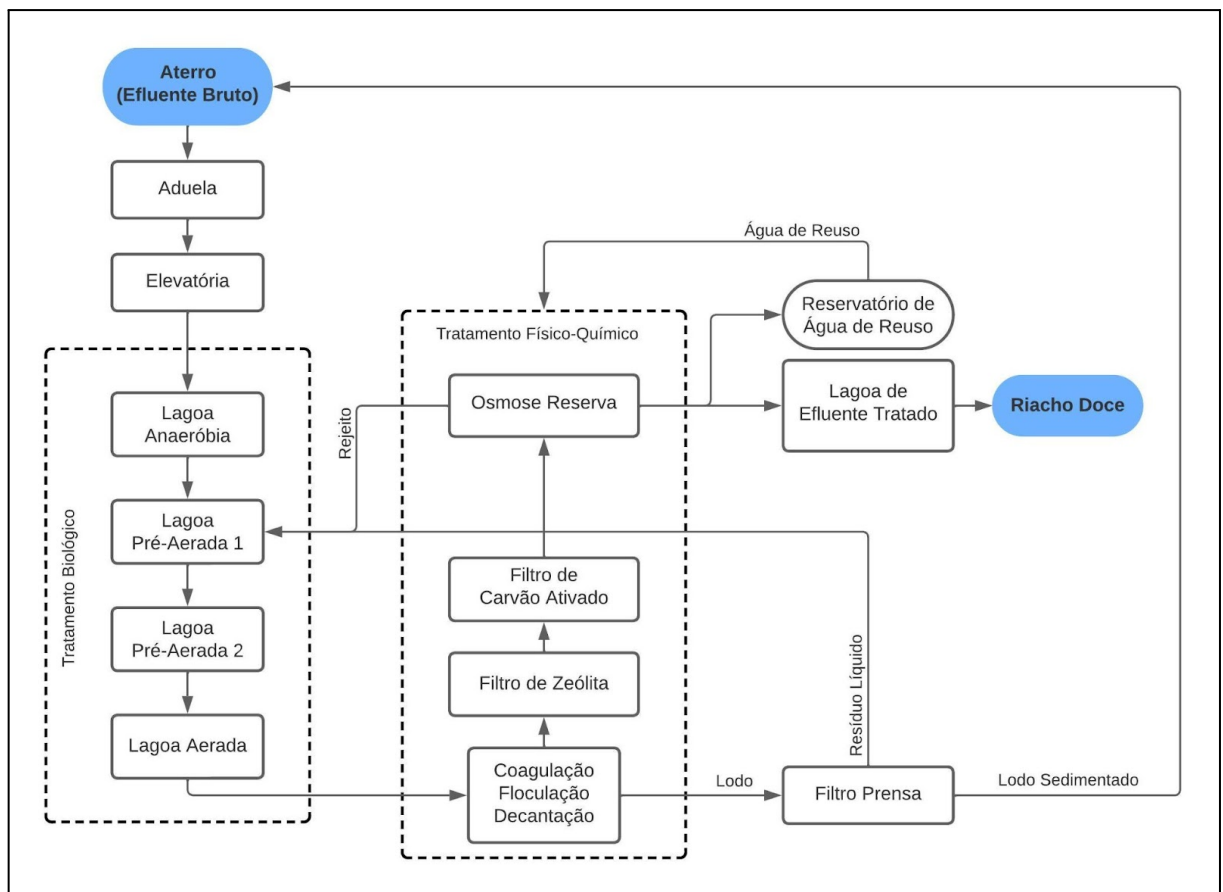
Nas Figuras 4 e 5 estão apresentados, respectivamente, uma vista aérea da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) do aterro sanitário de Maceió-AL com a indicação de suas operações unitárias e um fluxograma com as etapas do seu processo de tratamento.

Figura 4 – Vista aérea da ETE do aterro sanitário de Maceió-AL



Fonte: Adaptado de Google Earth (2023)

Figura 5 – Fluxograma do processo da ETE do aterro sanitário de Maceió-AL



Fonte: Autor (2023)

O lixiviado gerado no aterro sanitário possui dois destinos: uma parcela do lixiviado pré-tratado é encaminhado à Estação de Tratamento de Esgoto do emissário submarino de Maceió operado pela empresa BRK Ambiental, e a outra fração é destinada ao pós-tratamento, que atendendo aos padrões de lançamento da Resolução CONAMA nº 430/2011, é descartado no Riacho Doce.

3.1.1. Pré-tratamento

O pré-tratamento do lixiviado do aterro sanitário de Maceió-AL é realizado utilizando uma lagoa anaeróbia, duas lagoas pré-aeradas e uma lagoa aerada facultativa. Na Tabela 1 podem ser observadas as dimensões destas lagoas utilizadas para o tratamento biológico do lixiviado gerado no aterro sanitário.

Tabela 1 – Dimensões das lagoas do aterro sanitário de Maceió-AL

Lagoa	Volume (m³)	Área (m²)	Profundidade (m)
Anaeróbia	16.500	3.300	5,48
Pré-aerada 1	4.500	1.100	4,27
Pré-aerada 2	3.200	1.400	2,40
Aerada	3.500	1.400	2,42

Fonte: Autor (2023)

Fica evidente que a lagoa anaeróbia é a maior lagoa de tratamento biológico existente no aterro sanitário, tanto em relação ao volume comportado, quanto às dimensões de área e profundidade. As lagoas pré-aeradas, apesar de possuírem um sistema de tratamento semelhante (utilizando bactérias aeróbias), distinguem-se nas suas dimensões, sendo a pré-aerada 1 maior em termos de volume e profundidade se comparada com a pré-aerada 2. Já a lagoa aerada possui a mesma área que a lagoa pré-aerada 2, apesar do seu volume ser maior.

3.1.2. Pós-tratamento

O pós-tratamento do lixiviado do aterro sanitário de Maceió-AL envolve os processos de coag-floc-dec, filtração e osmose reversa, sendo realizado, comumente, com o pH natural do lixiviado gerado, e, ocasionalmente elevando o seu pH.

O processo de coagulação-floculação ocorre em um reator com capacidade de 8,0 m³, utilizando como coagulante o PAC comercial, com concentração de Al₂O₃ (óxido de alumínio) de 23%, preparado em um tanque de 7 m³ com diluição variando entre 10% e 20% do volume do tanque. Por vezes, é utilizado em conjunto com o PAC comercial um polímero aniônico, também preparado em um tanque de 7 m³, com diluição entre 0,1% e 0,2%, para ajudar na floculação e clarificação do lixiviado. Após a coagulação e floculação, a decantação

ocorre em um tanque (decantador) com volume 36 m³, sendo o lodo sedimentado encaminhado para um adensador contendo 40 a 100 mg de cal.

Em seguida, o lixiviado sai da etapa de coagulação-floculação-decantação e é encaminhado para a filtração, através de uma estação elevatória (EE1) com vazão de 30 m³/h. O processo de filtração utiliza dois pares de filtros, sendo um de zeólita e o outro de carvão ativado, ligados em série, cada um com volume de 2 m³.

Posterior à filtração, o lixiviado é destinado ao processo de osmose reversa, através de outra estação elevatória (EE2), também com vazão de 30 m³/h. A osmose reversa possui dois containers, com vazão de 7 m³/h cada container, tratando 50 a 70% do efluente de entrada e gerando de 50 a 30% de rejeito, sendo este rejeito retornado para a lagoa pré-aerada 1.

Ao final, uma parcela do lixiviado tratado é encaminhado para o reservatório de água de reuso, para ser reutilizado no sistema de tratamento físico-químico da própria ETE do aterro sanitário, e a outra parcela para a lagoa tratado com volume de 4.400 m³, de onde é bombeado intermitentemente com vazão de 30 m³/h, até atingir a vazão de outorga de 350 m³/dia, para o descarte final no Riacho Doce.

3.2. Planejamento Metodológico

A metodologia do presente trabalho consistiu em três etapas: caracterização do lixiviado pré-tratado no aterro sanitário de Maceió-AL, estudo da potencialidade da coagulação-floculação-decantação como pós-tratamento de lixiviado em escala de bancada e análises físico-químicas com as amostras remanescentes dos ensaios de bancada.

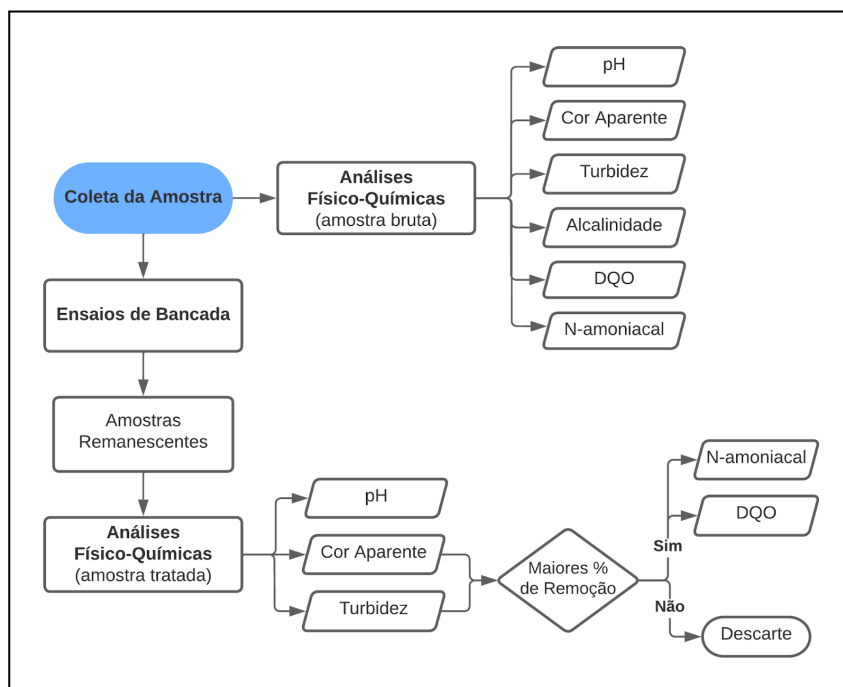
A potencialidade da coagulação-floculação-decantação como pós-tratamento de lixiviado foi estudada com uma amostra do lixiviado pré-tratado biologicamente do aterro sanitário de Maceió-AL. O coagulante investigado foi o PAC comercial, com concentração de Al₂O₃ de 23%, avaliando, também, a eficiência deste PAC comercial em conjunto com um polímero aniônico. Vale ressaltar que tanto o PAC comercial quanto o polímero aniônico utilizados nos ensaios de bancada são, atualmente, empregados no aterro sanitário de Maceió-AL em seu processo de tratamento físico-químico de coagulação-floculação.

Com a amostra do lixiviado pré-tratado (amostra bruta), antes dos ensaios de bancada, foi feita a sua caracterização por meio das análises físico-químicas de pH, cor aparente, turbidez, alcalinidade, DQO e N-amoniaco. Em cada amostra dos ensaios de bancada foram realizadas análises físico-químicas do pH de coagulação, e da cor aparente e turbidez remanescentes. Em seguida, para os pontos selecionados com maior remoção de cor aparente e turbidez foram realizadas análises físico-químicas de N-amoniaco e DQO, com o objetivo

de quantificar, também, a eficiência da coagulação-floculação-decantação, utilizando como coagulante o PAC comercial, na remoção destes parâmetros físico-químicos.

Na Figura 6 pode ser observado um modelo esquemático do fluxograma das etapas metodológicas do presente trabalho.

Figura 6 – Fluxograma das etapas metodológicas do TCC



Fonte: Autor (2023)

O tempo de execução dos ensaios de bancada, juntamente com as análises físico-químicas, foi de 7 dias para cada coleta de amostra.

3.2.1. Coleta da Amostra

A coleta da amostra de lixiviado foi realizada em 10 bombonas de 20 L, sendo transportada para o LSA do CTEC/UFAL. Ao chegar no laboratório, a amostra foi estocada em uma única bombona de 200 L, em temperatura ambiente.

Foram realizadas quatro coletas em meses distintos: outubro e novembro de 2022, e janeiro e fevereiro de 2023. Os meses de outubro e novembro de 2022 referem-se à estação de primavera. Já os meses de janeiro e fevereiro de 2023 correspondem à estação de verão, representando um período de estiagem. Vale destacar que o período de amostragem corresponde ao período de baixa precipitação (50 a 90 mm).

As amostras do lixiviado foram coletadas na lagoa aerada facultativa, etapa final do pré-tratamento biológico do aterro sanitário, com exceção do mês de outubro/2022. Em

outubro/2022 a amostra foi coletada na lagoa pré-aerada 2, já que a lagoa aerada facultativa estava desativada temporariamente para manutenção.

Observa-se no Quadro 2 em quais coletas foram testadas apenas o PAC nos ensaios de bancada e em quais coletas foram utilizados o PAC em conjunto com o polímero aniônico.

Quadro 2 – Aplicação do PAC comercial e do polímero aniônico nos ensaios de bancada

Produto Químico	Coleta			
	Outubro/2022	Novembro/2022	Janeiro/2023	Fevereiro/2023
PAC	x	x	x	x
Polímero		x		x

Fonte: Autor (2023)

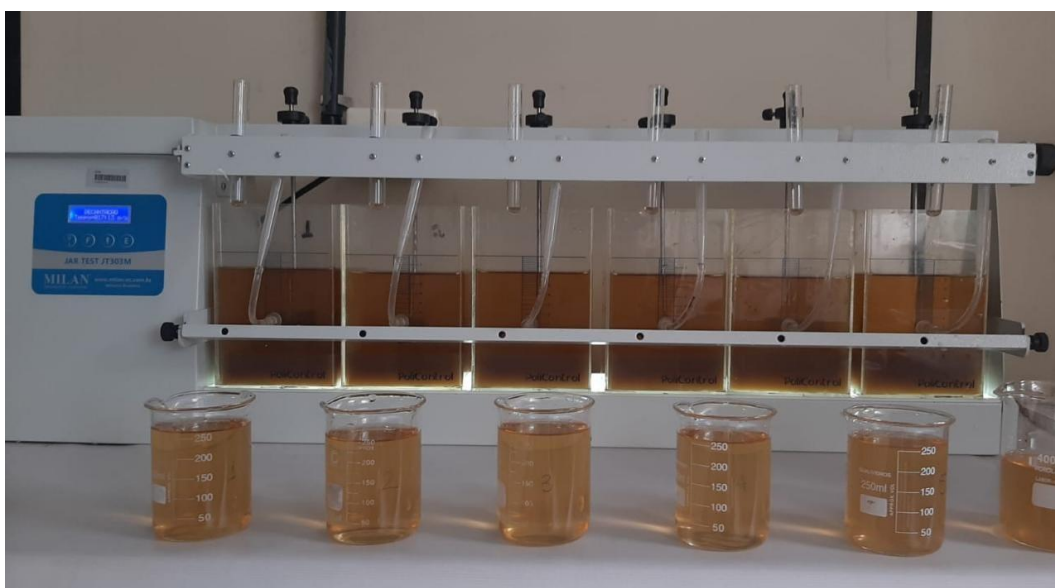
3.3. Ensaios de Bancada

Os ensaios de bancada foram realizados no Laboratório de Saneamento Ambiental (LSA), do Centro de Tecnologia (CTEC) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL).

3.3.1. Equipamento

Para os ensaios de coagulação-floculação-decantação, em escala de bancada, por meio do jar test, foi utilizado o equipamento Jar Test JT303M da Milan Equipamentos Científicos (Figura 7), para diferentes dosagens do coagulante.

Figura 7 – Equipamento jar test utilizado nos ensaios de bancada



Fonte: Autor (2023)

O equipamento de jar test utilizado é composto de seis jarros em acrílico transparente com volume de 2 L cada jarro, possuindo um sistema de pás com rotação estável entre 10 a

350 rpm. O equipamento possui dispositivos para dosagem de produtos químicos e para coleta de água decantada simultaneamente situados a 7 cm abaixo da lâmina líquida.

3.3.2. Sistema de Agitação

O sistema de rotação das pás e tempos de detenção, tanto para a mistura rápida quanto para a floculação, foram retirados da ABNT NBR 12216/1992 e dos dados aplicados atualmente no pós-tratamento de lixiviados do aterro sanitário de Maceió-AL. Com isso, em relação ao sistema de rotação das pás, utilizou-se rotação de 350 rpm durante 2 minutos para a mistura rápida e 20 rpm com duração de 20 minutos para a floculação.

Para o tempo de decantação, estudou-se duas velocidades de sedimentação (V_s) para cada ponto de pH x dosagem de PAC, sendo: 1,0 cm/min referente ao tempo de decantação de 7 minutos e 0,5 cm/min referente ao tempo de decantação de 14 minutos. Destaque-se que no mês de outubro/2022 foi estudada apenas a velocidade de sedimentação de 1,0 cm/min.

A escolha das velocidades de sedimentação foi feita por meio de observação com base em ensaio preliminar, que tinha como objetivo determinar o tempo necessário para que o lodo formado ficasse abaixo do nível de coleta da amostra remanescente.

3.3.3. Preparação das Amostras

Os ensaios de bancada foram realizados em cinco pHs distintos para a mesma amostra coletada: natural, 6,00, 6,50, 8,50 e 9,00. O pH natural da amostra varia em função das características do lixiviado na data coletada.

Para reduzir o pH da amostra utilizou-se ácido sulfúrico (H_2SO_4) e para elevar o pH utilizou-se hidróxido de sódio (NaOH), preparando 30 L de amostra em cada caso.

3.3.4. Dosagens do Coagulante e Polímero

Na Tabela 2 estão apresentadas as dosagens utilizadas do PAC comercial, em mg/L, bem como o seu respectivo volume em escala de bancada, em mL. As dosagens do coagulante foram determinadas a partir de ensaios preliminares e das dosagens utilizadas em escala real.

Quando se empregou o polímero aniônico em conjunto com o PAC comercial, a dosagem deste polímero foi constante em todos os pontos de pH x dosagem de PAC, correspondendo à 0,1% do volume da amostra de lixiviado em cada jarro do jar test. Como cada ponto dos ensaios de bancada foi realizado com um volume de 2 L de amostra, o volume correspondente de polímero aniônico utilizado foi de 2 mL. Sendo assim, nestes ensaios de

bancada, além das dosagens de 200 a 750 mg.PAC/L, acrescentou-se, simultaneamente, 2 mL do polímero aniônico em cada jarro do jar test contendo a amostra.

Tabela 2 – Dosagens de PAC comercial para realização dos ensaios de bancada

Dosagem de PAC (mg/L)	Volume de PAC (mL)	Dosagem de PAC (mg/L)	Volume de PAC (mL)
200	0,4	500	1,0
250	0,5	550	1,1
300	0,6	600	1,2
350	0,7	650	1,3
400	0,8	700	1,4
450	0,9	750	1,5

Fonte: Autor (2023)

3.3.5. Montagem dos Diagramas de Coagulação

Os ensaios de coag-floc-dec foram realizados visando a montagem dos diagramas de coagulação, para identificar qual região, determinada pelos pares de valores pH x dosagem de PAC apresentou menores valores de cor aparente e turbidez remanescentes. Destaca-se que as curvas de coagulação foram montadas manualmente.

Complementando a representação gráfica, para cada diagrama de coagulação foram elaborados gráficos de linha correspondentes à dosagem de PAC x percentual de remoção.

3.4. Análises Físico-Químicas

As análises físico-químicas do presente trabalho foram realizadas no Laboratório de Saneamento Ambiental (LSA), do Centro de Tecnologia (CTEC) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), de acordo com os procedimentos descritos por APHA, AWWA e WEF (2017). É possível ver no Quadro 3 os métodos aplicados para realizar as análises físico-químicas dos parâmetros investigados.

Quadro 3 – Método das análises físico-químicas dos parâmetros avaliados

Parâmetro	Método de Análise
pH	Potenciométrico
Alcalinidade (mg.CaCO ₃ /L)	Potenciométrico
Cor Aparente (uC)	Colorimétrico
Turbidez (NTU)	Turbidimétrico
DQO (mg.O ₂ /L)	Espectrofotométrico
Nitrogênio Amoniacal (mg.N-NH ₃ /L)	Titulométrico

Fonte: APHA, AWWA e WEF (2017)

Ressalta-se que as análises de pH, cor e turbidez foram realizadas tanto com o efluente pré-tratado biologicamente quanto com todas as amostras remanescentes dos ensaios de bancada (coag-floc-dec) utilizando o jar test. Já as análises de DQO e N-amoniaco, além do efluente pré-tratado, foram realizadas apenas nas amostras remanescentes que apresentaram menores valores de cor e turbidez.

3.4.1. Potencial Hidrogeniônico

Para a aferição do pH das amostras utilizou-se o método potenciométrico, utilizando um phmetro digital de bancada da marca Tecnonon modelo LUCA-210, acoplado a um eletrodo blindado modelo HC 200 da Hydrocore. Para realizar a medição, o eletrodo foi inserido no Becker de vidro de 150 mL contendo a amostra, de modo a ficar submerso, e sua leitura foi feita quando o seu valor estabilizou.

3.4.2. Alcalinidade

A alcalinidade foi medida pelo método potenciométrico, utilizando um phmetro digital de bancada da marca Tecnonon modelo LUCA-210, acoplado a um eletrodo blindado modelo HC 200 da Hydrocore. Conjuntamente, utilizou-se um agitador magnético da marca Brastec modelo Q-261A21, com uma barra metálica para homogeneizar a amostra.

Para a redução do pH, foi utilizada uma solução padrão de H_2SO_4 com normalidade conhecida. A leitura foi realizada anotando o volume de H_2SO_4 utilizado para reduzir o pH da amostra até o pH 5,75 para a alcalinidade parcial, e pH 4,35 para a alcalinidade total, sendo os resultados expressos em $\text{mg.CaCO}_3/\text{L}$.

3.4.3. Cor Aparente

A cor aparente foi aferida através do colorímetro portátil da marca PoliControl modelo AquaColor Cor, utilizando cubetas de vidro para realizar a leitura das amostras. Anterior à medição da cor aparente das amostras estudadas, o equipamento foi calibrado com os padrões 0 uC, 100 uC e 500 uC. O resultado da cor aparente obtida foi expresso na unidade uC (unidades de cor), que representa 1 mg.Pt.Co/L .

3.4.4. Turbidez

Para a medição da turbidez, utilizou-se o turbidímetro portátil da marca PoliControl modelo AP2000 iR, com cubetas de vidro para realizar a leitura das amostras, agitadas manualmente para dispersão das partículas em suspensão. Anterior à medição da turbidez, o

equipamento foi calibrado com os padrões 0,02 NTU, 10 NTU e 100 NTU. O resultado da turbidez obtida foi expresso em Unidade Nefelométrica de Turbidez (NTU).

3.4.5. Demanda Química de Oxigênio

A DQO foi aferida utilizando tubos de ensaio contendo 1,5 mL da solução de dicromato de potássio e sulfato de mercúrio e 3,5 mL da solução de ácido sulfúrico e sulfato de prata, além de adicionar 2 mL das amostras. Para digestão das amostras, utilizou-se o bloco digestor modelo AT525 da Alfakit, onde permaneceram por 2 horas a uma temperatura de 150 °C. A leitura das amostras foi realizada em espectrofotômetro modelo IL-226 da Kasuaki, utilizando comprimento de onda de 620 nm, sendo os resultados expressos em mg.O₂/L.

As leituras da absorbância na análise de DQO nas amostras foram realizadas em duplicatas, utilizando o valor médio para os cálculos da sua concentração.

3.4.6. Nitrogênio Amoniacal

Para medição do N-amoniacal (N-NH₃), tomou-se 50 mL das amostras, adicionando algumas gotas de NaOH para que o pH das amostras atingisse um valor próximo de 9,0, com auxílio de um phmetro digital de bancada da marca Tecnopeon modelo LUCA-210, acoplado a um eletrodo blindado modelo HC 200 da Hydrocore, além de um agitador magnético da marca Brastec modelo Q-261A21, com uma barra metálica para homogeneizar a amostra.

Para destilação das amostras, utilizou-se o destilador de nitrogênio da marca SPLabor modelo SP-74, recebendo o destilado de cada amostra em um Erlenmeyer de 250 mL, contendo 50 mL de ácido bórico a 2% e solução indicadora mista para nitrogênio amoniacal, recolhendo aproximadamente 50 mL do destilado para cada caso.

Por fim, titulou-se as amostras com a solução padrão de H₂SO₄, com normalidade conhecida. A leitura foi realizada anotando o volume de H₂SO₄ utilizado nas amostras até a coloração rosa ser obtida, sendo os resultados expressos em mg.N-NH₃/L.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Caracterização do Lixiviado Pré-tratado no Aterro Sanitário de Maceió-AL

A seguir, estão apresentados os resultados das análises físico-químicas de cor aparente, turbidez, pH, alcalinidade, DQO e N-amoniaco do lixiviado pré-tratado biologicamente no aterro sanitário de Maceió-AL. É possível observar que a concentração dos parâmetros analisados variou em função das características do lixiviado na data coletada, apresentando valores distintos a cada mês. Os dados da caracterização físico-química do lixiviado pré-tratado estão apresentados no Apêndice A.

4.1.1. Cor Aparente e Turbidez

Nos Gráficos 9 e 10 estão apresentadas as variações da concentração de cor aparente e turbidez, respectivamente, do lixiviado pré-tratado biologicamente no aterro sanitário de Maceió-AL, em cada data coletada, onde pode ser observado que a cor aparente apresentou um valor mínimo de 730 uC e um valor máximo de 1185 uC, ao passo que a turbidez variou entre o valor mínimo de 27,6 NTU e o valor máximo de 72,7 NTU.

Santos (2022) caracterizou o lixiviado bruto e o lixiviado pré-tratado biologicamente do aterro sanitário de Maceió (AL), no período de novembro de 2021 a junho de 2022.

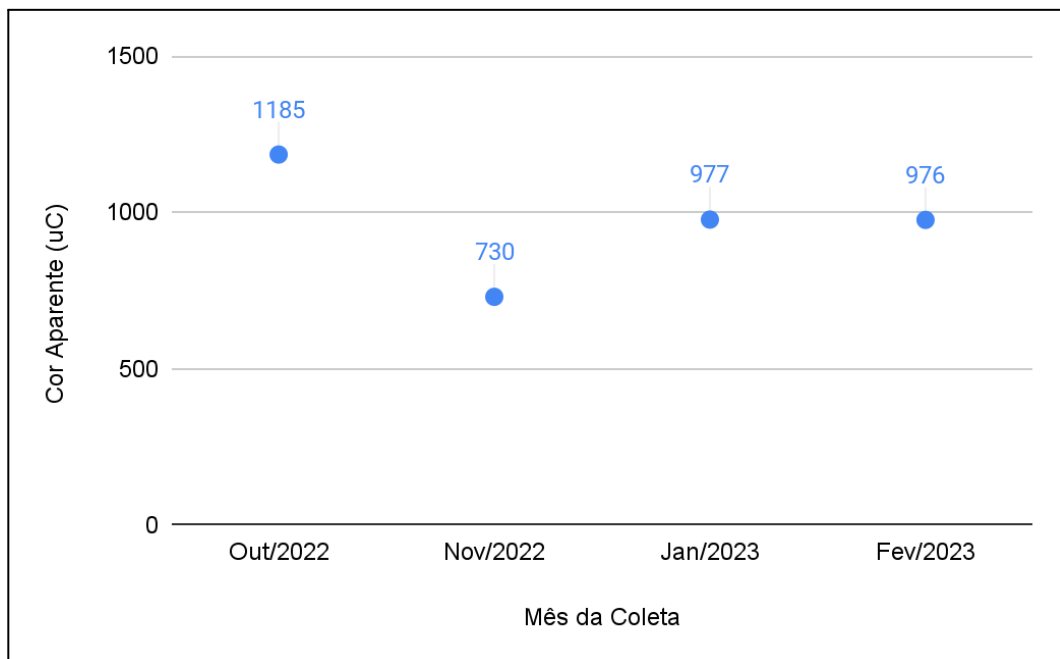
Em relação ao lixiviado bruto, para o parâmetro de cor aparente, Santos (2022) encontrou um valor mínimo de 1310 uC e um valor máximo de 4000 uC, apresentando uma média de 2698,5 uC no período de estiagem e 1775 uC no período chuvoso. Para a turbidez, obteve um valor mínimo de 120 NTU e um valor máximo de 464 NTU, sendo a média do período de estiagem 267,3 NTU e a média do período chuvoso 161,67 NTU.

Caracterizando o lixiviado pré-tratado biologicamente, Santos (2022) observou uma redução da concentração dos parâmetros de cor aparente e turbidez. A cor aparente variou entre o valor mínimo de 720 uC e o valor máximo 1590 uC, atingindo uma média de 1214 uC no período de estiagem e uma média de 1.250,7 uC no período chuvoso. Enquanto isso, a turbidez apresentou um valor mínimo de 15 NTU e valor máximo de 62 NTU, com uma média 39 NTU no período de estiagem e 38,8 NTU no período chuvoso.

Máximo (2007) analisou o lixiviado proveniente do Aterro Metropolitano da Grande Florianópolis, localizado em Biguaçu (SC), no período de fevereiro de 2005 a maio de 2006. Em suas análises, obteve valor mínimo de 5180 mg.Pt-Co/L, máximo de 5840 mg.Pt-Co/L e média de 5474 mg.Pt-Co/L para a cor aparente. Por outro lado, a turbidez apresentou valor mínimo de 208 NTU, valor máximo de 443 NTU e média de 308 NTU.

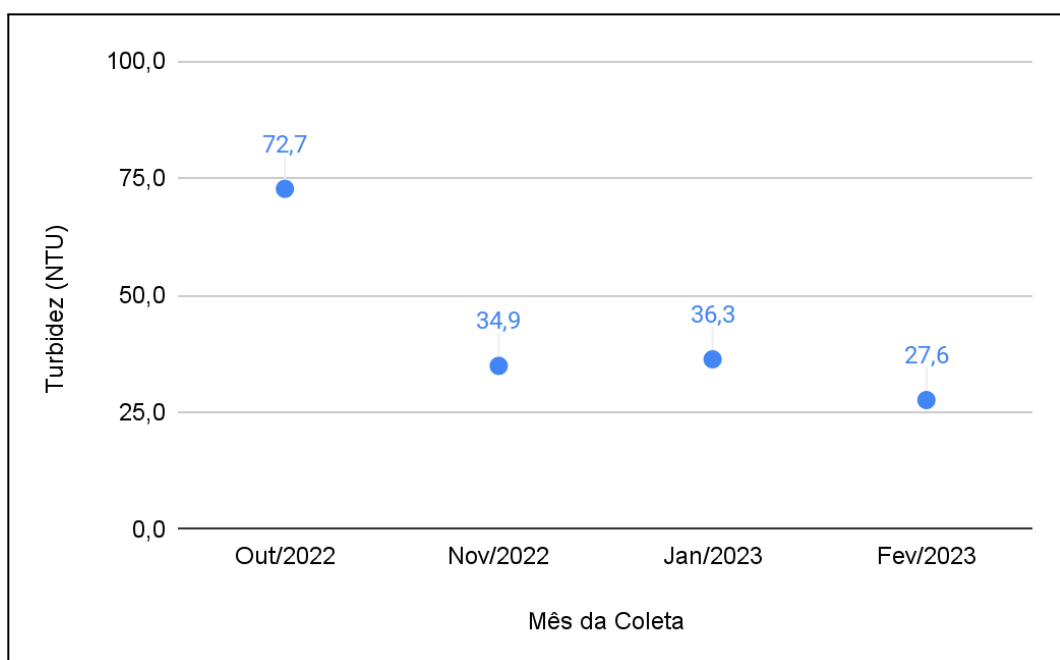
Ao longo do período de seis meses de monitoramento do lixiviado gerado no aterro controlado de resíduos sólidos de Londrina (PR), Felici (2010) obteve um valor médio de 6023 Pt-Co para a cor aparente e 5110 Pt-Co para a cor verdadeira. Quando o lixiviado bruto foi submetido ao sistema de tratamento biológico em um sistema de lodo ativado precedido por dois tanques de *stripping*, encontrou-se os valores de 5624 Pt-Co para a cor aparente, 5041 Pt-Co para a cor verdadeira e turbidez de 7,74 uT.

Gráfico 9 – Resultados da cor aparente do lixiviado pré-tratado



Fonte: Autor (2023)

Gráfico 10 – Resultados da turbidez do lixiviado pré-tratado



Fonte: Autor (2023)

Gewehr (2012) trabalhou com um período de cinco meses de monitoramento com o lixiviado bruto do aterro sanitário da Central de Resíduos do Recreio, situado no município de Minas do Leão (RS), e estudou a "turbidez não filtrada", a "turbidez filtrada" e a cor verdadeira. A "turbidez não filtrada" apresentou valor mínimo de 925 FAU, máximo de 1400 FAU e média de 1093 FAU. Para a "turbidez filtrada" encontrou valor mínimo de 625 FAU, máximo de 1053 FAU e média de 782 FAU. A cor verdadeira apareceu com valor mínimo de 1200 mg.Pt-Co/L, máximo de 18564 mg.Pt-Co/L e média de 10353 mg.Pt-Co/L.

4.1.2. pH e Alcalinidade

No Gráfico 11 está representada a variação do pH natural do lixiviado pré-tratado biologicamente no aterro sanitário de Maceió-AL, em cada data coletada, onde se verifica que o pH apresentou um valor mínimo de 7,36 e um valor máximo de 8,27.

Os valores de pH encontrados por Santos (2022), para o lixiviado bruto, variaram entre 7,30 e 8,18, sendo a média do período de estiagem 7,87 e a média do período chuvoso 7,63. Já para o lixiviado pré-tratado biologicamente, foram encontrados valores de pH que variaram entre o valor mínimo de 6,94 e o valor máximo de 8,18, sendo a média do período de estiagem 7,54 e a média do período chuvoso 7,63.

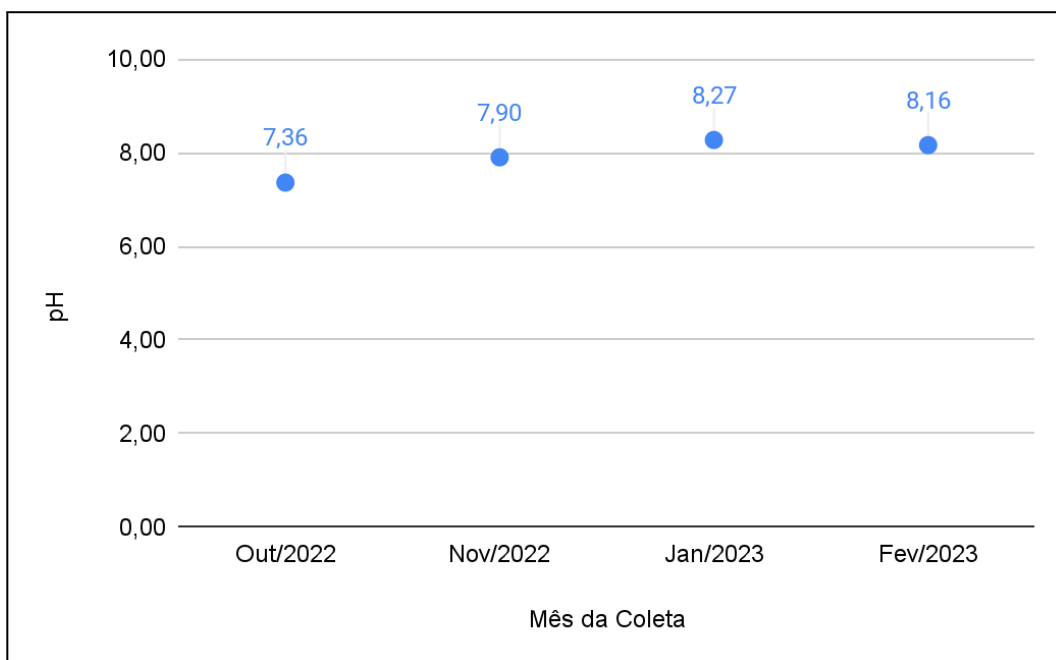
Araújo (2019) também trabalhou com o lixiviado bruto gerado no aterro sanitário de Maceió (AL), por meio da análise de dados de um período de nove anos (2010 - 2019), agrupando os resultados em período chuvoso e período de baixa precipitação. No período chuvoso, o pH apresentou uma média de 7,65, valor mínimo de 5,78 e valor máximo de 8,52, enquanto no período de baixa precipitação foi encontrada uma média de 7,86, valor mínimo de 5,40 e valor máximo de 8,63.

Analogamente, no Gráfico 12 está representada a variação da alcalinidade do lixiviado pré-tratado biologicamente no aterro sanitário de Maceió-AL, em cada data coletada, onde se verifica que a alcalinidade apresentou um valor mínimo de 649,5 mg.CaCO₃/L e valor máximo de 3.640,8 mg.CaCO₃/L.

Santos (2022) também caracterizou o lixiviado bruto e o pré-tratado biologicamente do aterro sanitário de Maceió (AL) em relação ao parâmetro de alcalinidade. Para o lixiviado bruto, foram encontrados um valor mínimo de 5.581,50 mg.CaCO₃/L e máximo de 20.862,00 mg.CaCO₃/L, apresentando uma média de 9.347,15 mg.CaCO₃/L no período de estiagem e 13.999,50 mg.CaCO₃/L no período chuvoso. Para o lixiviado pré-tratado biologicamente, encontrou-se valores de alcalinidade entre o valor mínimo de 280,50 mg.CaCO₃/L e máximo

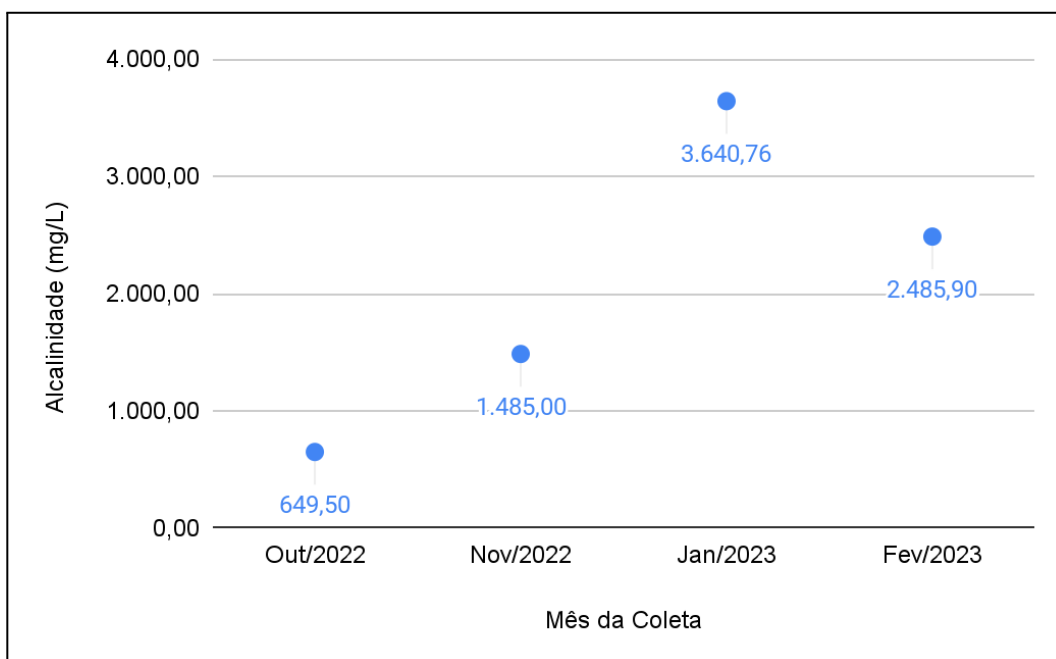
de 2.800,00 mg.CaCO₃/L, sendo a média do período de estiagem 850,55 mg.CaCO₃/L e a média do período chuvoso 1.441,04 mg.CaCO₃/L.

Gráfico 11 – Resultados do pH do lixiviado pré-tratado



Fonte: Autor (2023)

Gráfico 12 – Resultados da alcalinidade do lixiviado pré-tratado



Fonte: Autor (2023)

Nas análises realizadas por Araújo (2019), a alcalinidade do lixiviado bruto do aterro sanitário de Maceió (AL) apresentou uma média de 8379 mg.CaCO₃/L no período chuvoso e 8314 mg.CaCO₃/L no período de baixa precipitação. No período chuvoso, a alcalinidade

variou entre o valor mínimo de 4300 mg.CaCO₃/L e o valor máximo de 12700 mg.CaCO₃/L, enquanto que no período de baixa precipitação apresentou valor mínimo de 930 mg.CaCO₃/L e valor valor máximo de 17100 mg.CaCO₃/L.

Felici (2010) encontrou um valor mínimo de 8,32 e máximo de 8,55 para o pH, com uma média de 8,45, enquanto que a alcalinidade variou entre o valor mínimo de 6062 mg.CaCO₃/L e o valor máximo de 6950 mg.CaCO₃/L, apresentando uma média de 6097 mg.CaCO₃/L. Quando o lixiviado bruto foi submetido ao tratamento biológico, encontrou-se o valor de pH 9,05 e alcalinidade de 2661 mg.CaCO₃/L.

Gewehr (2012) obteve médias de pH de 8,3 e alcalinidade de 7970 mg.CaCO₃/L. No período de tempo analisado, o pH variou entre o valor mínimo de 8,0 e o valor máximo de 8,5, ao passo que a alcalinidade apresentou um valor mínimo de 5630 mg.CaCO₃/L e um valor máximo de 14400 mg.CaCO₃/L.

Máximo (2007) observou uma média de pH 8, apresentando valor mínimo de 7,85 e valor máximo de 8,96. Para a alcalinidade, obteve uma média de 5229 mg.CaCO₃/L, com valor mínimo de 6400 mg.CaCO₃/L e valor máximo de 8100 mg.CaCO₃/L.

Com isso, observa-se que os resultados de pH e alcalinidade encontrados no presente trabalho estão compatíveis com os dados apresentados na literatura.

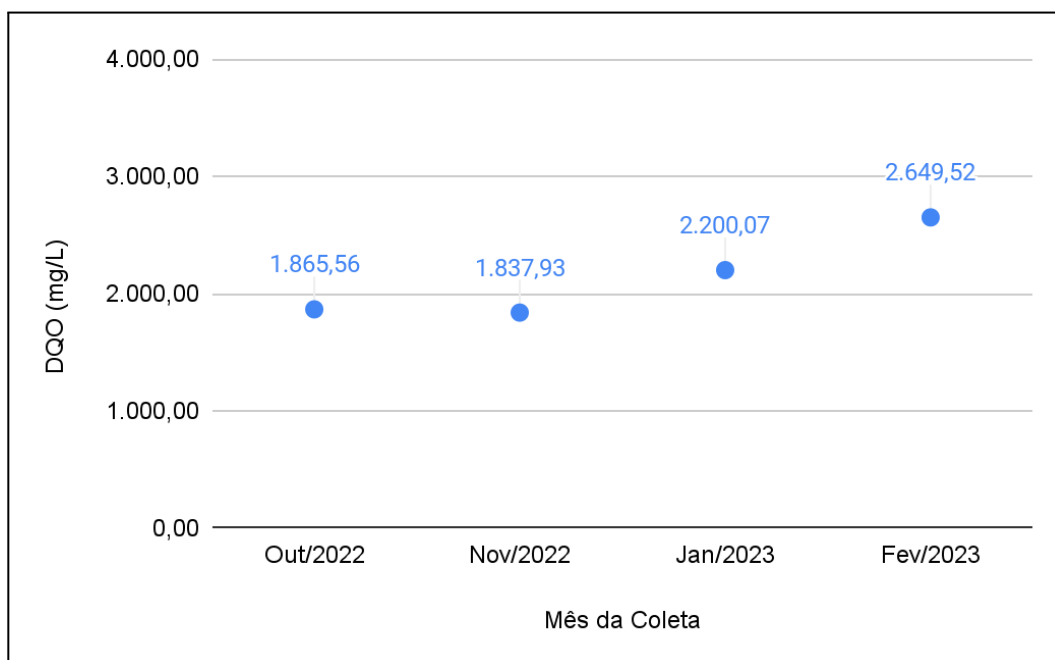
4.1.3. DQO

No Gráfico 13 está apresentada a variação da concentração de DQO do lixiviado pré-tratado biologicamente no aterro sanitário de Maceió-AL, em cada data coletada, onde se verifica que concentração de DQO apresentou um valor mínimo de 1.837,93 mg.O₂/L e um valor máximo de 2.649,52 mg.O₂/L.

Santos (2022), em sua caracterização do lixiviado bruto, obteve valor mínimo de 2.494 mg.O₂/L e máximo de 8.156 mg.O₂/L, sendo a média do período de estiagem 5.423 mg.O₂/L e a média do período chuvoso 4.590 mg.O₂/L. Para o lixiviado pré-tratado biologicamente, encontrou uma variação entre 735,8 mg.O₂/L e 4.237,3 mg.O₂/L, com uma média 1.961,6 mg.O₂/L no período de estiagem e 2.530,2 mg.O₂/L no período chuvoso, constando uma redução da concentração de DQO no tratamento biológico do aterro sanitário.

Araújo (2019), trabalhando com o lixiviado bruto, encontrou um valor mínimo de 2880 mg.O₂/L, valor máximo de 22600 mg.O₂/L e uma média de 10458 mg.O₂/L no período chuvoso. No período de baixa precipitação obteve um valor mínimo de 1610 mg.O₂/L, valor máximo de 27800 mg.O₂/L e uma média de 5944 mg.O₂/L.

Gráfico 13 – Resultados da DQO do lixiviado pré-tratado



Fonte: Autor (2023)

Em suas análises do lixiviado bruto, Felici (2010) obteve um valor mínimo de 2905 mg.O₂/L, valor máximo de 3242 mg.O₂/L e valor médio de 2973 mg.O₂/L. Após submeter o lixiviado bruto ao tratamento biológico, chegou ao valor médio de 2264 mg.O₂/L.

Gewehr (2012) calculou a média de 4786 mg.O₂/L, apresentando valor mínimo de 3039 mg.O₂/L e valor máximo de 7272 mg.O₂/L. Máximo (2007) encontrou valor mínimo de 1577 mg.O₂/L, valor máximo de 6103 mg.O₂/L e média de 3079 mg.O₂/L.

4.1.4. N-amoniaco

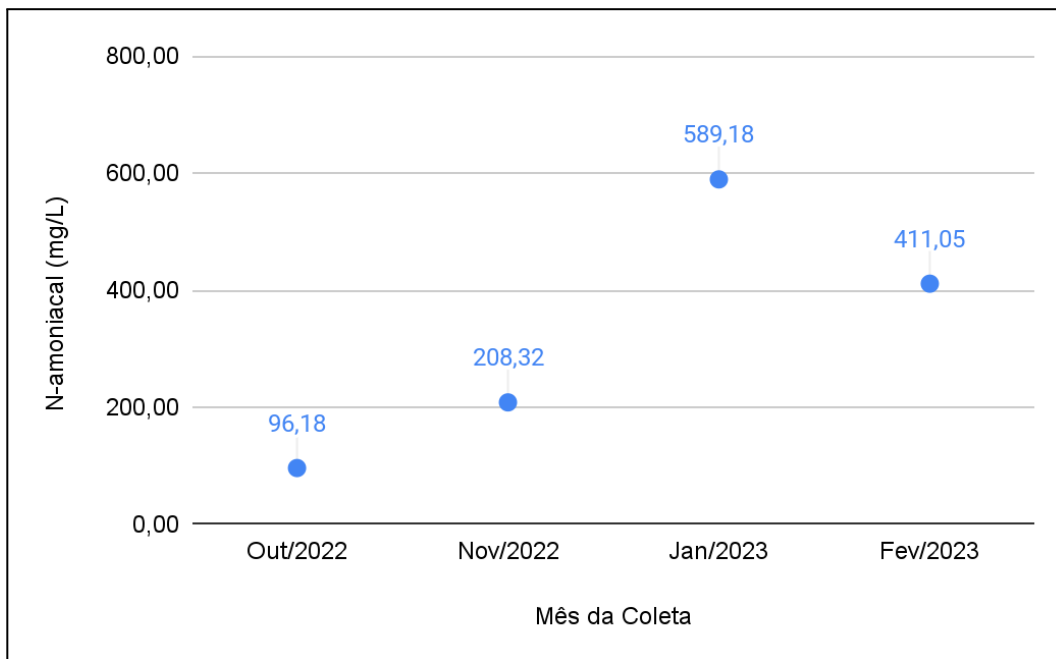
No Gráfico 14 está apresentada a variação da concentração de N-amoniaco do lixiviado pré-tratado biologicamente no aterro sanitário de Maceió-AL, em cada data coletada, onde se verifica que a concentração apresentou um valor mínimo de 96,18 mg.N-NH₃/L e um valor máximo de 589,18 mg.N-NH₃/L.

Em suas análises com o lixiviado bruto, Santos (2022) encontrou uma média de 1.629,83 mg.N-NH₃/L no período de estiagem e 1.945,16 mg.N-NH₃/L no período chuvoso. Já o lixiviado pré-tratado biologicamente, apresentou uma média de 63 mg.N-NH₃/L no período de estiagem e 387,80 mg.N-NH₃/L no período chuvoso, mostrando a eficiência da redução de N-amoniaco no sistema de tratamento biológico do aterro sanitário.

Araújo (2019), para o lixiviado bruto no período chuvoso, obteve um valor mínimo de 933 mg.N-NH₃/L, máximo de 2730 mg.N-NH₃/L e uma média de 1770 mg.N-NH₃/L. Já no

período de baixa precipitação, encontrou valor mínimo de 418 mg.N-NH₃/L, valor máximo de 3300 mg.N-NH₃/L e média de 1721 mg.N-NH₃/L.

Gráfico 14 – Resultados do N-amoniaco do lixiviado pré-tratado



Fonte: Autor (2023)

Felici (2010), para o lixiviado bruto, encontrou valor mínimo de 1007 mg.N-NH₃/L, valor máximo de 1074 mg.N-NH₃/L e valor médio de 1040 mg.N-NH₃/L. Quando o lixiviado bruto foi tratado biologicamente, encontrou-se valor de 15 mg.N-NH₃/L, constatando a eficiência de 90% de remoção de N-amoniaco no sistema de tratamento biológico por lodo ativado precedido por dois tanques de *stripping*.

Gewehr (2012) calculou a média de 1441 mg.N-NH₃/L, apresentando valor mínimo de 1030 mg.N-NH₃/L e máximo de 1792 mg.N-NH₃/L. Por sua vez, Máximo (2007) obteve valor mínimo de 850 mg.N-NH₃/L, máximo de 1385,5 mg.N-NH₃/L e média de 1248 mg.N-NH₃/L.

Como especificado por Telles (2010), quando o lixiviado apresenta alta concentração de DQO e N-amoniaco, o tratamento biológico é insuficiente na remoção destes parâmetros, a fim de enquadrar o efluente dentro dos padrões de lançamento da legislação vigente. Desse modo, é necessário empregar técnicas de tratamento físico-químico, associadas com os processos de tratamento biológico, para tratar o lixiviado.

4.2. Ensaios de Bancada

Os ensaios de bancada, com jar test e amostra do lixiviado pré-tratado biologicamente, do aterro sanitário de Maceió-AL, foram utilizados para investigar a região caracterizada pelo

par de valores pH de coagulação x dosagens de coagulante que resulta em maior remoção de cor, turbidez, DQO e N-amoniacal.

As dosagens do PAC estudadas variaram de 200 a 750 mg/L, em cinco faixas de pH (6,0 à 9,0). Os ensaios de bancada resultaram em 60 pontos de pH de coagulação x dosagem de PAC para cada velocidade de sedimentação avaliada.

Observa-se que o pH natural da amostra variou em função das características do lixiviado em cada data coletada (Tabela 3).

Tabela 3 – pH natural da amostra em cada coleta

Data da Coleta	pH natural
27/outubro/2022	7,36
24/novembro/2022	7,90
16/janeiro/2023	8,27
17/fevereiro/2023	8,16

Fonte: Autor (2023)

Para a alteração do pH das amostras, é possível visualizar na Tabela 4 a quantidade de H_2SO_4 empregado em 30 L da amostra para reduzir o pH, bem como os valores do pH inicial e final. Analogamente, na Tabela 5 está exposta a quantidade de NaOH empregado em 30 L da amostra para elevar o pH.

Tabela 4 – Dosagens de H_2SO_4 utilizadas para reduzir o pH da amostra

pH nominal	Dados	Coleta			
		Outubro/2022	Novembro/2022	Janeiro/2023	Fevereiro/2023
6,0	Data da Análise	28/10/2022	26/11/2022	17/01/2023	18/02/2023
	pH inicial	7,56	8,20	8,44	8,17
	Volume de H_2SO_4 (mL)	8,00	26,00	52,00	35,00
	pH final	6,03	6,02	5,99	5,98
6,5	Data da Análise	29/10/2022	26/11/2022	18/01/2023	18/02/2023
	pH inicial	7,60	8,00	8,44	8,17
	Volume de H_2SO_4 (mL)	5,50	14,00	35,00	23,00
	pH final	6,53	6,52	6,51	6,51

Fonte: Autor (2023)

Tabela 5 – Dosagens de NaOH utilizadas para elevar o pH da amostra

pH nominal	Dados	Coleta			
		Outubro/2022	Novembro/2022	Janeiro/2023	Fevereiro/2023
8,5	Data da Análise	29/10/2022	26/11/2022	19/01/2023	19/02/2023
	pH inicial	7,60	8,20	8,45	8,16
	Massa de NaOH (g)	2,36	3,17	1,23	6,18
	pH final	8,48	8,53	8,50	8,51
9,0	Data da Análise	28/10/2022	26/11/2022	19/01/2023	19/02/2023
	pH inicial	7,56	8,20	8,45	8,16
	Massa de NaOH (g)	6,85	12,01	16,82	20,59
	pH final	8,97	9,02	8,98	8,98

Fonte: Autor (2023)

Os dados obtidos nos ensaios de bancada estão apresentados no Apêndice B (out/2022), Apêndice C (nov/2022), Apêndice D (jan/2023) e Apêndice E (fev/2023).

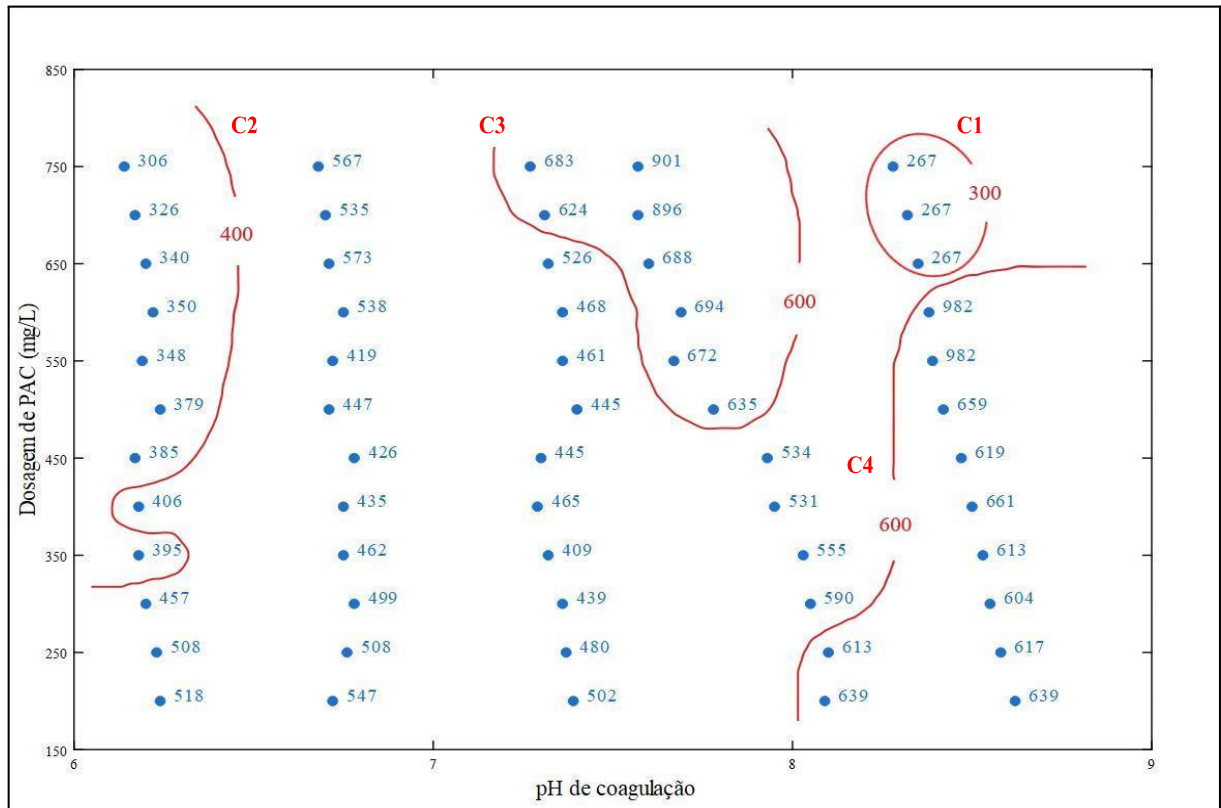
4.2.1. Outubro de 2022

Em out/2022 o lixiviado pré-tratado biologicamente apresentava as características de pH 7,36, cor aparente 1185 uC, turbidez 72,7 NTU e alcalinidade 649,5 mg.CaCO₃/L. Vale destacar que diferente dos meses subsequentes, a amostra do lixiviado em outubro/2022 foi coletada na lagoa pré-aerada 2.

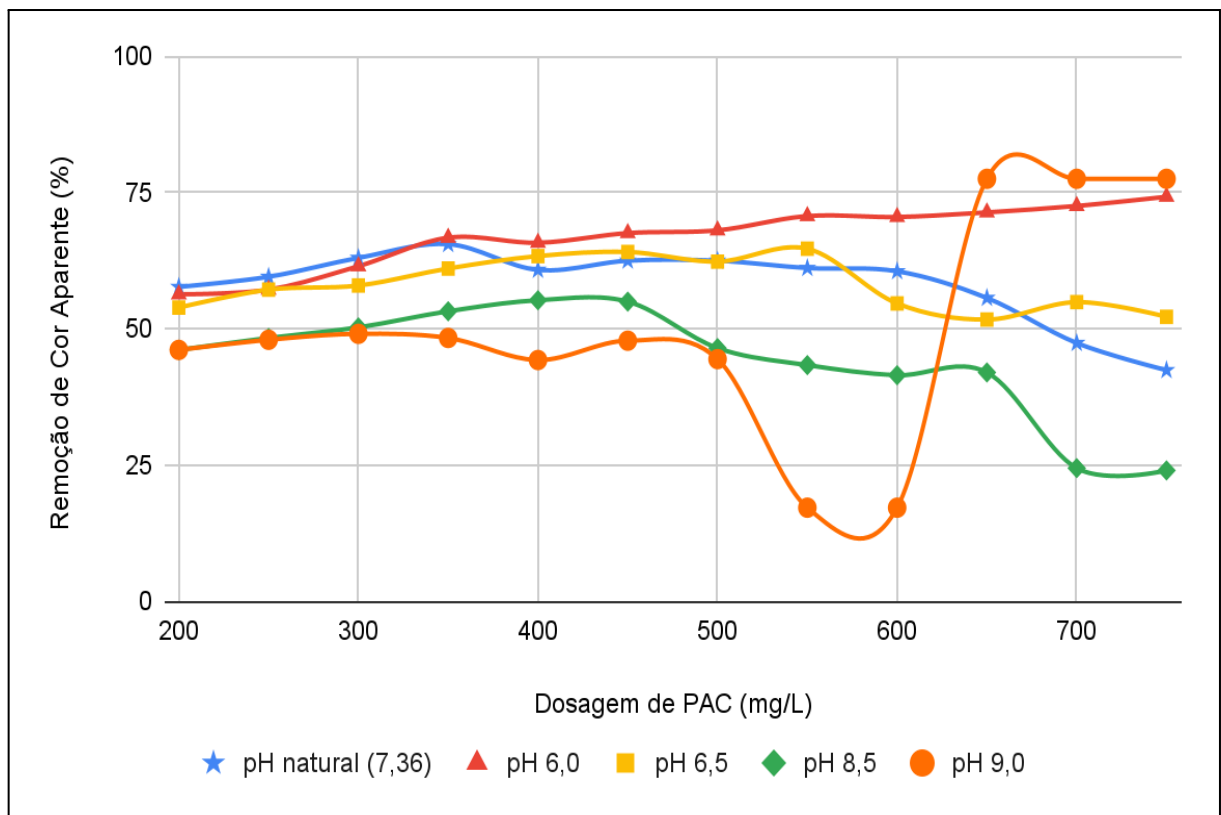
Realizou-se os ensaios de bancada utilizando o coagulante PAC comercial (dosagens especificadas na Tabela 2) e apenas com velocidade de sedimentação de 1,0 cm/min.

No Gráfico 15 está apresentado o diagrama de coagulação para a cor aparente e velocidade de sedimentação de 1 cm/min. De maneira complementar, no Gráfico 16 pode ser visualizada a eficiência de remoção de cor aparente nos ensaios realizados.

No diagrama de coagulação para cor aparente, exibido no Gráfico 15, pode ser observado que, a partir das amostras remanescentes dos ensaios de bancada, foi possível traçar curvas de coagulação que representam valores de cor aparente de 200 a 300 uC, 300 a 400 uC, 400 a 600 uC e 600 a 1000 uC, e que a região que apresentou melhor desempenho no tratamento do lixiviado por coag-floc-dec, está situada na faixa de pH de coagulação 8,28 - 8,35 com dosagens do PAC comercial de 650 a 750 mg/L (curva C1 com resultados de cor aparente remanescentes entre 200 uC e 300 uC).

Gráfico 15 – Diagrama de coagulação para cor aparente (uC) e $V_s = 1$ cm/min (Out/22)

Fonte: Autor (2023)

Gráfico 16 – Remoção de cor aparente com $V_s = 1$ cm/min (Out/22)

Fonte: Autor (2023)

Observando a curva C2, percebe-se que a região compreendida pela faixa de pH de coagulação 6,14 - 6,24 com dosagens de 350 a 750 mg.PAC/L (exceto a dosagem de 400 mg.PAC/L) também obteve bom desempenho no tratamento do lixiviado por coag-floc-dec, considerando os resultados de cor aparente remanescentes entre 300 uC e 400 uC.

Em termos de percentuais, analisando o Gráfico 16, todos os pontos de pH de coagulação x dosagens de PAC da região do diagrama de coagulação englobados pela curva C1 demonstraram eficiência de remoção de 77% de cor aparente. Por sua vez, os pontos estudados da região do diagrama de coagulação delimitados à direita pela curva C2 (valores entre 300 uC e 400 uC) demonstraram eficiência de remoção de 67% a 74% de cor aparente.

Os pares de pH de coagulação x dosagem de PAC englobados pela curva C3 e delimitados à esquerda pela curva C4, exibidos no diagrama de coagulação do Gráfico 15, expressam os valores de cor aparente entre 600 uC e 1000 uC, sendo os resultados menos eficientes no tratamento de cor aparente. Nessas regiões, através do Gráfico 16, observa-se que a eficiência de remoção de cor aparente variou de 17% a 49%.

Na Tabela 6 é possível ver os pares de pH coagulação x dosagem de PAC com melhor desempenho no tratamento do lixiviado para o parâmetro de cor aparente e $V_s = 1$ cm/min, bem como seus respectivos percentuais de remoção.

Tabela 6 – Melhores pares de pH x mg.PAC/L para cor aparente e $V_s = 1$ cm/min (Out/22)

pH inicial	Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Remoção de Cor Aparente (%)
9,00	650	8,35	267	77
	700	8,32	267	77
	750	8,28	267	77
6,00	350	6,18	395	67
	450	6,17	385	68
	500	6,24	379	68
	550	6,19	348	71
	600	6,22	350	70
	650	6,20	340	71
	700	6,17	326	72
	750	6,14	306	74

Fonte: Autor (2023)

Nota-se, ainda, que a relação de pH natural x dosagem de PAC demonstrou eficiências de remoção de cor aparente entre 42% e 65%, sendo as dosagens de 300 mg.PAC/L (63% de remoção) e 350 mg.PAC/L (65% de remoção) com melhor desempenho no tratamento. Na

Tabela 7 estão expostos os pares de pH natural x mg.PAC/L no tratamento do lixiviado por coag-floc-dec para o parâmetro de cor aparente e $V_s = 1$ cm/min.

Tabela 7 – Pares de pH natural x mg.PAC/L para cor aparente e $V_s = 1$ cm/min (Out/22)

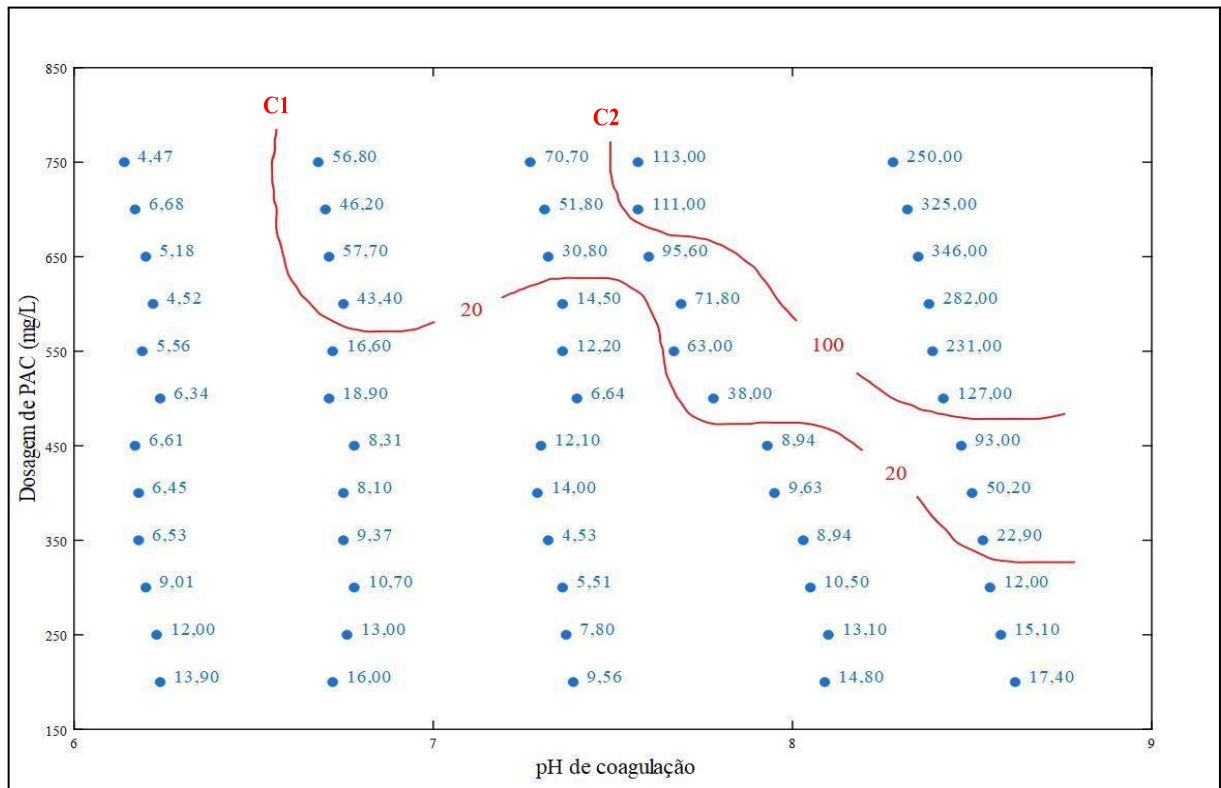
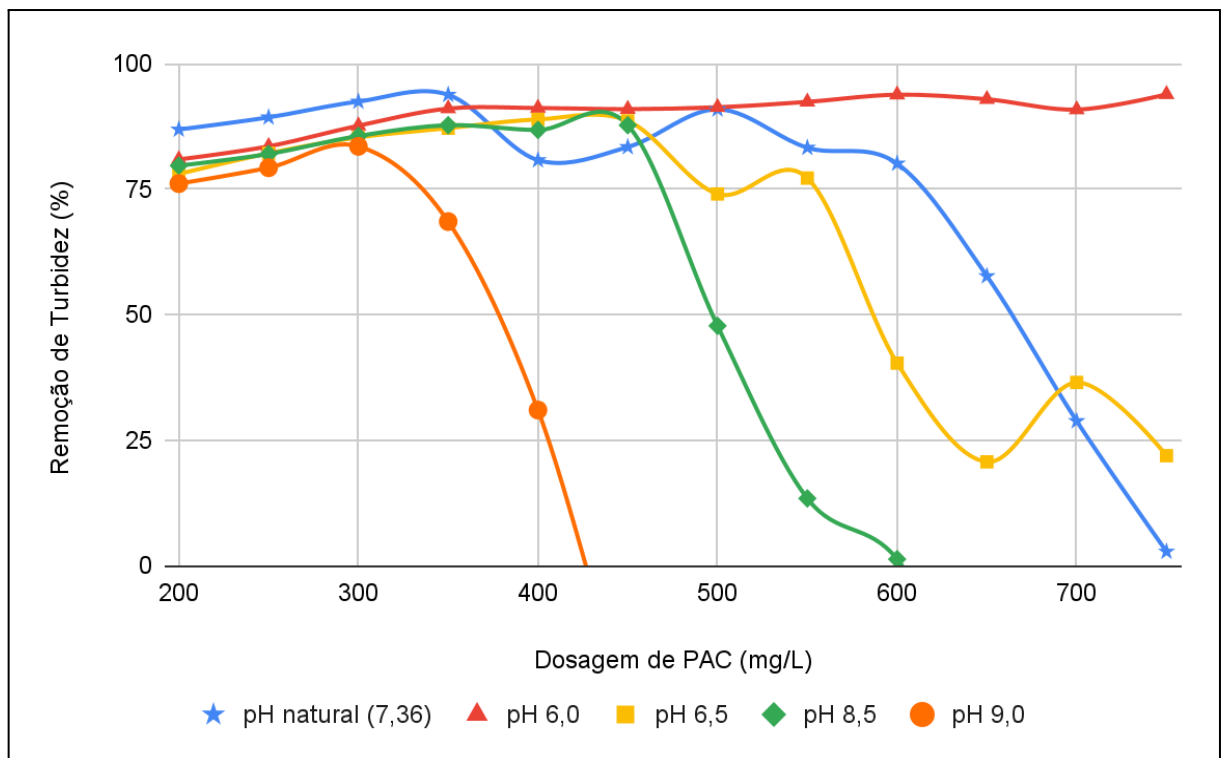
Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Remoção de Cor Aparente (%)
200	7,39	502	58
250	7,37	480	59
300	7,36	439	63
350	7,32	409	65
400	7,29	465	61
450	7,30	445	62
500	7,40	445	62
550	7,36	461	61
600	7,36	468	61
650	7,32	526	56
700	7,31	624	47
750	7,27	683	42

Fonte: Autor (2023)

Tratando-se da turbidez, no Gráfico 17 está apresentado seu respectivo diagrama de coagulação, e no Gráfico 18 pode ser visualizada a eficiência de remoção de turbidez nos ensaios realizados, com velocidade de sedimentação de 1 cm/min.

No diagrama de coagulação para turbidez e $V_s = 1$ cm/min, visto no Gráfico 17, pode ser verificado que, a partir das amostras remanescentes dos ensaios de bancada, foi possível traçar curvas de coagulação que representam valores de turbidez de 4 a 20 NTU, 20 a 100 NTU e 100 a 350 NTU.

Baseado no diagrama de coagulação para turbidez apontado, a região delimitada à direita pela curva C1 (resultados de 4 a 20 NTU) compreende os pares de pH de coagulação x dosagem de PAC que apresentaram melhor desempenho no tratamento do lixiviado por coag-floc-dec. Ainda dentro desta mesma região, observa-se valores entre 4 NTU e 5 NTU, correspondendo aos pontos com maior remoção de turbidez.

Gráfico 17 – Diagrama de coagulação para turbidez (NTU) e $V_s = 1$ cm/min (Out/22)Gráfico 18 – Remoção de turbidez com $V_s = 1$ cm/min (Out/22)

Analisando os Gráficos 17 e 18, os pontos de pH x dosagens de PAC da região do diagrama de coagulação delimitados à direita pela curva C1 demonstraram eficiência de remoção de 74% a 94%, sendo os pontos entre 4 NTU e 5 NTU com 94%.

Na Tabela 8 estão apresentados os pares de pH de coagulação x dosagem de PAC com melhor desempenho no tratamento do lixiviado para o parâmetro de turbidez e $V_s = 1$ cm/min, bem como seus respectivos percentuais de remoção.

Tabela 8 – Melhores pares de pH x mg.PAC/L para turbidez e $V_s = 1$ cm/min (Out/22)

pH inicial	Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Turbidez (NTU)	Remoção de Turbidez (%)
6,00	600	6,22	4,52	94
	750	6,14	4,47	94
7,36	350	7,32	4,53	94

Fonte: Autor (2023)

A relação de pH natural x dosagem de PAC, exceto as dosagens de 650 a 750 mg.PAC/L, também demonstrou eficiências de remoção de turbidez entre 80% e 94%, sendo as dosagens de 300 mg.PAC/L (92% de remoção) e 350 mg.PAC/L (94% de remoção) com melhor desempenho no tratamento. A dosagem de 750 mg.PAC/L apresentou a menor eficiência (3% de remoção). Na Tabela 9 estão expostos os pares de pH natural x mg.PAC/L no tratamento do lixiviado por coag-floc-dec para o parâmetro de turbidez e $V_s = 1$ cm/min.

Tabela 9 – Pares de pH natural x mg.PAC/L para turbidez e $V_s = 1$ cm/min (Out/22)

Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Turbidez (NTU)	Remoção de Turbidez (%)
200	7,39	9,56	87
250	7,37	7,80	89
300	7,36	5,51	92
350	7,32	4,53	94
400	7,29	14,00	81
450	7,30	12,10	83
500	7,40	6,64	91
550	7,36	12,20	83
600	7,36	14,50	80
650	7,32	30,80	58
700	7,31	51,80	29
750	7,27	70,70	3

Fonte: Autor (2023)

4.2.2. Novembro de 2022

Em nov/2022 o lixiviado pré-tratado biologicamente apresentava as características de pH 7,90, cor aparente 730 uC, turbidez 34,9 NTU e alcalinidade 1485 mg.CaCO₃/L.

Os ensaios de bancada foram realizados utilizando o coagulante PAC comercial, com as dosagens especificadas na Tabela 2, em conjunto com o polímero aniônico (dosagem de 0,1% do volume da amostra em cada jarro do jar test), e com velocidades de sedimentação de 1 cm/min e 0,5 cm/min.

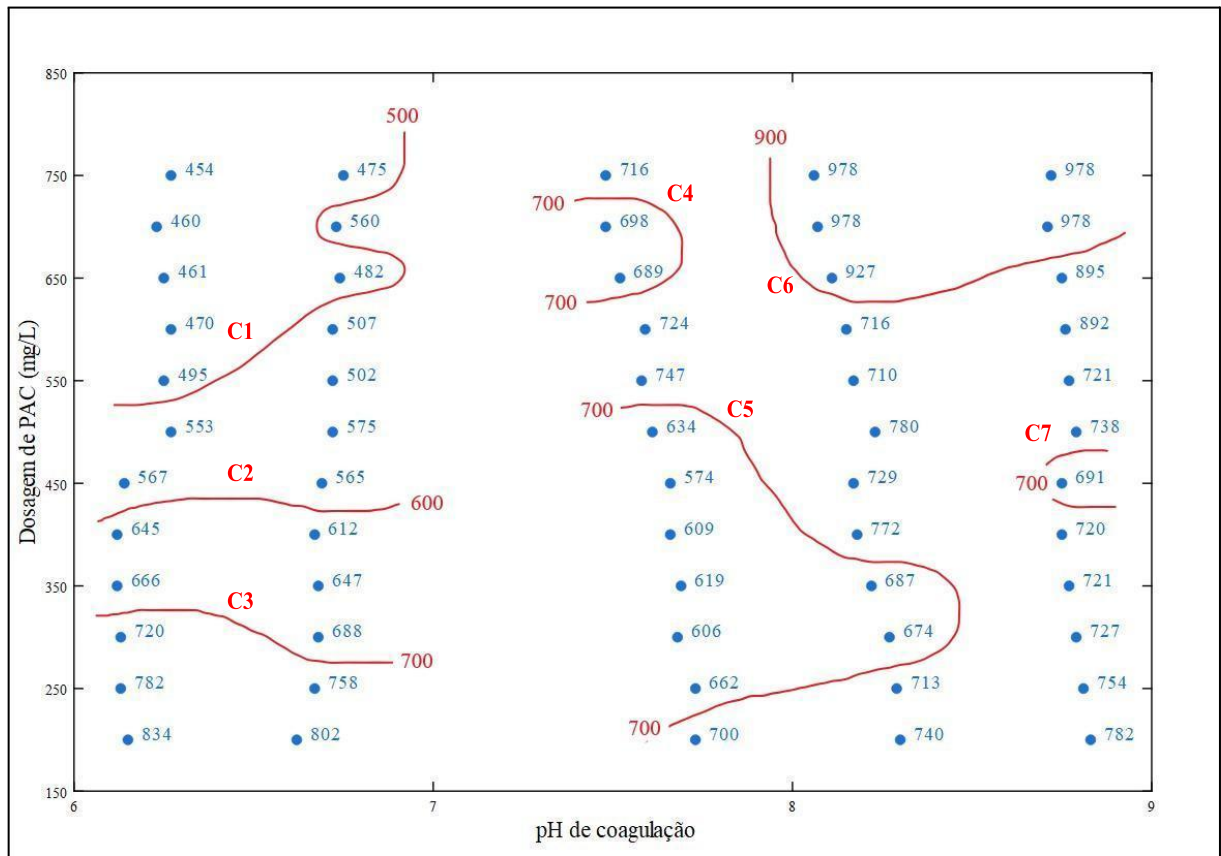
No Gráfico 19 está apresentado o diagrama de coagulação para a cor aparente e velocidade de sedimentação de 1 cm/min, enquanto no Gráfico 20 pode ser visualizada a eficiência de remoção de cor aparente nos ensaios realizados.

No diagrama de coagulação para cor aparente e $V_s = 1,0$ cm/min, apresentado no Gráfico 19, observa-se que, a partir das amostras remanescentes, foi possível traçar curvas de coagulação que representam valores de cor aparente de 400 a 500 uC, 500 a 600 uC, 600 a 700 uC, 700 a 900 uC e 900 a 1000 uC.

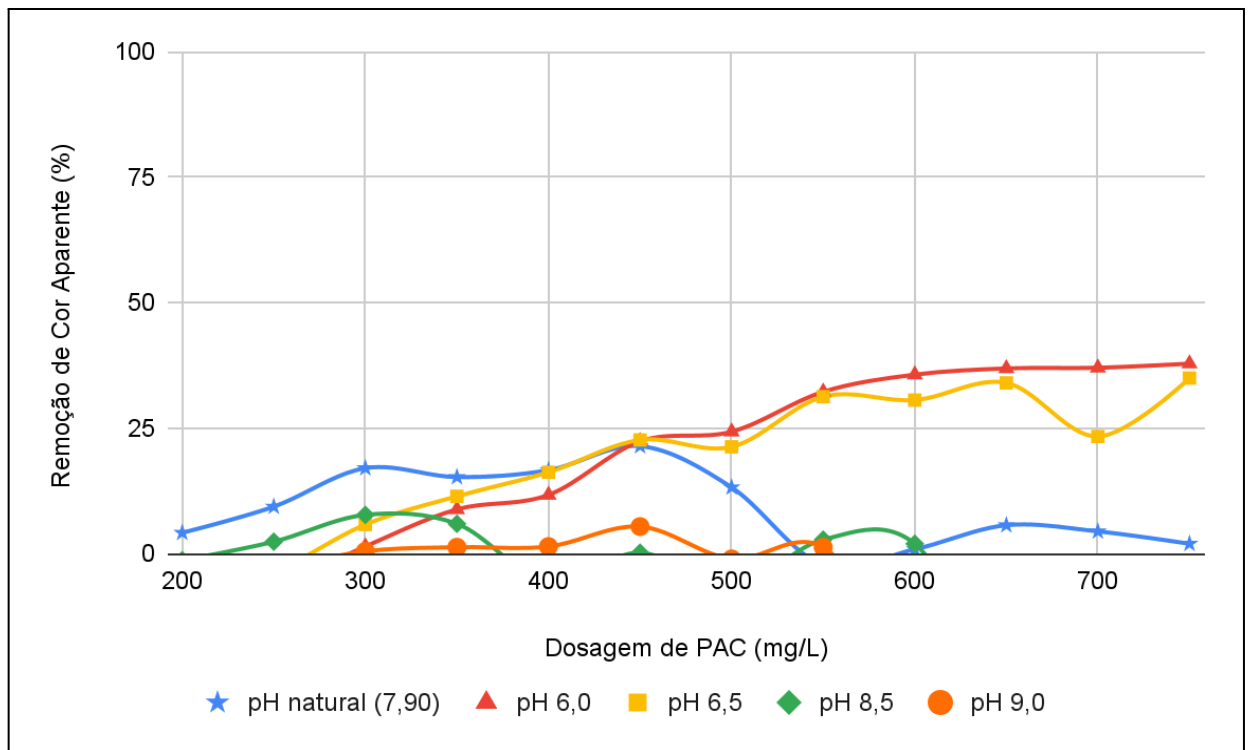
Nota-se que, com base no diagrama de coagulação para cor aparente apontado, a região que apresentou melhor desempenho no tratamento do lixiviado por coag-floc-dec está nas faixas de pH de coagulação 6,23 - 6,27 com dosagens de 550 a 750 mg.PAC/L e pH de coagulação 6,74 - 6,75 com dosagens de 650 e 750 mg.PAC/L (região delimitada pela curva C1 com resultados de cor aparente remanescentes entre 400 uC e 500 uC). Além disso, a região delimitada entre as curvas C1 e C2 também obteve bom desempenho, considerando os resultados de cor aparente remanescentes entre 500 uC e 600 uC.

Analisando o Gráfico 20, os pontos estudados de pH de coagulação x dosagens de PAC da região do diagrama de coagulação com resultados de cor aparente de 400 a 500 uC, demonstraram eficiência de remoção de 32% a 38% de cor aparente. Por sua vez, os pontos estudados da região do diagrama de coagulação delimitada entre as curvas C1 e C2 (valores entre 500 uC e 600 uC) demonstraram eficiência de remoção de 21% a 31% de cor aparente.

Na Tabela 10 é possível ver os pares de pH de coagulação x dosagem de PAC com melhor desempenho no tratamento do lixiviado para o parâmetro de cor aparente e $V_s = 1$ cm/min, bem como seus respectivos percentuais de remoção.

Gráfico 19 – Diagrama de coag. para cor aparente (uC) e $V_s = 1$ cm/min (Nov/22)

Fonte: Autor (2023)

Gráfico 20 – Remoção de cor aparente com $V_s = 1$ cm/min (Nov/22)

Fonte: Autor (2023)

Tabela 10 – Melhores pares de pH x mg.PAC/L para cor aparente e $V_s = 1$ cm/min (Nov/22)

pH inicial	Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Remoção de Cor Aparente (%)
6,00	550	6,25	495	32
	600	6,27	470	36
	650	6,25	461	37
	700	6,23	460	37
	750	6,27	454	38
6,50	650	6,74	482	34
	750	6,75	475	35

Fonte: Autor (2023)

Observa-se, ainda, que a relação de pH natural x dosagem de PAC demonstrou eficiências de remoção de cor aparente entre 1% e 21%, sendo a dosagem de 450 mg.PAC/L (21% de remoção) com melhor desempenho. Destaca-se que a dosagem de 550 mg.PAC/L não apresentou eficiência no tratamento, ou seja, o resultado da cor aparente da amostra remanescente foi maior que a cor aparente do lixiviado pré-tratado biologicamente.

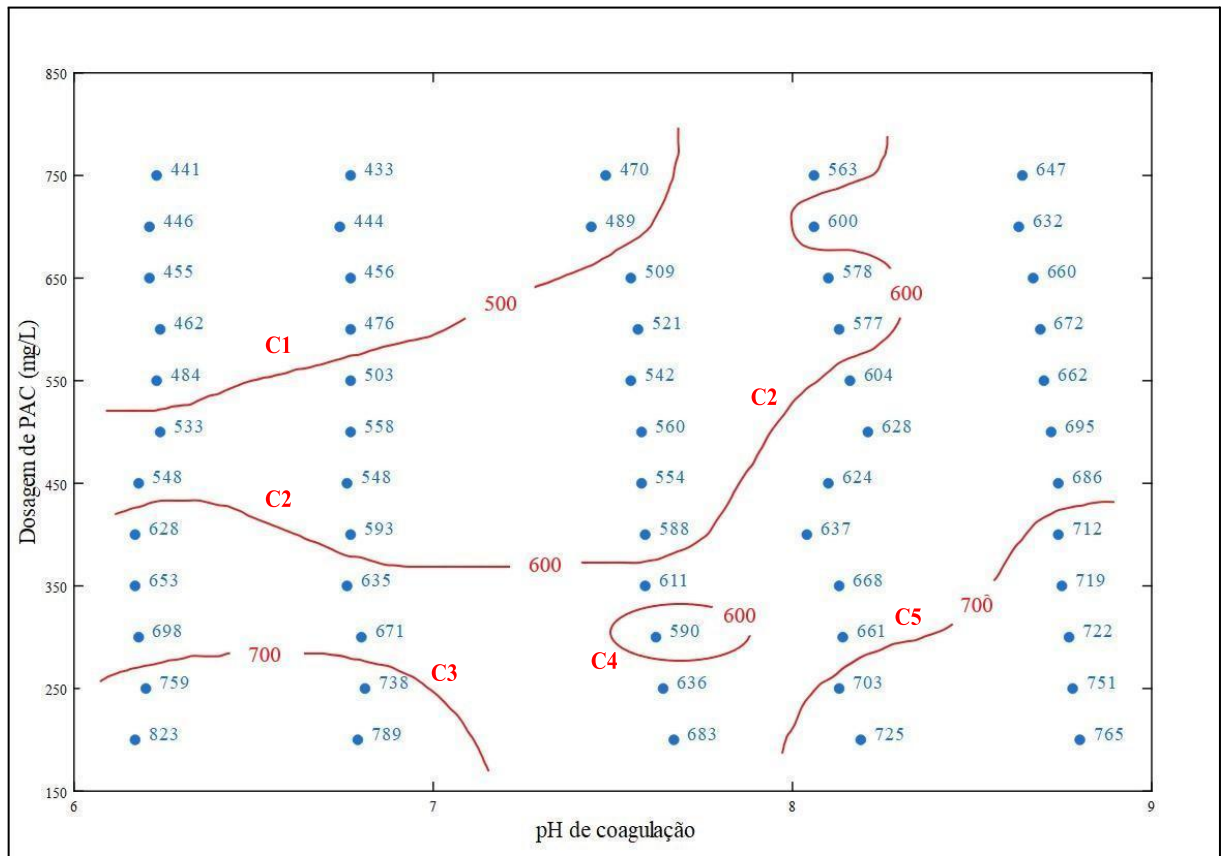
Na Tabela 11 estão expostos os pares de pH natural x mg.PAC/L no tratamento do lixiviado por coag-floc-dec para o parâmetro de cor aparente e $V_s = 1$ cm/min.

Tabela 11 – Pares de pH natural x mg.PAC/L para cor aparente e $V_s = 1$ cm/min (Nov/22)

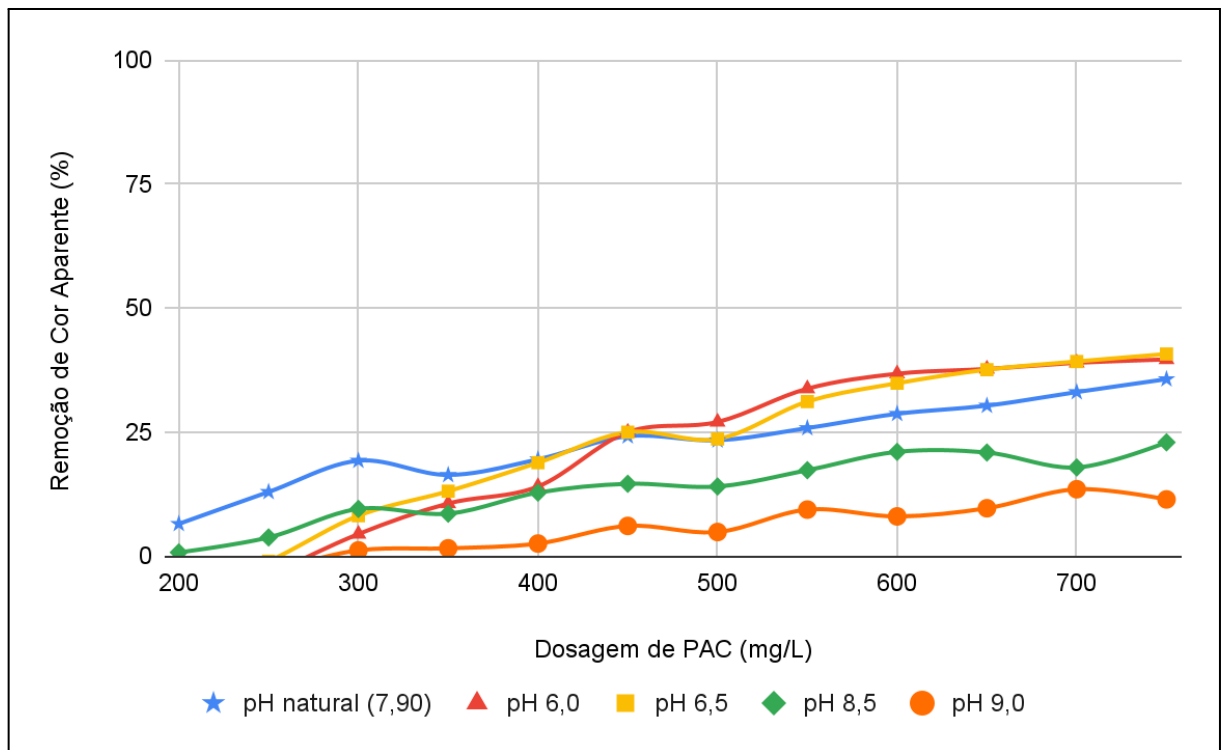
Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Remoção de Cor Aparente (%)
200	7,73	700	4
250	7,73	662	9
300	7,68	606	17
350	7,69	619	15
400	7,66	609	17
450	7,66	574	21
500	7,61	634	13
550	7,58	747	--
600	7,59	724	1
650	7,52	689	6
700	7,48	698	4
750	7,48	716	2

Fonte: Autor (2023)

Para a velocidade de sedimentação de 0,5 cm/min, no Gráfico 21 está ilustrado o diagrama de coagulação para a cor aparente, ao passo que no Gráfico 22 pode ser analisada a eficiência de remoção de cor aparente nos ensaios realizados.

Gráfico 21 – Diagrama de coagulação para cor aparente (uC) e $V_s = 0,5$ cm/min (Nov/22)

Fonte: Autor (2023)

Gráfico 22 – Remoção de cor aparente com $V_s = 0,5$ cm/min (Nov/22)

Fonte: Autor (2023)

Observa-se que foi possível traçar curvas de coagulação que representam valores de cor aparente de 400 a 500 uC, 500 a 600 uC, 600 a 700 uC e 700 a 900 uC. Nesse caso, a região que apresentou melhor desempenho no tratamento do lixiviado por coag-floc-dec, para a cor aparente, está nas faixas de pH de coagulação 6,21 - 6,24 com dosagens de 550 a 750 mg.PAC/L, pH de coagulação 6,74 - 6,77 com dosagens de 600 a 750 mg.PAC/L e pH de coagulação 7,44 - 7,48 com dosagens de 700 e 750 mg.PAC/L (região acima da curva C1 com resultados de cor aparente de 400 a 500 uC). Nota-se que, em comparação com o diagrama de coagulação para $V_s = 1$ cm/min (Gráfico 19), não houve resultados acima de 900 uC.

Em termos de percentuais, analisando o Gráfico 22, os pontos estudados de pH de coagulação x dosagens de PAC da região do diagrama de coagulação delimitada pela curva C1 (com resultados de cor aparente de 400 a 500 uC), demonstraram eficiência de remoção de 33% a 41% de cor aparente.

Na Tabela 12 é possível ver os pares de pH de coagulação x dosagem de PAC com melhor desempenho no tratamento do lixiviado para o parâmetro de cor aparente e $V_s = 0,5$ cm/min, bem como seus respectivos percentuais de remoção.

Tabela 12 – Melhores pares de pH x mg.PAC/L para cor aparente e $V_s = 0,5$ cm/min (Nov/22)

pH inicial	Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Remoção de Cor Aparente (%)
6,00	550	6,23	484	34
	600	6,24	462	37
	650	6,21	455	38
	700	6,21	446	39
	750	6,23	441	40
6,50	600	6,77	476	35
	650	6,77	456	38
	700	6,74	444	39
	750	6,77	433	41
7,90	700	7,44	489	33
	750	7,48	470	36

Fonte: Autor (2023)

Tem-se, ainda, que a relação de pH natural x dosagem de PAC demonstrou eficiências de remoção de cor aparente entre 6% e 36%, sendo as dosagens de 650 mg.PAC/L (30% de remoção), 700 mg.PAC/L (33% de remoção) e 750 mg.PAC/L (36% de remoção) com melhor desempenho. Destaca-se que a dosagem de 550 mg.PAC/L apresentou eficiência de 26%,

enquanto para a mesma dosagem e $V_s = 1$ cm/min não houve eficiência no tratamento. A dosagem de 200 mg.PAC/L apresentou a menor eficiência (6% de remoção).

Na Tabela 13 estão expostos os pares de pH natural x mg.PAC/L no tratamento do lixiviado por coag-floc-dec para o parâmetro de cor aparente e $V_s = 0,5$ cm/min.

Tabela 13 – Pares de pH natural x mg.PAC/L para cor aparente e $V_s = 0,5$ cm/min (Nov/22)

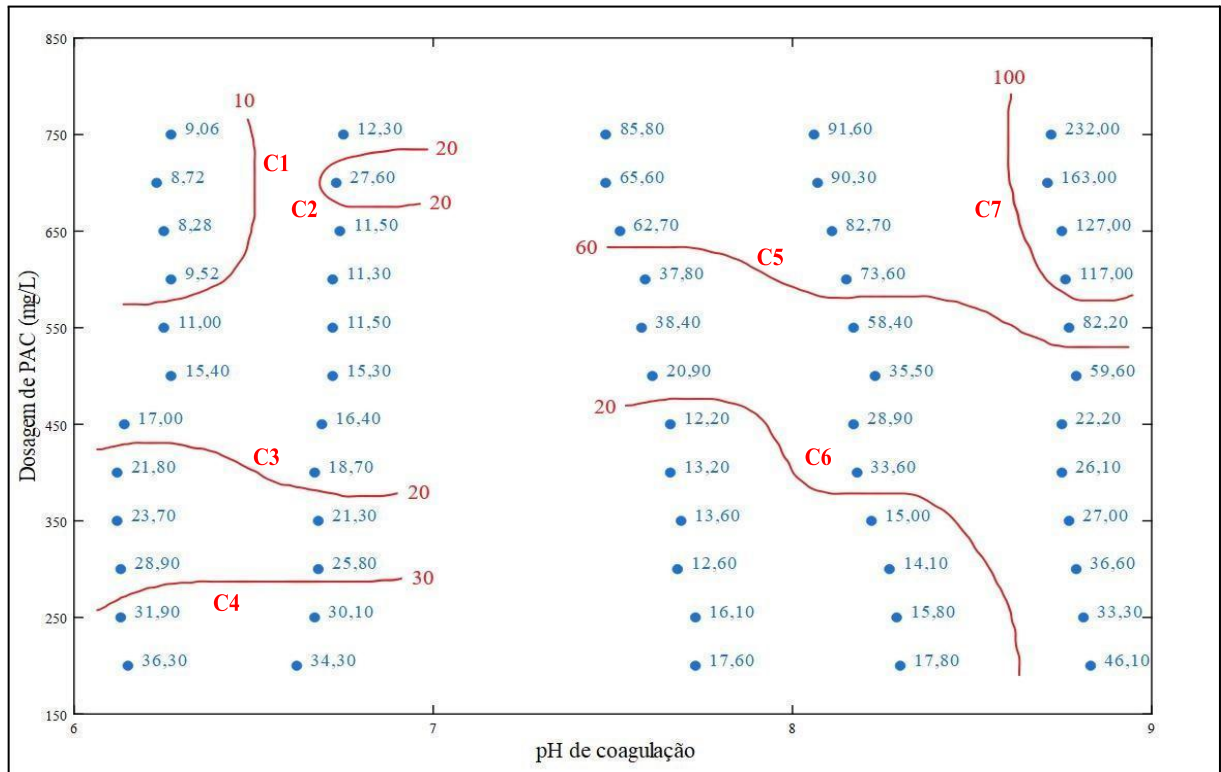
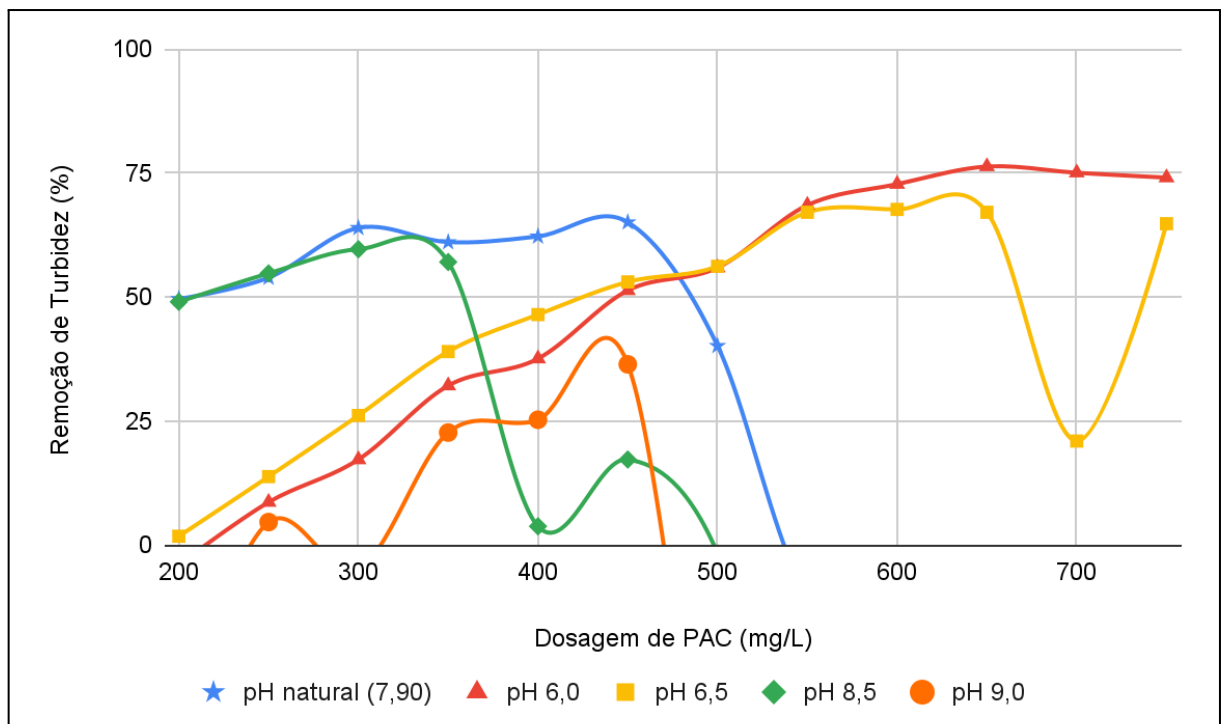
Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Remoção de Cor Aparente (%)
200	7,67	683	6
250	7,64	636	13
300	7,62	590	19
350	7,59	611	16
400	7,59	588	19
450	7,58	554	24
500	7,58	560	23
550	7,55	542	26
600	7,57	521	29
650	7,55	509	30
700	7,44	489	33
750	7,48	470	36

Fonte: Autor (2023)

Tratando-se da turbidez, nos Gráficos 23 e 24 estão apresentados, respectivamente, o diagrama de coagulação e a sua eficiência de remoção, referentes à $V_s = 1$ cm/min.

No diagrama de coagulação para turbidez e $V_s = 1$ cm/min, apresentado no Gráfico 24, pode ser verificado que, a partir das amostras remanescentes dos ensaios de bancada, foi possível traçar curvas de coagulação que representam valores de turbidez de 8 a 10 NTU, 10 a 20 NTU, 20 a 60 NTU, 60 a 100 NTU e 100 a 250 NTU.

A região delimitada à direita pela curva C1 (resultados de 8 a 10 NTU) compreende os pares de pH de coagulação x dosagem de PAC que apresentaram melhor desempenho no tratamento por coag-floc-dec. Observando o Gráfico 24, percebe-se que estes pontos delimitados à direita pela curva C1 demonstraram eficiência de remoção de 73% a 76%.

Gráfico 23 – Diagrama de coagulação para turbidez (NTU) e $V_s = 1$ cm/min (Nov/22)Gráfico 24 – Remoção de turbidez com $V_s = 1$ cm/min (Nov/22)

Na Tabela 14 estão apresentados os pares de pH de coagulação x dosagem de PAC com melhor desempenho no tratamento do lixiviado para a turbidez e $V_s = 1$ cm/min.

Tabela 14 – Melhores pares de pH x mg.PAC/L para turbidez e $V_s = 1$ cm/min (Nov/22)

pH inicial	Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Turbidez (NTU)	Remoção de Turbidez (%)
6,00	600	6,27	9,52	73
	650	6,25	8,28	76
	700	6,23	8,72	75
	750	6,27	9,06	74

Fonte: Autor (2023)

A relação de pH natural x dosagem de PAC, exceto as dosagens de 550 a 750 mg.PAC/L, demonstrou eficiências de remoção de turbidez entre 40% e 64%, sendo as dosagens de 300 mg.PAC/L (64% de remoção) e 450 mg.PAC/L (65% de remoção) com melhor desempenho no tratamento. Para as dosagens de 550 a 750 mg.PAC/L não houve eficiência no tratamento, ou seja, o resultado da turbidez da amostra remanescente foi maior que a turbidez do lixiviado pré-tratado biologicamente.

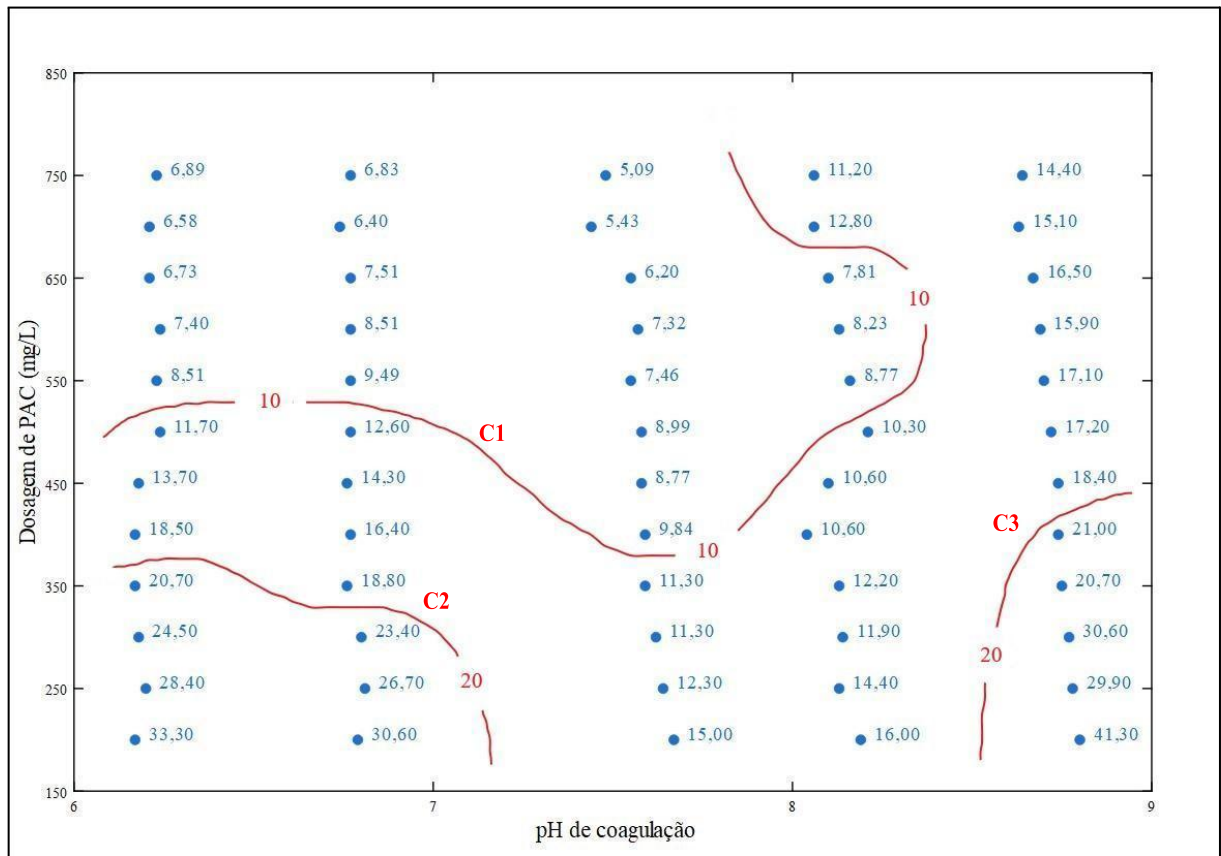
Na Tabela 15 estão expostos os pares de pH natural x mg.PAC/L no tratamento do lixiviado por coag-floc-dec para o parâmetro de turbidez e $V_s = 1$ cm/min.

Tabela 15 – Pares de pH natural x mg.PAC/L para turbidez e $V_s = 1$ cm/min (Nov/22)

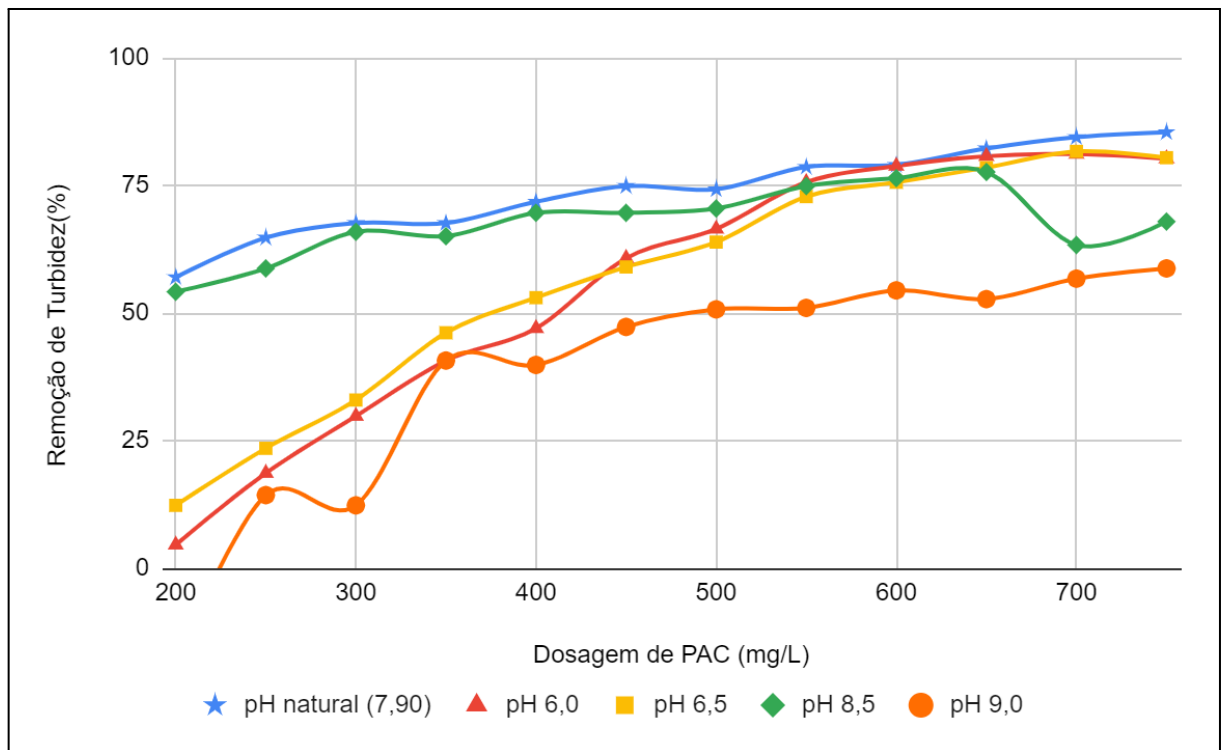
Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Turbidez (NTU)	Remoção de Turbidez (%)
200	7,73	17,60	50
250	7,73	16,10	54
300	7,68	12,60	64
350	7,69	13,60	61
400	7,66	13,20	62
450	7,66	12,20	65
500	7,61	20,90	40
550	7,58	38,40	--
600	7,59	37,80	--
650	7,52	62,70	--
700	7,48	65,60	--
750	7,48	85,80	--

Fonte: Autor (2023)

Para a velocidade de sedimentação de 0,5 cm/min, no Gráfico 25 está apresentado o diagrama de coagulação para a turbidez, enquanto que no Gráfico 26 pode ser analisada a eficiência de remoção de turbidez nos ensaios realizados.

Gráfico 25 – Diagrama de coagulação para turbidez (NTU) e $V_s = 0,5$ cm/min (Nov/22)

Fonte: Autor (2023)

Gráfico 26 – Remoção de turbidez com $V_s = 0,5$ cm/min (Nov/22)

Fonte: Autor (2023)

Observa-se que foi possível traçar curvas de coagulação que representam valores de turbidez de 5 a 10 NTU, 10 a 20 NTU e 20 a 45 NTU. A região acima e delimitada à direita pela curva C1 (resultados de 5 a 10 NTU) compreende os pares de pH de coagulação x dosagem de PAC que apresentaram melhor desempenho no tratamento do lixiviado por coag-floc-dec. Ainda dentro desta mesma região, observa-se valores abaixo de 5 a 6 NTU (pH de coagulação 7,44 - 7,48), correspondendo aos pontos com maior remoção de turbidez.

Analisando o Gráfico 26, os pontos de pH de coagulação x dosagens de PAC da região do diagrama de coagulação com resultados de turbidez de 5 a 10 NTU demonstraram eficiência de remoção de 72% a 85%, sendo os pontos de 5 a 6 NTU de 84% a 85%.

Na Tabela 16 estão apresentados os pares de pH de coagulação x dosagem de PAC com melhor desempenho no tratamento do lixiviado para a turbidez e $V_s = 0,5$ cm/min.

Tabela 16 – Melhores pares de pH x mg.PAC/L para turbidez e $V_s = 0,5$ cm/min (Nov/22)

pH inicial	Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Turbidez (NTU)	Remoção de Turbidez (%)
7,90	700	7,44	5,43	84
	750	7,48	5,09	85

Fonte: Autor (2023)

Na Tabela 17 estão expostos os pares de pH natural x mg.PAC/L no tratamento do lixiviado por coag-floc-dec para o parâmetro de turbidez e $V_s = 1$ cm/min.

Tabela 17 – Pares de pH natural x mg.PAC/L para turbidez e $V_s = 0,5$ cm/min (Nov/22)

Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Turbidez (NTU)	Remoção de Turbidez (%)
200	7,67	15,00	57
250	7,64	12,30	65
300	7,62	11,30	68
350	7,59	11,30	68
400	7,59	9,84	72
450	7,58	8,77	75
500	7,58	8,99	74
550	7,55	7,46	79
600	7,57	7,32	79
650	7,55	6,20	82
700	7,44	5,43	84
750	7,48	5,09	85

Fonte: Autor (2023)

A relação de pH natural x dosagem de PAC demonstrou eficiências de remoção de turbidez entre 57% e 85%, sendo as dosagens de 700 mg.PAC/L (84% de remoção) e 750 mg.PAC/L (85% de remoção) com melhor desempenho no tratamento. Nota-se que para as dosagens de 550 a 750 mg.PAC/L houve eficiência entre 79% e 85%, enquanto para as mesmas dosagens e $V_s = 1$ cm/min não houve eficiência no tratamento.

4.2.3. Janeiro de 2023

Em janeiro/2023 (período de estiagem) o lixiviado pré-tratado biologicamente apresentava as características de pH 8,27, cor aparente 977 uC, turbidez 36,3 NTU e alcalinidade 3640,76 mg.CaCO₃/L. Os ensaios de bancada foram realizados utilizando o coagulante PAC comercial, com as dosagens especificadas na Tabela 2 e velocidades de sedimentação de 1 cm/min e 0,5 cm/min.

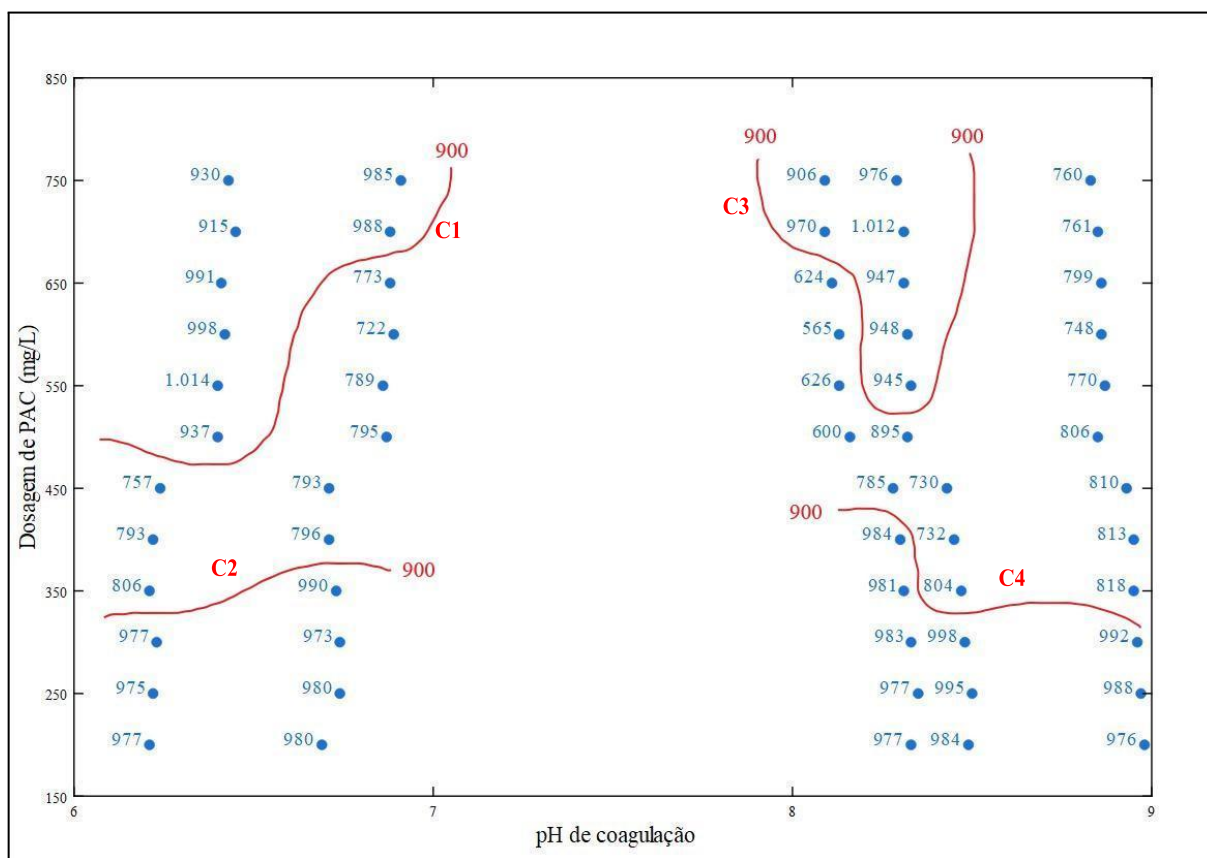
No Gráfico 27 está apresentado o diagrama de coagulação para a cor aparente e velocidade de sedimentação de 1 cm/min, enquanto no Gráfico 28 pode ser visualizada a eficiência de remoção de cor aparente nos ensaios realizados.

No diagrama de coagulação para cor aparente e $V_s = 1,0$ cm/min, visto no Gráfico 27, observa-se que, a partir das amostras remanescentes, foi possível traçar curvas de coagulação que representam valores de cor aparente de 600 a 900 uC e 900 a 1100 uC.

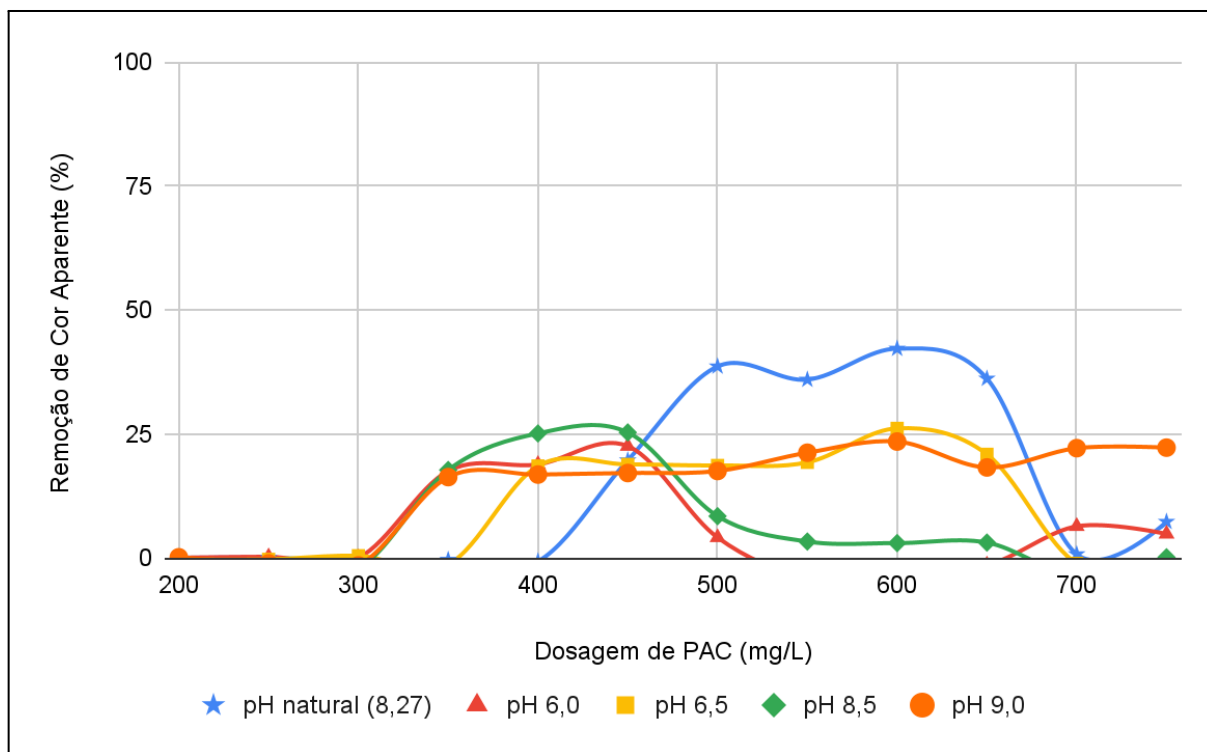
Nota-se que, com base no diagrama de coagulação para cor aparente apontado, a região que apresentou melhor desempenho no tratamento do lixiviado por coag-floc-dec está na faixa de pH de coagulação 8,11 - 8,16 com dosagens de 500 a 650 mg.PAC/L, sendo a dosagem de 600 mg.PAC/L com melhor resultado (565 uC).

A partir do Gráfico 28, os pontos estudados de pH de coagulação x dosagens de PAC da região do diagrama de coagulação com resultados de cor aparente de 600 a 900 uC, demonstraram eficiência de remoção de 8% a 42% de cor aparente. Os pontos estudados com pH de coagulação 8,11 - 8,16 e dosagens de 500 a 650 mg.PAC/L demonstraram eficiência de remoção de 36% a 42% de cor aparente.

Na Tabela 18 é possível ver os pares de pH de coagulação x dosagem de PAC com melhor desempenho no tratamento do lixiviado para cor aparente e $V_s = 1$ cm/min, bem como seus respectivos percentuais de remoção.

Gráfico 27 – Diagrama de coagulação para cor aparente (uC) e $V_s = 1$ cm/min (Jan/23)

Fonte: Autor (2023)

Gráfico 28 – Remoção de cor aparente com $V_s = 1$ cm/min (Jan/23)

Fonte: Autor (2023)

Tabela 18 – Melhores pares de pH x mg.PAC/L para cor aparente e $V_s = 1$ cm/min (Jan/23)

pH inicial	Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Remoção de Cor Aparente (%)
8,27	500	8,16	600	39
	550	8,13	626	36
	600	8,13	565	42
	650	8,11	624	36

Fonte: Autor (2023)

Nota-se, ainda, que a relação de pH natural x dosagem de PAC demonstrou eficiências de remoção de cor aparente entre 0% e 42%, sendo a dosagem de 600 mg.PAC/L (42% de remoção) com melhor desempenho. Destaca-se que as dosagens de 200 a 400 mg.PAC/L não apresentaram eficiência no tratamento, ou seja, o resultado da cor aparente da amostra remanescente foi maior que a cor aparente do lixiviado pré-tratado biologicamente.

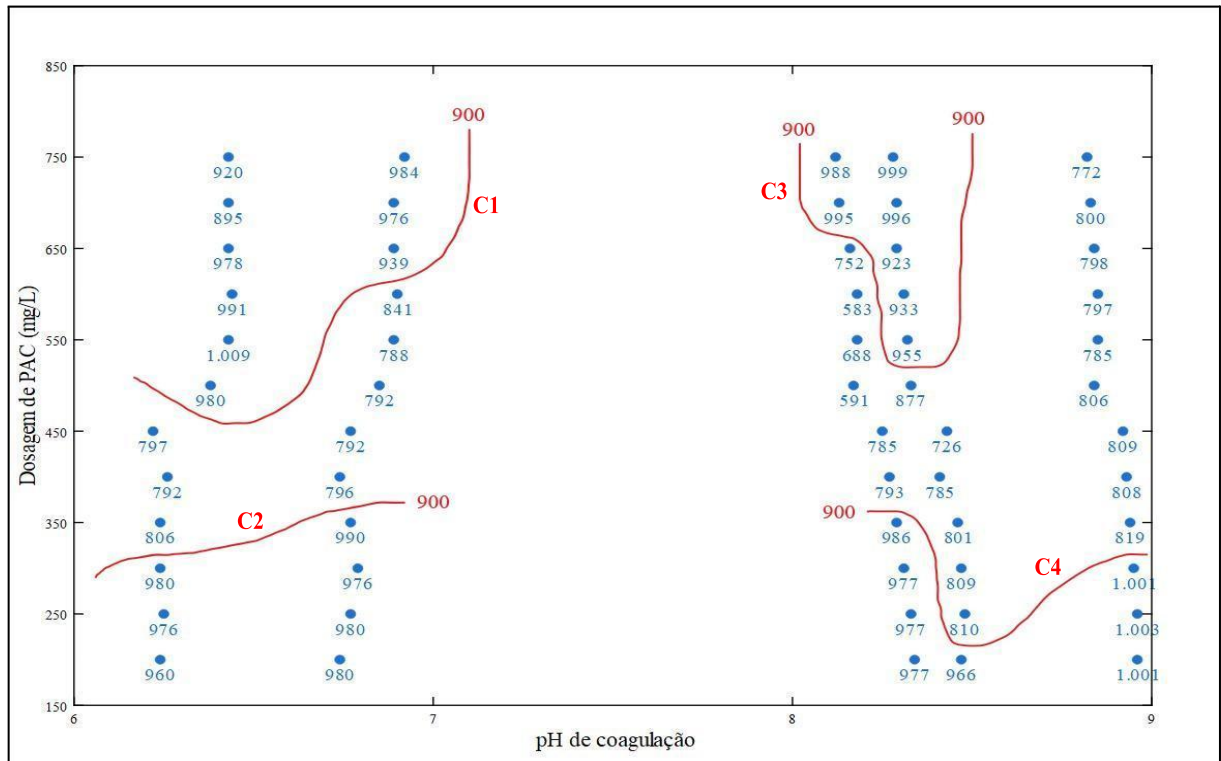
Na Tabela 19 estão expostos os pares de pH natural x mg.PAC/L no tratamento do lixiviado por coag-floc-dec para o parâmetro de cor aparente e $V_s = 1$ cm/min.

Tabela 19 – Pares de pH natural x mg.PAC/L para cor aparente e $V_s = 1$ cm/min (Jan/23)

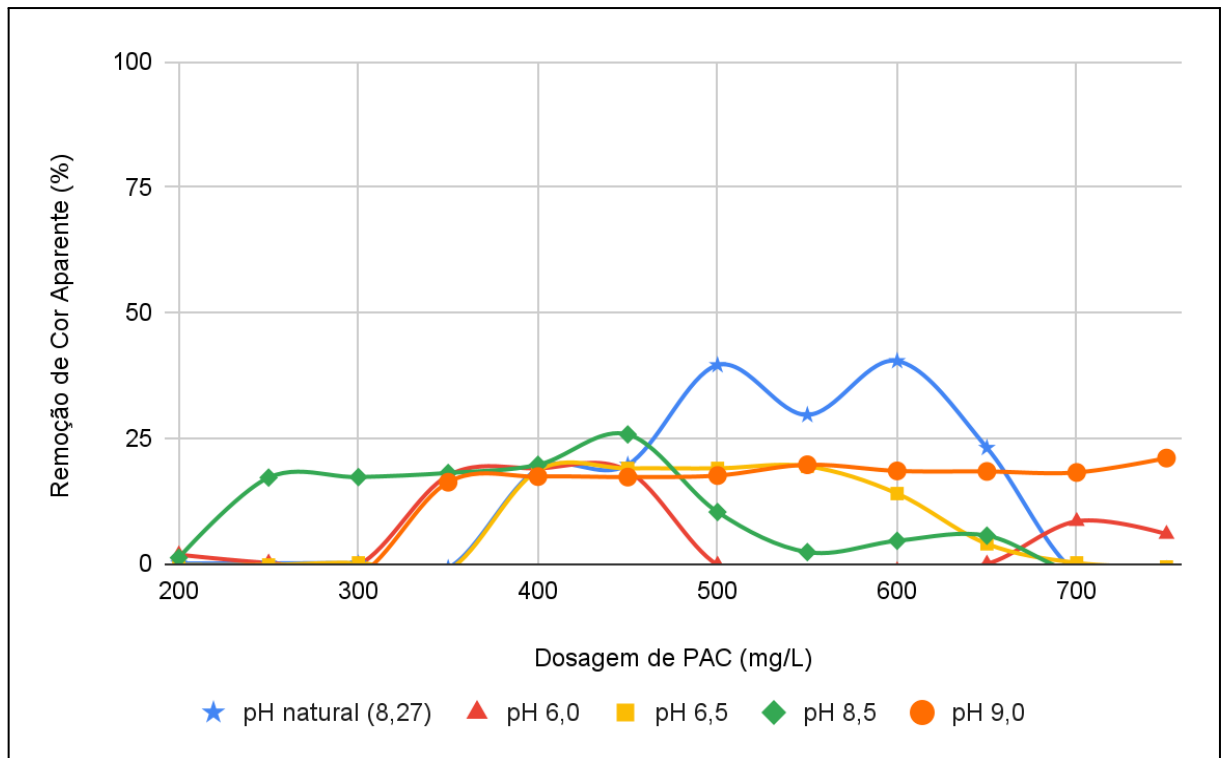
Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Remoção de Cor Aparente (%)
200	8,33	977	0
250	8,35	977	0
300	8,33	983	--
350	8,31	981	0
400	8,30	984	--
450	8,28	785	20
500	8,16	600	39
550	8,13	626	36
600	8,13	565	42
650	8,11	624	36
700	8,09	970	1
750	8,09	906	7

Fonte: Autor (2023)

Para a velocidade de sedimentação de 0,5 cm/min, no Gráfico 29 está exibido o diagrama de coagulação para a cor aparente, ao passo que no Gráfico 30 pode ser analisada a eficiência de remoção de cor aparente nos ensaios realizados.

Gráfico 29 – Diagrama de coagulação para cor aparente (uC) e $V_s = 0,5$ cm/min (Jan/23)

Fonte: Autor (2023)

Gráfico 30 – Remoção de cor aparente com $V_s = 0,5$ cm/min (Jan/23)

Fonte: Autor (2023)

Observa-se que, semelhante ao diagrama de coagulação visto no Gráfico 27, foi possível traçar curvas de coagulação que representam valores de cor aparente de 600 a 900 uC

e 900 a 1100 uC. Nesse caso, a região que apresentou melhor desempenho no tratamento do lixiviado por coag-floc-dec, para o parâmetro de cor aparente, está na faixa de pH de coagulação 8,17 - 8,18 com dosagens de 500 a 600 mg.PAC/L.

Analisando o Gráfico 30, os pontos estudados de pH de coagulação x dosagens de PAC da região do diagrama de coagulação com resultados de cor aparente de 600 a 900 uC, demonstraram eficiência de remoção de 8% a 40% de cor aparente. Os pontos estudados com pH de coagulação 8,17 - 8,18 e dosagens de 500 a 600 mg.PAC/L demonstraram eficiência de remoção de 30% a 40% de cor aparente.

Na Tabela 20 é possível ver os pares de pH de coagulação x dosagem de PAC com melhor desempenho no tratamento do lixiviado para o parâmetro de cor aparente e $V_s = 0,5$ cm/min, bem como seus respectivos percentuais de remoção.

Tabela 20 – Melhores pares de pH x mg.PAC/L para cor aparente e $V_s = 0,5$ cm/min (Jan/23)

pH inicial	Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Remoção de Cor Aparente (%)
8,27	500	8,17	591	40
	550	8,18	688	30
	600	8,18	583	40

Fonte: Autor (2023)

Na Tabela 21 estão expostos os pares de pH natural x mg.PAC/L no tratamento do lixiviado por coag-floc-dec para o parâmetro de cor aparente e $V_s = 1$ cm/min.

Tabela 21 – Pares de pH natural x mg.PAC/L para cor aparente e $V_s = 0,5$ cm/min (Jan/23)

Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Remoção de Cor Aparente (%)
200	8,34	977	0
250	8,33	977	0
300	8,31	977	0
350	8,29	986	--
400	8,27	793	19
450	8,25	785	20
500	8,17	591	40
550	8,18	688	30
600	8,18	583	40
650	8,16	752	23
700	8,13	995	--
750	8,12	988	--

Fonte: Autor (2023)

Percebe-se, ainda, que a relação de pH natural x dosagem de PAC demonstrou eficiências de remoção de cor aparente entre 0% e 40%, sendo a dosagem de 600 mg.PAC/L (40% de remoção) com melhor desempenho. Destaca-se que as dosagens de 200 a 350 mg.PAC/L e 700 a 750 mg.PAC/L não apresentaram eficiência no tratamento.

Referentes à turbidez, nos Gráficos 31 e 32 estão apresentados, respectivamente, o diagrama de coagulação e a sua eficiência de remoção nos ensaios de bancada realizados, referentes à $V_s = 1$ cm/min.

No diagrama de coagulação para turbidez e $V_s = 1$ cm/min, foi possível traçar curvas que representam valores de turbidez de 15 a 20 NTU, 20 a 30 NTU e 30 a 35 NTU.

A região delimitada à direita pela curva C1 (resultados de 15 a 20 NTU) compreende os pares de pH de coagulação x dosagem de PAC que apresentaram melhor desempenho no tratamento por coag-floc-dec, com eficiência de remoção de 47% a 56%.

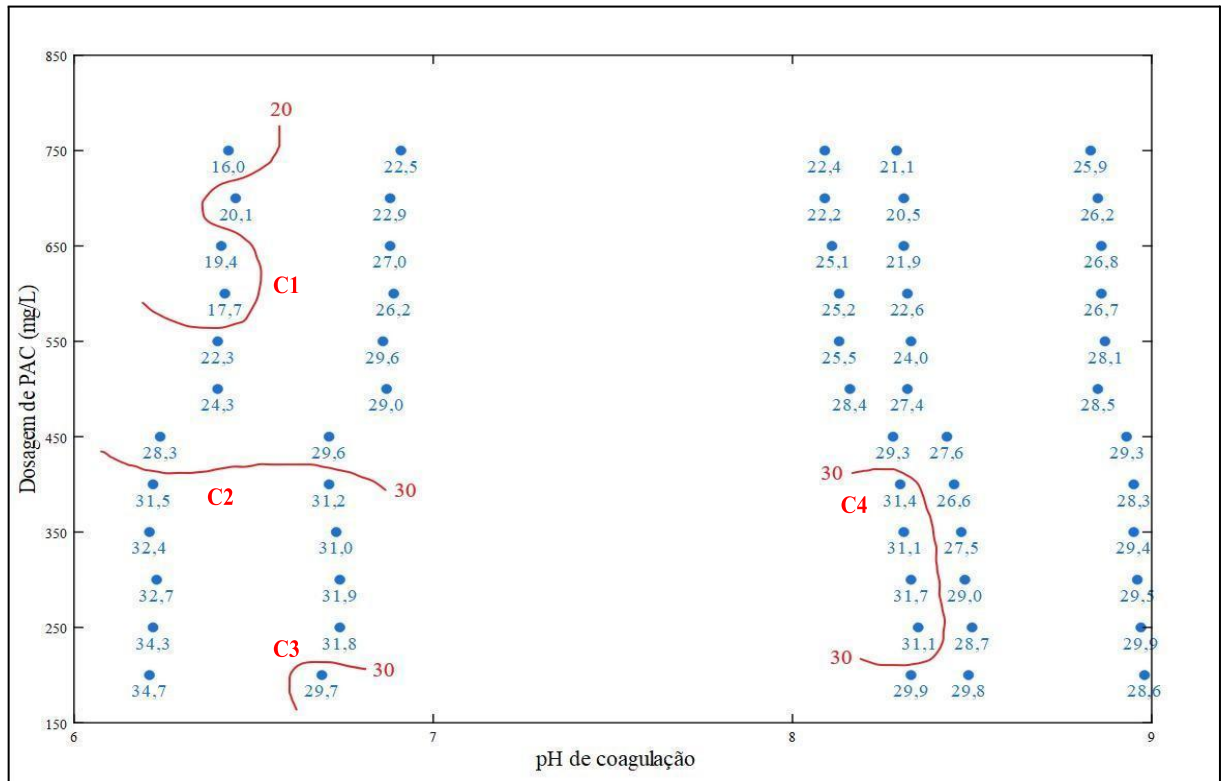
Na Tabela 22 estão apresentados os pares de pH de coagulação x dosagem de PAC com melhor desempenho no tratamento do lixiviado para a turbidez e $V_s = 1$ cm/min.

Tabela 22 – Melhores pares de pH x mg.PAC/L para turbidez e $V_s = 1$ cm/min (Jan/23)

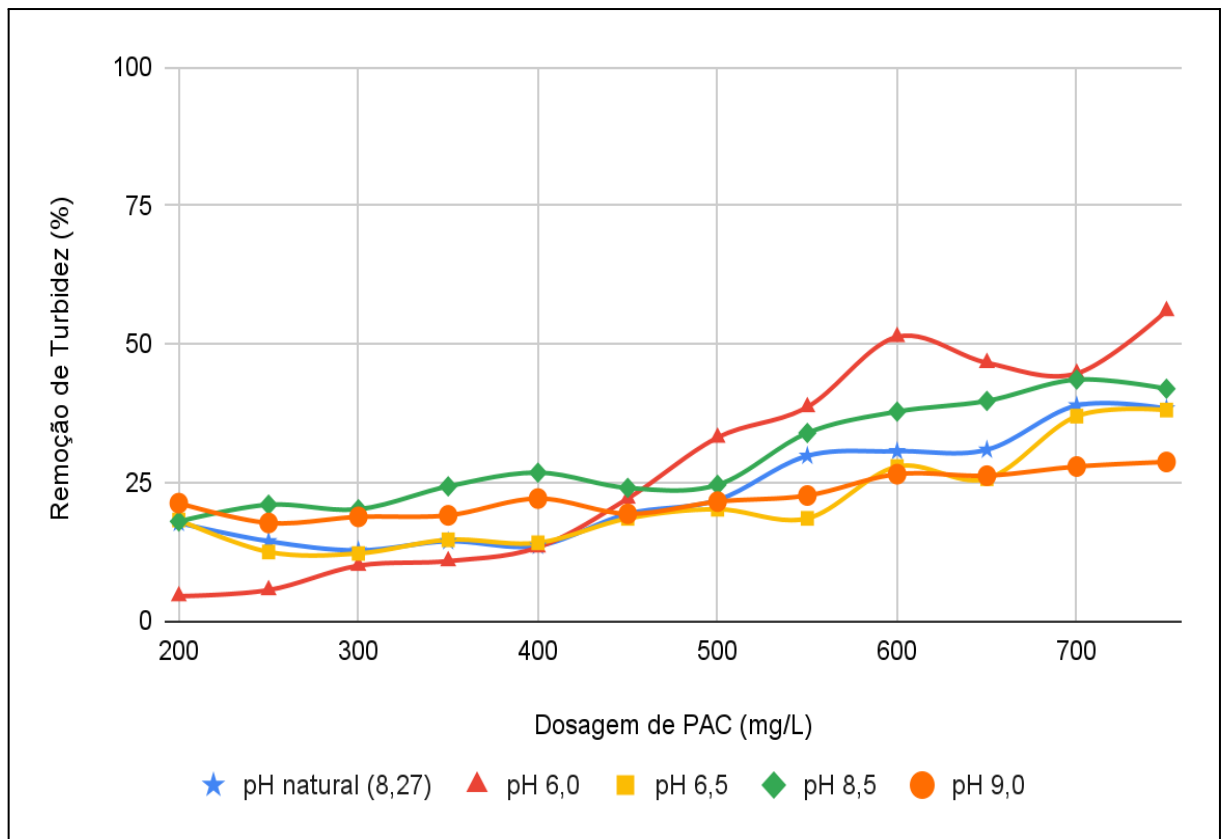
pH inicial	Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Turbidez (NTU)	Remoção de Turbidez (%)
6,00	600	6,42	17,70	51
	650	6,41	19,40	47
	750	6,43	16,00	56

Fonte: Autor (2023)

A relação de pH natural x dosagem de PAC demonstrou eficiências de remoção de turbidez entre 13% e 39%, sendo as dosagens de 700 mg.PAC/L (39% de remoção) e 750 mg.PAC/L (38% de remoção) com melhor desempenho no tratamento. Na Tabela 23 estão expostos os pares de pH natural x mg.PAC/L no tratamento do lixiviado por coag-floc-dec para o parâmetro de turbidez e $V_s = 1$ cm/min.

Gráfico 31 – Diagrama de coagulação para turbidez (NTU) e $V_s = 1$ cm/min (Jan/23)

Fonte: Autor (2023)

Gráfico 32 – Remoção de turbidez com $V_s = 1$ cm/min (Jan/23)

Fonte: Autor (2023)

Tabela 23 – Pares de pH natural x mg.PAC/L para turbidez e $V_s = 1$ cm/min (Jan/23)

Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Turbidez (NTU)	Remoção de Turbidez (%)
200	8,33	29,90	18
250	8,35	31,10	14
300	8,33	31,70	13
350	8,31	31,10	14
400	8,30	31,40	13
450	8,28	29,30	19
500	8,16	28,40	22
550	8,13	25,50	30
600	8,13	25,20	31
650	8,11	25,10	31
700	8,09	22,20	39
750	8,09	22,40	38

Fonte: Autor (2023)

Na Tabela 24 estão apresentados os pares de pH de coagulação x dosagem de PAC com melhor desempenho no tratamento do lixiviado para a turbidez e $V_s = 0,5$ cm/min.

Tabela 24 – Melhores pares de pH x mg.PAC/L para turbidez e $V_s = 0,5$ cm/min (Jan/23)

pH inicial	Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Turbidez (NTU)	Remoção de Turbidez (%)
6,00	650	6,43	16,60	54
	700	6,43	15,80	56
	750	6,43	13,70	62

Fonte: Autor (2023)

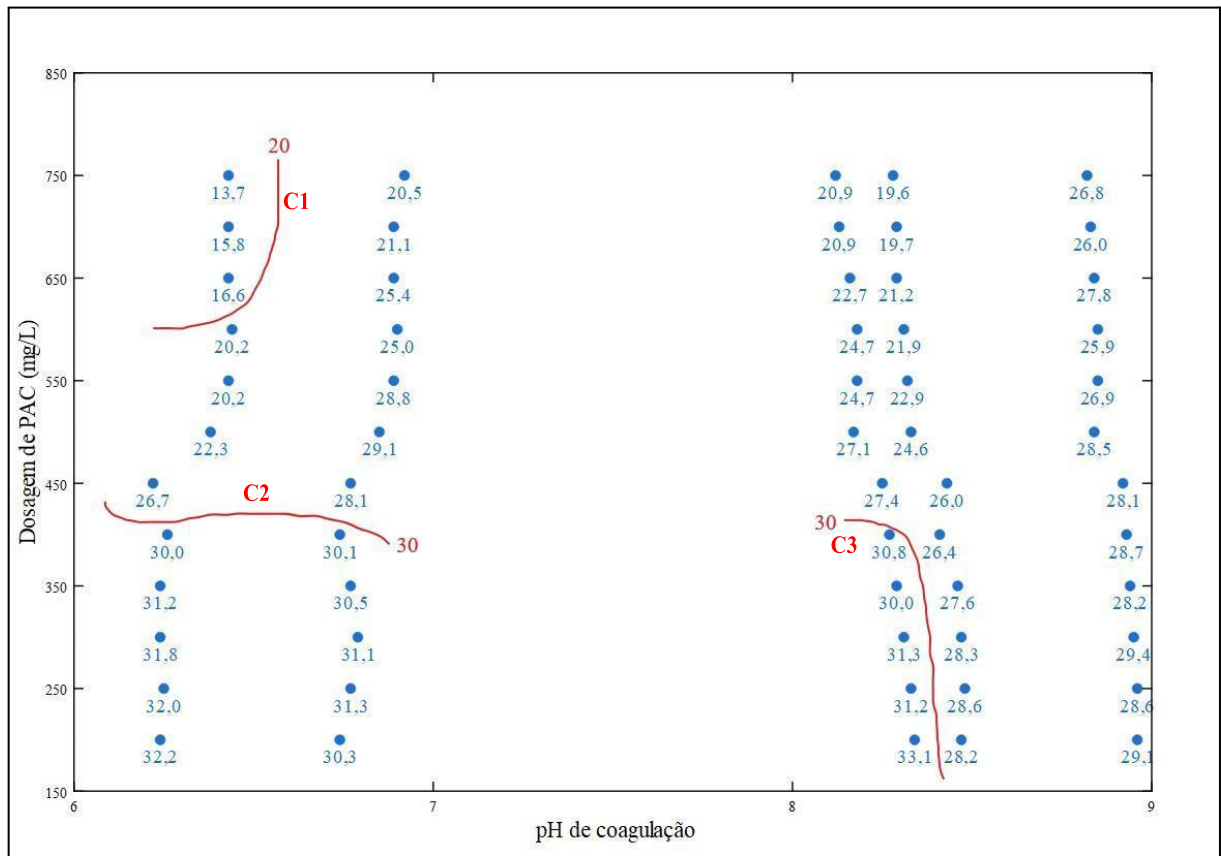
Na Tabela 25, a relação de pH natural x dosagem de PAC demonstrou eficiências de remoção de turbidez entre 9% e 42%, sendo as dosagens de 700 mg.PAC/L (42% de remoção) e 750 mg.PAC/L (42% de remoção) com melhor desempenho no tratamento.

Ainda em relação à turbidez, nos Gráficos 33 e 34 estão exibidos, respectivamente, o diagrama de coagulação e a sua eficiência de remoção, referentes à $V_s = 0,5$ cm/min.

No diagrama de coagulação para turbidez e $V_s = 0,5$ cm/min, foi possível traçar curvas que representam valores de turbidez de 15 a 20 NTU, 20 a 30 NTU e 30 a 35 NTU.

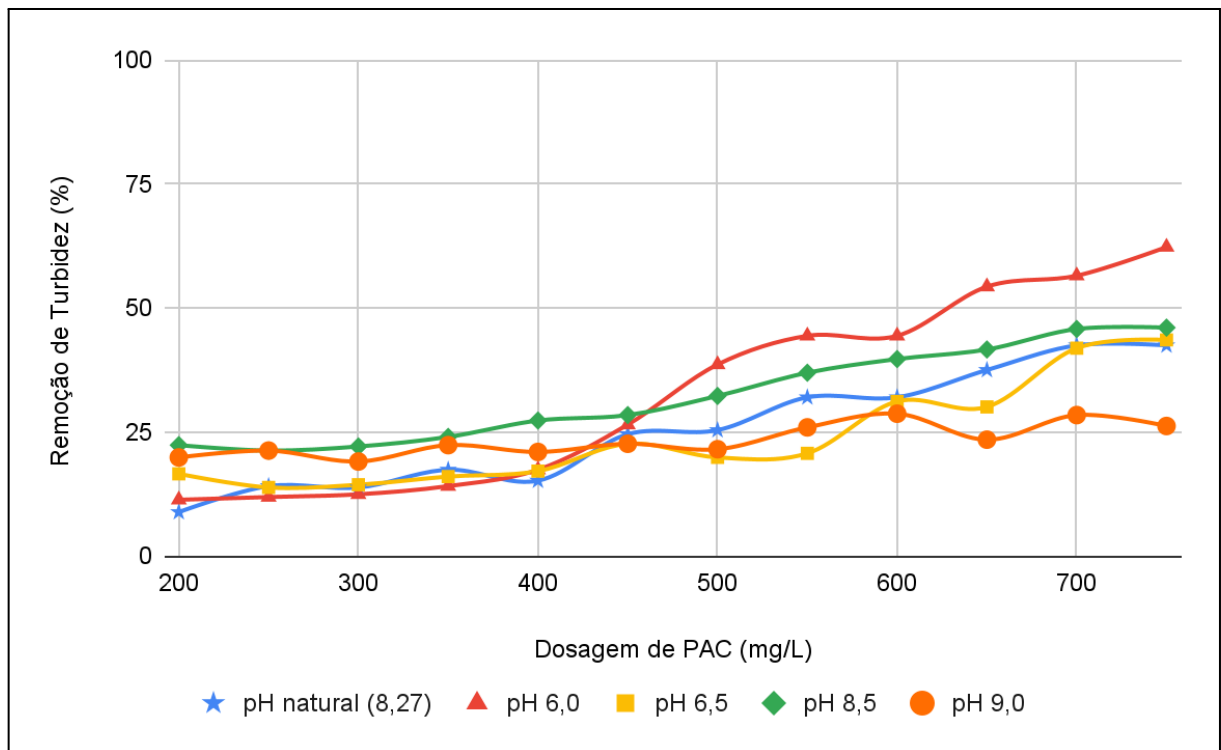
A região delimitada à direita pela curva C1 (resultados de 15 a 20 NTU) compreende os pares de pH de coagulação x dosagem de PAC que apresentaram melhor desempenho no tratamento por coag-floc-dec, com eficiência de remoção de 54% a 62%.

Gráfico 33 – Diagrama de coagulação para turbidez (NTU) e $V_s = 0,5$ cm/min (Jan/23)



Fonte: Autor (2023)

Gráfico 34 – Remoção de turbidez com $V_s = 0,5$ cm/min (Jan/23)



Fonte: Autor (2023)

Na Tabela 25 estão expostos os pares de pH natural x mg.PAC/L no tratamento do lixiviado por coag-floc-dec para o parâmetro de turbidez e $V_s = 0,5$ cm/min.

Tabela 25 – Pares de pH natural x mg.PAC/L para turbidez e $V_s = 0,5$ cm/min (Jan/23)

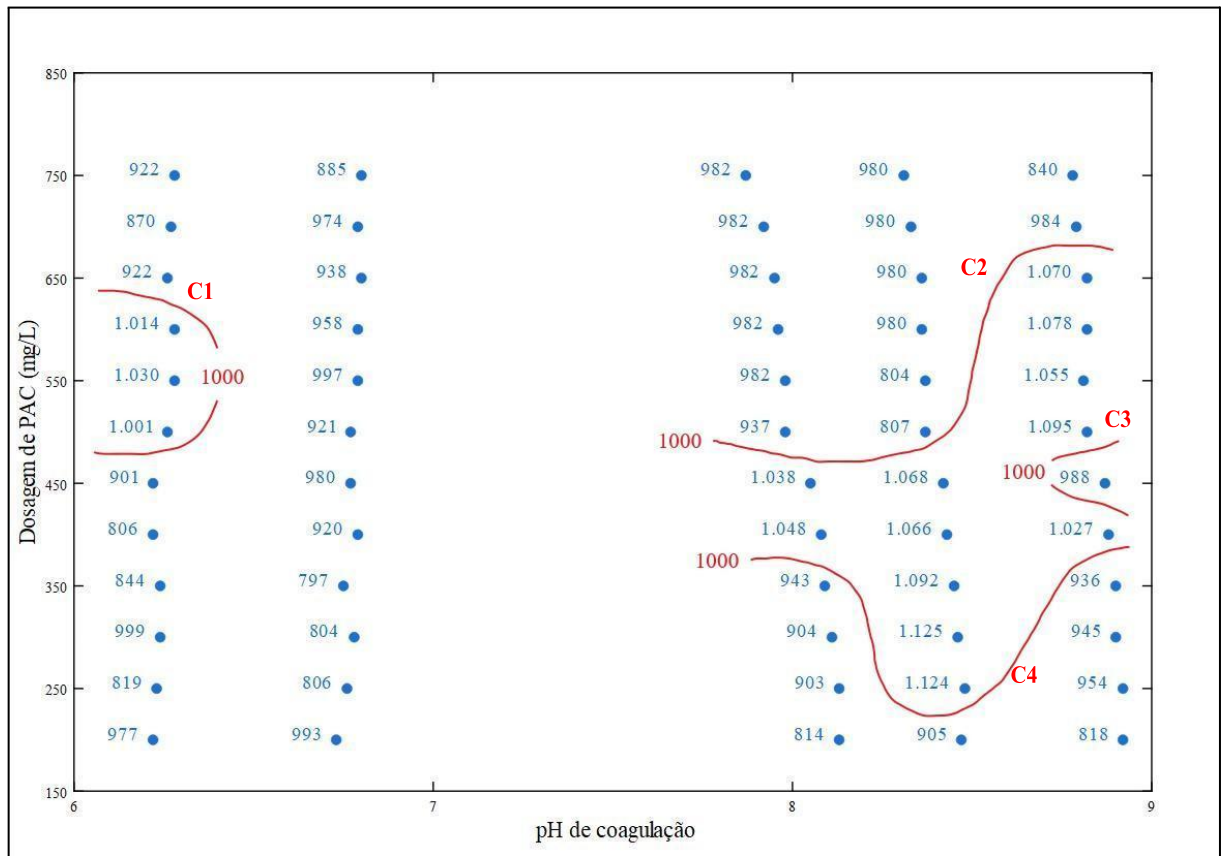
Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Turbidez (NTU)	Remoção de Turbidez (%)
200	8,34	33,10	9
250	8,33	31,20	14
300	8,31	31,30	14
350	8,29	30,00	17
400	8,27	30,80	15
450	8,25	27,40	25
500	8,17	27,10	25
550	8,18	24,70	32
600	8,18	24,70	32
650	8,16	22,70	37
700	8,13	20,90	42
750	8,12	20,90	42

Fonte: Autor (2023)

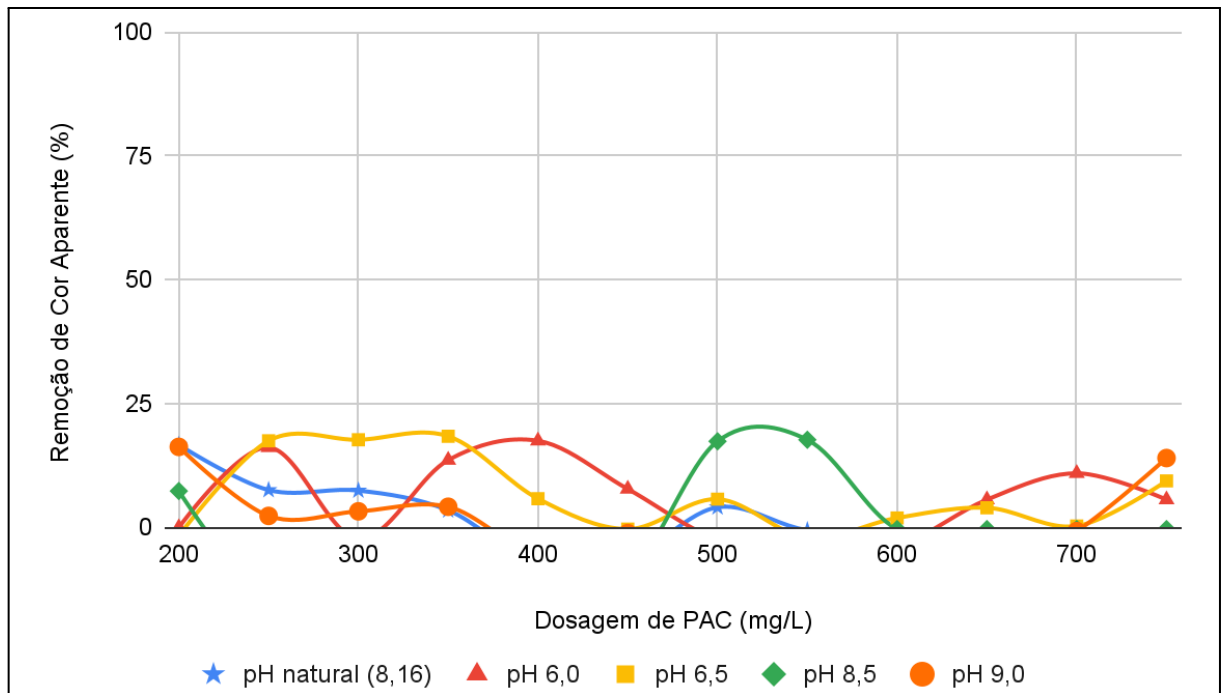
4.2.4. Fevereiro de 2023

Em fevereiro/2023 (período de estiagem) o lixiviado pré-tratado biologicamente apresentava as características de pH 8,16, cor aparente 976 uC, turbidez 27,6 NTU e alcalinidade 2485,90 mg.CaCO₃/L. Os ensaios de bancada foram realizados utilizando o coagulante PAC comercial, com as dosagens especificadas na Tabela 2, em conjunto com o polímero aniônico (dosagem de 0,1% do volume da amostra em cada jarro do jar test).

No Gráfico 35 está apresentado o diagrama de coagulação para a cor aparente e velocidade de sedimentação de 1 cm/min, enquanto no Gráfico 36 pode ser visualizada a eficiência de remoção de cor aparente nos ensaios realizados.

Gráfico 35 – Diagrama de coagulação para cor aparente (uC) e $V_s = 1$ cm/min (Fev/23)

Fonte: Autor (2023)

Gráfico 36 – Remoção de cor aparente com $V_s = 1$ cm/min (Fev/23)

Fonte: Autor (2023)

No diagrama de coagulação para cor aparente e $V_s = 1,0$ cm/min, visto no Gráfico 35, observa-se que, a partir das amostras remanescentes, foi possível traçar curvas de coagulação que representam valores de cor aparente de 700 a 1000 uC e 1000 a 1200 uC.

Nota-se que, com base no diagrama de coagulação para cor aparente apontado, a região que apresentou melhor desempenho no tratamento do lixiviado por coag-floc-dec está na faixa de pH de coagulação 6,75 - 6,78 com dosagens de 300 e 350 mg.PAC/L.

Analisando o Gráfico 36, os pontos estudados de pH de coagulação x dosagens de PAC da região do diagrama de coagulação com resultados de cor aparente de 400 a 500 uC, demonstraram eficiência de remoção de 0% a 18% de cor aparente, sendo a região com pH de coagulação 6,75 - 6,78 e dosagens de 300 e 350 mg.PAC/L com 18%.

Na Tabela 26 é possível ver o par de pH de coagulação x dosagem de PAC com melhor desempenho no tratamento do lixiviado para o parâmetro de cor aparente e $V_s = 1$ cm/min, bem como seu respectivo percentual de remoção.

Tabela 26 – Melhores pares de pH x mg.PAC/L para cor aparente e $V_s = 1$ cm/min (Fev/23)

pH inicial	Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Remoção de Cor Aparente (%)
6,50	300	6,78	804	18
	350	6,75	797	18

Fonte: Autor (2023)

Na Tabela 27 estão expostos os pares de pH natural x mg.PAC/L no tratamento do lixiviado por coag-floc-dec para o parâmetro de cor aparente e $V_s = 1$ cm/min.

Tabela 27 – Pares de pH natural x mg.PAC/L para cor aparente e $V_s = 1$ cm/min (Fev/23)

Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Remoção de Cor Aparente (%)
200	8,13	814	17
250	8,13	903	7
300	8,11	904	7
350	8,09	943	3
400	8,08	1048	--
450	8,05	1038	--
500	7,98	937	4
550	7,98	982	--
600	7,96	982	--
650	7,95	982	--
700	7,92	982	--
750	7,87	982	--

Fonte: Autor (2023)

Nota-se, ainda, que a relação de pH natural x dosagem de PAC demonstrou eficiências de remoção de cor aparente entre 3% e 17%, sendo a dosagem de 200 mg.PAC/L (17% de remoção) com melhor desempenho. Destaca-se que as dosagens de 400 a 750 mg.PAC/L (exceto a dosagem de 500 mg.PAC/L) não apresentaram eficiência no tratamento.

Para a velocidade de sedimentação de 0,5 cm/min, no Gráfico 37 está exibido o diagrama de coagulação para a cor aparente, ao passo que no Gráfico 38 pode ser analisada a eficiência de remoção de cor aparente nos ensaios realizados.

Observa-se que, semelhante ao diagrama de coagulação ilustrado no Gráfico 35 (resultados de cor aparente e $V_s = 1\text{cm/min}$), foi possível traçar curvas de coagulação que representam valores de cor aparente de 700 a 1000 uC e 1000 a 1200 uC. Nesse caso, a região que apresentou melhor desempenho no tratamento do lixiviado por coag-floc-dec está na faixa de pH de coagulação 6,76 - 6,77 com dosagens de 250 mg.PAC/L a 350 mg.PAC/L.

A partir da análise do Gráfico 38, os pontos estudados de pH de coagulação x dosagens de PAC da região do diagrama de coagulação com resultados de cor aparente de 700 a 1000 uC, demonstraram eficiência de remoção de 1% a 18% de cor aparente. Os pontos estudados com pH de coagulação 6,76 - 6,77 e dosagens de 250 mg.PAC/L a 350 mg.PAC/L demonstraram eficiência de remoção de 18% de cor aparente.

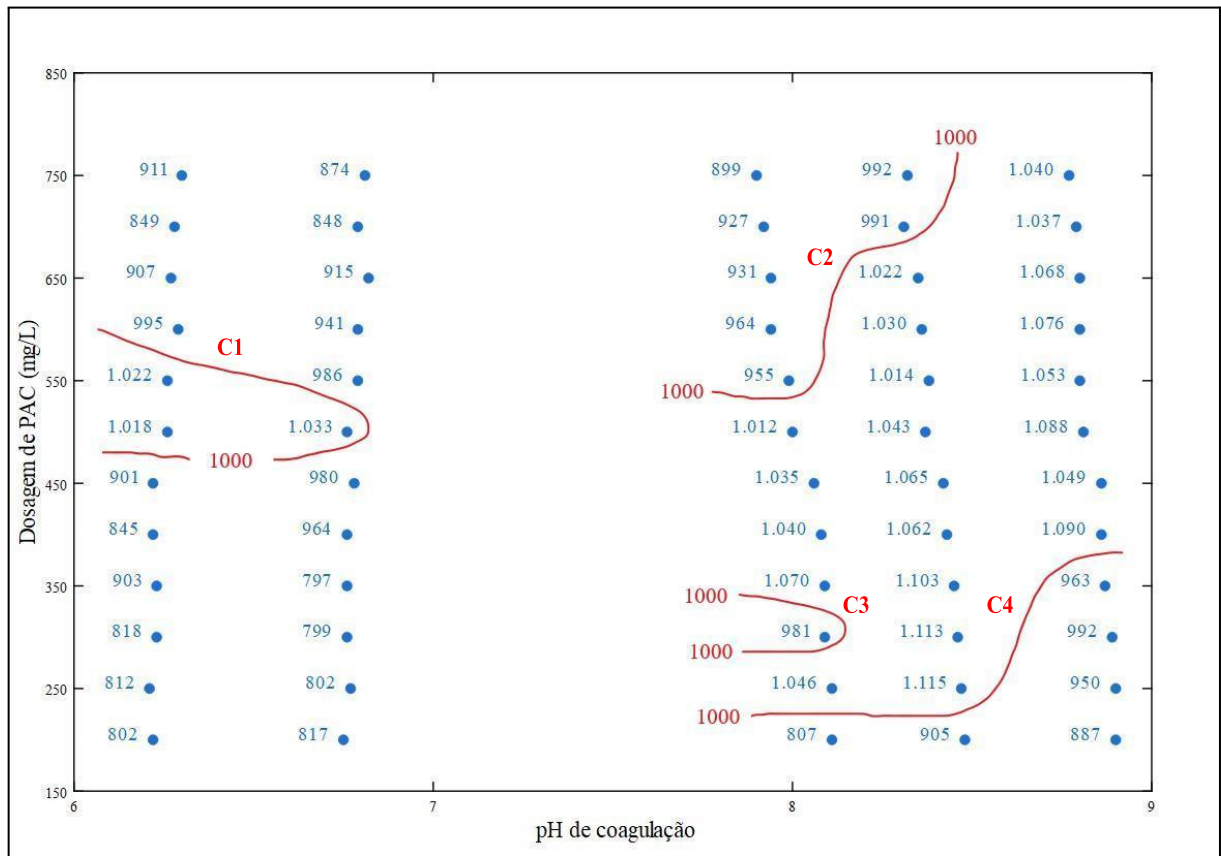
Na Tabela 28 é possível ver os pares de pH de coagulação x dosagem de PAC com melhor desempenho no tratamento do lixiviado para o parâmetro de cor aparente e $V_s = 0,5\text{ cm/min}$, bem como seus respectivos percentuais de remoção.

A relação de pH natural x dosagem de PAC demonstrou eficiências de remoção de cor aparente entre 1% e 17%, sendo a dosagem de 200 mg.PAC/L (17% de remoção) com melhor desempenho. Todavia, as dosagens de 250 a 500 mg.PAC/L não apresentaram eficiência.

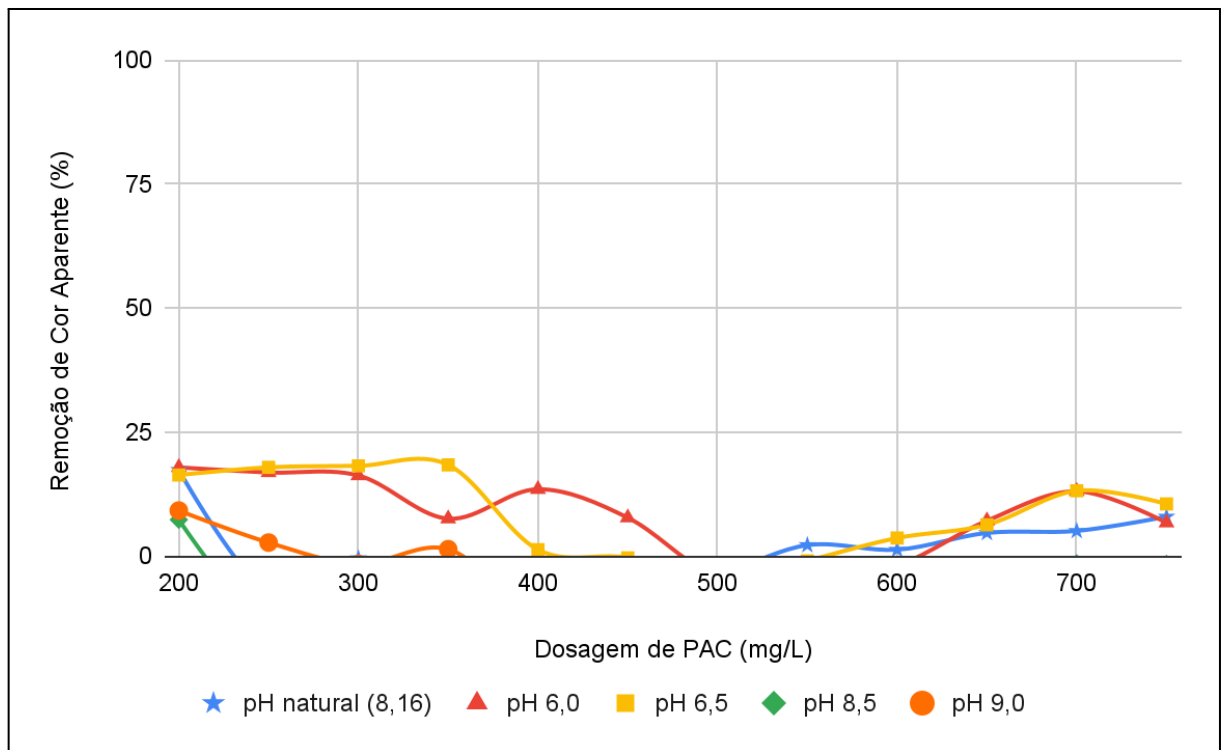
Tabela 28 – Melhores pares de pH x mg.PAC/L para cor aparente e $V_s = 0,5\text{ cm/min}$ (Fev/23)

pH inicial	Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Remoção de Cor Aparente (%)
6,50	250	6,77	802	18
	300	6,76	799	18
	350	6,76	797	18

Fonte: Autor (2023)

Gráfico 37 – Diagrama de coagulação para cor aparente (uC) e $V_s = 0,5$ cm/min (Fev/23)

Fonte: Autor (2023)

Gráfico 38 – Remoção de cor aparente com $V_s = 0,5$ cm/min (Fev/23)

Fonte: Autor (2023)

Na Tabela 29 estão expostos os pares de pH natural x mg.PAC/L no tratamento do lixiviado por coag-floc-dec para o parâmetro de cor aparente e $V_s = 0,5$ cm/min.

Tabela 29 – Pares de pH natural x mg.PAC/L para cor aparente e $V_s = 0,5$ cm/min (Fev/23)

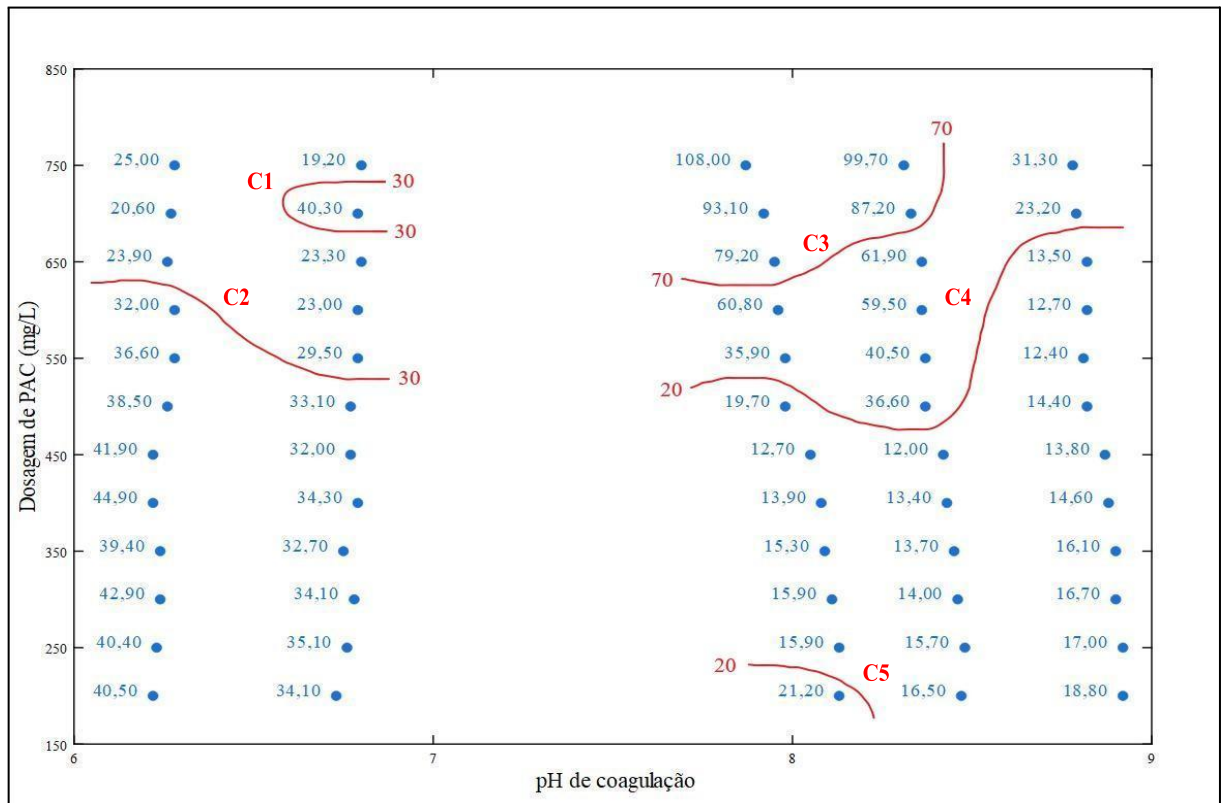
Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Remoção de Cor Aparente (%)
200	8,11	807	17
250	8,11	1046	--
300	8,09	981	--
350	8,09	1070	--
400	8,08	1040	--
450	8,06	1035	--
500	8,00	1012	--
550	7,99	955	2
600	7,94	964	1
650	7,94	931	5
700	7,92	927	5
750	7,90	899	8

Fonte: Autor (2023)

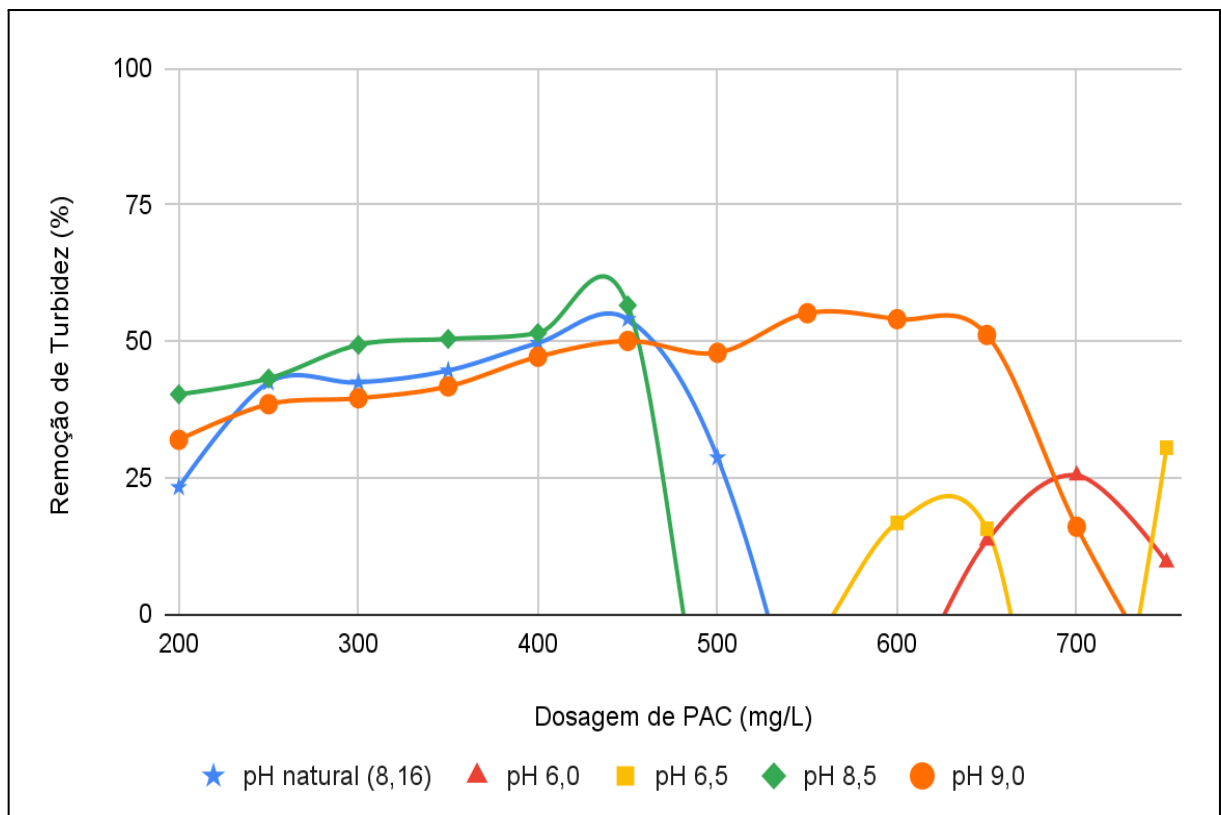
Em relação à turbidez, nos Gráficos 39 e 40 estão apresentados, respectivamente, o diagrama de coagulação e a sua eficiência de remoção, referentes à $V_s = 1$ cm/min.

No diagrama de coagulação para turbidez e $V_s = 1$ cm/min, visto no Gráfico 39, pode ser verificado que, a partir das amostras remanescentes dos ensaios de bancada, foi possível traçar curvas de coagulação que representam valores de turbidez de 12 a 20 NTU, 20 a 70 NTU e 70 a 100 NTU.

A região delimitada entre as curvas C4 e C5 (resultados de 12 a 20 NTU) compreende os pares de pH de coagulação x dosagem de PAC que apresentaram melhor desempenho no tratamento por coag-floc-dec. O par de pH de coagulação 6,80 x dosagem de 750 mg.PAC/L também apresentou resultado de 12 a 20 NTU. Observando o Gráfico 40, percebe-se que estes pares de pH de coagulação x mg.PAC/L demonstraram eficiência de remoção de 29% a 57%.

Gráfico 39 – Diagrama de coagulação para turbidez (NTU) e $V_s = 1$ cm/min (Fev/23)

Fonte: Autor (2023)

Gráfico 40 – Remoção de turbidez com $V_s = 1$ cm/min (Fev/23)

Fonte: Autor (2023)

Ainda em relação à região com turbidez de 12 a 20 NTU, observa-se que os melhores resultados estão entre 12 NTU a 13 NTU, com eficiência de remoção de 54% a 57%. Na Tabela 30 estão apresentados os pares de pH de coagulação x dosagem de PAC com melhor desempenho no tratamento do lixiviado para o parâmetro de turbidez e $V_s = 1$ cm/min.

Tabela 30 – Melhores pares de pH x mg.PAC/L para turbidez e $V_s = 1$ cm/min (Fev/23)

pH inicial	Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Turbidez (NTU)	Remoção de Turbidez (%)
8,16	450	8,05	12,70	54
8,50	450	8,42	12,00	57
9,00	550	8,81	12,40	55
	600	8,82	12,70	54

Fonte: Autor (2023)

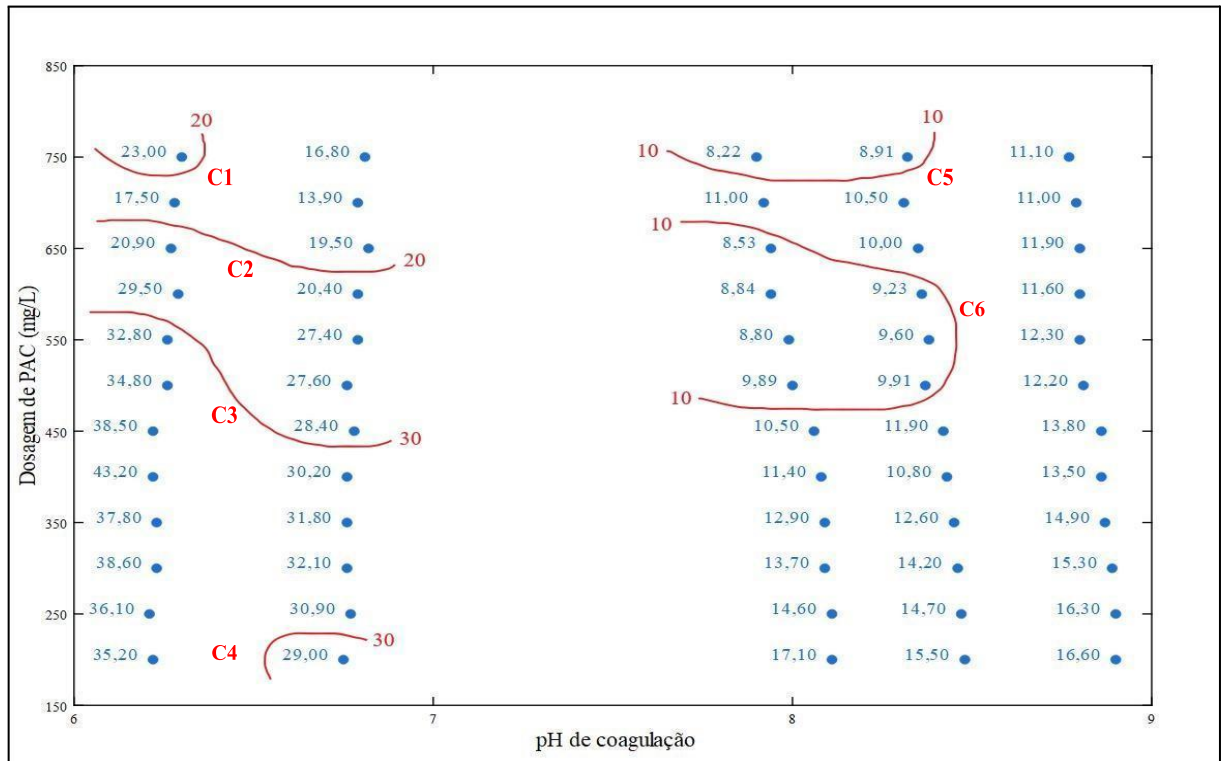
A relação de pH natural x dosagem de PAC demonstrou eficiências de remoção de turbidez entre 23% e 54%, sendo a dosagem de 450 mg.PAC/L (54% de remoção) com melhor desempenho no tratamento. As dosagens de 550 a 750 mg.PAC/L não apresentaram eficiência no tratamento. Na Tabela 31 estão expostos os pares de pH natural x mg.PAC/L no tratamento do lixiviado por coag-floc-dec para o parâmetro de turbidez e $V_s = 1$ cm/min.

Tabela 31 – Pares de pH natural x mg.PAC/L para turbidez e $V_s = 1$ cm/min (Fev/23)

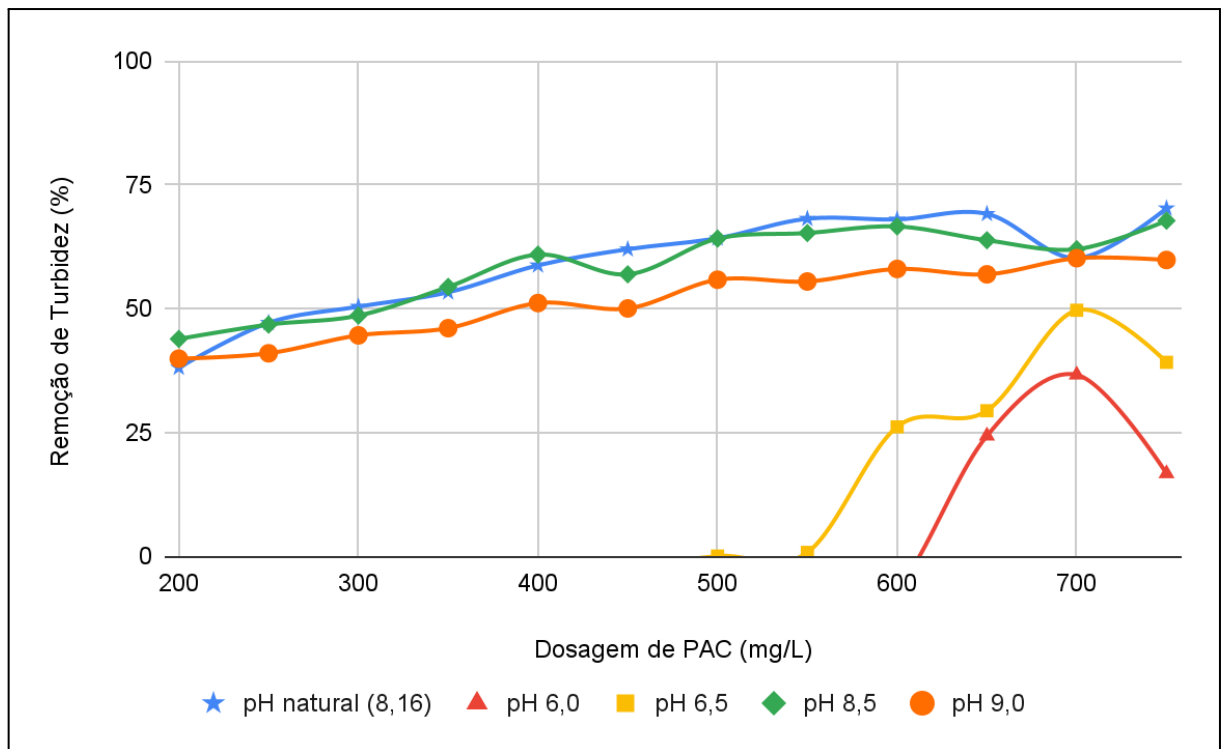
Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Turbidez (NTU)	Remoção de Turbidez (%)
200	8,13	21,20	23
250	8,13	15,90	42
300	8,11	15,90	42
350	8,09	15,30	45
400	8,08	13,90	50
450	8,05	12,70	54
500	7,98	19,70	29
550	7,98	35,90	--
600	7,96	60,80	--
650	7,95	79,20	--
700	7,92	93,10	--
750	7,87	108,00	--

Fonte: Autor (2023)

Ainda em relação à turbidez, nos Gráficos 41 e 42 estão exibidos, respectivamente, o diagrama de coagulação e a sua eficiência de remoção, referentes à $V_s = 0,5$ cm/min.

Gráfico 41 – Diagrama de coagulação para turbidez (NTU) e $V_s = 0,5$ cm/min (Fev/23)

Fonte: Autor (2023)

Gráfico 42 – Remoção de turbidez com $V_s = 0,5$ cm/min (Fev/23)

Fonte: Autor (2023)

No diagrama de coagulação para turbidez e $V_s = 0,5$ cm/min, visto no Gráfico 41, pode ser verificado que, a partir das amostras remanescentes dos ensaios de bancada, foi

possível traçar curvas de coagulação que representam valores de turbidez de 8 a 10 NTU, 10 a 20 NTU, 20 a 30 NTU e 30 a 45 NTU. Observa-se que, em comparação com o diagrama de coagulação para $V_s = 1$ cm/min (Gráfico 39), para $V_s = 0,5$ cm/min houve resultados de turbidez remanescente abaixo de 10 NTU.

A região delimitada acima da curva C5 e englobada pela curva C6 (resultados de 8 a 10 NTU) compreende os pares de pH de coagulação x dosagem de PAC que apresentaram melhor desempenho no tratamento por coag-floc-dec.

Em termos de percentuais, analisando o Gráfico 42, os pontos estudados de pH de coagulação x dosagens de PAC da região do diagrama de coagulação com resultados de 8 a 10 NTU demonstraram eficiência de remoção de 64% a 70% de turbidez.

Na Tabela 32 estão apresentados os pares de pH de coagulação x dosagem de PAC com melhor desempenho no tratamento do lixiviado para a turbidez e $V_s = 0,5$ cm/min.

Tabela 32 – Melhores pares de pH x mg.PAC/L para turbidez e $V_s = 0,5$ cm/min (Fev/23)

pH inicial	Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Turbidez (NTU)	Remoção de Turbidez (%)
8,16	500	8,00	9,89	64
	550	7,99	8,80	68
	600	7,94	8,84	68
	650	7,94	8,53	69
	750	7,90	8,22	70
8,50	500	8,37	9,91	64
	550	8,38	9,60	65
	600	8,36	9,23	67
	750	8,32	8,91	68

Fonte: Autor (2023)

A relação de pH natural x dosagem de PAC demonstrou eficiências de remoção de turbidez entre 38% e 70%, sendo a dosagem de 750 mg.PAC/L (70% de remoção) com melhor desempenho no tratamento. Destaca-se que as dosagens de 550 a 750 mg.PAC/L apresentaram eficiência de 64% a 70%, enquanto para as mesmas dosagens e $V_s = 1$ cm/min não houve eficiência no tratamento (Tabela 31).

Na Tabela 33 estão expostos os pares de pH natural x mg.PAC/L no tratamento do lixiviado por coag-floc-dec para o parâmetro de turbidez e $V_s = 0,5$ cm/min.

Tabela 33 – Pares de pH natural x mg.PAC/L para turbidez e $V_s = 0,5$ cm/min (Fev/23)

Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Turbidez (NTU)	Remoção de Turbidez (%)
200	8,11	17,10	38
250	8,11	14,60	47
300	8,09	13,70	50
350	8,09	12,90	53
400	8,08	11,40	59
450	8,06	10,50	62
500	8,00	9,89	64
550	7,99	8,80	68
600	7,94	8,84	68
650	7,94	8,53	69
700	7,92	11,00	60
750	7,90	8,22	70

Fonte: Autor (2023)

4.3. Remoção de DQO e N-amoniacal

A seguir, estão apresentados os resultados das análises de DQO e N-amoniacal do lixiviado pré-tratado biologicamente no aterro sanitário de Maceió-AL e das amostras remanescentes dos ensaios de bancada utilizando o jar test. É possível observar que a concentração dos parâmetros analisados variou em função das características do lixiviado na data coletada, apresentando valores distintos a cada mês.

Os dados das análises de DQO e N-amoniacal estão apresentados no Apêndice F (outubro de 2022), Apêndice G (novembro de 2022), Apêndice H (janeiro de 2023) e Apêndice I (fevereiro de 2023).

Nos meses de out/22 e jan/23 as amostras remanescentes são resultados dos ensaios de bancada utilizando apenas do PAC comercial, enquanto que nos meses de nov/22 e fev/23 são resultantes dos ensaios utilizando o polímero aniônico em conjunto com o PAC comercial. De modo geral, observa-se que a utilização do polímero aniônico não apresentou uma melhoria na remoção de DQO e N-amoniacal.

4.3.1. Outubro de 2022

Na Tabela 34 estão apontados os pontos do diagrama de coagulação de outubro/2022 selecionados para análise de DQO e N-amoniacal.

Tabela 34 – Amostras do jar test para análise de DQO e N-amoniacal (Out/22)

Ponto	pH inicial	Dosagem de PAC (mg/L)	Vs (cm/min)
1	6,00	600	1,0
2	6,00	750	1,0

Fonte: Autor (2023)

Neste mês, o lixiviado pré-tratado biologicamente (concentração inicial) apresentava as características de DQO 1.865,56 mg.O₂/L e N-amoniacal 96,18 mg.N-NH₃/L. Nas Tabelas 35 e 36 podem ser vistos, respectivamente, o balanço de massa de DQO e N-amoniacal das amostras remanescentes (concentração final).

Tabela 35 – Balanço de massa de DQO (Out/22)

Ponto	DQO inicial (mg.O ₂ /L)	DQO final (mg.O ₂ /L)	DQO removida (mg.O ₂ /L)
1	1.865,56	1.398,16	467,39
2		1.215,96	649,60

Fonte: Autor (2023)

Tabela 36 – Balanço de massa de N-amoniacal (Out/22)

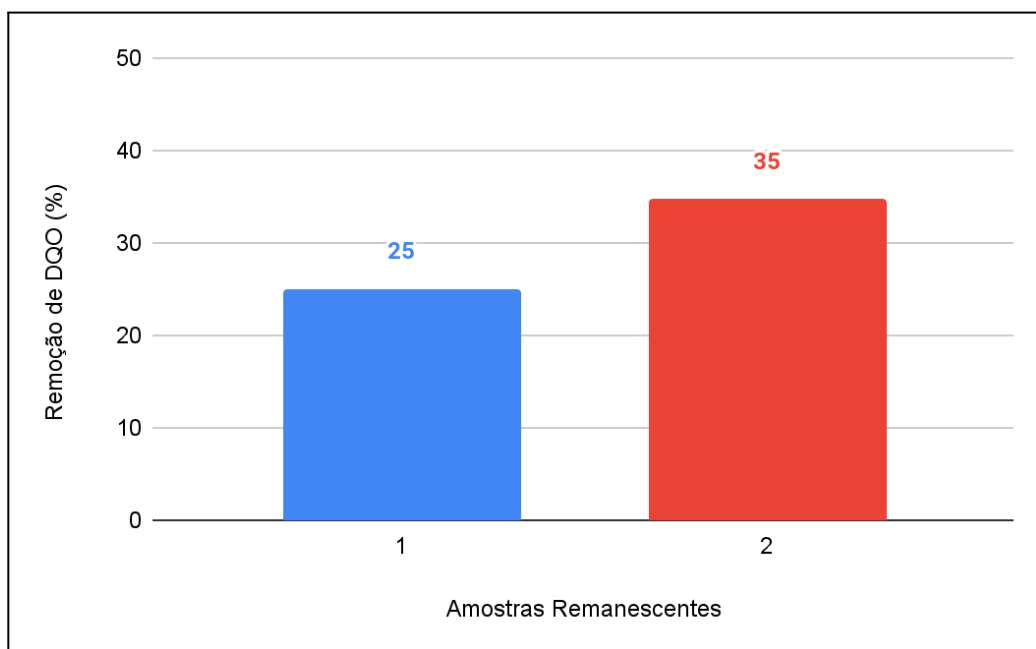
Ponto	N-amoniacal inicial (mg.N-NH ₃ /L)	N-amoniacal final (mg.N-NH ₃ /L)	N-amoniacal removido (mg.N-NH ₃ /L)
1	96,18	72,24	23,94
2		66,36	29,82

Fonte: Autor (2023)

Observando as Tabelas 35 e 36, nota-se que a amostra 2 obteve maior remoção absoluta de DQO e N-amoniacal, com remoção de 649,60 mg.O₂/L e 29,82 mg.N-NH₃/L. Já a amostra 1 apresentou remoção de 467,39 mg.O₂/L e 23,94 mg.N-NH₃/L

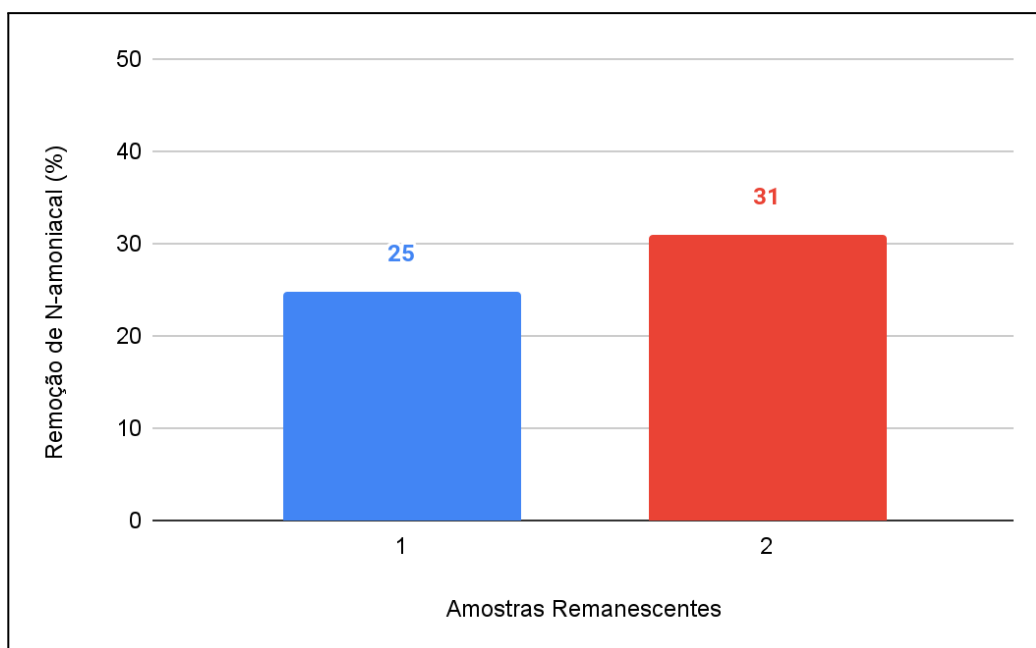
Nos Gráficos 43 e 44 estão exibidos, respectivamente, os percentuais de remoção de DQO e N-amoniacal das amostras remanescentes 1 e 2, referentes à Vs = 1 cm/min. A amostra 1 atingiu 25% de remoção de DQO e 25% de remoção de N-amoniacal, enquanto a amostra 2 mostrou eficiência de remoção de 35% de DQO e 31% de N-amoniacal.

Gráfico 43 – Remoção de DQO das amostras 1 e 2 (Out/22)



Fonte: Autor (2023)

Gráfico 44 – Remoção de N-amoniaco das amostras 1 e 2 (Out/22)



Fonte: Autor (2023)

4.3.2. Novembro de 2022

Na Tabela 37 estão apresentados os pontos do diagrama de coagulação do mês de novembro/2022 selecionados para análise de DQO e N-amoniaco.

Neste mês, o lixiviado pré-tratado biologicamente (concentração inicial) apresentava as características de DQO 1837,93 mg.O₂/L e N-amoniaco 208,32 mg.N-NH₃/L. Nas Tabelas

38 e 39 podem ser observados, respectivamente, o balanço de massa de DQO e N-amoniaco das amostras remanescentes (concentração final).

Tabela 37 – Amostras do jar test para análise de DQO e N-amoniaco (Nov/22)

Ponto	pH inicial	Dosagem de PAC (mg/L)	Vs (cm/min)
1	6,00	650	1,0
2	6,00	700	1,0
3	7,90	750	0,5
4	6,50	750	0,5

Fonte: Autor (2023)

Tabela 38 – Balanço de massa de DQO (Nov/22)

Ponto	DQO inicial (mg.O ₂ /L)	DQO final (mg.O ₂ /L)	DQO removida (mg.O ₂ /L)
1	1.837,93	1.252,97	584,95
2		1.204,57	633,35
3		1.207,42	630,50
4		1.193,19	644,74

Fonte: Autor (2023)

Tabela 39 – Balanço de massa de N-amoniaco (Nov/22)

Ponto	N-amoniaco inicial (mg.N-NH ₃ /L)	N-amoniaco final (mg.N-NH ₃ /L)	N-amoniaco removido (mg.N-NH ₃ /L)
1	208,32	127,68	80,64
2		135,24	73,08
3		206,64	1,68
4		178,92	29,40

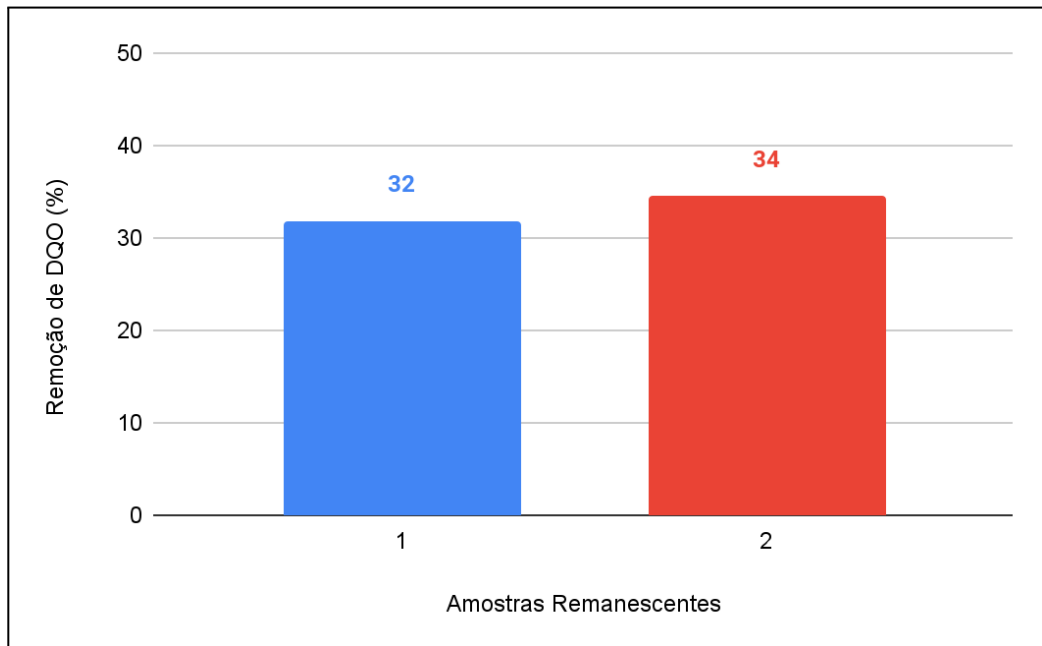
Fonte: Autor (2023)

Verificando as Tabelas 38 e 39, nota-se que a amostra 4 obteve maior remoção absoluta de DQO, com remoção de 644,74 mg.O₂/L. Enquanto isso, a amostra 1 apresentou maior remoção absoluta de N-amoniaco, com remoção de 80,64 mg.N-NH₃/L

Nos Gráficos 45 e 46 podem ser vistos, respectivamente, os percentuais de remoção de DQO e N-amoniaco das amostras remanescentes 1 e 2, referentes à Vs = 1 cm/min.

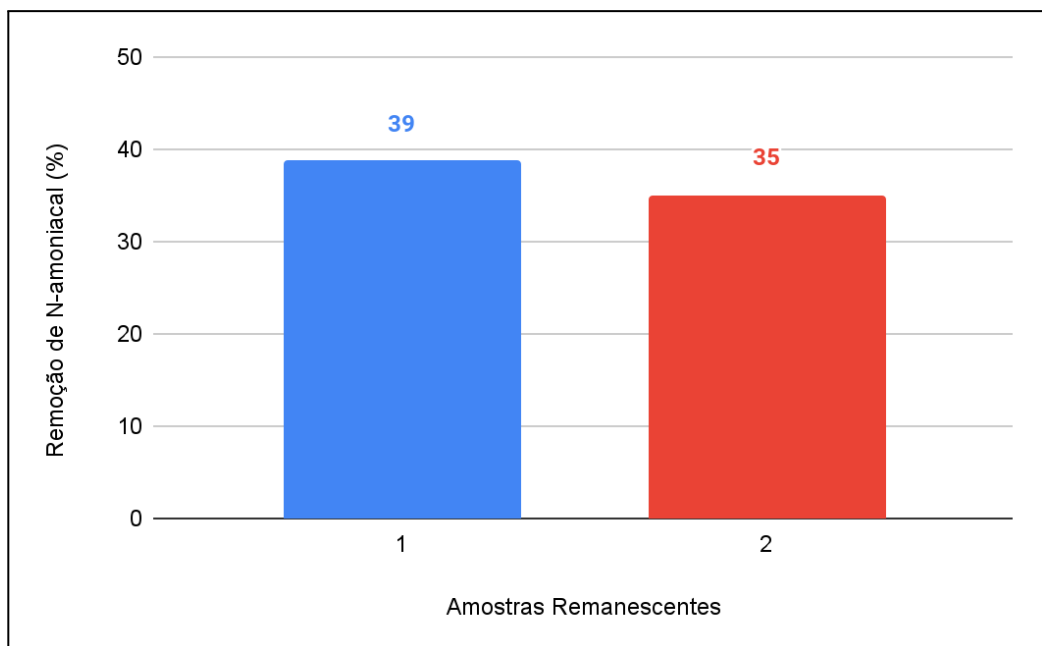
Após o tratamento por coag-floc-dec, a amostra 1 teve 32% de remoção de DQO e 39% de remoção de N-amoniaco. Já a amostra 2 mostrou eficiência de remoção de 34% de DQO e 35% de N-amoniaco.

Gráfico 45 – Remoção de DQO das amostras 1 e 2 (Nov/22)



Fonte: Autor (2023)

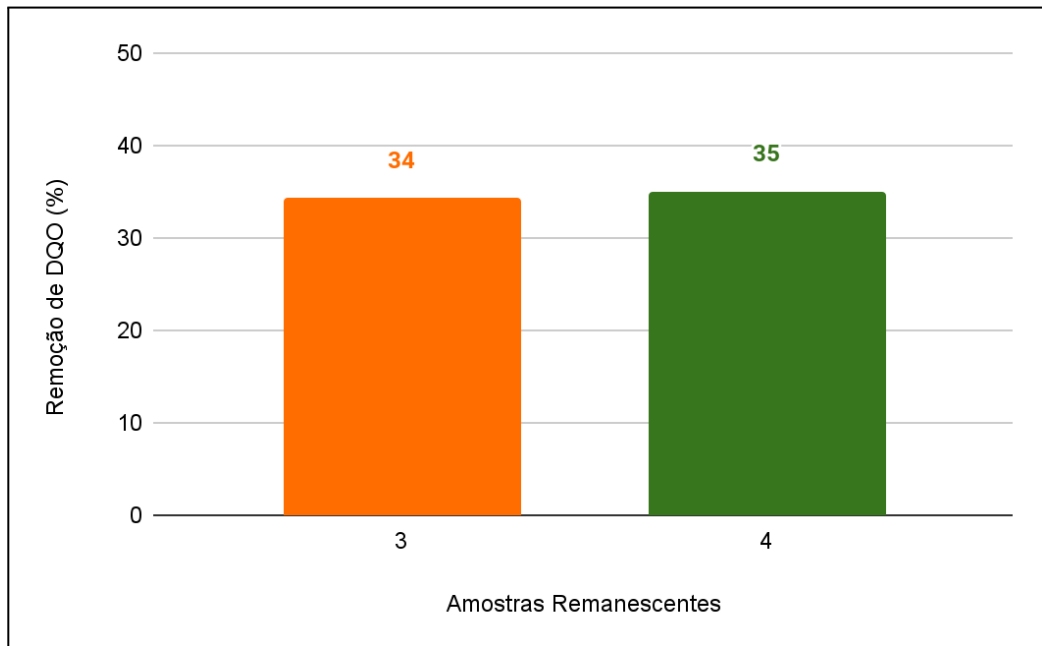
Gráfico 46 – Remoção de N-amoniaco das amostras 1 e 2 (Nov/22)



Fonte: Autor (2023)

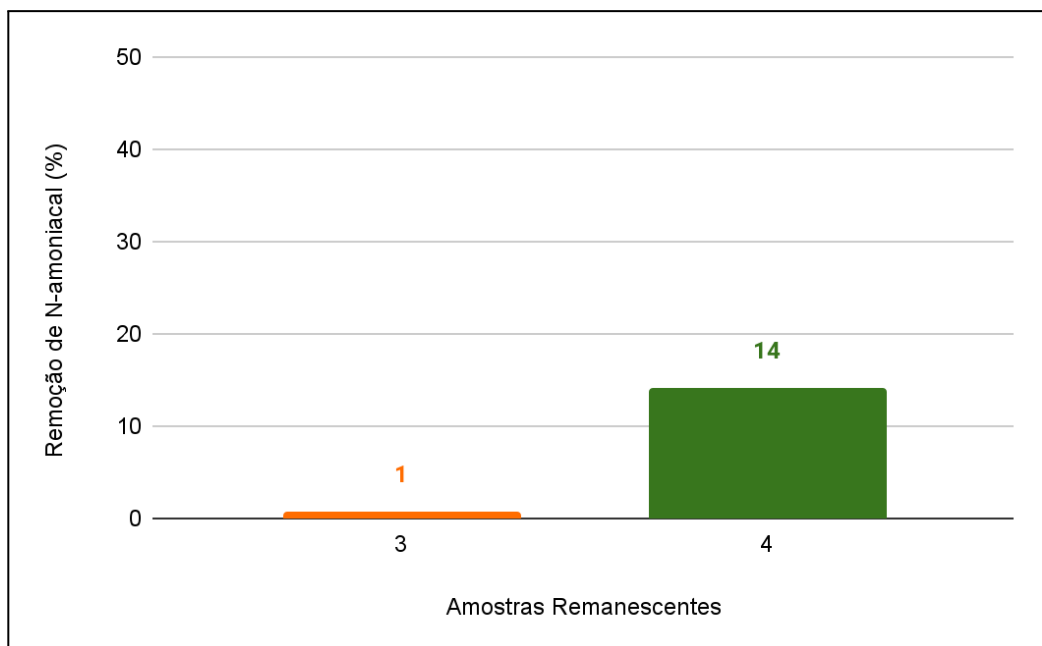
Referentes à $V_s = 0,5$ cm/min, nos Gráficos 47 e 48 estão exibidos, respectivamente, os percentuais de remoção de DQO e N-amoniaco das amostras remanescentes 3 e 4. A amostra 3 alcançou 34% de remoção de DQO e apenas 1% de remoção de N-amoniaco. Por sua vez, a amostra 4 obteve eficiência de remoção de 35% de DQO e 14% de N-amoniaco.

Gráfico 47 – Remoção de DQO das amostras 3 e 4 (Nov/22)



Fonte: Autor (2023)

Gráfico 48 – Remoção de N-amoniaco das amostras 3 e 4 (Nov/22)



Fonte: Autor (2023)

4.3.3. Janeiro de 2023

Na Tabela 40 estão apresentados os pontos do diagrama de coagulação do mês de janeiro/2023 selecionados para análise de DQO e N-amoniaco.

Neste mês, o lixiviado pré-tratado biologicamente (concentração inicial) apresentava as características de DQO 2200,07 mg.O₂/L e N-amoniaco 589,18 mg.N-NH₃/L. Nas Tabelas

41 e 42 podem ser analisados, respectivamente, o balanço de massa de DQO e N-amoniacal das amostras remanescentes (concentração final).

Tabela 40 – Amostras do jar test para análise de DQO e N-amoniacal (Jan/23)

Ponto	pH inicial	Dosagem de PAC (mg/L)	Vs (cm/min)
1	8,27	600	1,0
2	6,00	750	1,0
3	8,27	600	0,5
4	6,00	750	0,5

Fonte: Autor (2023)

Tabela 41 – Balanço de massa de DQO (Jan/23)

Ponto	DQO inicial (mg.O ₂ /L)	DQO final (mg.O ₂ /L)	DQO removida (mg.O ₂ /L)
1	2.200,07	2.100,43	99,64
2		1.844,21	355,86
3		2.007,90	192,17
4		1.865,56	334,51

Fonte: Autor (2023)

Tabela 42 – Balanço de massa de N-amoniacal (Jan/23)

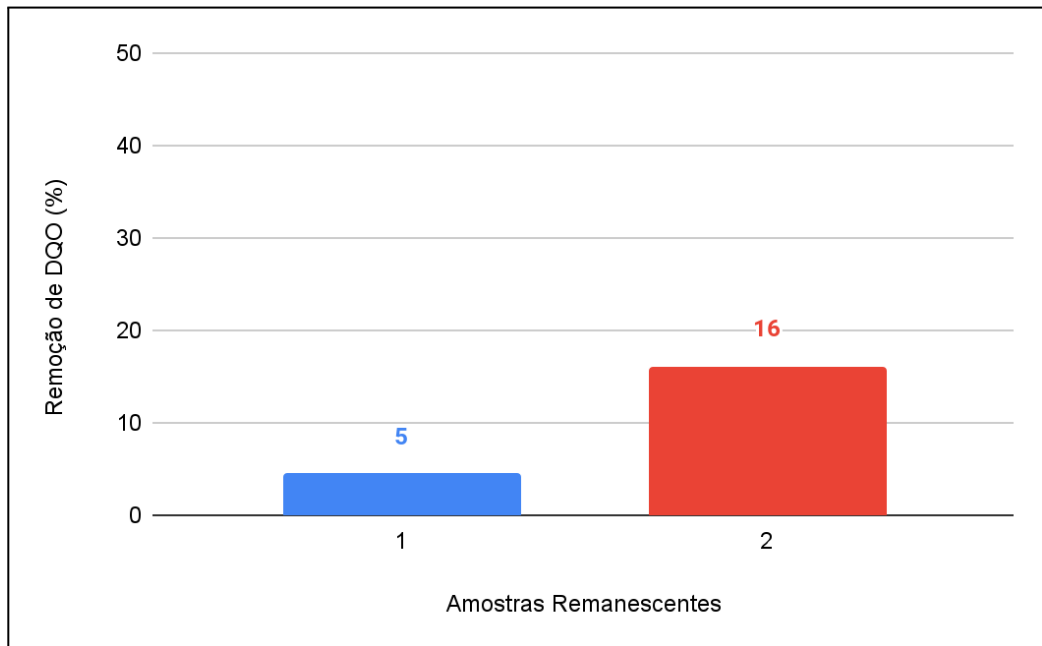
Ponto	N-amoniacal inicial (mg.N-NH ₃ /L)	N-amoniacal final (mg.N-NH ₃ /L)	N-amoniacal removido (mg.N-NH ₃ /L)
1	589,18	575,48	13,70
2		306,92	282,26
3		553,55	35,63
4		331,58	257,60

Fonte: Autor (2023)

A partir das Tabelas 41 e 42, verifica-se que a amostra 2 obteve maior remoção absoluta de DQO e N-amoniacal, com remoção de 355,86 mg.O₂/L e 282,26 mg.N-NH₃/L

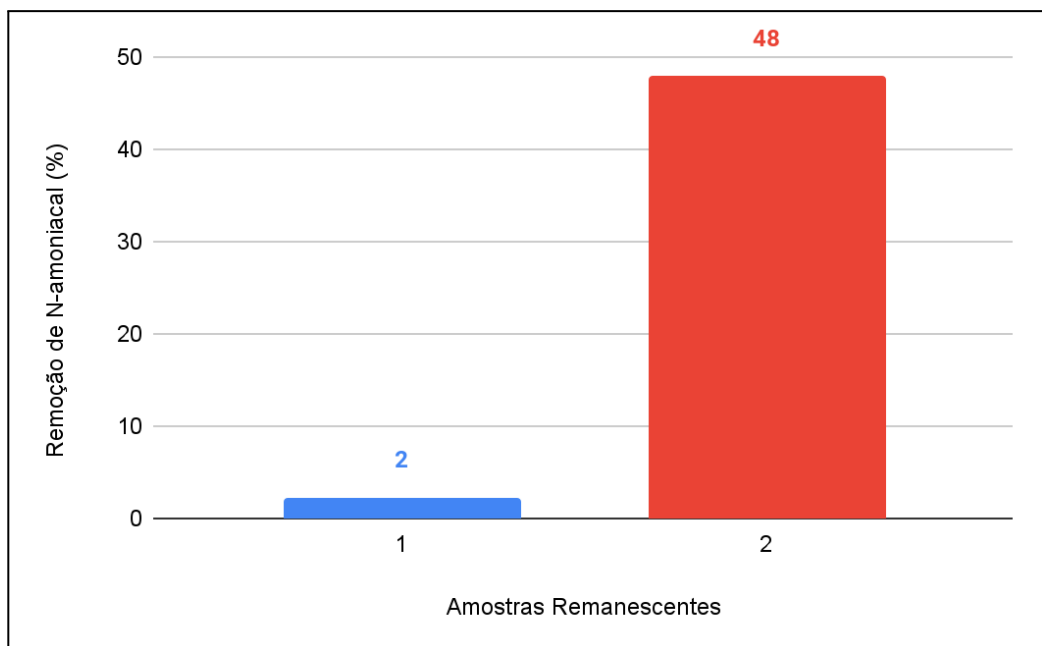
Nos Gráficos 49 e 50 podem ser vistos, respectivamente, os percentuais de remoção de DQO e N-amoniacal das amostras remanescentes 1 e 2, referentes à Vs = 1 cm/min. A amostra 1 teve apenas 5% de remoção de DQO e 2% de remoção de N-amoniacal. A amostra 2, por sua vez, mostrou eficiência de remoção de 16% de DQO e 48% de N-amoniacal.

Gráfico 49 – Remoção de DQO das amostras 1 e 2 (Jan/23)



Fonte: Autor (2023)

Gráfico 50 – Remoção de N-amoniaco das amostras 1 e 2 (Jan/23)

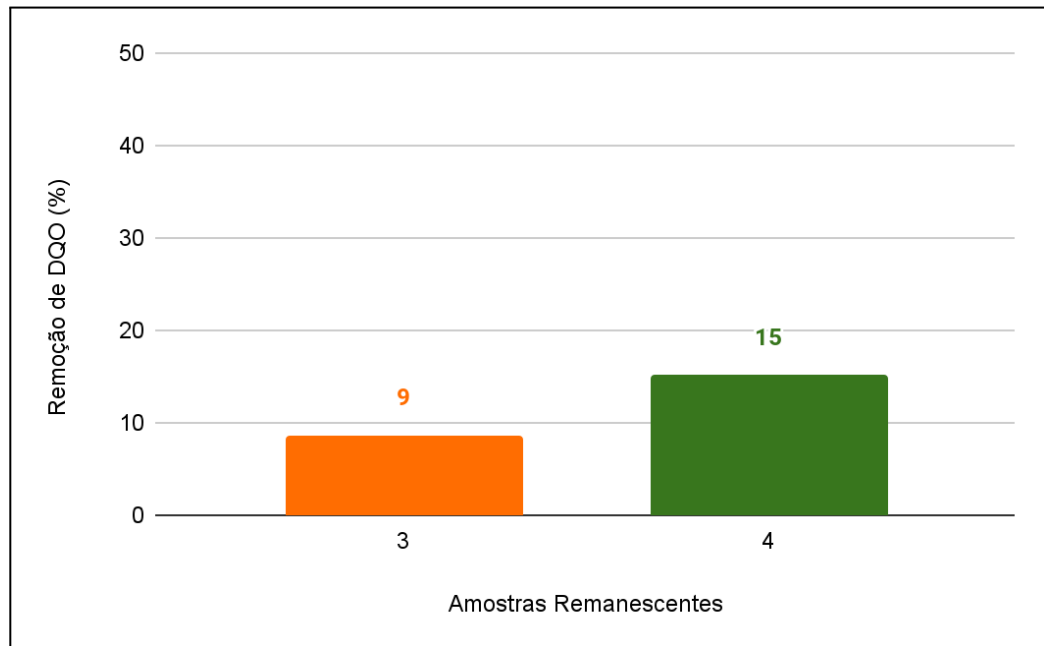


Fonte: Autor (2023)

Referentes à $V_s = 0,5$ cm/min, nos Gráficos 51 e 52 estão exibidos, respectivamente, os percentuais de remoção de DQO e N-amoniaco das amostras remanescentes 3 e 4.

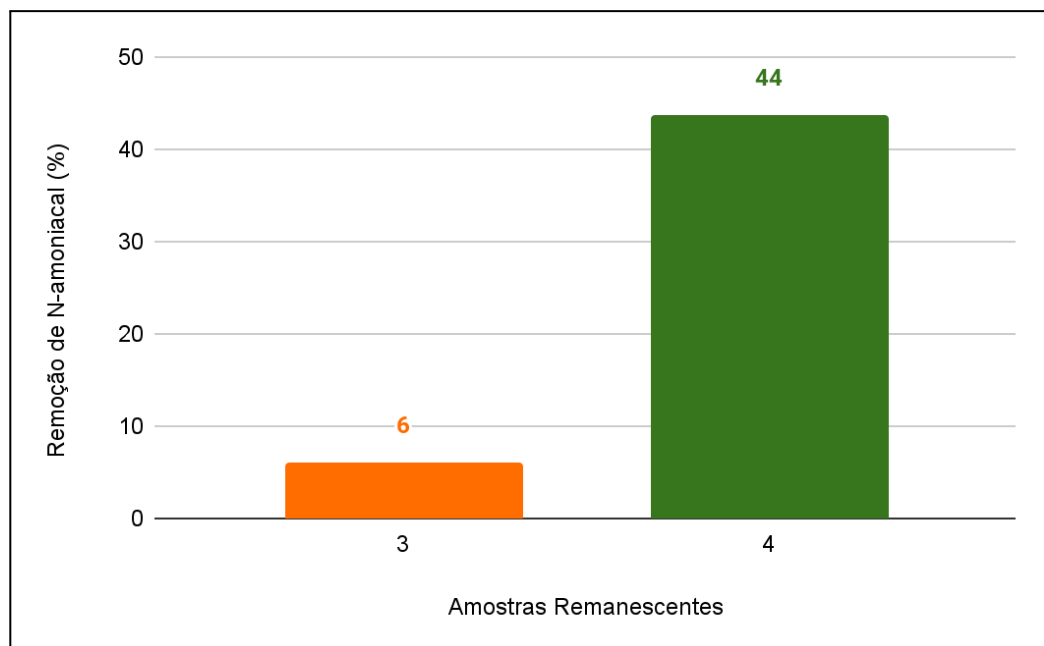
Após o tratamento por coag-floc-dec, observa-se que a amostra 3 conseguiu apenas 9% de remoção de DQO e apenas 6% de remoção de N-amoniaco. Já a amostra 4 obteve eficiência de remoção de 15% de DQO e 44% de N-amoniaco.

Gráfico 51 – Remoção de DQO das amostras 3 e 4 (Jan/23)



Fonte: Autor (2023)

Gráfico 52 – Remoção de N-amoniacal das amostras 3 e 4 (Jan/23)



Fonte: Autor (2023)

4.3.4. Fevereiro de 2023

Na Tabela 43 estão apresentados os pontos do diagrama de coagulação do mês de fevereiro/2023 selecionados para análise de DQO e N-amoniacal.

Neste mês, o lixiviado pré-tratado biologicamente (concentração inicial) apresentava as características de DQO 2649,52 mg.O₂/L e N-amoniacal 411,05 mg.N-NH₃/L. Nas Tabelas

44 e 45 podem ser analisados, respectivamente, o balanço de massa de DQO e N-amoniaco das amostras remanescentes (concentração final).

Tabela 43 – Amostras do jar test para análise de DQO e N-amoniaco (Fev/23)

Ponto	pH inicial	Dosagem de PAC (mg/L)	Vs (cm/min)
1	8,16	450	1,0
2	6,50	350	1,0
3	8,16	750	0,5
4	6,50	350	0,5

Fonte: Autor (2023)

Tabela 44 – Balanço de massa de DQO (Fev/23)

Ponto	DQO inicial (mg.O ₂ /L)	DQO final (mg.O ₂ /L)	DQO removida (mg.O ₂ /L)
1	2.649,52	2.357,26	292,26
2		2.327,29	322,23
3		2.259,84	389,68
4		2.402,22	247,29

Fonte: Autor (2023)

Tabela 45 – Balanço de massa de N-amoniaco (Fev/23)

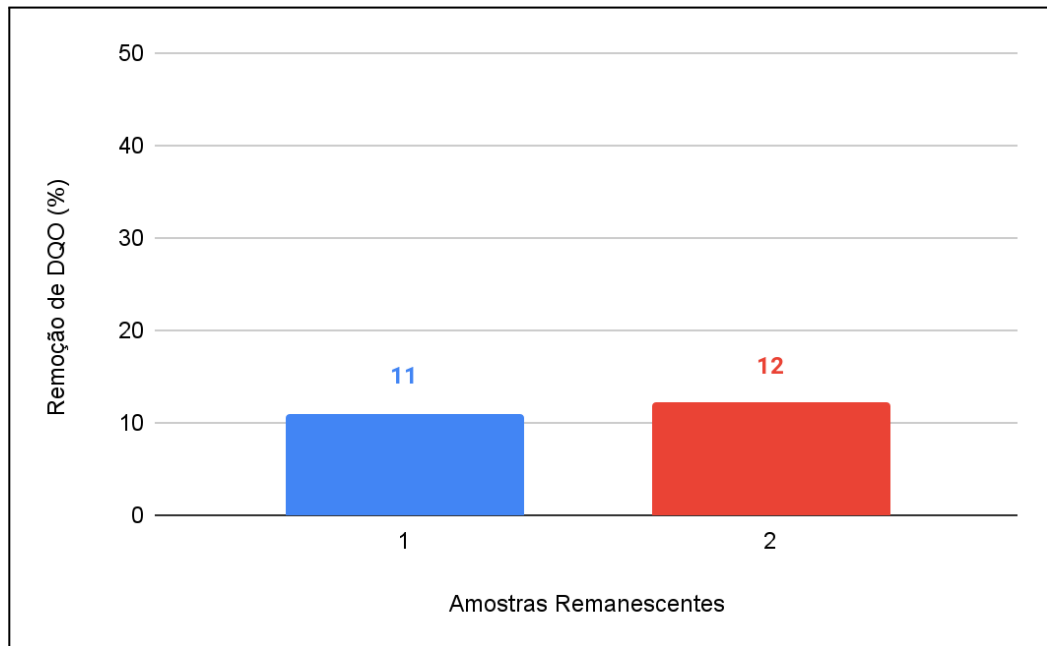
Ponto	N-amoniaco inicial (mg.N-NH ₃ /L)	N-amoniaco final (mg.N-NH ₃ /L)	N-amoniaco removido (mg.N-NH ₃ /L)
1	411,05	408,31	2,74
2		405,57	5,48
3		397,35	13,70
4		369,95	41,10

Fonte: Autor (2023)

Analisando as Tabelas 44 e 45, constata-se que a amostra 3 obteve maior remoção absoluta de DQO, com remoção de 389,7 mg.O₂/L. Por outro lado, a amostra 4 apresentou maior remoção absoluta de N-amoniaco, com remoção de 41,1 mg.N-NH₃/L

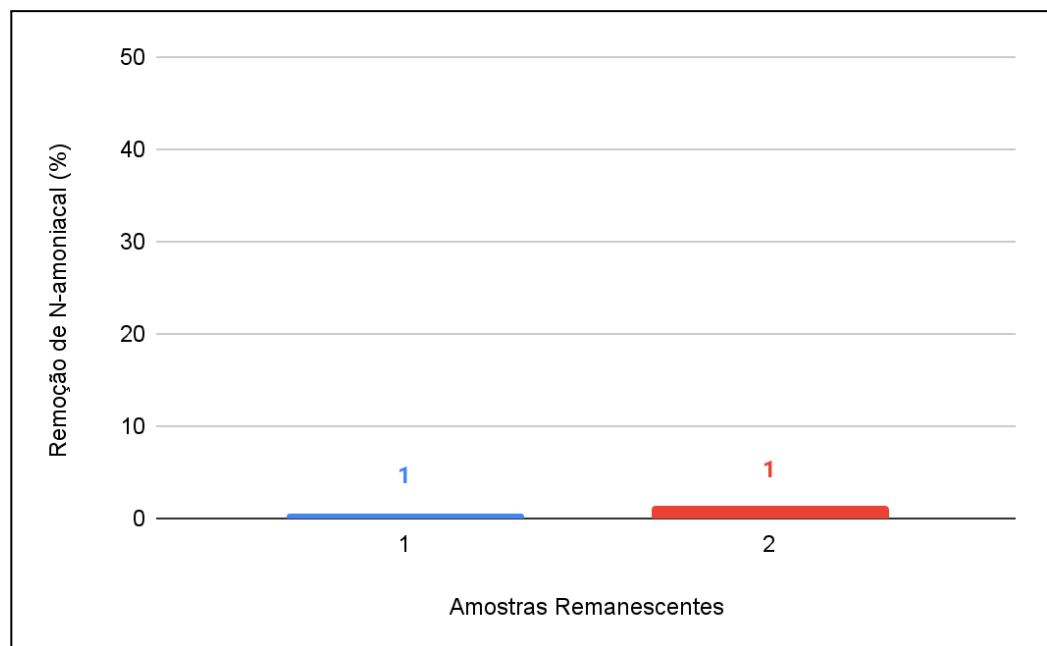
Nos Gráficos 53 e 54 podem ser vistos, respectivamente, os percentuais de remoção de DQO e N-amoniaco das amostras remanescentes 1 e 2, referentes à Vs = 1 cm/min. A amostra 1 teve 11% de remoção de DQO e 1% de remoção de N-amoniaco. Analogamente, a amostra 2 mostrou eficiência de remoção de 12% de DQO e 1% de N-amoniaco.

Gráfico 53 – Remoção de DQO das amostras 1 e 2 (Fev/23)



Fonte: Autor (2023)

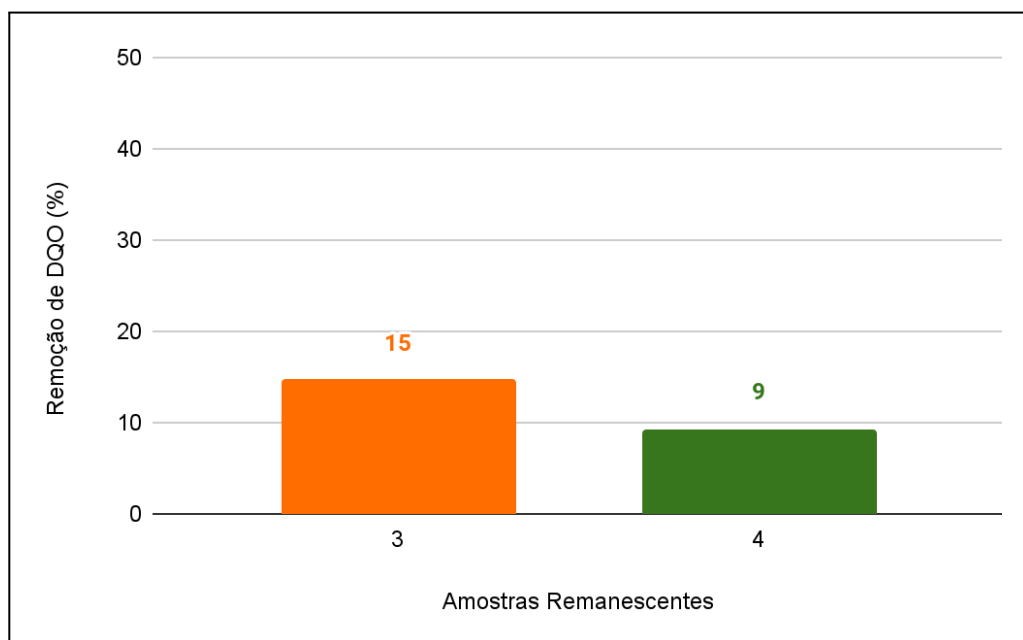
Gráfico 54 – Remoção de N-amoniaco das amostras 1 e 2 (Fev/23)



Fonte: Autor (2023)

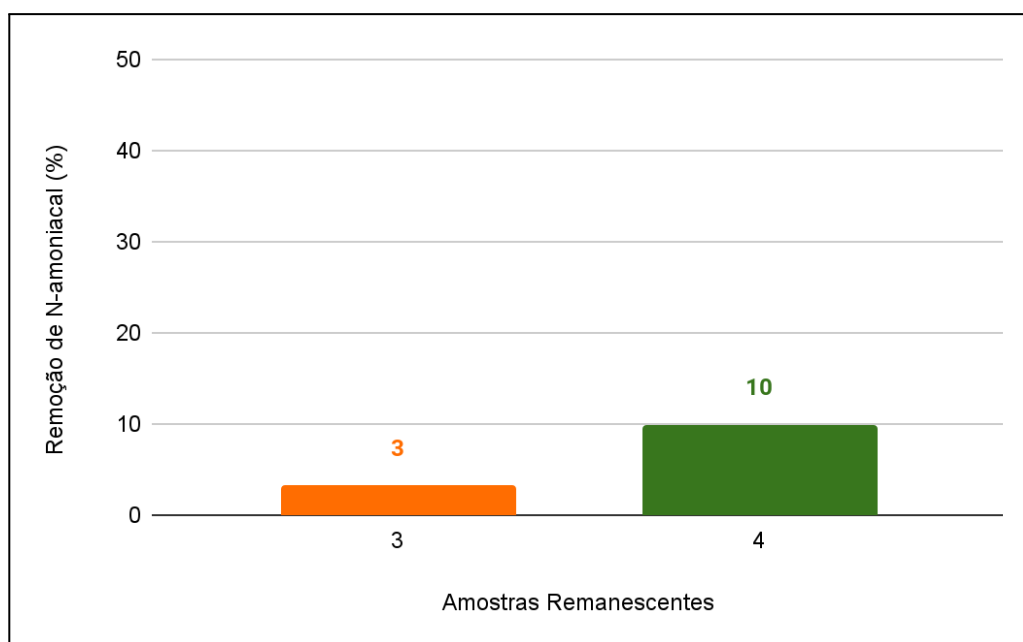
Referentes à $V_s = 0,5$ cm/min, nos Gráficos 55 e 56 estão exibidos, respectivamente, os percentuais de remoção de DQO e N-amoniaco das amostras remanescentes 3 e 4. A amostra 3 alcançou 15% de remoção de DQO e apenas 3% de remoção de N-amoniaco. Já a amostra 4 obteve eficiência de remoção de 9% de DQO e 10% de N-amoniaco.

Gráfico 55 – Remoção de DQO das amostras 3 e 4 (Fev/23)



Fonte: Autor (2023)

Gráfico 56 – Remoção de N-amoniaco das amostras 3 e 4 (Fev/23)



Fonte: Autor (2023)

Com isso, nota-se que o lixiviado tratado, no período analisado, ainda apresentou elevada DQO e concentração de N-amoniaco acima dos padrões de lançamento da Resolução CONAMA nº 430/2011, com valores mínimos de 1.844,21 mg.O₂/L e 66,36 mg.N-NH₃/L, respectivamente. Desse modo, o efluente final requer o emprego de técnicas de tratamento complementares. No caso do aterro sanitário de Maceió-AL, após a coag-floc-dec, o lixiviado é encaminhado para o tratamento por filtração e osmose reserva.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos, em escala de bancada, para o tratamento físico-químico por coagulação-floculação-decantação aplicado em lixiviado pré-tratado biologicamente do aterro sanitário do município de Maceió-AL, mostraram que:

A concentração de DQO e N-amoniacal, variou ao longo das coletas analisadas, com pico de concentração de DQO em fev/23 e de N-amoniacal em jan/23. A DQO apresentou um intervalo de variação de 1.837,93 mg.O₂/L a 2.649,52 mg.O₂/L, enquanto que o N-amoniacal teve valor mínimo de 96,18 mg.N-NH₃/L e máximo de 589,18 mg.N-NH₃/L.

O pH do lixiviado, tanto do pré-tratado biologicamente quanto das amostras remanescentes dos ensaios de bancada, ao longo do período analisado, se manteve dentro da faixa exigida pela Resolução CONAMA nº 430/2011 (entre 5 e 9).

A partir da análise da alcalinidade, com concentrações que variaram de 1.067,3 mg.CaCO₃/L a 3.063,3 mg.CaCO₃/L, conclui-se que a alcalinidade do lixiviado pré-tratado biologicamente é muito elevada e dificulta os ajustes no pH previamente ao tratamento.

Outrossim, observou-se, na caracterização do lixiviado pré-tratado biologicamente, que este possui elevada concentração de cor aparente e baixa turbidez, indicando que a cor verdadeira devida a sólidos dissolvidos é elevada. Consequentemente, nos ensaios de bancada, a maior parte dos flocos formados na etapa de floculação, no sistema de tratamento por coag-floc-dec, ainda eram leves demais para sedimentar, o que leva à comprovação da dificuldade de remover as partículas dissolvidas no lixiviado.

Mesmo com a aplicação do polímero aniônico, onde se busca aumentar o “peso” dos flocos, observou-se que sua aplicação simultânea com o PAC não surtiu efeitos significativos no desempenho do tratamento do lixiviado. Os melhores resultados foram obtidos nos ensaios onde se estudou apenas a utilização do PAC, com melhor desempenho na remoção dos parâmetros de cor aparente, turbidez, DQO e N-amoniacal.

Os resultados obtidos dos ensaios de bancada permitem concluir que a sua eficiência no tratamento depende intrinsecamente das características do lixiviado (pH, alcalinidade, cor aparente, turbidez, DQO e N-amoniacal) e dos parâmetros operacionais do processo de tratamento por coag-floc-dec. Destaca-se que lixiviados com diferentes características, devido à idade do aterro e tratamento prévio, reagem de formas diferentes a dosagens de coagulante e ajustes no pH.

Além disso, os ensaios de bancada realizados demonstraram que os pontos de pH x dosagem de PAC apresentaram melhor desempenho com $V_s = 0,5$ cm/min, em virtude do aumento no tempo de sedimentação para os flocos formados.

Observando os diagramas de coagulação, notou-se que os pares de pH natural x dosagens de PAC com dosagens do coagulante variando de 300 mg.PAC/L e 350 mg.PAC/L, em função das características do lixiviado pré-tratado, estiveram entre os pontos com melhor remoção de cor aparente e turbidez.

Quanto à remoção de DQO e N-amoniacal, obtidas nas amostras remanescentes com maior remoção de cor aparente e turbidez, mostraram, também, variabilidade dos resultados, devido às características do lixiviado na data coletada. Quando foi utilizado apenas o PAC nos ensaios de bancada, as amostras remanescentes demonstraram desempenho de até 35% de remoção de DQO e até 48% de remoção de N-amoniacal. Já nos ensaios de bancada utilizando o PAC em conjunto com o polímero aniônico, o percentual de remoção foi menor, de até 35% de DQO e 39% de N-amoniacal.

Por fim, observou-se que após o sistema de tratamento por coag-floc-dec, o lixiviado ainda não alcançou os limites de lançamento de descarte de efluentes em corpos hídricos, estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 430/2011, necessitando de outros processos de tratamento complementares.

Para a realização de trabalhos futuros, recomenda-se:

- a) Investigar a aplicação de outros coagulantes no tratamento do lixiviado por coag-floc-dec, incluindo o cloreto férrico e o sulfato férrico, que atuam numa faixa mais ampla de pH e podem não requerer o ajuste do pH de coagulação;
- b) Investigar a aplicação do polímero aniônico na etapa de floculação, visto que no presente trabalho foi estudada sua aplicação simultânea com o coagulante na mistura rápida como é utilizado em escala real;
- c) Investigar diferentes dosagens do polímero aniônico nos pontos com maior remoção de cor aparente e turbidez identificados no diagrama de coagulação;
- d) Investigar o sistema de coagulação-floculação-flotação, em escala de bancada, a fim de analisar o desempenho da flotação no tratamento do lixiviado.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, S. M. A. **Caracterização físico-química e tratabilidade por coagulação-floculação dos líquidos percolados gerados no aterro sanitário de Uberlândia-MG**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2002.
- ARAÚJO, L. G. S. de. **Avaliação do lixiviado de aterro sanitário: geração e tecnologias de tratamento**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Centro Acadêmico do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2019.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WATER ENVIRONMENT FEDERATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 23th ed. Washington, DC: APHA; Denver, CO: AWWA; Alexandria, VA: WEF, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil: 2018/2019**. São Paulo: ABRELPE, 2019. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/download-panorama-2018-2019/>>. Acesso em: 13 nov. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil: 2020**. São Paulo: ABRELPE, 2020. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>>. Acesso em: 13 nov. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil: 2021**. São Paulo: ABRELPE, 2021. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama-2021/>>. Acesso em: 15 out. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil: 2022**. São Paulo: ABRELPE, 2022. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/download-panorama-2022/>>. Acesso em: 07 dez. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12216: Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público**. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- BASSIN, J. P.; DEZOTTI, M. Tratamento primário, secundário e terciário de efluentes. In: DEZOTTI, M. (coord.). **Processos e técnicas para o controle ambiental de efluentes líquidos**. Rio de Janeiro: E-papers, 2008. cap. 3, p. 53-242. (Série Escola Piloto de Engenharia Química COPPE/UFRJ, v. 5).

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 148, n. 92, p. 89-91, 16 mai. 2011.

CASTILHOS JUNIOR, A. B. de. (coord.). **Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos com ênfase na proteção de corpos d'água**: prevenção, geração e tratamento de lixiviados de aterros sanitários. Florianópolis: ABES, 2006. 494 p. (Projeto PROSAB).

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2. ed. São Carlos: RiMa, 2005. v. 1, 792 p.

FELICI, E. M. **Coagulação-floculação-sedimentação como pós-tratamento de efluente de sistema biológico em batelada aplicado a lixiviado de aterro de resíduos sólidos urbanos**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Centro de Tecnologia e Urbanismo, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2010.

FELICI, E. M.; KURODA, E. K.; YAMASHITA, F.; SILVA, S. M. C. P. da. Remoção de carga orgânica recalcitrante de lixiviado de resíduos sólidos urbanos pré-tratado biologicamente por coagulação química-floculação-sedimentação. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 2, p. 177-184, 2013.

FLECK, E. **Sistema integrado por filtro anaeróbio, filtro biológico de baixa taxa e banhado construído aplicado ao tratamento de lixiviado de aterro sanitário**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

GEWEHR, A. G. **Tratamento por coagulação-floculação de lixiviado bruto de aterro sanitário com e sem pré-tratamento biológico em reator sequencial em batelada**. 2012. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

GOMES, L. P. (coord.). **Estudos de caracterização e tratabilidade de lixiviados de aterros sanitários para as condições brasileiras**. Rio de Janeiro: ABES, 2009. 360 p.. (Projeto PROSAB).

KJELDSEN, P. *et al.* Present and long-term composition of MSW landfill leachate: a review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, Boca Raton, v. 32, n. 4, p. 297-336, 2002.

MÁXIMO, V. A. **Tratamento por coagulação-floculação dos lixiviados do aterro sanitário da região metropolitana de Florianópolis**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

- MORAIS, J. L. de. **Estudo da potencialidade de processos oxidativos avançados, isolados e integrados com processos biológicos tradicionais, para tratamento de chorume de aterro sanitário.** 2005. Tese (Doutorado em Química) – Setor de Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- MORAIS, J. L. de; SIRTORI, C.; PERALTA-ZAMORA, P. G. Tratamento de chorume de aterro sanitário por fotocatalise heterogênea integrada a processo biológico convencional. *Química Nova*, São Paulo, v. 29, n. 1, p. 20-23, 2006.
- MORAVIA, W. G. **Estudos de caracterização, tratabilidade e condicionamento de lixiviados visando tratamento por lagoas.** 2007. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.
- PAVANELLI, G. **Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada.** 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.
- PEDROSO, K. **Avaliação do tratamento do lixiviado do aterro sanitário de Maringá, Paraná, por processo de coagulação/floculação e ozonização.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Centro de Tecnologia do Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2012.
- SANTOS, H. M. do N. **Sistema de lagoas de estabilização e lagoa aerada para redução da carga orgânica e nitrogênio de percolado de aterro sanitário.** 2022. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2022.
- SOUTO, G. D. **Lixiviado de aterros sanitários brasileiros - estudo de remoção do nitrogênio amoniacal por processo de arraste com ar (“stripping”).** 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.
- TELLES, C. A. S. **Processos combinados para o tratamento de lixiviado de aterro sanitário.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

APÊNDICE A – Resultados da Caracterização do Lixiviado Pré-tratado

Tabela A.1 – Resultados das análises físico-químicas do lixiviado pré-tratado

Parâmetro	Out/2022	Nov/2022	Jan/2023	Fev/2023	Média	DP
pH	7,36	7,90	8,27	8,16	7,92	0,41
Cor Aparente (uC)	1185	730	977	976	967	186
Turbidez (NTU)	72,7	34,9	36,3	27,6	42,9	20,2
Alcalinidade (mg.CaCO ₃ /L)	649,50	1485,00	3640,76	2485,90	2065,29	1291,02
DQO (mg.O ₂ /L)	1865,56	1837,93	2200,07	2649,52	2138,27	378,49
N-amoniacal (mg.N-NH ₃ /L)	96,18	208,32	589,18	411,05	326,18	218,45

Fonte: Autor (2023)

APÊNDICE B – Resultados dos Ensaios de Bancada de Outubro/2022

Tabela B.1 – Resultados dos ensaios de bancada com pH natural (7,36) e $V_s = 1$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Turbidez (NTU)
200	7,39	502	9,56
250	7,37	480	7,80
300	7,36	439	5,51
350	7,32	409	4,53
400	7,29	465	14,00
450	7,30	445	12,10
500	7,40	445	6,64
550	7,36	461	12,20
600	7,36	468	14,50
650	7,32	526	30,80
700	7,31	624	51,80
750	7,27	683	70,70

Fonte: Autor (2023)

Tabela B.2 – Remoção de cor aparente e turbidez com pH natural (7,36) e $V_s = 1$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	Remoção de Cor Aparente (%)	Remoção de Turbidez (%)
200	58	87
250	59	89
300	63	92
350	65	94
400	61	81
450	62	83
500	62	91
550	61	83
600	61	80
650	56	58
700	47	29
750	42	3

Fonte: Autor (2023)

Tabela B.3 – Resultados dos ensaios de bancada com pH 6,0 e $V_s = 1$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Turbidez (NTU)
200	6,24	518	13,90
250	6,23	508	12,00
300	6,20	457	9,01
350	6,18	395	6,53
400	6,18	406	6,45
450	6,17	385	6,61
500	6,24	379	6,34
550	6,19	348	5,56
600	6,22	350	4,52
650	6,20	340	5,18
700	6,17	326	6,68
750	6,14	306	4,47

Fonte: Autor (2023)

Tabela B.4 – Remoção de cor aparente e turbidez com pH 6,0 e $V_s = 1$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	Remoção de Cor Aparente (%)	Remoção de Turbidez (%)
200	56	81
250	57	83
300	61	88
350	67	91
400	66	91
450	68	91
500	68	91
550	71	92
600	70	94
650	71	93
700	72	91
750	74	94

Fonte: Autor (2023)

Tabela B.5 – Resultados dos ensaios de bancada com pH 6,5 e $V_s = 1$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Turbidez (NTU)
200	6,72	547	16,00
250	6,76	508	13,00
300	6,78	499	10,70
350	6,75	462	9,37
400	6,75	435	8,10
450	6,78	426	8,31
500	6,71	447	18,90
550	6,72	419	16,60
600	6,75	538	43,40
650	6,71	573	57,70
700	6,70	535	46,20
750	6,68	567	56,80

Fonte: Autor (2023)

Tabela B.6 – Remoção de cor aparente e turbidez com pH 6,5 e $V_s = 1$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	Remoção de Cor Aparente (%)	Remoção de Turbidez (%)
200	54	78
250	57	82
300	58	85
350	61	87
400	63	89
450	64	89
500	62	74
550	65	77
600	55	40
650	52	21
700	55	36
750	52	22

Fonte: Autor (2023)

Tabela B.7 – Resultados dos ensaios de bancada com pH 8,5 e $V_s = 1$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Turbidez (NTU)
200	8,09	639	14,80
250	8,10	613	13,10
300	8,05	590	10,50
350	8,03	555	8,94
400	7,95	531	9,63
450	7,93	534	8,94
500	7,78	635	38,00
550	7,67	672	63,00
600	7,69	694	71,80
650	7,60	688	95,60
700	7,57	896	111,00
750	7,57	901	113,00

Fonte: Autor (2023)

Tabela B.8 – Remoção de cor aparente e turbidez com pH 8,5 e $V_s = 1$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	Remoção de Cor Aparente (%)	Remoção de Turbidez (%)
200	46	80
250	48	82
300	50	86
350	53	88
400	55	87
450	55	88
500	46	48
550	43	13
600	41	1
650	42	--
700	24	--
750	24	--

Fonte: Autor (2023)

Tabela B.9 – Resultados dos ensaios de bancada com pH 9,0 e $V_s = 1$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Turbidez (NTU)
200	8,62	639	17,40
250	8,58	617	15,10
300	8,55	604	12,00
350	8,53	613	22,90
400	8,50	661	50,20
450	8,47	619	93,00
500	8,42	659	127,00
550	8,39	982	231,00
600	8,38	982	282,00
650	8,35	267	346,00
700	8,32	267	325,00
750	8,28	267	250,00

Fonte: Autor (2023)

Tabela B.10 – Remoção de cor aparente e turbidez com pH 9,0 e $V_s = 1$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	Remoção de Cor Aparente (%)	Remoção de Turbidez (%)
200	46	76
250	48	79
300	49	83
350	48	69
400	44	31
450	48	--
500	44	--
550	17	--
600	17	--
650	77	--
700	77	--
750	77	--

Fonte: Autor (2023)

APÊNDICE C – Resultados dos Ensaios de Bancada de Novembro/2022

Tabela C.1 – Resultados dos ensaios de bancada com pH natural (7,90) e $V_s = 1$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Turbidez (NTU)
200	7,73	700	17,60
250	7,73	662	16,10
300	7,68	606	12,60
350	7,69	619	13,60
400	7,66	609	13,20
450	7,66	574	12,20
500	7,61	634	20,90
550	7,58	747	38,40
600	7,59	724	37,80
650	7,52	689	62,70
700	7,48	698	65,60
750	7,48	716	85,80

Fonte: Autor (2023)

Tabela C.2 – Remoção de cor aparente e turbidez com pH natural (7,90) e $V_s = 1$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	Remoção de Cor Aparente (%)	Remoção de Turbidez (%)
200	4	50
250	9	54
300	17	64
350	15	61
400	17	62
450	21	65
500	13	40
550	--	--
600	1	--
650	6	--
700	4	--
750	2	--

Fonte: Autor (2023)

Tabela C.3 – Resultados dos ensaios de bancada com pH 6,0 e $V_s = 1$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Turbidez (NTU)
200	6,15	834	36,30
250	6,13	782	31,90
300	6,13	720	28,90
350	6,12	666	23,70
400	6,12	645	21,80
450	6,14	567	17,00
500	6,27	553	15,40
550	6,25	495	11,00
600	6,27	470	9,52
650	6,25	461	8,28
700	6,23	460	8,72
750	6,27	454	9,06

Fonte: Autor (2023)

Tabela C.4 – Remoção de cor aparente e turbidez com pH 6,0 e $V_s = 1$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	Remoção de Cor Aparente (%)	Remoção de Turbidez (%)
200	--	--
250	--	9
300	1	17
350	9	32
400	12	38
450	22	51
500	24	56
550	32	68
600	36	73
650	37	76
700	37	75
750	38	74

Fonte: Autor (2023)

Tabela C.5 – Resultados dos ensaios de bancada com pH 6,5 e $V_s = 1$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Turbidez (NTU)
200	6,62	802	34,30
250	6,67	758	30,10
300	6,68	688	25,80
350	6,68	647	21,30
400	6,67	612	18,70
450	6,69	565	16,40
500	6,72	575	15,30
550	6,72	502	11,50
600	6,72	507	11,30
650	6,74	482	11,50
700	6,73	560	27,60
750	6,75	475	12,30

Fonte: Autor (2023)

Tabela C.6 – Remoção de cor aparente e turbidez com pH 6,5 e $V_s = 1$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	Remoção de Cor Aparente (%)	Remoção de Turbidez (%)
200	--	2
250	--	14
300	6	26
350	11	39
400	16	46
450	23	53
500	21	56
550	31	67
600	31	68
650	34	67
700	23	21
750	35	65

Fonte: Autor (2023)

Tabela C.7 – Resultados dos ensaios de bancada com pH 8,5 e $V_s = 1$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Turbidez (NTU)
200	8,30	740	17,80
250	8,29	713	15,80
300	8,27	674	14,10
350	8,22	687	15,00
400	8,18	772	33,60
450	8,17	729	28,90
500	8,23	780	35,50
550	8,17	710	58,40
600	8,15	716	73,60
650	8,11	927	82,70
700	8,07	978	90,30
750	8,06	978	91,60

Fonte: Autor (2023)

Tabela C.8 – Remoção de cor aparente e turbidez com pH 8,5 e $V_s = 1$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	Remoção de Cor Aparente (%)	Remoção de Turbidez (%)
200	--	49
250	2	55
300	8	60
350	6	57
400	--	4
450	0	17
500	--	--
550	3	--
600	2	--
650	--	--
700	--	--
750	--	--

Fonte: Autor (2023)

Tabela C.9 – Resultados dos ensaios de bancada com pH 9,0 e $V_s = 1$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Turbidez (NTU)
200	8,83	782	46,10
250	8,81	754	33,30
300	8,79	727	36,60
350	8,77	721	27,00
400	8,75	720	26,10
450	8,75	691	22,20
500	8,79	738	59,60
550	8,77	721	82,20
600	8,76	892	117,00
650	8,75	895	127,00
700	8,71	978	163,00
750	8,72	978	232,00

Fonte: Autor (2023)

Tabela C.10 – Remoção de cor aparente e turbidez com pH 9,0 e $V_s = 1$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	Remoção de Cor Aparente (%)	Remoção de Turbidez (%)
200	--	--
250	--	5
300	0	--
350	1	23
400	1	25
450	5	36
500	--	--
550	1	--
600	--	--
650	--	--
700	--	--
750	--	--

Fonte: Autor (2023)

Tabela C.11 – Resultados dos ensaios de bancada com pH natural (7,90) e $V_s = 0,5$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Turbidez (NTU)
200	7,67	683	15,00
250	7,64	636	12,30
300	7,62	590	11,30
350	7,59	611	11,30
400	7,59	588	9,84
450	7,58	554	8,77
500	7,58	560	8,99
550	7,55	542	7,46
600	7,57	521	7,32
650	7,55	509	6,20
700	7,44	489	5,43
750	7,48	470	5,09

Fonte: Autor (2023)

Tabela C.12 – Remoção de cor aparente e turbidez com pH natural (7,90) e $V_s = 0,5$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	Remoção de Cor Aparente (%)	Remoção de Turbidez (%)
200	6	57
250	13	65
300	19	68
350	16	68
400	19	72
450	24	75
500	23	74
550	26	79
600	29	79
650	30	82
700	33	84
750	36	85

Fonte: Autor (2023)

Tabela C.13 – Resultados dos ensaios de bancada com pH 6,0 e $V_s = 0,5$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Turbidez (NTU)
200	6,17	823	33,30
250	6,20	759	28,40
300	6,18	698	24,50
350	6,17	653	20,70
400	6,17	628	18,50
450	6,18	548	13,70
500	6,24	533	11,70
550	6,23	484	8,51
600	6,24	462	7,40
650	6,21	455	6,73
700	6,21	446	6,58
750	6,23	441	6,89

Fonte: Autor (2023)

Tabela C.14 – Remoção de cor aparente e turbidez com pH 6,0 e $V_s = 0,5$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	Remoção de Cor Aparente (%)	Remoção de Turbidez (%)
200	--	5
250	--	19
300	4	30
350	11	41
400	14	47
450	25	61
500	27	66
550	34	76
600	37	79
650	38	81
700	39	81
750	40	80

Fonte: Autor (2023)

Tabela C.15 – Resultados dos ensaios de bancada com pH 6,5 e $V_s = 0,5$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Turbidez (NTU)
200	6,79	789	30,60
250	6,81	738	26,70
300	6,80	671	23,40
350	6,76	635	18,80
400	6,77	593	16,40
450	6,76	548	14,30
500	6,77	558	12,60
550	6,77	503	9,49
600	6,77	476	8,51
650	6,77	456	7,51
700	6,74	444	6,40
750	6,77	433	6,83

Fonte: Autor (2023)

Tabela C.16 – Remoção de cor aparente e turbidez com pH 6,5 e $V_s = 0,5$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	Remoção de Cor Aparente (%)	Remoção de Turbidez (%)
200	--	12
250	--	23
300	8	33
350	13	46
400	19	53
450	25	59
500	24	64
550	31	73
600	35	76
650	38	78
700	39	82
750	41	80

Fonte: Autor (2023)

Tabela C.17 – Resultados dos ensaios de bancada com pH 8,5 e $V_s = 0,5$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Turbidez (NTU)
200	8,19	725	16,00
250	8,13	703	14,40
300	8,14	661	11,90
350	8,13	668	12,20
400	8,04	637	10,60
450	8,10	624	10,60
500	8,21	628	10,30
550	8,16	604	8,77
600	8,13	577	8,23
650	8,10	578	7,81
700	8,06	600	12,80
750	8,06	563	11,20

Fonte: Autor (2023)

Tabela C.18 – Remoção de cor aparente e turbidez com pH 8,5 e $V_s = 0,5$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	Remoção de Cor Aparente (%)	Remoção de Turbidez (%)
200	1	54
250	4	59
300	9	66
350	8	65
400	13	70
450	15	70
500	14	70
550	17	75
600	21	76
650	21	78
700	18	63
750	23	68

Fonte: Autor (2023)

Tabela C.19 – Resultados dos ensaios de bancada com pH 9,0 e $V_s = 0,5$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Turbidez (NTU)
200	8,80	765	41,30
250	8,78	751	29,90
300	8,77	722	30,60
350	8,75	719	20,70
400	8,74	712	21,00
450	8,74	686	18,40
500	8,72	695	17,20
550	8,70	662	17,10
600	8,69	672	15,90
650	8,67	660	16,50
700	8,63	632	15,10
750	8,64	647	14,40

Fonte: Autor (2023)

Tabela C.20 – Remoção de cor aparente e turbidez com pH 9,0 e $V_s = 0,5$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	Remoção de Cor Aparente (%)	Remoção de Turbidez (%)
200	--	--
250	--	14
300	1	12
350	2	41
400	2	40
450	6	47
500	5	51
550	9	51
600	8	54
650	10	53
700	13	57
750	11	59

Fonte: Autor (2023)

APÊNDICE D – Resultados dos Ensaios de Bancada de Janeiro/2023

Tabela D.1 – Resultados dos ensaios de bancada com pH natural (8,27) e $V_s = 1$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Turbidez (NTU)
200	8,33	977	29,90
250	8,35	977	31,10
300	8,33	983	31,70
350	8,31	981	31,10
400	8,30	984	31,40
450	8,28	785	29,30
500	8,16	600	28,40
550	8,13	626	25,50
600	8,13	565	25,20
650	8,11	624	25,10
700	8,09	970	22,20
750	8,09	906	22,40

Fonte: Autor (2023)

Tabela D.2 – Remoção de cor aparente e turbidez com pH natural (8,27) e $V_s = 1$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	Remoção de Cor Aparente (%)	Remoção de Turbidez (%)
200	0	18
250	0	14
300	--	13
350	0	14
400	--	13
450	20	19
500	39	22
550	36	30
600	42	31
650	36	31
700	1	39
750	7	38

Fonte: Autor (2023)

Tabela D.3 – Resultados dos ensaios de bancada com pH 6,0 e $V_s = 1$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Turbidez (NTU)
200	6,21	977	34,70
250	6,22	975	34,30
300	6,23	977	32,70
350	6,21	806	32,40
400	6,22	793	31,50
450	6,24	757	28,30
500	6,40	937	24,30
550	6,40	1014	22,30
600	6,42	998	17,70
650	6,41	991	19,40
700	6,45	915	20,10
750	6,43	930	16,00

Fonte: Autor (2023)

Tabela D.4 – Remoção de cor aparente e turbidez com pH 6,0 e $V_s = 1$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	Remoção de Cor Aparente (%)	Remoção de Turbidez (%)
200	0	4
250	0	6
300	0	10
350	18	11
400	19	13
450	23	22
500	4	33
550	--	39
600	--	51
650	--	47
700	6	45
750	5	56

Fonte: Autor (2023)

Tabela D.5 – Resultados dos ensaios de bancada com pH 6,5 e $V_s = 1$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Turbidez (NTU)
200	6,69	980	29,70
250	6,74	980	31,80
300	6,74	973	31,90
350	6,73	990	31,00
400	6,71	796	31,20
450	6,71	793	29,60
500	6,87	795	29,00
550	6,86	789	29,60
600	6,89	722	26,20
650	6,88	773	27,00
700	6,88	988	22,90
750	6,91	985	22,50

Fonte: Autor (2023)

Tabela D.6 – Remoção de cor aparente e turbidez com pH 6,5 e $V_s = 1$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	Remoção de Cor Aparente (%)	Remoção de Turbidez (%)
200	0	18
250	0	12
300	0	12
350	--	15
400	19	14
450	19	18
500	19	20
550	19	18
600	26	28
650	21	26
700	--	37
750	--	38

Fonte: Autor (2023)

Tabela D.7 – Resultados dos ensaios de bancada com pH 8,5 e $V_s = 1$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Turbidez (NTU)
200	8,49	984	29,80
250	8,50	995	28,70
300	8,48	998	29,00
350	8,47	804	27,50
400	8,45	732	26,60
450	8,43	730	27,60
500	8,32	895	27,40
550	8,33	945	24,00
600	8,32	948	22,60
650	8,31	947	21,90
700	8,31	1012	20,50
750	8,29	976	21,10

Fonte: Autor (2023)

Tabela D.8 – Remoção de cor aparente e turbidez com pH 8,5 e $V_s = 1$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	Remoção de Cor Aparente (%)	Remoção de Turbidez (%)
200	--	18
250	--	21
300	--	20
350	18	24
400	25	27
450	25	24
500	8	25
550	3	34
600	3	38
650	3	40
700	--	44
750	0	42

Fonte: Autor (2023)

Tabela D.9 – Resultados dos ensaios de bancada com pH 9,0 e $V_s = 1$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Turbidez (NTU)
200	8,98	976	28,60
250	8,97	988	29,90
300	8,96	992	29,50
350	8,95	818	29,40
400	8,95	813	28,30
450	8,93	810	29,30
500	8,85	806	28,50
550	8,87	770	28,10
600	8,86	748	26,70
650	8,86	799	26,80
700	8,85	761	26,20
750	8,83	760	25,90

Fonte: Autor (2023)

Tabela D.10 – Remoção de cor aparente e turbidez com pH 9,0 e $V_s = 1$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	Remoção de Cor Aparente (%)	Remoção de Turbidez (%)
200	0	21
250	--	18
300	--	19
350	16	19
400	17	22
450	17	19
500	18	21
550	21	23
600	23	26
650	18	26
700	22	28
750	22	29

Fonte: Autor (2023)

Tabela D.11 – Resultados dos ensaios de bancada com pH natural (8,27) e $V_s = 0,5$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Turbidez (NTU)
200	8,34	977	33,10
250	8,33	977	31,20
300	8,31	977	31,30
350	8,29	986	30,00
400	8,27	793	30,80
450	8,25	785	27,40
500	8,17	591	27,10
550	8,18	688	24,70
600	8,18	583	24,70
650	8,16	752	22,70
700	8,13	995	20,90
750	8,12	988	20,90

Fonte: Autor (2023)

Tabela D.12 – Remoção de cor aparente e turbidez com pH natural (8,27) e $V_s = 0,5$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	Remoção de Cor Aparente (%)	Remoção de Turbidez (%)
200	0	9
250	0	14
300	0	14
350	--	17
400	19	15
450	20	25
500	40	25
550	30	32
600	40	32
650	23	37
700	--	42
750	--	42

Fonte: Autor (2023)

Tabela D.13 – Resultados dos ensaios de bancada com pH 6,0 e $V_s = 0,5$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Turbidez (NTU)
200	6,24	960	32,20
250	6,25	976	32,00
300	6,24	980	31,80
350	6,24	806	31,20
400	6,26	792	30,00
450	6,22	797	26,70
500	6,38	980	22,30
550	6,43	1009	20,20
600	6,44	991	20,20
650	6,43	978	16,60
700	6,43	895	15,80
750	6,43	920	13,70

Fonte: Autor (2023)

Tabela D.14 – Remoção de cor aparente e turbidez com pH 6,0 e $V_s = 0,5$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	Remoção de Cor Aparente (%)	Remoção de Turbidez (%)
200	2	11
250	0	12
300	0	12
350	18	14
400	19	17
450	18	26
500	0	39
550	--	44
600	--	44
650	0	54
700	8	56
750	6	62

Fonte: Autor (2023)

Tabela D.15 – Resultados dos ensaios de bancada com pH 6,5 e $V_s = 0,5$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Turbidez (NTU)
200	6,74	980	30,30
250	6,77	980	31,30
300	6,79	976	31,10
350	6,77	990	30,50
400	6,74	796	30,10
450	6,77	792	28,10
500	6,85	792	29,10
550	6,89	788	28,80
600	6,90	841	25,00
650	6,89	939	25,40
700	6,89	976	21,10
750	6,92	984	20,50

Fonte: Autor (2023)

Tabela D.16 – Remoção de cor aparente e turbidez com pH 6,5 e $V_s = 0,5$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	Remoção de Cor Aparente (%)	Remoção de Turbidez (%)
200	0	17
250	0	14
300	0	14
350	--	16
400	19	17
450	19	23
500	19	20
550	19	21
600	14	31
650	4	30
700	0	42
750	--	44

Fonte: Autor (2023)

Tabela D.17 – Resultados dos ensaios de bancada com pH 8,5 e $V_s = 0,5$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Turbidez (NTU)
200	8,47	966	28,20
250	8,48	810	28,60
300	8,47	809	28,30
350	8,46	801	27,60
400	8,41	785	26,40
450	8,43	726	26,00
500	8,33	877	24,60
550	8,32	955	22,90
600	8,31	933	21,90
650	8,29	923	21,20
700	8,29	996	19,70
750	8,28	999	19,60

Fonte: Autor (2023)

Tabela D.18 – Remoção de cor aparente e turbidez com pH 8,5 e $V_s = 0,5$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	Remoção de Cor Aparente (%)	Remoção de Turbidez (%)
200	1	22
250	17	21
300	17	22
350	18	24
400	20	27
450	26	28
500	10	32
550	2	37
600	5	40
650	6	42
700	--	46
750	--	46

Fonte: Autor (2023)

Tabela D.19 – Resultados dos ensaios de bancada com pH 9,0 e $V_s = 0,5$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Turbidez (NTU)
200	8,96	1001	29,10
250	8,96	1003	28,60
300	8,95	1001	29,40
350	8,94	819	28,20
400	8,93	808	28,70
450	8,92	809	28,10
500	8,84	806	28,50
550	8,85	785	26,90
600	8,85	797	25,90
650	8,84	798	27,80
700	8,83	800	26,00
750	8,82	772	26,80

Fonte: Autor (2023)

Tabela D.20 – Remoção de cor aparente e turbidez com pH 9,0 e $V_s = 0,5$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	Remoção de Cor Aparente (%)	Remoção de Turbidez (%)
200	--	20
250	--	21
300	--	19
350	16	22
400	17	21
450	17	23
500	18	21
550	20	26
600	18	29
650	18	23
700	18	28
750	21	26

Fonte: Autor (2023)

APÊNDICE E – Resultados dos Ensaio de Bancada de Fevereiro/2023

Tabela E.1 – Resultados dos ensaios de bancada com pH natural (8,16) e $V_s = 1$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Turbidez (NTU)
200	8,13	814	21,20
250	8,13	903	15,90
300	8,11	904	15,90
350	8,09	943	15,30
400	8,08	1048	13,90
450	8,05	1038	12,70
500	7,98	937	19,70
550	7,98	982	35,90
600	7,96	982	60,80
650	7,95	982	79,20
700	7,92	982	93,10
750	7,87	982	108,00

Fonte: Autor (2023)

Tabela E.2 – Remoção de cor aparente e turbidez com pH natural (8,16) e $V_s = 1$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	Remoção de Cor Aparente (%)	Remoção de Turbidez (%)
200	17	23
250	7	42
300	7	42
350	3	45
400	--	50
450	--	54
500	4	29
550	--	--
600	--	--
650	--	--
700	--	--
750	--	--

Fonte: Autor (2023)

Tabela E.3 – Resultados dos ensaios de bancada com pH 6,0 e $V_s = 1$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Turbidez (NTU)
200	6,22	977	40,50
250	6,23	819	40,40
300	6,24	999	42,90
350	6,24	844	39,40
400	6,22	806	44,90
450	6,22	901	41,90
500	6,26	1001	38,50
550	6,28	1030	36,60
600	6,28	1014	32,00
650	6,26	922	23,90
700	6,27	870	20,60
750	6,28	922	25,00

Fonte: Autor (2023)

Tabela E.4 – Remoção de cor aparente e turbidez com pH 6,0 e $V_s = 1$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	Remoção de Cor Aparente (%)	Remoção de Turbidez (%)
200	0	--
250	16	--
300	--	--
350	14	--
400	17	--
450	8	--
500	--	--
550	--	--
600	--	--
650	6	13
700	11	25
750	6	9

Fonte: Autor (2023)

Tabela E.5 – Resultados dos ensaios de bancada com pH 6,5 e $V_s = 1$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Turbidez (NTU)
200	6,73	993	34,10
250	6,76	806	35,10
300	6,78	804	34,10
350	6,75	797	32,70
400	6,79	920	34,30
450	6,77	980	32,00
500	6,77	921	33,10
550	6,79	997	29,50
600	6,79	958	23,00
650	6,80	938	23,30
700	6,79	974	40,30
750	6,80	885	19,20

Fonte: Autor (2023)

Tabela E.6 – Remoção de cor aparente e turbidez com pH 6,5 e $V_s = 1$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	Remoção de Cor Aparente (%)	Remoção de Turbidez (%)
200	--	--
250	17	--
300	18	--
350	18	--
400	6	--
450	0	--
500	6	--
550	--	--
600	2	17
650	4	16
700	0	--
750	9	30

Fonte: Autor (2023)

Tabela E.7 – Resultados dos ensaios de bancada com pH 8,5 e $V_s = 1$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Turbidez (NTU)
200	8,47	905	16,50
250	8,48	1124	15,70
300	8,46	1125	14,00
350	8,45	1092	13,70
400	8,43	1066	13,40
450	8,42	1068	12,00
500	8,37	807	36,60
550	8,37	804	40,50
600	8,36	980	59,50
650	8,36	980	61,90
700	8,33	980	87,20
750	8,31	980	99,70

Fonte: Autor (2023)

Tabela E.8 – Remoção de cor aparente e turbidez com pH 8,5 e $V_s = 1$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	Remoção de Cor Aparente (%)	Remoção de Turbidez (%)
200	7	40
250	--	43
300	--	49
350	--	50
400	--	51
450	--	57
500	17	--
550	18	--
600	0	--
650	0	--
700	0	--
750	0	--

Fonte: Autor (2023)

Tabela E.9 – Resultados dos ensaios de bancada com pH 9,0 e $V_s = 1$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Turbidez (NTU)
200	8,92	818	18,80
250	8,92	954	17,00
300	8,90	945	16,70
350	8,90	936	16,10
400	8,88	1027	14,60
450	8,87	988	13,80
500	8,82	1095	14,40
550	8,81	1055	12,40
600	8,82	1078	12,70
650	8,82	1070	13,50
700	8,79	984	23,20
750	8,78	840	31,30

Fonte: Autor (2023)

Tabela E.10 – Remoção de cor aparente e turbidez com pH 9,0 e $V_s = 1$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	Remoção de Cor Aparente (%)	Remoção de Turbidez (%)
200	16	32
250	2	38
300	3	39
350	4	42
400	--	47
450	--	50
500	--	48
550	--	55
600	--	54
650	--	51
700	--	16
750	14	--

Fonte: Autor (2023)

Tabela E.11 – Resultados dos ensaios de bancada com pH natural (8,16) e $V_s = 0,5$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Turbidez (NTU)
200	8,11	807	17,10
250	8,11	1046	14,60
300	8,09	981	13,70
350	8,09	1070	12,90
400	8,08	1040	11,40
450	8,06	1035	10,50
500	8,00	1012	9,89
550	7,99	955	8,80
600	7,94	964	8,84
650	7,94	931	8,53
700	7,92	927	11,00
750	7,90	899	8,22

Fonte: Autor (2023)

Tabela E.12 – Remoção de cor aparente e turbidez com pH natural (8,16) e $V_s = 0,5$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	Remoção de Cor Aparente (%)	Remoção de Turbidez (%)
200	17	38
250	--	47
300	--	50
350	--	53
400	--	59
450	--	62
500	--	64
550	2	68
600	1	68
650	5	69
700	5	60
750	8	70

Fonte: Autor (2023)

Tabela E.13 – Resultados dos ensaios de bancada com pH 6,0 e $V_s = 0,5$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Turbidez (NTU)
200	6,22	802	35,20
250	6,21	812	36,10
300	6,23	818	38,60
350	6,23	903	37,80
400	6,22	845	43,20
450	6,22	901	38,50
500	6,26	1018	34,80
550	6,26	1022	32,80
600	6,29	995	29,50
650	6,27	907	20,90
700	6,28	849	17,50
750	6,30	911	23,00

Fonte: Autor (2023)

Tabela E.14 – Remoção de cor aparente e turbidez com pH 6,0 e $V_s = 0,5$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	Remoção de Cor Aparente (%)	Remoção de Turbidez (%)
200	18	--
250	17	--
300	16	--
350	7	--
400	13	--
450	8	--
500	--	--
550	--	--
600	--	--
650	7	24
700	13	37
750	7	17

Fonte: Autor (2023)

Tabela E.15 – Resultados dos ensaios de bancada com pH 6,5 e $V_s = 0,5$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Turbidez (NTU)
200	6,75	817	29,00
250	6,77	802	30,90
300	6,76	799	32,10
350	6,76	797	31,80
400	6,76	964	30,20
450	6,78	980	28,40
500	6,76	1033	27,60
550	6,79	986	27,40
600	6,79	941	20,40
650	6,82	915	19,50
700	6,79	848	13,90
750	6,81	874	16,80

Fonte: Autor (2023)

Tabela E.16 – Remoção de cor aparente e turbidez com pH 6,5 e $V_s = 0,5$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	Remoção de Cor Aparente (%)	Remoção de Turbidez (%)
200	16	--
250	18	--
300	18	--
350	18	--
400	1	--
450	0	--
500	--	0
550	--	1
600	4	26
650	6	29
700	13	50
750	10	39

Fonte: Autor (2023)

Tabela E.17 – Resultados dos ensaios de bancada com pH 8,5 e $V_s = 0,5$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Turbidez (NTU)
200	8,48	905	15,50
250	8,47	1115	14,70
300	8,46	1113	14,20
350	8,45	1103	12,60
400	8,43	1062	10,80
450	8,42	1065	11,90
500	8,37	1043	9,91
550	8,38	1014	9,60
600	8,36	1030	9,23
650	8,35	1022	10,00
700	8,31	991	10,50
750	8,32	992	8,91

Fonte: Autor (2023)

Tabela E.18 – Remoção de cor aparente e turbidez com pH 8,5 e $V_s = 0,5$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	Remoção de Cor Aparente (%)	Remoção de Turbidez (%)
200	7	44
250	--	47
300	--	49
350	--	54
400	--	61
450	--	57
500	--	64
550	--	65
600	--	67
650	--	64
700	--	62
750	--	68

Fonte: Autor (2023)

Tabela E.19 – Resultados dos ensaios de bancada com pH 9,0 e $V_s = 0,5$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	pH de coagulação	Cor Aparente (uC)	Turbidez (NTU)
200	8,90	887	16,60
250	8,90	950	16,30
300	8,89	992	15,30
350	8,87	963	14,90
400	8,86	1090	13,50
450	8,86	1049	13,80
500	8,81	1088	12,20
550	8,80	1053	12,30
600	8,80	1076	11,60
650	8,80	1068	11,90
700	8,79	1037	11,00
750	8,77	1040	11,10

Fonte: Autor (2023)

Tabela E.20 – Remoção de cor aparente e turbidez com pH 9,0 e $V_s = 0,5$ cm/min

Dosagem de PAC (mg/L)	Remoção de Cor Aparente (%)	Remoção de Turbidez (%)
200	9	40
250	3	41
300	--	45
350	1	46
400	--	51
450	--	50
500	--	56
550	--	55
600	--	58
650	--	57
700	--	60
750	--	60

Fonte: Autor (2023)

APÊNDICE F – Resultados das Análises de DQO e N-amoniaco de Out/2022

Tabela F.1 – Concentração de DQO nas amostras remanescentes dos ensaios de bancada

Ponto	pH	Dosagem de PAC (mg/L)	Vs (cm/min)	DQO inicial (mg.O ₂ /L)	DQO final (mg.O ₂ /L)	Remoção (%)
1	6,00	600	1,0	1.865,56	1.398,16	25
2	6,00	750	1,0		1.215,96	35

Fonte: Autor (2023)

Tabela F.2 – Concentração de N-amoniaco nas amostras remanescentes dos ensaios de bancada

Ponto	pH	Dosagem de PAC (mg/L)	Vs (cm/min)	N-amoniaco inicial (mg.N-NH ₃ /L)	N-amoniaco final (mg.N-NH ₃ /L)	Remoção (%)
1	6,00	600	1,0	96,18	72,24	25
2	6,00	750	1,0		66,36	31

Fonte: Autor (2023)

APÊNDICE G – Resultados das Análises de DQO e N-amoniaco de Nov/2022

Tabela G.1 – Concentração de DQO nas amostras remanescentes dos ensaios de bancada

Ponto	pH	Dosagem de PAC (mg/L)	Vs (cm/min)	DQO inicial (mg.O ₂ /L)	DQO final (mg.O ₂ /L)	Remoção (%)
1	6,00	650	1,0	1.837,93	1.252,97	32
2	6,00	700	1,0		1.204,57	34
3	7,90	750	0,5		1.207,42	34
4	6,50	750	0,5		1.193,19	35

Fonte: Autor (2023)

Tabela G.2 – Concentração de N-amoniaco nas amostras remanescentes dos ensaios de bancada

Ponto	pH	Dosagem de PAC (mg/L)	Vs (cm/min)	N-amoniaco inicial (mg.N-NH ₃ /L)	N-amoniaco final (mg.N-NH ₃ /L)	Remoção (%)
1	6,00	650	1,0	208,32	127,68	39
2	6,00	700	1,0		135,24	35
3	7,90	750	0,5		206,64	1
4	6,50	750	0,5		178,92	14

Fonte: Autor (2023)

APÊNDICE H – Resultados das Análises de DQO e N-amoniaco de Jan/2023

Tabela H.1 – Concentração de DQO nas amostras remanescentes dos ensaios de bancada

Ponto	pH	Dosagem de PAC (mg/L)	Vs (cm/min)	DQO inicial (mg.O ₂ /L)	DQO final (mg.O ₂ /L)	Remoção (%)
1	8,27	600	1,0	2.200,07	2.100,43	5
2	6,00	750	1,0		1.844,21	16
3	8,27	600	0,5		2.007,90	9
4	6,00	750	0,5		1.865,56	15

Fonte: Autor (2023)

Tabela H.2 – Concentração de N-amoniaco nas amostras remanescentes dos ensaios de bancada

Ponto	pH	Dosagem de PAC (mg/L)	Vs (cm/min)	N-amoniaco inicial (mg.N-NH ₃ /L)	N-amoniaco final (mg.N-NH ₃ /L)	Remoção (%)
1	8,27	600	1,0	589,18	575,48	2
2	6,00	750	1,0		306,92	48
3	8,27	600	0,5		553,55	6
4	6,00	750	0,5		331,58	44

Fonte: Autor (2023)

APÊNDICE I – Resultados das Análises de DQO e N-amoniaco de Fev/2023

Tabela I.1 – Concentração de DQO nas amostras remanescentes dos ensaios de bancada

Ponto	pH	Dosagem de PAC (mg/L)	Vs (cm/min)	DQO inicial (mg.O ₂ /L)	DQO final (mg.O ₂ /L)	Remoção (%)
1	8,16	450	1,0	2.649,52	2.357,26	11
2	6,50	350	1,0		2.327,29	12
3	8,16	750	0,5		2.259,84	15
4	6,50	350	0,5		2.402,22	9

Fonte: Autor (2023)

Tabela I.2 – Concentração de N-amoniaco nas amostras remanescentes dos ensaios de bancada

Ponto	pH	Dosagem de PAC (mg/L)	Vs (cm/min)	N-amoniaco inicial (mg.N-NH ₃ /L)	N-amoniaco final (mg.N-NH ₃ /L)	Remoção (%)
1	8,16	450	1,0	411,05	408,31	1
2	6,50	350	1,0		405,57	1
3	8,16	750	0,5		397,35	3
4	6,50	350	0,5		369,95	10

Fonte: Autor (2023)