

Análise Comparativa entre Água Sintética à Base de Caulim e Substâncias Húmicas e Água Natural Superficial em Ensaio de Coagulação-Floculação

Comparative Analysis of Synthetic Kaolin-Humic Substances Water and Natural Surface Water in Coagulation-Flocculation Tests

Diego Gouveia Marques,^{a,*} Janaina de Melo Franco Domingos,^b Valquíria Campos^a

^a Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, Departamento de Engenharia Ambiental, CEP 18087-180, Sorocaba-SP, Brasil

^b Universidade de São Paulo (USP), Escola de Artes, Ciências e Humanidades, CEP 03828-000, São Paulo-SP, Brasil

*E-mail: diego.marques@unesp.br

Submissão: 19 de Fevereiro de 2025

Aceite: 13 de Setembro de 2025

Publicado online: 19 de Setembro de 2025

Treatability tests are part of the continuous improvement routine in a water treatment process for supply purposes. The use of synthetic waters is widely observed, promoting the standardization and versatility of raw water samples. Among the most commonly used reagents, kaolin and humic and fulvic acids stand out. This study examined the behavior of parameters frequently monitored in natural raw waters in relation to kaolin and humic and fulvic acid concentrations, assessing the relationship between their values and the coagulant demand required to reach the isoelectric point. Once the conditions of a synthetic water similar to natural water in terms of turbidity and coagulant demand were established, comparative jar tests with natural water were conducted. The results showed no significant difference at the 5% level for the charge neutralization mechanism and low-turbidity waters. However, the synthetic water exhibited greater turbidity reduction in medium-turbidity water samples, where the sweep coagulation mechanism was predominant. This divergent result may be explained by the presence of small particles naturally occurring in raw water, such as non-humic organic matter, which can hinder the coagulation process, in contrast to the more uniform and larger-diameter particles in the prepared synthetic water.

Keywords: Jar test; water treatment; raw water; synthetic water formulation; coagulation diagram.

1. Introdução

O crescimento da demanda por água potável tem demandado o desenvolvimento de tecnologias voltadas à garantia do fornecimento seguro em qualidade e quantidade, condição fundamental para o bem-estar coletivo. Dentre as fontes de água para abastecimento, as águas superficiais naturais destacam-se por sua ampla utilização.^{1,2} Esse tipo de manancial possui, em geral, impurezas de dimensões que conferem aspecto de sistema coloidal, como ácidos húmicos (AH) e ácidos fúlvicos (AF), microrganismos e grãos finos, como silte e argila. As partículas finas e outros detritos terrestres são gerados pelo intemperismo, com consequente deposição nos corpos d'água.³ Adicionalmente, a variação da qualidade de águas de superfície é amplamente afetada por fatores sazonais, como a precipitação pluviométrica.⁴ O monitoramento da qualidade de águas naturais empregadas no abastecimento é de extrema importância para garantir a proteção da saúde pública, e variáveis como pH, matéria orgânica, condutividade elétrica e turbidez são exemplos de parâmetros avaliados, para esse acompanhamento.^{5,6}

Um dos processos de maior importância no tratamento de água é a coagulação, responsável pela desestabilização dos sistemas coloidais, permitindo sua agregação e separação.^{7,8} Dentre os mecanismos relacionados ao tratamento, destacam-se a neutralização de carga e a varredura, sendo que cada mecanismo tem sua característica operacional e vantagem associada.⁹ O mecanismo de neutralização de cargas atua reduzindo a repulsão eletrostática entre as partículas coloidais, permitindo sua aproximação, colisão e consequente agregação. O monitoramento do potencial zeta é essencial nesse mecanismo, pois permite alcançar condições próximas à neutralidade e prevenir a inversão de cargas. Caracterizada por valores positivos, a inversão de cargas pode comprometer a eficiência da coagulação e levar à reestabilização indesejada do sistema.¹⁰ No mecanismo de varredura, por sua vez, em dosagens mais altas de coagulante e faixas de pH ligeiramente básicas, a alta formação de hidróxidos insolúveis promove o arraste físico de partículas coloidais presentes na água.¹¹

O estudo de etapas do tratamento de água buscando melhoria operacional relacionada à efetividade dos sistemas é incentivado.¹² O termo “ensaio de tratabilidade” abrange estudos de etapas isoladas ou a associação de processos, normalmente empregando reator estático,

também chamado de *jar test*, os quais permitem a avaliação de diversas condições como pH e concentração de reagentes, visando a melhoria na remoção de componentes de interesse sanitário.¹³

A determinação da dosagem de coagulante é um processo não linear, influenciado por múltiplos fatores e sustentado por reações químicas complexas.¹⁴ Entre os principais parâmetros destacam-se a dosagem de coagulante aplicada e o pH de coagulação. Diagramas de coagulação que relacionam essas variáveis são amplamente utilizados para estudos do processo, tendo como resposta a turbidez residual em cada condição avaliada.^{15,16} O diagrama de coagulação, comumente, possui mais de 60 pontos,^{15,16} ou seja, com o uso de água natural, seria necessário um mínimo de 120 L, considerando os jarros de 2 L do *jar test*. Dada a variabilidade temporal da qualidade da água, é necessário o armazenamento de grandes volumes para assegurar condições iniciais equivalentes das amostras entre os testes. Entretanto, o armazenamento de grandes volumes pode acarretar modificações por sedimentação natural ou deterioração, comprometendo a premissa de condição semelhante das amostras.¹⁷

Do ponto de vista de experimentação, duas amostras que não estão exatamente na mesma condição inicial dificultam a interpretação e comparação dos resultados, sendo um cenário não recomendável em sistemas experimentais controlados.¹⁸ Nesse contexto de necessidade de padronização da água bruta e do emprego de diferentes condições iniciais, observa-se que diversos autores empregaram águas sintéticas para ensaios de tratabilidade, especificamente em ensaios de coagulação-floculação. Dentre os trabalhos levantados na literatura, verificou-se o emprego de suspensão de caulim,¹⁹⁻²² soluções de AH,²³⁻²⁶ e as associações de caulim com AH,²⁷⁻²⁹ bentonita com AF,³⁰ e caulim com AF.^{31,32}

O caulim refere-se ao nome comercial de produto constituído, essencialmente, por caulinita, um silicato de alumínio hidratado, com célula unitária expressa por $\text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$ e classificado como filossilicato com estrutura 1:1.^{33,34} Argilominerais, em geral, caracterizam-se por apresentar partículas muito finas, elevada carga superficial, alta capacidade de troca catiônica, elevada área superficial e intumescimento na presença de água. Nesses minerais, na fração argila, as superfícies das camadas estão disponíveis para hidratação e troca de cátions.³⁵

As substâncias húmicas, por sua vez, são compostos orgânicos oriundos da decomposição de resíduos vegetais e animais do ambiente, constituídas de AH, AF, huminas e ácidos himatomelânicos. Os ácidos húmicos e fúlvicos, referenciados como AH+AF neste trabalho, são os compostos mais importantes das frações húmicas com relação à reatividade e ocorrência nos ecossistemas.³⁶

No contexto de águas sintéticas, a representatividade em relação às amostras naturais e a definição dos parâmetros de referência para reproduzir o comportamento das amostras são fatores de grande importância, frequentemente subestimados. Dentre os estudos que utilizaram Caulim–

AH, por exemplo, observa-se que a preparação da água sintética costuma se restringir ao ajuste de faixas de interesse para parâmetros como turbidez, absorvância em 254 nm e pH, e em menor frequência, o carbono orgânico total (TOC) e a demanda química de oxigênio (DQO). Os autores, em geral, assumem que a reprodução desses valores é suficiente para obter águas sintéticas próximas das naturais ou com comportamento esperado em ensaios de tratabilidade.²⁷⁻²⁹ Contudo, essa abordagem limita-se à comparação numérica dos parâmetros, sem verificar se valores semelhantes mantêm consistência quando aplicados a sistemas de naturezas distintas: águas sintéticas, compostas por poucas substâncias, e águas naturais, caracterizadas pela presença de múltiplos interferentes. Além disso, aspectos essenciais para a coagulação, como o acompanhamento do potencial zeta em função da dosagem de coagulante,¹⁰ não foram abordados, não levando em conta a possibilidade de inversão de cargas nas faixas estudadas, o que amplia o risco de interpretações equivocadas sobre condições efetivas de coagulação em um diagrama. A ausência dessa verificação de comportamento entre águas sintéticas e naturais pode, portanto, comprometer a confiabilidade dos resultados.

O presente trabalho teve como objetivo verificar se parâmetros físico-químicos comumente monitorados em águas brutas (turbidez, absorvância em 254 nm, cor aparente, condutividade, potencial zeta) podem ser utilizados como referência na formulação de águas sintéticas para ensaios de tratabilidade. Para tanto, além do acompanhamento da variação desses parâmetros em relação ao Caulim e às substâncias húmicas, foi avaliado o comportamento do potencial zeta das águas sintéticas preparadas em resposta ao uso de coagulantes. Ao final, foram comparados os resultados de turbidez residual em ensaios de *jar test* conduzidos com amostras naturais e sintéticas de baixa e média turbidez, sob mecanismos de neutralização de cargas e de varredura, a fim de identificar eventuais equivalências ou desvios (subestimação ou superestimação).

2. Experimental

Na produção da água sintética foram utilizados caulim da empresa ACS científica, com 98% das partículas menores que 0,425 mm e uma mistura pastosa de AH+AF da marca Imperial Nutri. As substâncias húmicas empregadas correspondem a um produto comercial de baixo custo, utilizado como adubo, sem especificação da proporção entre AH e AF. Considerando que ensaios de tratabilidade e a construção de diagramas de coagulação demandam grandes quantidades de reagentes para repetições frequentes, a utilização de materiais comerciais não analíticos apresenta-se como uma abordagem voltada à viabilidade em termos de custo e disponibilidade. Neste contexto, a estratégia foi avaliar o efeito global da concentração do produto comercial à base de AH+AF sobre os parâmetros de interesse, reconhecendo tratar-se de uma mistura de

composição específica, sem detalhamento das frações húmicas individuais.

Foram preparadas soluções-estoque a 1% m m⁻¹ de caulim e de AH+AF em água potável, obtidas pela adição de 10 g de cada material em 1 L de água, em pH próximo à neutralidade e temperatura ambiente. As preparações foram mantidas sob agitação contínua para evitar sedimentação e garantir a homogeneidade das dosagens. A concentração, em mg L⁻¹, foi adotada em relação à massa seca do caulim e à massa total pastosa do AH+AF, previamente homogeneizada. Em béqueres contendo 100 mL de água potável, foram adicionados volumes entre 0,5 e 4,0 mL de cada preparação, correspondendo a concentrações de 50 a 400 mg L⁻¹, além da condição 0 mg L⁻¹ (branco, sem adição), totalizando nove pontos de análise, e cada parâmetro foi aferido em triplicata.

Os parâmetros avaliados foram turbidez, cor aparente, condutividade, pH, potencial zeta, absorbância em 254 nm (UV₂₅₄) e tamanho de partícula por dispersão dinâmica de luz (DLS). Para a aferição dos parâmetros foram empregados os seguintes equipamentos: turbidímetro Hach Tu5200, colorímetro Policontrol Aquacolor, espectrofotômetro UV-Visível Mettler Toledo UV5 e Malvern Zetasizer Nano – ZS90. Nos ensaios de bancada foi utilizado *jar test* Policontrol modelo FlocControl IV.

Na etapa subsequente, as amostras com concentração de 400 mg L⁻¹ de ambos os reagentes receberam dosagem de cloreto de polialumínio (PAC) em incrementos iniciais de 1 mg L⁻¹, com aferição do potencial zeta de cada ponto. Nos sistemas em que o potencial zeta respondeu rapidamente, manteve-se esse incremento e; no sistema cuja resposta foi mais lenta os incrementos foram ampliados para 3 e 5 mg L⁻¹ a partir de aproximadamente 8 mg L⁻¹, até a obtenção do ponto isoelétrico. As medidas de potencial zeta corresponderam à média de 30 leituras realizadas em triplicata.

Empregou-se o PAC Floc 120 HT da Bauminas, com teor de Al₂O₃ de 9,8 % e basicidade de 57 a 67 % nos ensaios. A água bruta empregada na comparação com a suspensão caulim-AH+AF foi obtida da represa Cachoeira do França, Juitituba, manancial utilizado no abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo.³⁷

Estabelecidas as concentrações que produziram água sintética com a mesma demanda de PAC usada na água natural até o ponto isoelétrico, realizou-se a comparação da água sintética contendo a combinação caulim-AH+AF com a água natural por meio de ensaios de *jar test* em duas condições: a) ponto isoelétrico sem correção de pH, na zona do mecanismo de coagulação por neutralização de cargas com formação de Al insolúvel; b) mecanismo de varredura predominante, com dosagem de 2,2 mg L⁻¹ de Al (44 mg L⁻¹ de PAC) e pH fixo em 7,5, valores descritos como habituais do mecanismo de varredura, adaptados de Lin e Ika.³⁸ Para o experimento com mecanismo de neutralização de cargas, coletou-se uma amostra no período de estiagem, caracterizada como água bruta de baixa turbidez.³⁹ Por

outro lado, para o ensaio com mecanismo de varredura foi utilizada uma amostra coletada em época chuvosa, com turbidez intermediária de valor acima de 20 NTU. As amostras de água sintética foram preparadas ajustando-se a concentração de caulim de modo a reproduzir a turbidez da água natural, mantendo-se as concentrações de AH+AF previamente estabelecidas nas etapas anteriores.

A comparação das médias de potencial zeta, turbidez inicial e final foi realizada pelo teste t de Student (5% de significância), considerando triplicatas independentes (n = 3) dos ensaios de *jar test*. O teste t é uma das abordagens mais amplamente aplicadas na comparação de 2 médias com mesma quantidade de amostras.⁴⁰

3. Resultados e Discussão

Como primeiras informações para a comparação desejada, realizou-se a verificação dos parâmetros físico-químicos da água natural superficial da represa Cachoeira do França, que foi usada como referência frente às preparações com caulim e AH+AF (Tabela 1).

Tabela 1. Parâmetros físico-químicos da água natural superficial de referência

Parâmetro	Valor
Turbidez (NTU)	3,30±0,31
Cor Aparente (mg Pt Co L ⁻¹)	38,3±1,4
pH	6,80±0,05
Potencial Zeta (mV)	-17,50±0,02
UV ₂₅₄ (u.a.)	0,08±0,01
Condutividade (mS cm ⁻¹)	0,030±0,004

Como análise inicial em relação às amostras de água sintética, após obtida a variação para cada parâmetro nas concentrações de 0 a 400 mg L⁻¹ de caulim e de AH+AF, verificou-se, por meio de mapa de calor, a correlação entre as variáveis avaliadas e a variação nas dosagens. Os resultados são descritos na Figura 1.

Observa-se que o potencial zeta apresenta correlação negativa com o aumento da concentração de ambos os reagentes. A magnitude dessa correlação é moderada no caso do caulim (entre -0,47 e -0,54) e forte quando utilizado AH+AF (de -0,84 a -0,93). Por outro lado, todos os demais parâmetros, com exceção do potencial zeta, apresentam relação positiva com a dosagem dos reagentes, com correlações consideradas elevadas, na faixa de 0,83 a 0,99.⁴¹

A variação de pH foi observada por meio da Figura 2 e os dados aferidos de potencial zeta, em mV, para as amostras com caulim e AH+AF são expressos na Figura 3. Nota-se, na Figura 2, que os reagentes possuem comportamentos opostos, com AH+AF reduzindo o pH, e o seu aumento ocorre com a concentração de caulim. Entretanto, as variações de pH foram sutis: com AH+AF, de 6,6 para cerca de 6,3, e com caulim, até aproximadamente 7,2 nas

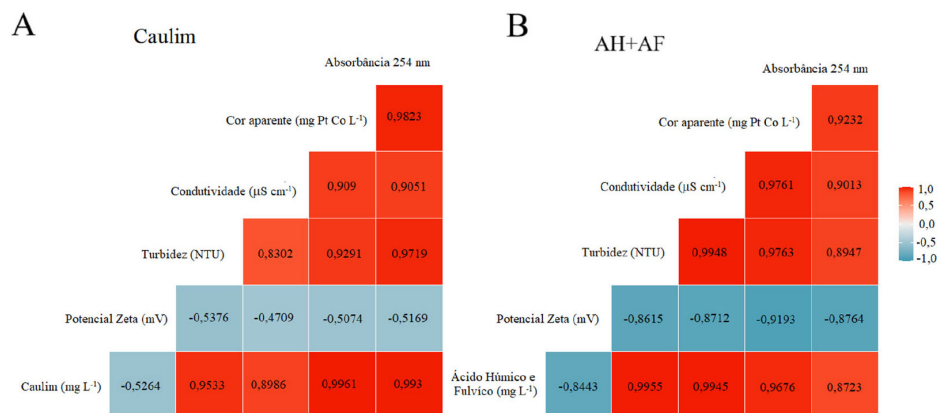


Figura 1. Mapa de calor de correlação de potencial zeta, turbidez, condutividade, cor aparente e UV₂₅₄ com (A) concentração de AH+AF e (B) concentração de caulim

maiores concentrações. Os valores de pH mantidos próximo à neutralidade satisfazem os valores da faixa de águas naturais de classes 1 e 2, regularmente de 6 a 9, definidos pela resolução CONAMA 357.⁴²

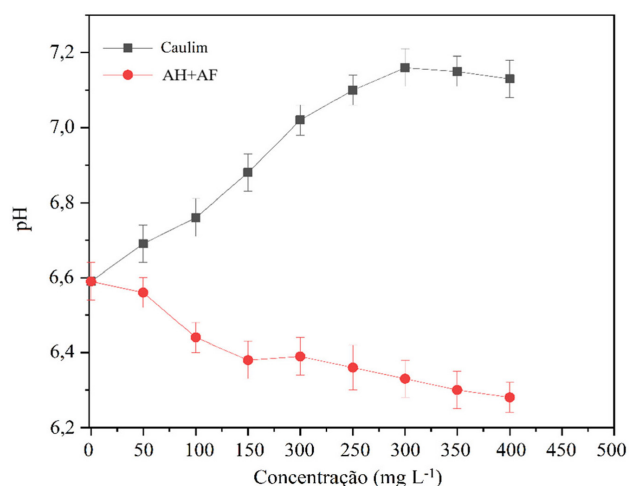


Figura 2. Variação de pH com a concentração de AH+AF e caulim

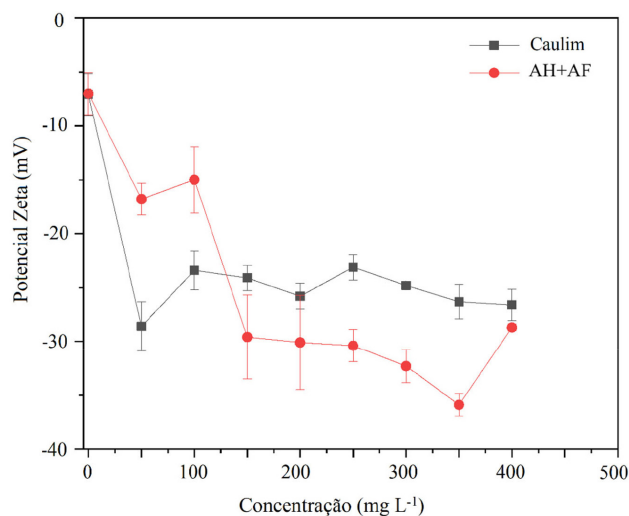


Figura 3. Relação do potencial zeta (mV) e a concentração de caulim e AH+AF

Observa-se pela Figura 3 que, quando emprega-se caulim, ocorre uma redução brusca do potencial zeta na concentração de 50 mg L⁻¹, aproximando-se de -30 mV. Para as concentrações subsequentes, por sua vez, os valores não mantêm a tendência de baixa, mas em valores próximos a -25 mV. Au e Leong⁴³ observaram o potencial zeta foi de -30 mV em suspensão de caulim com altas concentrações (10 g L⁻¹) em pH 7, reforçando que o aumento da concentração não resulta em grandes alterações no parâmetro. Os autores demonstram, ainda, que o potencial torna-se mais negativo com o aumento do pH, passando de aproximadamente -10 mV em pH 2 para cerca de -35 mV em pH 12.

O potencial zeta, quando aumentada a concentração de AH+AF, apresentou clara e mais linear tendência de baixa até a concentração de 350 mg L⁻¹, com valores próximos à -15 mV até 100 mg L⁻¹, valores ligeiramente abaixo de -30 mV até a concentração de 300 mg L⁻¹, e mínimo de -35 mV quando empregado 350 mg L⁻¹. Klučáková⁴⁴ descreve que com o aumento da concentração de AH+AF, o potencial zeta segue em tendência de diminuição, comportamento coerente com o obtido neste trabalho, e defende que potenciais zeta mais baixos são encontrados para suspensões com menores partículas de ácidos húmicos. Os valores mais baixos obtidos de potencial zeta, entre -30 e -35 mV, para ambos os reagentes indicam um sistema coloidal de moderada estabilidade eletrostática induzida por cargas.⁴⁵

Do mesmo modo, foram avaliados os valores de turbidez (Figura 4), sendo essa medida de grande importância na avaliação das águas brutas e tratadas em termos da etapa de coagulação-floculação. O alto valor de turbidez, ou seja, a presença de material particulado, pode criar condição para o aparecimento de microrganismos patogênicos e favorecer a ocorrência de "blindagem" dos microrganismos, nas partículas coloidais, podendo comprometer a ação de desinfecção.⁴⁶ O aumento acentuado da turbidez foi observado apenas com a adição de caulim, comportamento esperado, uma vez que a turbidez está diretamente associada à presença de sólidos suspensos e coloides, sendo, portanto,

influenciada pela fração argilosa introduzida pelo caulim.⁴⁷

Em relação a esse reagente, uma análise de regressão linear resultou em um R^2 de 0,91 indicando tratar-se de reagente conveniente para a obtenção de um valor específico de turbidez na concentração verificada. Similarmente, Hakiki *et al.*⁴⁷, em ensaios relacionando a concentração de caulim e turbidez, observaram que, na faixa de 0 a 100 mg L⁻¹, a variação resultou em boa aplicabilidade para análises de regressão linear. Para concentração de 100 mg L⁻¹ de caulim, por exemplo, a turbidez obtida foi de aproximadamente 60 NTU, valor muito próximo ao observado no presente trabalho para a mesma concentração, reforçando a alta previsibilidade e reprodutibilidade da aplicação do reagente na padronização de águas para ensaios de coagulação. Por outro lado, os autores citam que os limites entre as partículas suspensas e os dispersantes não puderam mais ser observados em faixas acima de 100 mg L⁻¹ do reagente, coerentemente com o observado na Figura 4, na qual ligeira perturbação na linearidade da variação para a faixa acima dessa concentração foi observada, indicando que comportamentos podem ser particulares de faixas adotadas.

A variação de turbidez com AH+AF foi praticamente nula, permanecendo abaixo de 2 NTU, mesmo na concentração de 400 mg L⁻¹. Essa baixa interferência confirma a reduzida presença de partículas não solubilizadas, já que AH+AF correspondem a frações típicas da matéria orgânica natural (MON) solúveis em água.⁴⁸ Lan *et al.*⁴⁹ observaram que AH são mais solúveis em pH próximo à neutralidade, enquanto AF teriam solubilidade favorecida em pH mais baixo.

Em contraste com a relação esperada entre caulim e turbidez, a presença de AH+AF está associada principalmente a sólidos dissolvidos e MON, com impacto previsto no parâmetro de cor aparente.³⁹ A Figura 5A apresenta a variação da cor aparente em função da concentração dos reagentes, enquanto a Figura 5B mostra a razão cor aparente/turbidez, proposta por Cruz *et al.*³⁹ como indicador da influência da turbidez na cor aparente.

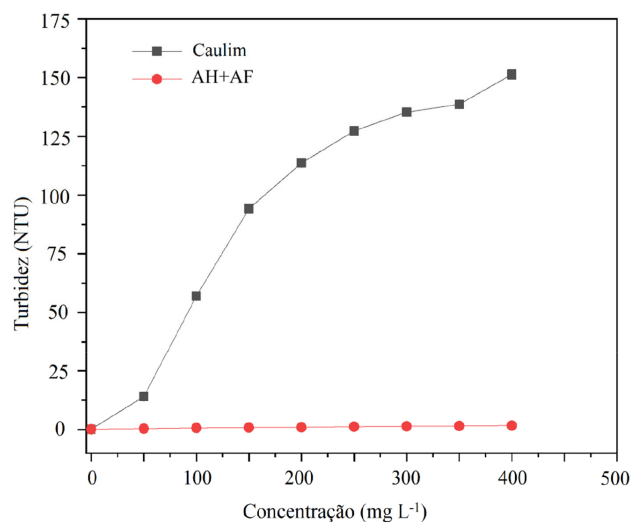


Figura 4. Relação entre turbidez (NTU) e a concentração de caulim e AH+AF

Verificou-se que ambos os reagentes aumentaram a cor aparente. Para uma dosagem de 400 mg L⁻¹, o caulim elevou a cor aparente para aproximadamente 45 mg PtCo L⁻¹, enquanto a mesma concentração de AH+AF resultou em um valor próximo de 10 mg PtCo L⁻¹. A razão cor aparente/turbidez apresentou comportamento distinto: as amostras com caulim exibiram valores baixos (0,15 a 0,30 para dosagens acima de 100 mg L⁻¹), ao passo que as amostras com AH+AF atingiram razões elevadas, na faixa de 7,5 a 11.

A Figura 6 apresenta a variação de UV₂₅₄ para ambos os reagentes. Observa-se que a adição de caulim promove elevação expressivamente maior, alcançando valores acima de 0,25 u.a. em 400 mg L⁻¹, enquanto nas amostras com AH+AF os valores máximos permanecem abaixo de 0,05 u.a.

A Figura 7 indica a variação da condutividade em função da concentração dos reagentes. Para esse parâmetro, a influência do caulim foi praticamente nula, variando de 0,037 a 0,046 mS cm⁻¹, enquanto com AH+AF o aumento foi

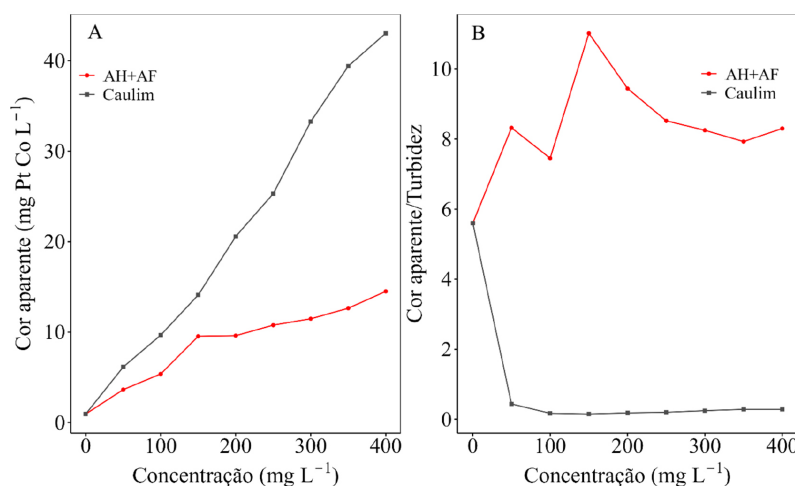


Figura 5. (A) cor aparente em relação à concentração de caulim e AH+HF (B) indicação da razão cor aparente-turbidez

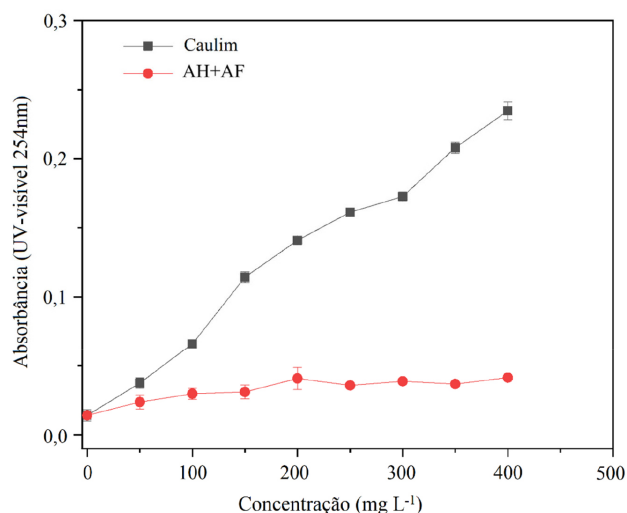


Figura 6. Variação de UV₂₅₄ para solução com caulim e AH+AF

muito mais expressivo, de 0,037 a 0,390 mS cm⁻¹, ou seja, mais de dez vezes superior. A presença de MON se relaciona com o aumento da condutividade elétrica,⁵ como um fator coerente ao observado na Figura 7, devido ao aumento de concentração de AH+AF.

A Tabela 2 apresenta um resumo dos parâmetros aferidos para a água natural superficial, e para as amostras preparadas de 400 mg L⁻¹ de caulim e AH+AF.

A Tabela 2 sintetiza as diferenças entre a água natural superficial e as suspensões sintéticas de caulim e AH+AF. Nota-se que o potencial zeta manteve-se em faixas semelhantes entre os sistemas, ainda que os valores absolutos mais negativos tenham sido observados para os reagentes sintéticos. Em contraste, parâmetros como a cor aparente e a turbidez mostraram padrões distintos: a suspensão de caulim reproduziu valores de cor próximos aos da água natural, mas com turbidez muito mais elevada, enquanto a de AH+AF apresentou turbidez próxima à da água natural, porém com cor aparente inferior. A razão cor aparente/turbidez, portanto, diferenciou melhor os sistemas, aproximando a amostra com AH+AF da água natural e destacando a dominância da turbidez na de caulim. Já os valores de UV₂₅₄ e condutividade reforçaram a divergência em relação à água natural: a amostra com caulim obteve valores de absorbância muito superiores, enquanto o valor

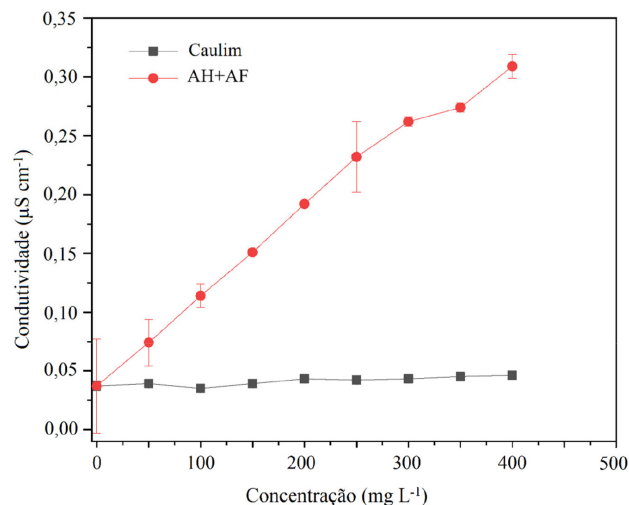


Figura 7. Variação de condutividade (mS cm⁻¹) com a concentração de caulim e AH+AF

obtido para a de AH+AF ficou abaixo. Para a condutividade, a água com caulim mostrou valor apenas ligeiramente maior que a natural, ao passo que a água com AH+AF apresentou valor muito mais elevado. O pH manteve-se próximo à neutralidade em todos os ensaios, sem impacto relevante nos resultados.

A partir das três amostras descritas na Tabela 2, verificou-se a dosagem requerida de PAC para a obtenção do ponto isoelétrico. Os valores aferidos são expressos na Figura 8.

Inicialmente, observa-se que a demanda de coagulante variou significativamente entre os sistemas avaliados. A suspensão de caulim atingiu a neutralização de cargas (próxima a +10 mV, ponto de potencial zeta de inversão) com uma dosagem bastante reduzida de apenas 2 mg L⁻¹ de PAC. Em claro contraste, a amostra de AH+AF (400 mg L⁻¹) demandou 24 mg L⁻¹ de PAC para alcançar seu ponto isoelétrico, refletindo a maior complexidade da matriz orgânica. A água bruta natural apresentou um comportamento intermediário, com uma demanda de 7 mg L⁻¹ de PAC, posicionando-se entre os dois sistemas sintéticos estudados. A demanda de PAC, portanto, não apresentou relação direta com o valor de UV₂₅₄, já que a suspensão de caulim apresentou absorbância três vezes maior que a da água natural, mas exigiu 3,5 vezes menos

Tabela 2. Parâmetros físico-químicos da água bruta da Cachoeira do França, e amostras de 400 mg L⁻¹ de caulim e AH+AF

Parâmetro	Água Natural Superficial	Caulim (400 mg L ⁻¹)	AH+AF (400 mg L ⁻¹)
UV ₂₅₄ (u.a.)	0,079±0,003	0,234±0,004	0,041±0,003
Potencial Zeta (mV)	-17,5±1,96	-26,6±1,5	-28,7±1,6
Cor Aparente (mg PtCo L ⁻¹)	38,4±1,2	43,0±1,8	14,5±0,9
Turbidez (NTU)	3,31±0,84	151,30±2,14	1,74±0,35
Cor Aparente/Turbidez	11,60±2,97	0,284±0,013	8,33±1,75
Condutividade (mS cm ⁻¹)	0,029±0,002	0,046±0,003	0,309±0,003
pH	6,80±0,05	7,10±0,05	6,30±0,05

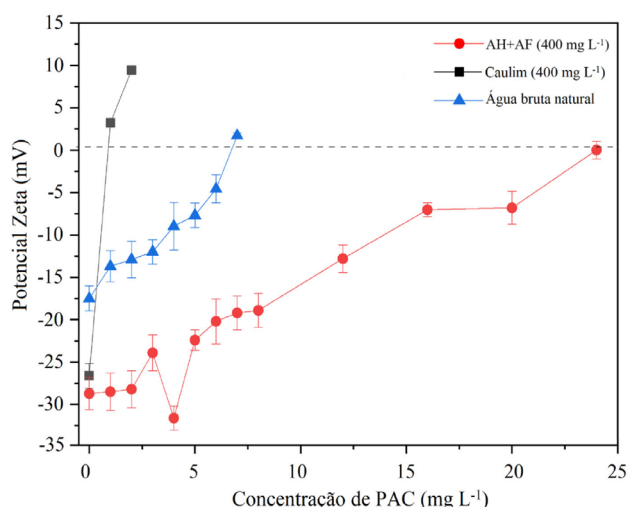


Figura 8. Variação do potencial zeta em mV de amostras de AH+AF 400 mg L⁻¹, caulim 400 mg L⁻¹ e água natural superficial, em relação a concentração de PAC até obtenção do ponto isoelétrico.

coagulante. No caso da condutividade, observou-se uma tendência de que valores mais elevados estivessem associados a maiores dosagens de PAC, embora sem proporcionalidade com o valor da água natural: a solução de AH+AF apresentou condutividade dez vezes superior, mas demanda apenas 3,5 vezes maior. Assim, optou-se pelo controle da demanda de coagulante a partir da fração AH+AF, mais representativa para reproduzir a demanda real.

Adotando a concentração fixa de PAC de 7 mg L⁻¹, variou-se a concentração de AH+AF de 50 a 200 mg L⁻¹, aferindo o potencial zeta e a condutividade, com o objetivo de atingir o ponto isoelétrico. Os resultados são expressos na Tabela 3.

Tabela 3. Potencial zeta e condutividade de solução de AH+AF com 7 mg L⁻¹ de PAC

Concentração de AH+AF (mg L ⁻¹)	Potencial Zeta (mV)	Condutividade (mS cm ⁻¹)
50	-0,73±0,89	0,071±0,005
100	-2,65±0,97	0,105±0,001
150	-11,80±2,59	0,139±0,001
200	-14,50±2,63	0,172±0,002

A concentração de AH+AF correspondente à dosagem de 7 mg L⁻¹ de PAC para atingir potencial zeta próximo a 0 mV foi de 50 mg L⁻¹, adotada como referência para a preparação da água sintética nas etapas subsequentes.

A definição da água sintética considerou, portanto, a fração de AH+AF ajustada à demanda de PAC e a turbidez regulada pela concentração de caulim. Em seguida, foram realizados ensaios de *jar test* comparando amostras de água natural superficial e água sintética. A Tabela 4 apresenta os parâmetros hidráulicos empregados, adaptados de Di Bernardo e Paz⁵⁰, em conformidade com a norma NBR 12216⁵¹ para estações de tratamento de água. Optou-se por uma velocidade de sedimentação no limite inferior da faixa recomendada (1 cm min⁻¹), de modo a prolongar o tempo de decantação e favorecer os contrastes entre tratamentos em termos de turbidez residual.

Tabela 4. Parâmetros hidráulicos empregados nos ensaios de *jar test*

Parâmetro	Valor
Gradiente de Mistura Rápida	600 s ⁻¹
Duração da Mistura Rápida	20 s
Gradiente de Mistura Lenta	40 s ⁻¹
Tempo de Mistura Lenta	15 min
Velocidade de Sedimentação	1,0 cm min ⁻¹

O primeiro ensaio foi realizado com base no mecanismo de neutralização de cargas, com dosagem de 7 mg L⁻¹ de PAC para ambas as amostras de água bruta sintética e natural. A Tabela 5 descreve a comparação entre potencial zeta, turbidez inicial e turbidez final das amostras, com comparação de médias por meio do teste t, indicada pelo valor-p.

Conforme demonstra o valor-p da Tabela 5, não houve diferença significativa a 5% para nenhum parâmetro, com condição de potencial zeta próximo a zero e em relação à turbidez inicial e final. Dessa forma, destaca-se boa reprodutibilidade da água sintética para amostra de água natural de baixa turbidez e tratamento por meio da coagulação, com neutralização de cargas em potencial zeta zero.

No segundo ensaio empregou-se água natural de turbidez intermediária (aproximadamente 22 NTU), coletada em outubro de 2023, período de chuvas no estado de São Paulo.⁵² O tratamento foi conduzido sob o mecanismo de varredura, com dosagem de 44 mg L⁻¹ de PAC e pH controlado entre 7,5 e 8. Os resultados são apresentados na Tabela 6, com comparação entre as médias de turbidez inicial e final por meio do teste t e indicação do valor-p.

Os resultados da Tabela 6 mostram que a turbidez inicial das duas amostras esteve na mesma condição, sem diferença

Tabela 5. Resultados do *jar test* na comparação entre água natural superficial e sintética, com tratamento voltado ao mecanismo de neutralização de cargas em potencial zeta zero

	Potencial Zeta Após Coagulação (mV)	Turbidez Inicial (NTU)	Turbidez Final (NTU)
Água Sintética	-0,27±0,32	2,75±0,37	0,76±0,25
Água Natural	-0,88±0,13	2,39±0,06	1,05±0,04
Valor-p	0,13	0,25	0,21

Tabela 6. Resultados de experimento com *jar test* na comparação entre água natural superficial e sintética, com tratamento pelo mecanismo de varredura, com 44 mg L⁻¹ de PAC e pH entre 7,5 e 8

	pH de Coagulação	Turbidez Inicial (NTU)	Turbidez Final (NTU)
Água Sintética	7,80±0,05	22,8±0,55	0,93±0,14
Água Natural	7,80±0,05	22,3±0,32	2,80±0,15
Valor-p	-	0,29	0,007*

* significativo a 5% pelo teste T.

significativa a 5%. Já a turbidez final da água sintética foi significativamente mais baixa em relação à água natural superficial, evidenciando uma limitação na reprodutibilidade da matriz sintética sob o mecanismo de varredura, com possível superestimação na redução de turbidez.

Visando compreender o comportamento observado na Tabela 6, foi realizada a análise da distribuição de tamanho de partículas por DLS para as amostras de água bruta, AH+AF e caulim, apresentada na Figura 9. A análise foi organizada em duas faixas: de 0 a 10 µm, correspondente ao limite de detecção do equipamento (Figura 9A), e de 0 a 2 µm, onde se concentram as partículas predominantes (Figura 9B).

Conforme mostra a Figura 9, a água bruta apresentou ampla variação no tamanho de partículas, de valores inferiores a 0,5 µm até próximos de 2 µm. A suspensão de caulim exibiu maior uniformidade, concentrando-se entre 0,5 e 1,5 µm, enquanto o AH+AF apresentou distribuição mais estreita e em menor diâmetro, próxima de 0,4 µm.

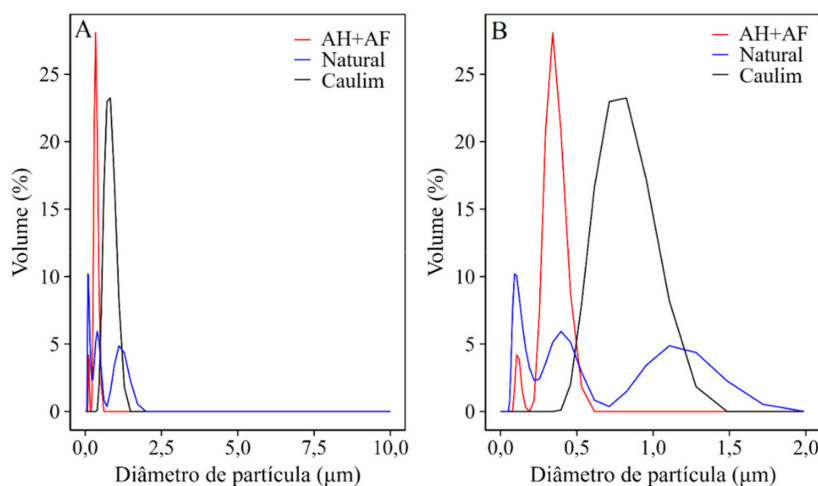
Tentou-se medir o tamanho das partículas formadas nas águas floculadas, tanto sintética quanto natural; entretanto, os valores ultrapassaram o limite máximo de 10 µm do equipamento de DLS disponível. Em futuros estudos, o acompanhamento do tamanho das partículas formadas pode complementar as observações de turbidez residual apresentadas neste trabalho.

A análise da Figura 1 revela uma forte correlação positiva entre a dosagem de reagentes e a maioria dos parâmetros avaliados, com exceção do potencial zeta. Essa

relação indica não apenas a sensibilidade dos parâmetros à adição dos reagentes, mas também um comportamento próximo ao linear, o que é altamente desejável para a produção de amostras sintéticas. Dessa forma, é possível prever a variação dos parâmetros por meio de linhas de tendência e regressões lineares, facilitando a estimativa de pontos específicos e a replicação controlada de condições, em ensaios futuros.

No entanto, conforme ilustrado pela Figura 4, referente à variação na turbidez, a alta correlação deve ser interpretada em conjunto com a magnitude da variação observada. O caso da turbidez na presença de AH+AF mostra que, embora apresente alta correlação com a dosagem, seu aumento foi praticamente nulo quando comparado a dosagens equivalentes de caulim. Isso indica que o controle da turbidez é predominantemente influenciado pela concentração de caulim, sendo a contribuição de AH+AF insignificante. A faixa de concentração testada (0 a 400 mg L⁻¹) permitiu a geração de amostras com turbidez superior a 100 NTU, demonstrando a versatilidade do caulim para produzir amostras com baixa, média e alta turbidez, adequando-se a diferentes cenários de água bruta de referência. Essa adaptabilidade corrobora o uso do caulim como material representativo para simular a fração coloidal mineral, conforme observado em estudos anteriores.²⁴⁻²⁷

A cor aparente mostrou-se um parâmetro limitado para a padronização de águas sintéticas. O fato de ambos os reagentes elevarem seu valor significa que combinações diferentes de caulim e AH+AF podem resultar num

**Figura 9.** Diâmetro de partícula por DLS de suspensão 400 mg L⁻¹ de caulim, solução de 400 mg L⁻¹ de AH+AF e água natural superficial, para faixas de (A) 0 a 10 µm e (B) 0 a 2 µm

mesmo valor de cor aparente, gerando matrizes aquosas distintas e comprometendo a padronização. Essa limitação existe porque, embora a cor verdadeira seja classicamente associada à matéria orgânica dissolvida, a cor aparente sofre interferência direta da turbidez, aumentando também na presença de materiais coloidais como o caulim,⁵³ o que introduz uma ambiguidade inerente ao parâmetro.

A razão cor aparente/turbidez mostrou-se uma métrica mais adequada para direcionar a simulação quando o interesse está na fração orgânica dissolvida. Os valores elevados para AH+AF (7,5–11), próximos aos de águas naturais de alta cor reportados na literatura (7,7 a 12,3)³⁹, refletem uma matriz onde a cor verdadeira é predominante, conforme esperado para uma amostra preparada exclusivamente com substâncias húmicas. Entretanto, a comparação da demanda de PAC evidencia que a razão cor/turbidez, por si só, não é um preditor confiável da coagulabilidade. O fato de a amostra AH+AF exigir uma dosagem substancialmente maior de coagulante que a água natural, apesar de apresentar uma razão cor/turbidez ligeiramente inferior (8,3 contra 11,6), indica que a natureza química específica dos constituintes orgânicos utilizados na água sintética difere daquela da matéria orgânica natural presente na água natural de referência, resultando em uma maior demanda por coagulante. Portanto, os resultados indicam que a razão cor/turbidez pode ajudar a classificar uma amostra como de alta ou baixa cor verdadeira, mas não permite comparações diretas em termos de demanda de coagulante.

Observando os resultados da Tabela 2 e da Figura 6, verifica-se que as propriedades elétricas e ópticas das amostras sintéticas diferem consideravelmente entre si e em relação à água natural, refletindo a natureza distinta das partículas em cada sistema. Observou-se que, embora o comprimento de onda em 254 nm seja caracteristicamente associado à MON, devido à absorção por anéis aromáticos e grupos funcionais –OH e –COOH,⁵⁴ a interferência de partículas em suspensão pode camuflar essa informação. No presente estudo, a dispersão causada pelo caulim resultou em valores de absorbância absolutos mais elevados do que os do AH+AF, sobrepondo-se ao sinal da matéria orgânica dissolvida. Este fenômeno é corroborado por trabalhos como os de Albrektien *et al.*⁵⁴ e Wang *et al.*⁵⁵, que demonstram que coloides minerais elevam significativamente a absorbância no UV-Vis. Berho *et al.*⁵⁶, por exemplo, relataram UV_{254} superior a 1 u.a. em suspensões de caulim a 250 mg L⁻¹. Dessa forma, embora a absorbância UV_{254} seja um parâmetro descrito como relevante para estimar a demanda de coagulante,^{6,54} sua aplicabilidade na produção de águas sintéticas, controle de processos e automação depende de forma crítica da minimização da interferência de materiais coloidais e em suspensão.⁵⁶

Nos ensaios, o valor de UV_{254} não se mostrou preditivo da demanda de coagulante entre matrizes distintas: na fração AH+AF, mesmo com absorbância menor que a da água bruta, a dosagem requerida foi maior; no caulim, a absorbância

muito superior não se traduziu em maior consumo de PAC. Isso indica que, na presença de partículas minerais, o valor de UV_{254} reflete majoritariamente o espalhamento ótico e não o conteúdo de NOM, perdendo valor como referência de demanda de coagulante. Além disso, em águas naturais, que combinam partículas de diferentes naturezas, essa relação direta entre absorbância e demanda está sujeita a mais interferências, reforçando a limitação do parâmetro quando usado isoladamente.

A condutividade captou melhor a tendência de aumento de demanda na matriz rica em substâncias húmicas, coerente com a maior presença de espécies iônicas e grupos funcionais ionizáveis das amostras com AH+AF, mesmo que a relação não seja proporcional. Mortadi *et al.*⁵⁸ destacam que, embora parâmetros físico-químicos isolados tenham baixa capacidade preditiva em termos de demanda de coagulante, propriedades elétricas como a condutividade podem ser relevantes para o controle e a otimização do processo de coagulação. No entanto, no presente estudo, a água natural superficial apresentou valores de condutividade inferiores aos da suspensão de caulim, mas exigiu maior dosagem de coagulante, evidenciando a limitação desse parâmetro como preditor na comparação proposta neste trabalho.

Em relação aos parâmetros de referência, por fim, observa-se que valores semelhantes de potencial zeta inicial nas amostras iniciais (entre -17,5 e -28,7 mV) não resultam em comportamento de coagulação equivalente: enquanto o caulim é rapidamente neutralizado, a mistura AH+AF exige doses muito mais elevadas de PAC. Isso evidencia que a interpretação do potencial zeta deve considerar a natureza química das partículas presentes, e não ser feita de forma isolada. Em geral a demanda de PAC observada, baixa para caulim e alta para AH+AF, é um comportamento coerente de acordo com Schalkwyk *et al.*³, que descreveram maior demanda de coagulante em sistemas contendo AH+AF, e com Tang *et al.*⁵⁹, que observaram uma diferença de dez vezes entre caulim e AH em sistemas sintéticos. Pernistiky e Edzwald⁵⁹ também relatam que 1 mg de carbono orgânico húmico pode demandar a mesma quantidade de coagulante que 100 NTU de partículas de argila.

No que diz respeito aos ensaios de *jar test* comparando as duas abordagens, o contraste significativo observado na varredura reforça a importância da comparação entre as amostras preparadas e as naturais, e destaca-se a possível superestimação de resultados em águas sintéticas quando apenas os ensaios em *jar test* são considerados. Águas naturais possuem impurezas diversas além de frações minerais e húmicas, como bactérias, vírus, algas, fungos e sólidos sedimentáveis, sendo, portanto, mais complexas do ponto de vista de interação com os reagentes de tratamento.³

He e Nan⁶¹ ressaltaram que a minimização de partículas pequenas é essencial para uma floculação eficiente, recomendando o monitoramento da quebra de flocos durante as etapas de agitação. Na justificativa de dificuldade de tratamento de águas de baixa turbidez, Zhang *et al.*⁶²

descreveram que a presença de partículas de pequeno diâmetro está relacionada à diminuição da taxa de colisão entre partículas e à consequente dificuldade na formação de agregados.

Adicionalmente, a literatura descreve que a fração húmica (HA) é mais facilmente removida por coagulação do que a fração não húmica de origem algal, uma vez que os compostos de alto peso molecular apresentam menor solubilidade e menor carga negativa por unidade, em comparação com compostos de baixo peso molecular, sendo, portanto, mais suscetíveis ao tratamento por coagulação.^{63,64} Frações não húmicas de origem algal, geralmente hidrofílicas e de baixo peso molecular, são reconhecidamente de difícil remoção, mesmo em doses usuais de coagulante, podendo reduzir a eficiência global do processo e justificar a menor diminuição de turbidez observada para a água natural superficial.^{65,66} Nesse contexto, a presença de parcelas não húmicas em águas brutas naturais pode dificultar o processo de coagulação, contribuindo para reduções menos expressivas, ao mesmo tempo que partículas uniformes e de maior diâmetro nas amostras com caulim e AH+AF, como observado na Figura 9, pode favorecer a floculação, colaborando para a maior remoção de turbidez observada na Tabela 6.

Em outras abordagens, cita-se que a presença combinada de AH e AF pode favorecer a remoção de frações não húmicas quando presentes em conjunto,⁶⁵ em razão de suas características estruturais e funcionais que ampliam a interação com partículas coloidais. De modo semelhante, estudos relatam o uso de bentonita como auxiliar de floculação em águas de baixa e média turbidez.^{67,68} Esses aspectos mostram que águas sintéticas podem oferecer vantagens adicionais na formação de flocos e, consequentemente, levar a uma sobrevalorização dos resultados finais quando comparadas às águas naturais, ainda que apresentem características, como turbidez e perfil do potencial zeta em contato com coagulantes, de mesma ordem de magnitude.

Mesmo que a magnitude de remoção seja diferenciada entre água sintética e natural nas zonas de maior influência do mecanismo de varredura, a água sintética obtida manteve a demanda de PAC em termos de potencial zeta coerente com águas naturais superficiais. Dessa forma, um diagrama de coagulação elaborado com água sintética à base de caulim e AH+AF consegue representar as zonas de neutralização de cargas de forma similar ao observado em águas naturais. Assim, atende ao propósito de servir como alternativa às águas naturais, suscetíveis a dificuldades de armazenamento e homogeneização, em experimentos que demandam elevado número de amostras, como a construção de tais diagramas.

A mistura de AH+AF comercial proposta se mostrou útil na aplicação de matéria orgânica ao sistema, com comportamento bem distinto do caulim, equilibrando o comportamento do potencial zeta em relação às dosagens de PAC com baixa interferência na turbidez. Por outro

lado, o emprego de reagentes analíticos e o conhecimento preciso de frações húmicas podem adicionar maior precisão e adequações específicas a condições de águas naturais de interesse.

Por fim, enquanto o trabalho foi pensado para se obter o comportamento de demanda de PAC e comparação com uma fonte de água natural superficial específica, a abordagem de definição de turbidez diretamente pela concentração de caulim, aliada à adequação da demanda de PAC, corrigida pela concentração de AH+AF, se mostra versátil e pode ser adequada para diferentes contextos de interesse de investigação.

4. Conclusão

O objetivo de obter uma amostra de água sintética padronizada e útil para empregar em ensaios com grande quantidade de amostras foi atingido. A turbidez demonstrou uma relação linear e altamente previsível com a concentração de caulim, servindo como parâmetro robusto para o ajuste preciso desse parâmetro. Paralelamente, o acompanhamento direto da demanda de coagulante, controlado pela concentração de AH+AF, permitiu o desenvolvimento de uma água sintética com um comportamento de desestabilização controlada, se aproximando da resposta eletrocinética de uma água natural. No entanto, outros parâmetros, como cor aparente, condutividade e UV₂₅₄, não se mostraram tão úteis para uma predição direta, e sua utilização como referência única apresenta limitações frente à complexidade das matrizes naturais. Ensaios de *jar test* confirmaram a reprodutibilidade da turbidez residual sob neutralização de cargas, mas indicaram superestimação da remoção de turbidez no tratamento por varredura. Essa diferença é atribuída possivelmente à ausência de constituintes interferentes (como matéria orgânica não-húmica ou micro-organismos), bem como à predominância de partículas uniformes e de maior diâmetro presentes na água sintética à base de caulim e AH+AF. Dessa forma, a formulação proposta é válida principalmente para estudos comparativos e de dosagem, onde a padronização da demanda de coagulante (via potencial zeta) assegura a identificação representativa das zonas de coagulação em um diagrama de coagulação, e a padronização da turbidez permite a investigação do desempenho em diferentes faixas, sendo uma formulação versátil, reprodutível e confiável para ensaios em escala de bancada.

Agradecimentos

Esta pesquisa foi financiada pela FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) processo nº 2023/12713-3 e IGT PAN (Instituto Granado de Tecnologia da Poliacrilonitrila). Os autores agradecem à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível

Superior), pelo acesso aos periódicos, com código de financiamento 001.

Referências Bibliográficas

- Li, L.; Rong, S.; Wang, R.; Yu, S.; Recent advances in artificial intelligence and machine learning for nonlinear relationship analysis and process control in drinking water treatment: A review. *Chemical Engineering Journal* **2021**, 405, 126673. [\[Crossref\]](#)
- Anderson, L.E.; DeMont, I.; Dunnington, D.D.; Bjorndahl, P.; Redden, D.J.; Brophy, M.J.; Gagnon, G.A.; A review of long-term change in surface water natural organic matter concentration in the northern hemisphere and the implications for drinking water treatment. *Science of The Total Environment* **2023**, 858, Part 1, 159699. [\[Crossref\]](#)
- Schalkwyk, M.; Rajagopaul, R.; Mokonyama, S.; Nkwanyana, S.; Thompson, P.; Evaluation and selection of an appropriate automatic coagulant dose control system of water treatment plants. *Water Research Comission* **2016**, report n° TT 666/16. [\[Link\]](#)
- Yang, X.; Hong, L.; Spatiotemporal variation and attribution analysis of surface water in Yunnan-Guizhou Plateau based on Google Earth Engine. *2024 IEEE 6th Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC)* **2024**, Chongqing, China, pp. 921-925. [\[Crossref\]](#)
- Tahraoui, H.; Toumi, S.; Boudoukhani, M.; Touzout, N.; Sid, A.N.E.H.; Amrane, A.; Belhadj, A.-E.; Hadjadj, M.; Laichi, Y.; Aboumustapha, M.; Kebir, M.; Bouguettoucha, A.; Chebli, D.; Assadi, A.A.; Zhang, J. Evaluating the Effectiveness of Coagulation–Flocculation Treatment Using Aluminum Sulfate on a Polluted Surface Water Source: A Year-Long Study. *Water* **2024**, 16, 400. [\[Crossref\]](#)
- Beauchamp, N.; Bouchard, C.; Dorea, C.; Rodriguez, M.; Ultraviolet absorbance monitoring for removal of DBP-precursor in waters with variable quality: Enhanced coagulation revisited. *Science of The Total Environment* **2020**, 717, 137225. [\[Crossref\]](#)
- Marques, D.G.; Campos, V.; Estatística experimental aplicada para determinar o par ideal da dosagem de coagulante e nível do pH de coagulação para tratamento de água de abastecimento público. *Revista DAE* **2024**, 243. [\[Crossref\]](#)
- Cui, H.; Huang, X.; Yu, Z.; Chen, P.; Cao, X.; Application progress of enhanced coagulation in water treatment. *RSC Advances* **2020**, 10, 20231. [\[Crossref\]](#)
- Marques, D.G.; Domingos, J.M.F.; Campos, V.; Poly(acrylamide-co-sodium acrylate) used as a flocculation aid associated with aluminum polychloride in the treatment of low turbidity surface water by charge neutralization. *Rev. Virtual Quim.* **2024**, 16(6), 844-851. [\[Crossref\]](#)
- Ghernaout, D.; Al-Ghonamy, A.I.; Naceur, M.W.; Boucherit, A.; Messaoudene, N.A.; Aichouni, M.; Mahjoubi, A.A.; Elboughdiri, N.A. Controlling coagulation process: From zeta potential to streaming potential. *Am. J. Environ. Prot.* **2015**, 4 (5), 1. [\[Crossref\]](#)
- El-taweel, R.M.; Mohamed, N.; Alrefaey, K.A.; Husien, S.; Abdel-Aziz, A.B.; Salim, A.I.; Mostafa, N.G.; Said, L.A.; Fahim, I.S.; Radwan, A.G.; A review of coagulation explaining its definition, mechanism, coagulant types, and optimization models; RSM, and ANN. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry* **2023**, 6, 100358. [\[Crossref\]](#)
- Ghernaout, D.; Elboughdiri, N.; Ghareba, S.; Salih, A.; Coagulation Process for Removing Algae and Algal Organic Matter – An Overview. *Open Access Library Journal* **2020**, 6, e6272. [\[Crossref\]](#)
- Ogura, A.P.; Sabogal-Paz, L.P.; Detection and alkaline inactivation of *Cryptosporidium spp.* oocysts and *Giardia spp.* cysts in drinking-water treatment sludge. *Journal of Water Process Engineering* **2021**, 40, 101939. [\[Crossref\]](#)
- Narges, S.; Ghorban, A.; Hassan, K.; Mohammad, K.; Prediction of the optimal dosage of coagulants in water treatment plants through developing models based on artificial neural network fuzzy inference system (ANFIS). *J. Environ. Health Sci. Eng.* **2021**, 19, 1543-1553. [\[Crossref\]](#)
- Silva, D.F.S.; Speranza, L.G.; Quartaroli, L.; Moruzzi, R.B.; Silva, G.H.R.; Separation of microalgae cultivated in anaerobically digested black water using *Moringa oleifera* Lam seeds as coagulant. *J. Water Process Eng.* **2020**, 39, 101738. [\[Crossref\]](#)
- Bartiko, D.; Julio, M. Construção e emprego de diagramas de coagulação como ferramenta para o monitoramento contínuo da floculação em águas de abastecimento. *Ambi-Água* **2015**, 10, 71-81. [\[Crossref\]](#)
- Di Bernardo, L.; Dantas, A.B.; Voltan, P.E.N. *Tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água*; Ed. LDiBe: São Carlos, São Paulo, 2011.
- Haag, D.; Matschonat, G. Limitations of controlled experimental systems as models for natural systems: a conceptual assessment of experimental practices in biogeochemistry and soil science. *Science of The Total Environment* **2001**, 277(1–3), 199-216. [\[Crossref\]](#)
- Zainol, N. A.; Khalilullah, P. A. B.; Abdul Ghani, A.; Abdul Rashid, N.; Mohd Zaini Makhtar, S. Turbidity Removal from Kaolin Synthetic Wastewater via Coagulation Process Using Sludge from Water Treatment Plant. *International Journal of Integrated Engineering* **2022**, 14(9), 222-231. [\[Crossref\]](#)
- Chakraborty, S.; Dutta, S.; Chatterjee, R.; Chanda, J.; Pal, S.; Bandyopadhyay, A. Flocculation of low concentration kaolin suspension using architecturally modified Xanthan gum: Effect of grafting to hyperbranching. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* **2023**, 150, 105066. [\[Crossref\]](#)
- Ferasat, Z.; Panahi, R.; Mokhtarani, B. Natural polymer matrix as safe flocculant to remove turbidity from kaolin suspension: Performance and governing mechanism. *Journal of Environmental Management* **2020**, 255, 109939. [\[Crossref\]](#)
- Fujisaki, K. Measurement of Flocculation phenomena of Kaolin and Bentonite with chitosan flocculant. **2023**. [\[Link\]](#)
- Benakcha, M.; Masmoudi, T. Effect of adding biochar from prickly pear skin to aluminium sulphate to improve the coagulation-flocculation process during the elimination of humic substances present in the Laghrous drainage canal Water, Zab

- El-gharbi region (SE Algeria). *Desalination and Water Treatment* **2024**, 317, 100141. [Crossref]
24. Libeck, B.; Kalinowski, S.; Wardzyńska, R.; Bęś, A. Using an angular detection photometer (ADP) in analyzing the humic acids coagulation process. *Journal of Water Process Engineering* **2020**, 37, 101507. [Crossref]
25. Xu, Y.; Chen, T.; Cui, F.; Shi, W. Effect of reused alum-humic-flocs on coagulation performance and floc characteristics formed by aluminum salt coagulants in humic-acid water. *Chemical Engineering Journal* **2016**, 287, 225-232. [Crossref]
26. Yue, Y.; An, G.; Lin, L.; Demissie, H.; Yang, X.; Jiao, R.; Wang, D. Design and coagulation mechanism of a new functional composite coagulant in removing humic acid. *Separation and Purification Technology* **2022**, 292, 121016. [Crossref]
27. Lv, M.; Liu, T.; Chen, F.; Zhang, Z.; Li, D.; Sun, M.; Feng, Y. Interactions between magnetic particles and polyaluminum chloride on the coagulation behavior in humic acid-kaolin synthetic water treatment. *Environmental Research* **2021**, 197, 111093. [Crossref]
28. Yu, W.-Z.; Gregory, J.; Li, G.-B.; Qu, J.-H. Effect of humic acid on coagulation performance during aggregation at low temperature. *Chemical Engineering Journal* **2013**, 223, 412-417. [Crossref]
29. Yang, Z.L.; Gao, B.Y.; Yue, Q.Y.; Wang, Y. Effect of pH on the coagulation performance of Al-based coagulants and residual aluminum speciation during the treatment of humic acid-kaolin synthetic water. *Journal of Hazardous Materials* **2010**, 178(1-3), 596-603. [Crossref]
30. Seher, H.; Geckeis, H.; Fanghänel, T.; Schäfer, T. Bentonite nanoparticle stability and the effect of fulvic acids: experiments and modelling. *Colloids Interfaces* **2020**, 4, 16. [Crossref]
31. Zhao, Y.X.; Gao, B.Y.; Zhang, G.Z.; Phuntsho, S.; Shon, H.K. Coagulation by titanium tetrachloride for fulvic acid removal: Factors influencing coagulation efficiency and floc characteristics. *Desalination* **2014**, 335(1), 70-77. [Crossref]
32. Wang, Y.; Mao, R.; Wang, Q.; Yang, Z.; Gao, B.; Zhao, Y. Fulvic acid removal performance and control of disinfection by-product formation potential in coagulation-ultrafiltration process. *Desalination* **2012**, 302, 55-64. [Crossref]
33. Campos, V.; Hypolito, R. The geochemistry of reactions of phosphate with natural clays and synthetic aluminum hydroxides. *Acta Microscopica* **1999**, 8, 117. [Link]
34. Campos, V.; de Moraes, L. C.; Rosa, A. H.; Fraceto, L. F.; Büchler, P. M. The effect of anionic sorption on the metakaolinite. *Materials Science Forum* **2010**, 660, 1015-1018. [Crossref]
35. Luckham, P. F.; Rossi, S. The colloidal and rheological properties of bentonite suspensions. *Advances in Colloid and Interface Science* **1999**, 82(1-3), 43-92. [Crossref]
36. Caron, V. C.; Graças, J. P.; Castro, P. R. de C. Condicionadores do solo: ácidos húmicos e fúlvicos. *Piracicaba: ESALQ/USP* **2015**. [Link]
37. Marques, D. G. Ecoeficiência do Sistema Produtor São Lourenço. *Revista Ambientale* **2021**, 13(4), 25-37. [Crossref]
38. Lin, J.-L.; Ika, A. R. Enhanced coagulation of low turbid water for drinking water treatment: dosing approach on floc formation and residuals minimization. *Environmental Engineering Science* **2019**, 36(6). [Crossref]
39. Cruz, D.; Pimentel, M.; Russo, A.; Cabral, W. Charge neutralization mechanism efficiency in water with high color turbidity ratio using aluminium sulfate and flocculation index. *Water* **2020**, 12, 572. [Crossref]
40. Gandhi, R.; Smith, H.N.; Mahomed, N.N.; Rizek, R.; Bhandari, M. Incorrect use of the student t test in randomized trials of bilateral hip and knee arthroplasty patients. *J. Arthroplasty* **2011**, 26 (5), 811-816. [Crossref]
41. Schober, P.; Boer, C.; Schwarte, L. A. Correlation coefficients: appropriate use and interpretation. *Anesthesia and Analgesia* **2018**, 126(5), 1763-1768. [Crossref]
42. Brasil. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução n. 357, de 17 de março de **2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos d'água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. *Diário Oficial da União: Seção 1, Brasília, DF*, 58-63, 18 mar. **2005**. [Link]
43. Au, P.; Leong, Y. Rheological and zeta potential behavior of kaolin and bentonite composite slurries. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* **2013**, 463, 530-541. [Crossref]
44. Klučáková, M. Size and charge evaluation of standard humic and fulvic acids as crucial factors to determine their environmental behavior and impact. *Frontiers in Chemistry* **2018**, 6. [Crossref]
45. Pochapski, D. J.; Carvalho Dos Santos, C.; Leite, G. W.; Pulcinelli, S. H.; Santilli, C. V. Zeta potential and colloidal stability predictions for inorganic nanoparticle dispersions: Effects of experimental conditions and electrokinetic models on the interpretation of results. *Langmuir* **2021**, 37(45), 13379-13389. [Crossref]
46. Edzwald, J. K. Coagulant mixing revisited: theory and practice. *Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA* **2013**, 62(2), 67-77. [Crossref]
47. Hakiki, R.; Zevi, Y.; Muntalif, B. S.; Purnama, I. Edge detection technique for simultaneous measurement of total suspended solids and turbidity. *GEOMATE Journal* **2023**, 25(111), 74-82. [Link]
48. O'Donoghue, J.; Fitzsimmons, L. Simplified low-cost LED nephelometer and turbidity experiments for practical teaching. *Journal of Chemical Education* **2022**, 99, 1304-1312. [Crossref]
49. Lan, T.; Wu, P.; Liu, Z.; Stroet, M.; Liao, J.; Chai, Z.; Mark, A. E.; Liu, N.; Wang, D. Understanding the effect of pH on the solubility and aggregation extent of humic acid in solution by combining simulation and the experiment. *Environmental Science & Technology* **2022**, 56(2), 917-927. [Crossref]
50. Di Bernardo, L.; Sabogal Paz, L.P. Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água. *Volume 1*. Editora LDIBE LTDA, São Carlos, São Paulo, **2008**.
51. ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público. *NBR 12216*, **1992**.
52. Fontão, P.A.B.; Ferreira, R.M.A. As chuvas no Sistema Cantareira: avaliação dos reflexos no manancial visando a segurança hídrica da Região Metropolitana de São Paulo. *Revista de Geografia - PPGE - UFJF* **2022**, 12(2). [Crossref]

53. Kubínová, T.; Kyncl, M. Comparison of standard methods for determining the color of water in several countries. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* **2021**, *900*, 012018. [\[Crossref\]](#)
54. Albrektienė, R.; Rimeika, M.; Zalieckienė, E.; Šaulys, V.; Zagorskis, A. Determination of organic matter by UV absorption in the ground water. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* **2012**, *20*(2), 163-167. [\[Crossref\]](#)
55. Wang, G. S.; Hsieh, S. T. Monitoring natural organic matter in water with scanning spectrophotometer. *Environment International* **2001**, *26*(4), 205-212. [\[Crossref\]](#)
56. Berho, C.; Pouet, M.-F.; Bayle, S.; Azema, N.; Thomas, O. Study of UV-vis responses of mineral suspensions in water. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* **2004**, *248*(1-3), 9-16. [\[Crossref\]](#)
57. Kato, H.; Nakamura, A.; Takahashi, K.; Kinugasa, S. Size effect on UV-Vis absorption properties of colloidal C60 particles in water. *Physical Chemistry Chemical Physics* **2009**, *11*, 4946-4948. [\[Crossref\]](#)
58. Mortadi, A.; Chahid, E. G.; Elmelouky, A.; Chahbi, M.; El Ghyati, N.; Zaim, S.; Cherkaoui, O.; El Moznine, R. Complex electrical conductivity as a new technique to monitor the coagulation-flocculation processes in the wastewater treatment of the textile industry. *Water Resources and Industry* **2020**, *24*, 100130. [\[Crossref\]](#)
59. Tang, Y.; Hu, X.; Cai, J.; Xi, Z.; Yang, H. An enhanced coagulation using a starch-based coagulant assisted by polysilicic acid in treating simulated and real surface water. *Chemosphere* **2020**, *259*, 127464. [\[Crossref\]](#)
60. Pernitsky, D. J.; Edzwald, J. K. Selection of alum and polyaluminum coagulants: principles and applications. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua* **2006**, *55*(2), 121-141. [\[Crossref\]](#)
61. He, W.; Nan, J. Study on the impact of particle size distribution on turbidity in water. *Desalination and Water Treatment* **2012**, *41*(1-3), 26-34. [\[Crossref\]](#)
62. Zhang, P.; Liao, L.; Zhu, G. Performance of PATC-PDMDAAC composite coagulants in low-temperature and low-turbidity water treatment. *Materials* **2019**, *12*, 2824. [\[Crossref\]](#)
63. Knap-Bałdyga, A.; Zubrowska-Sudoł, M. Natural organic matter removal in surface water treatment via coagulation—Current issues, potential solutions, and new findings. *Sustainability* **2023**, *15*, 13853. [\[Crossref\]](#)
64. Zong, Y.; Jin, X.; Li, Y.; Shang, Y.; Wang, Y.; Jin, P.; Wang, X.C.; Guo, F.; Li, D. The coagulation behavior and mechanism of low-coagulability organic matter (LCOM). *Sep. Purif. Technol.* **2024**, *328*, 125055. [\[Crossref\]](#)
65. Liang, H.; Xu, W.; Shi, B.; Huang, X. The role of interactions between extracellular organic matter and humic substances on coagulation-ultrafiltration process. *Chemosphere* **2021**, *264* (Part 2), 128501. [\[Crossref\]](#)
66. Krupińska, I. Removing iron and organic substances from water over the course of its treatment with the application of average and highly alkaline polyaluminium chlorides. *Molecules* **2021**, *26*, 1367. [\[Crossref\]](#)
67. Zaki, N.; Hadoudi, N.; Bensitel, N.; Salhi, A.; Amhamdi, H.; Ahari, M. Assessing the efficacy of bentonite as a coagulant aid for raw water treatment. *Desalination and Water Treatment* **2023**, *311*, 45-53. [\[Crossref\]](#)
68. Alsaeed, R. D.; Alaji, B.; Ibrahim, M. Using bentonite clay as coagulant aid for removing low to medium turbidity levels. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering* **2022**, *41*(12), 4080-4086. [\[Crossref\]](#)