

## I-027 - TRATABILIDADE DE ÁGUA DE MANANCIAL SUPERFICIAL COM CLORETO DE POLIALUMÍNIO (PAC): DIAGRAMA DE COAGULAÇÃO E SELEÇÃO DE PARÂMETROS OPERACIONAIS

**Lyda Patricia Sabogal-Paz<sup>(1)</sup>**

Professora do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo EESC/USP (São Carlos/SP).

**Kamila Jessie Sammarro Silva<sup>(2)</sup>**

Engenheira Ambiental e Sanitarista pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Mestra e doutoranda em Hidráulica e Saneamento pela EESC/USP.

**Endereço:** Av. Trabalhador São-carlense, 400 - Pq Arnold Schmidt – São Carlos – SP – CEP 13566-590 – São Carlos - SP – Brasil. E-mail: lysaboga@sc.usp.br

### RESUMO

Em função das particularidades de cada manancial abastecedor e, portanto, da qualidade da água bruta, há diferenças nas condições de coagulação, mistura e decantação da água, resultando em diferentes eficiências de tratamento visando à potabilidade. O presente trabalho verificou a utilização do cloreto de polialumínio (PAC) em diferentes condições de dosagem e pH de coagulação, para o tratamento de água de manancial superficial. Seu desempenho foi satisfatório para a matriz estudada, mesmo sem a exigência de adição de alcalinizantes ou acidulantes. Além disso, investigou-se a adequação dos parâmetros operacionais para as condições estudadas em escala de bancada e a sequência dos resultados obtidos pode orientar demais estudos que venham a determinar condições ótimas de mistura e sedimentação, simulando o tratamento de água por decantação.

**PALAVRAS-CHAVE:** Diagrama de coagulação, cloreto de polialumínio, estudo de tratabilidade.

### INTRODUÇÃO

O conceito de múltiplas barreiras guia o fornecimento seguro de água, envolvendo desde a proteção dos mananciais, até a otimização dos processos de tratamento e manutenção apropriada dos sistemas de distribuição (BETANCOURT e ROSE, 2004). No Brasil, de acordo com a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, o tratamento de água é predominantemente realizado por meio da tecnologia de ciclo completo (IBGE, 2010), a qual engloba as etapas de pré-tratamento químico, coagulação, floculação, decantação ou flotação e filtração, seguidas de desinfecção e correção do pH.

A otimização do processo de coagulação, especificamente, promove melhora na eficiência das etapas seguintes do tratamento de ciclo completo. Ensaios de tratabilidade com a elaboração diagramas de coagulação apresentam-se, portanto, como uma ferramenta para a seleção dos parâmetros operacionais, considerando o tipo de coagulante, pH de coagulação e dosagens, de modo a verificar as condições apropriadas para o tratamento com um objetivo específico (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2011).

Dentre os coagulantes utilizados no tratamento de água, há destaque para o cloreto de polialumínio (PAC), em comparação ao sulfato de alumínio em águas naturais (FERRARI; DE JULIO; DE JULIO, 2011). Em ensaios de tratabilidade com água de estudo, a remoção de turbidez e cor aparente por meio do uso do PAC foi relatada como satisfatória sem que houvesse a necessidade de correção de pH, tanto em tecnologias que utilizam a flotação (ANDREOLI; BONI; SABOGAL-PAZ, 2017), quanto a decantação (MACIEL; SABOGAL-PAZ, 2017), o que torna relevante ampliar sua investigação em matrizes diversas.

### OBJETIVOS

- Verificar o desempenho do cloreto de polialumínio (PAC) na coagulação de água de manancial superficial, em termos de remoção de cor e turbidez, a partir da elaboração de diagramas de coagulação.
- Realizar a seleção de parâmetros operacionais adequados para os ensaios de tratabilidade nas condições de estudo, considerando as etapas de coagulação, floculação e sedimentação.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios de tratabilidade foram realizados em escala de bancada conforme o método indicado por Di Bernardo, Dantas e Voltan (2011) com o objetivo de gerar diagramas de coagulação para água bruta de manancial superficial. Estes gráficos apresentam-se como uma ferramenta para a seleção da dose adequada de coagulante associada a um pH de coagulação, considerando resultados de clarificação da água.

O cloreto de polialumínio (PAC) foi aplicado como coagulante, com teor de 17,51% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  densidade de 1,36 g L<sup>-1</sup>. Em ensaios preliminares, foram avaliadas as dosagens de 10, 15, 20, 25 e 30 mg L<sup>-1</sup>, posteriormente reduzidas para o intervalo entre 5 e 15 mg L<sup>-1</sup> de coagulante. Quanto às condições de pH, considerou-se o pH natural da água (neutro), bem como variações entre 6 e 10, por meio da utilização de ácido sulfúrico (volumes de aproximadamente 2 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 0,25 N) como acidulante e hidróxido de sódio (volumes entre 0,2 e 5,5 mL de NaOH a 0,1 N) como alcalinizante.

Os gradientes e tempos de mistura rápida e lenta foram inicialmente adotados com base em Andreoli e Sabogal-Paz (2017) e Maciel e Sabogal-Paz (2017) respectivamente, os quais aplicaram PAC como coagulante em matrizes similares. Desta forma, a elaboração do diagrama de coagulação considerou o gradiente de velocidade médio na mistura rápida (Gmr) de 1000 s<sup>-1</sup> (500 rpm) por 10 s e gradiente de floculação, i. e., de mistura lenta (Gf) de 30 s<sup>-1</sup> (35 rpm) por 20 min. Os parâmetros operacionais foram reavaliados em seguida, com ensaios em triplicata para cada condição, aplicando-se o pH de coagulação e a dosagem de coagulante definidos nos ensaios iniciais.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A água bruta utilizada, coletada e armazenada à temperatura ambiente, apresentou turbidez média de 30,7±5,2 uT e cor aparente de 76,6±9,9 uH. O pH inicial encontrou-se na faixa neutra em todos os ensaios, mesmo nos que envolveram ajustes.

O ensaio de tratabilidade realizado inicialmente considerou dosagens de cloreto de polialumínio (PAC) entre 10 e 30 mg L<sup>-1</sup>, sem quaisquer alterações de pH. A remoção de turbidez foi de 81,8% para a dosagem de 10 mg L<sup>-1</sup>, 82,3% para 15 mg L<sup>-1</sup> e menor que 40% para as demais dosagens de PAC testadas. Estes resultados preliminares sugeriram que o mecanismo de coagulação predominante seria a adsorção e neutralização de cargas, de modo que se seguiram ensaios de tratabilidade envolvendo menores dosagens de coagulante, em virtude também da baixa turbidez da água do manancial. As doses testadas em seguida foram de 5, 7,5, 10, 12,5 e 15 mg L<sup>-1</sup> de PAC em comparação à sedimentação natural, pela não utilização do coagulante.

As figuras 1 e 2 apresentam os diagramas de coagulação elaborados para remoção de turbidez em função do pH de coagulação e dosagem de PAC, considerando a velocidade de sedimentação (Vs) de 2,0 cm min<sup>-1</sup> e 1,0 cm min<sup>-1</sup>, respectivamente. Em cada gráfico, a região delimitada com linha contínua em azul refere-se à turbidez remanescente menor que 5,0 uT, isto é, o valor recomendado para encaminhamento ao sistema de filtração em um tratamento convencional (DI BERNARDO; SABOGAL-PAZ, 2008). As remoções indicadas pela linha tracejada em vermelho referem-se aos pontos em que não houve alteração de pH.

O ponto A indicado nas Figuras 1 e 2 refere-se à dosagem de 10 mg L<sup>-1</sup> de PAC, sem que tenha havido alteração de pH da água bruta. Esta condição proveu a melhor remoção de turbidez tanto na velocidade de sedimentação de 2,0 cm min<sup>-1</sup> (93,9%) quanto na de 1,0 cm min<sup>-1</sup> (95,7%).

As Figuras 3 e 4, apresentam os diagramas elaborados para remoção de cor aparente, considerando Vs de 2,0 cm min<sup>-1</sup> e 1,0 cm min<sup>-1</sup>, respectivamente. Em cada gráfico, a região delimitada com linha contínua em azul refere-se à cor remanescente menor que 15 uH, isto é, o VMP para padrões organolépticos da PRC nº 5 de 2017 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011; 2017). As remoções indicadas pela linha tracejada em vermelho referem-se aos pontos em que não houve alteração de pH.

Quanto aos destaques de cada diagrama, o ponto A deve ser novamente ressaltado, desta vez na Figura 3, onde apresentou a melhor remoção de cor aparente para Vs = 2,0 cm min<sup>-1</sup> e dosagem de coagulante igual a 10 mg L<sup>-1</sup>, sem adição de acidulante ou alcalinizante. Os pontos B e C referem-se às melhores remoções de cor a 1,0 cm min<sup>-1</sup>, sob a dosagem de 10 mg L<sup>-1</sup> e 15 mg L<sup>-1</sup> e pH inicialmente ajustado para 8 e 9.

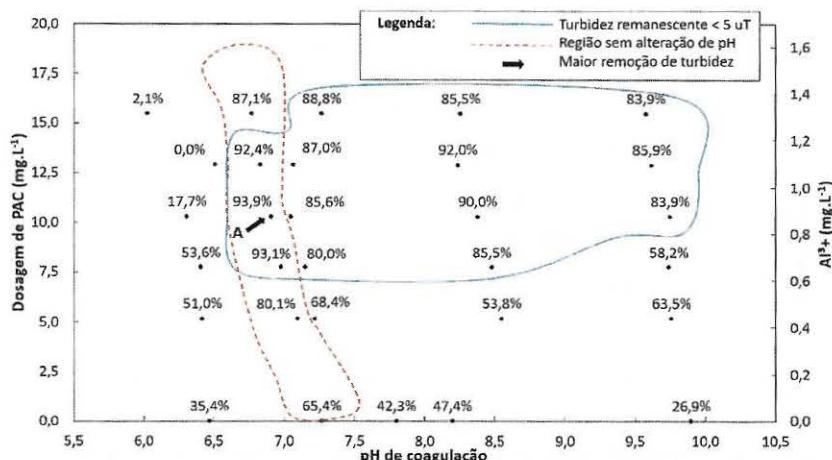


Figura 1 - Diagrama de coagulação para remoção de turbidez nas condições: dosagem de PAC entre 5 e 15 mg L<sup>-1</sup>, Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>, Tmr = 10 s, Gml= 30 s<sup>-1</sup>, Tml: 20 min, Vs = 2,0 cm min<sup>-1</sup>

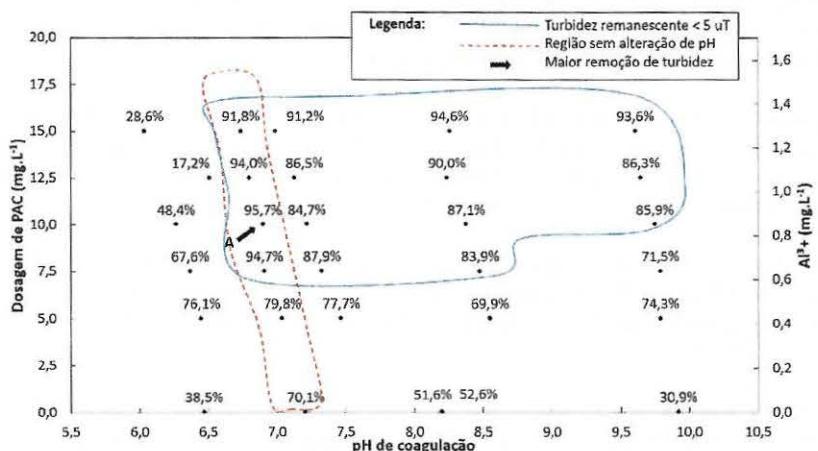


Figura 2 - Diagrama de coagulação para remoção de turbidez nas condições: dosagem de PAC entre 5 e 15 mg L<sup>-1</sup>, Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>, Tmr = 10 s, Gml= 30 s<sup>-1</sup>, Tml: 20 min, Vs = 1,0 cm min<sup>-1</sup>

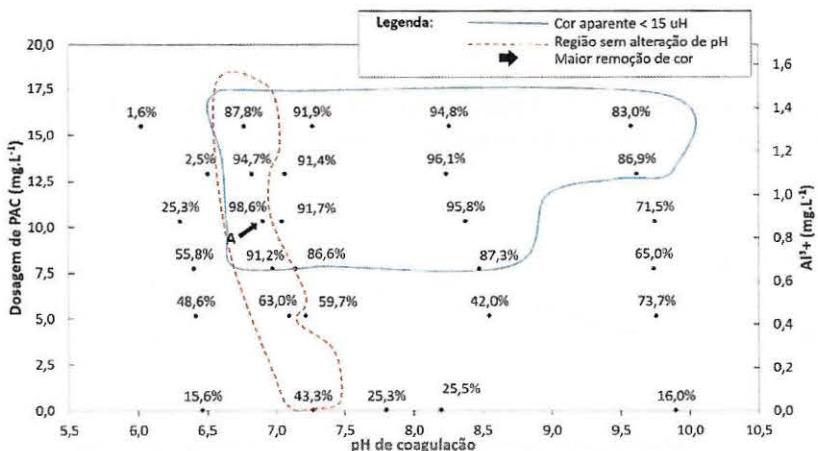


Figura 3 - Diagrama de coagulação para remoção de cor nas condições: dosagem de PAC entre 5 e 15 mg L<sup>-1</sup>, Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>, Tmr = 10 s, Gml= 30 s<sup>-1</sup>, Tml: 20 min, Vs = 2,0 cm min<sup>-1</sup>

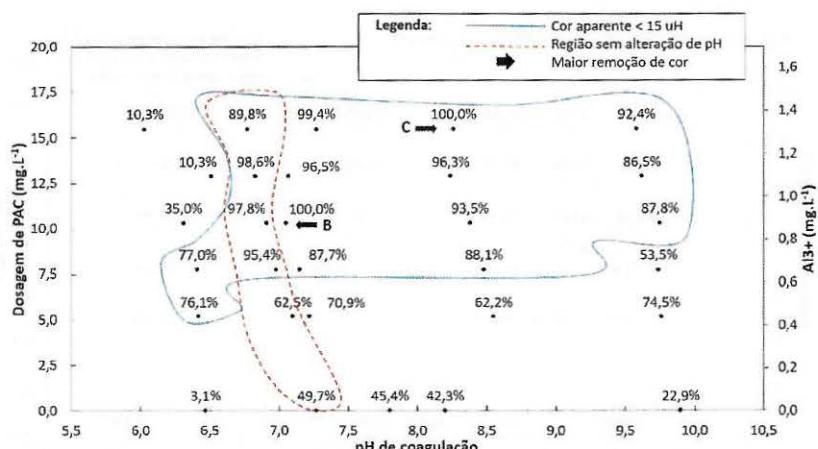


Figura 4 - Diagrama de coagulação para remoção de cor nas condições: dosagem de PAC entre 5 e 15 mg L<sup>-1</sup>, Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>, Tmr = 10 s, Gml = 30 s<sup>-1</sup>, Tml: 20 min, Vs = 1,0 cm min<sup>-1</sup>

A análise dos diagramas apresentados nas Figuras 1, 2, 3 e 4, como um todo, permite afirmar que o PAC é um coagulante eficiente para o tratamento da água do manancial de estudo por tratamento com decantação. Tal afirmação se baseia na amplitude de pH na qual o coagulante apresentou-se aplicável, promovendo remoções de turbidez e cor satisfatórias (< 5 uT e < 15 uH, respectivamente).

Para dar prosseguimento à seleção dos parâmetros de mistura adequados, optou-se pela utilização da dosagem de 10 mg L<sup>-1</sup> de coagulante, sem alteração de pH, em que foram obtidas remoções de turbidez e cor aparente dentro do intervalo de interesse. Esta condição refere-se ao obtido no ponto A, para o qual a água clarificada apresentou cor e turbidez remanescentes de 1,8 uT e 1,7 uH a 2,0 cm min<sup>-1</sup> e 1,3 uT e 1,1 uH a 1,0 cm min<sup>-1</sup>.

A definição dos parâmetros de mistura rápida baseou-se nos resultados apresentados na Figura 6, onde é possível verificar a remoção de turbidez e de cor aparente em função de (a) gradiente de velocidade para a mistura rápida e (b) tempo de mistura rápida. Os gradientes adotados foram de 700, 800, 900 e 1000 s<sup>-1</sup> e foram considerados os tempos de 10, 15, 20, 25 e 30 s.

Todos os gradientes de mistura rápida testados apresentaram remoções acima de 85,0% para cor aparente e 79,0% para turbidez. Optou-se por dar seguimento aos ensaios utilizando o gradiente médio de 700 s<sup>-1</sup> equivalente à rotação de 380 rpm no equipamento), em que houve remoção média de 88,9% de turbidez e 90,0% de cor aparente. Além disso, a turbidez média remanescente obtida foi a menor dentre as demais verificadas, de 3,5± 0,2 uT, atendendo a recomendação de Di Bernardo e Sabogal-Paz (2008) para o encaminhamento de água clarificada para os filtros.

Quanto ao tempo de mistura rápida, apresentado na Figura 5 (b), houve destaque para os tempos de 10 s e 25 s, os quais apresentaram remoções médias de turbidez em torno de 90,0%. Nesta comparação, o tempo de 10 s foi considerado mais adequado, devido à maior remoção de cor aparente e menor desvio padrão dos resultados obtidos.

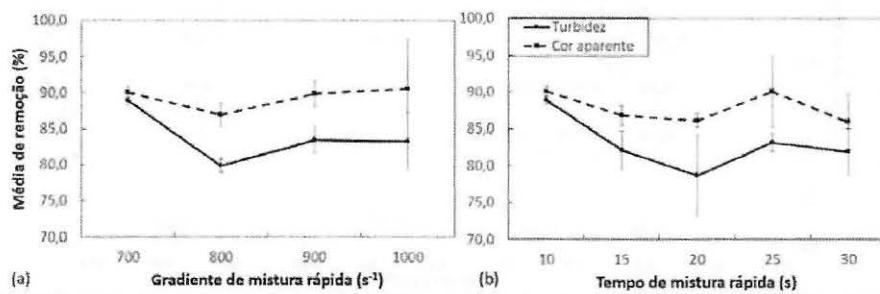


Figura 5 - Remoções de cor aparente e turbidez em função dos parâmetros operacionais de mistura rápida: (a) gradiente médio de velocidade de mistura, e; (b) tempo de mistura rápida

A Figura 6 (a) exibe os resultados de remoção de turbidez e cor para  $G_f$  iguais a 10, 20, 30, 40, 50  $s^{-1}$  e escalonado de 30 a 20  $s^{-1}$ . O tempo de mistura considerado nessa etapa de seleção de parâmetros foi de 20 min e, no caso da condição escalonada, utilizou-se 10 minutos para cada gradiente. Gradientes menores favoreceram a clarificação da água, tendo havido destaque para o de 30  $s^{-1}$  (88,9±0,6% de remoção de turbidez e 90,0±0,8% de remoção de cor aparente) e para a floculação com gradiente escalonado. Para dar seguimento aos ensaios, selecionou-se  $G_f$  de 30  $s^{-1}$  por conta do menor desvio padrão apresentado em relação ao de 30/20  $s^{-1}$  (87,4 ±2,8% de remoção de turbidez e 92,3±2,2 % de remoção de cor).

A Figura 6 (b) mostra os resultados para os ensaios com tempos entre 10 e 30 min. O  $T_{ml}$  de 10 min apresentou as menores remoções médias de cor aparente e turbidez, o que indica que este período não permitiu a formação apropriada dos flocos. Nele, a turbidez remanescente foi de 9,2±0,5 uT e a cor de 24,3±1,0 uH, de modo que nenhum dos parâmetros atendeu às expectativas de clarificação. Apesar disso, verificou-se tendência crescente de remoção dos parâmetros analisados em função do aumento de  $T_{ml}$  até 20 min, tendo este sido selecionado como  $T_f$  “ótimo”.

Por fim, foi definida  $V_s$  de 2,0 cm  $min^{-1}$ , em virtude dos resultados de remoção de turbidez e cor apresentados na Tabela 1. Apesar de  $V_s$  igual a 1,0 cm  $min^{-1}$  ter apresentado maiores remoções, esta velocidade é menos interessante ao ser aplicada em escala plena, exigindo maiores unidades de decantação. Os parâmetros operacionais selecionados foram compilados na Tabela 2.

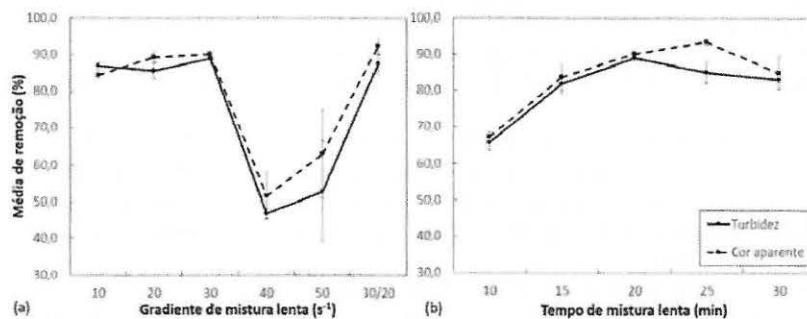


Figura 6 - Remoções de cor aparente e turbidez em função dos parâmetros operacionais de floculação:  
(a) gradiente médio de velocidade de mistura, e; (b) tempo de floculação

Tabela 1 - Remoção média percentual de turbidez e cor para diferentes velocidades de sedimentação

$V_s$ ( $cm\ min^{-1}$ )	Remoção de turbidez (%)	Remoção de cor aparente (%)
2,0	88,9 ± 0,60	90,0 ± 0,76
1,5	87,2 ± 1,56	89,9 ± 1,65
1,0	89,7 ± 1,43	92,9 ± 0,32

Tabela 2 - Parâmetros operacionais “ótimos”, adotados a partir dos ensaios de tratabilidade

Parâmetros	Valor	Unidade
Gradiente de velocidade médio na mistura rápida – $G_{mr}$	700	$s^{-1}$
Tempo de mistura rápida – $T_{mr}$	10	s
Gradiente de velocidade médio na floculação – $G_f$	30	$s^{-1}$
Tempo de floculação – $T_{ml}$	20	min
Velocidade de sedimentação – $V_s$	2,0	$Cm\ min^{-1}$

## CONCLUSÕES

A utilização do PAC apresentou remoções de turbidez e cor satisfatórias para o tratamento da água de manancial superficial em estudo em ampla faixa de pH, recomendando-se a utilização do pH neutro. Estes resultados indicam vantagem do uso do PAC, por não exigir custos com alcalinizantes. Além disso, a seleção dos parâmetros operacionais permitiu compreender a influência das dessas condições no tratamento com PAC e direcionar demais estudos com matrizes similares.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP (Projeto temático, processo nº 2012/50522-0), ao *Global Challenges Research Fund (GCRF) UK Research and Innovation* (SAFEWATER; EPSRC Grant Reference EP/P032427/1), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pela bolsa de mestrado concedida à Kamila Jessie Sammarro Silva e à empresa Quimisa S/A pela doação do coagulante PAC.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANDREOLI, F. C., BONI, D. M., SABOGAL-PAZ, L. P.. Remoção de cor e turbidez utilizando ciclo completo Com flotação: estudo em escala de bancada. 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2017. Anais do 28º Congresso de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro: ABES, 2017.
2. BETANCOURT, Walter Q.; ROSE, Joan B.. *Drinking water treatment processes for removal of Cryptosporidium and Giardia. Veterinary Parasitology*, v. 126, n. 1-2, p.219-234, dez. 2004.
3. BRASIL. Ministério da Saúde. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. Portaria de Consolidação nº 5, de 3 de outubro de 2017. Publicada no D.O.U. Nº 190, Seção 1, página 360 de 03/10/2017. Brasília, 2017.
4. DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B.; VOLTAN, P. E. N. Tratabilidade de Água e dos Resíduos gerados em Estações de Tratamento de Água. Editora LDiBe. 2011.
5. DI BERNARDO, L.; SABOGAL PAZ, L. P. Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água. Editora LDiBe. v 1 e v.2. 2008.
6. FERRARI, T. N; DE JULIO, M.; DE JULIO T., S. Emprego do Sulfato de Alumínio e do Cloreto de Polialumínio em estudos de Tratabilidade da Água que abastece o Município de São José dos Campos-SP. Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal, v. 8, n. 4, p. 118 -137 , out./dez. 2011.
7. IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico*, 2008. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.
8. MACIEL, P. M. F., SABOGAL-PAZ, L. P.. Diagrama de coagulação e otimização de misturas para água com turbidez elevada utilizando cloreto de polialumínio. 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2017. Anais do 28º Congresso de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro: ABES, 2017.