



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
ENG07053 - TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA



Uso de Taninos no Tratamento de Água para Abastecimento

Autor: André Luis da Silva Gusmão

Orientador: Prof^a Dr^a Mariliz Gutterres Soares

Porto Alegre, dezembro de 2014

Sumário

Sumário	ii
Agradecimentos	iii
Resumo	iv
Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	vi
Lista de Abreviaturas e Siglas	vii
1 Introdução	1
2 Revisão Bibliográfica	3
2.1 Tecnologias de Tratamento e Potabilização da Água	3
2.2 Parâmetros de Qualidade da Água	5
2.3 Agentes Coagulantes e Floculantes	7
2.3.1 Sais Inorgânicos	8
2.3.2 Polímeros Sintéticos	8
2.3.3 Polímeros Naturais e Taninos	9
3 Materiais e Métodos	13
3.1 Preparo das Soluções	13
3.2 Procedimento Experimental	13
3.3 Análise dos Parâmetros de Qualidade	16
3.3.1 Turbidez	16
3.3.2 Teor de Sólidos (Totais, Fixos e Voláteis)	17
3.3.3 Aparência do Floco e Velocidade de Sedimentação	18
3.3.4 Potencial Zeta e pH	18
4 Resultados	19
4.1 Caracterização da Água Bruta	19
4.2 Remoção de Turbidez	19
4.3 Remoção de Sólidos	21
4.4 Variação do pH e da Condutividade	21
4.5 Velocidade de Sedimentação e Aspecto do Floco	23
4.6 Variação do Potencial Zeta	25
5 Conclusões e Trabalhos Futuros	27
6 Referências	29

Agradecimentos

Primeiramente quero agradecer à minha família, por terem me acompanhado ao longo desses anos de estudos de engenharia química. Agradeço especialmente à minha mãe, Noeli Severo da Silva e ao meu pai, Washington Luis Ferreira Gusmão, por todo o sacrifício feito com o objetivo de propiciar condições para atingir meus objetivos. Palavras impressas em papel são pouco pra expressar a enorme gratidão que sinto por essas duas maravilhosas pessoas que, apesar de terem suas diferenças, sempre viveram e ainda vivem em prol de mim e dos meus irmãos Pedro e Artur.

Agradeço também à Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em especial ao Departamento de Engenharia Química. Agradeço não só pelos ensinamentos a mim transmitidos, mas também pela oportunidade conhecer diferentes pessoas, de diferentes personalidades, cada uma com um pouco de experiências para compartilhar. Agradeço também à minha orientadora, a Prof^a Dr^a Mariliz Gutterres Soares, por ter se disposto sempre que possível para me auxiliar, mesmo estando no Japão durante os dias que antecederam a entrega deste trabalho. Agradeço também ao pessoal do LACOURO, que me ensinaram muito e me acolheram.

Deixo este parágrafo para um agradecimento especial à minha namorada, Calisa. Sinceramente, tu és uma mistura de super-herói com monge, pois só assim é possível ter a força e a paciência necessárias pra lidar comigo de vez em quando.

Agradeço também aos meus amigos e amigas de dentro e fora da UFRGS (não são muitos para listar, mas quem ler esta mensagem se identificará) pelos ótimos momentos vivenciados durante esses anos de graduação dentro e fora do ambiente da universidade, que muito contribuíram para meu desenvolvimento pessoal Obrigado meus amigos, por estarem ao meu lado durante essa jornada.

Resumo

A qualidade da água para abastecimento, sob o ponto de vista dos parâmetros físico-químicos e bacteriológicos, e a capacidade de fornecimento em quantidade suficiente são preocupações históricas, não só das empresas responsáveis pelo tratamento e distribuição, mas como da sociedade como um todo. No processo de clarificação o alumínio, adicionado como agente coagulante acumula nos lodos residuais, retornando ao curso d'água utilizado para captação de água para tratamento, contaminando-os. Por conta disso é preciso estudar a possibilidade de utilização de agentes coagulantes alternativos, de modo a garantir que os parâmetros de potabilidade sejam atingidos sem gerar resíduos danosos ao meio ambiente. A alternativa adotada neste trabalho foi o uso de dois coagulantes de origem vegetal, Tanfloc SG Tanfloc SM, obtidos a partir de taninos da Acácia Negra (*Acacia mearnsii*), em comparação com o sulfato de alumínio segundo diversos parâmetros relacionados à potabilidade da água, tais como a turbidez, teor de sólidos, pH e potencial zeta. O estudo comparativo feito com os resultados obtidos neste trabalho mostrou que os coagulantes a base de taninos possuem eficiência igual ou maior que a do sulfato de alumínio, levando-se em conta a remoção de turbidez, variação de pH e teor de sólidos. Há diversas vantagens, tais como: uso de matéria prima renovável, menor toxicidade do lodo gerado, economia de produtos para ajuste de pH e produção de uma água potável isenta de alumínio. Contudo, o uso dessa classe de produtos ainda deve ser avaliado segundo critérios econômicos e de saúde. Considerando as limitações deste trabalho, os coagulantes derivados de tanino podem ser considerados uma alternativa promissora para o tratamento de água para abastecimento.

PALAVRAS-CHAVE: tratamento de água; floculação; coagulação; tanino; sulfato de alumínio.

Lista de Figuras

Figura 2.1: Principal monômero dos taninos (adaptado de MANGRICH <i>et al</i> , 2014).....	10
Figura 2.2: Molécula de tanino hidrolisável (adaptado de MANGRICH <i>et al</i> , 2014).....	10
Figura 2.3: Molécula de tanino condensado (adaptado de MANGRICH <i>et al</i> , 2014).....	11
Figura 4.1: Concentração média final de turbidez para cada concentração do agente coagulante-floculante testado	19
Figura 4.2: Percentual de remoção médio de turbidez para cada concentração do agente coagulante-floculante testado	20
Figura 4. 3: Variação do pH em função da concentração de coagulante.....	22
Figura 4.5: Flocos após adição de 70 mg/L de sulfato de alumínio	24
Figura 4.6: Flocos após adição de 70 mg/L de Tanfloc SM.....	24
Figura 4.7: Flocos após adição de 30 mg/L de Tanfloc SG.....	25

Lista de Tabelas

Tabela 3.1: Preparo das soluções de coagulante	13
Tabela 3.2: Parâmetros fixados nos ensaios	15
Tabela 3.3: Planejamento dos experimentos.....	16
Tabela 4.1: Caracterização da água bruta	19
Tabela 4.2: Teor de sólidos e percentual de remoção	21
Tabela 4.3: Velocidade de sedimentação e Aspecto do floco.....	24

Lista de Abreviaturas e Siglas

ETA: Estação de Tratamento de Água

L: Litro, unidade de volume

MS: Ministério da Saúde

mV: miliVolt

Nml: rotação do agitador na etapa de mistura lenta

Nmr: rotação do agitador na etapa de mistura rápida

NTU: *Nephelometric Turbidity Unit* (Unidade de Turbidez Nefelométrica)

pH: potencial hidrogeniônico

ppm: partes por milhão (equivalente a mg/L)

STF: Sólidos totais fixos

ST: Sólidos totais

STV: Sólidos totais voláteis

Tmr: Tempo de mistura rápida

Tml: Tempo de mistura lenta

Ts: Tempo de sedimentação

1 Introdução

Água potável é um produto demandado por todos os seres vivos, em especial o ser humano, principalmente após a explosão demográfica observada entre o final do século XVIII e início do século XX. Isso se deve principalmente aos avanços na área de produção de alimentos, com o advento dos fertilizantes e da mecanização da agricultura, e da saúde, com a criação dos antibióticos, vacinas e melhoria das condições de higiene. Contudo, nessa época ainda não havia preocupação com o meio ambiente, em especial, com as fontes de água, o que acarretou na poluição de rios e lagos. Nesse contexto, devido à alta taxa de crescimento demográfico e escassez de fontes naturais de água potável, surgiram as primeiras tecnologias de tratamento de água para abastecimento.

A técnica mais utilizada atualmente para tratamento de água é basicamente a mesma desde o século XVIII, sendo as principais diferenças relacionadas ao controle, automação e instrumentação do processo e as leis de qualidade da água. O princípio dessa técnica (referida normalmente como tratamento convencional) consiste em desestabilizar as partículas de poluentes, que normalmente estão presentes na água na forma de suspensão, de modo a permitir a formação de agregados que possam ser removidos por técnicas baseadas em diferença de massa específica (sedimentação e flotação) ou de tamanho (filtração). Para promover essa aglutinação se empregam produtos químicos, em especial o sulfato de alumínio, que vem sendo utilizado desde o surgimento dessa tecnologia de tratamento até os dias de hoje na maioria das estações de tratamento de água (ETAs) no Brasil e em diversos países. A principal vantagem no uso do sulfato de alumínio consiste no fato de possuir custo baixo, pois é um produto produzido a partir da mistura de ácido sulfúrico e bauxita, matérias-primas de fácil acesso.

Do início do tratamento de água até a segunda metade do século XX, a preocupação com a preservação do ambiente pouco avançou. Por conta disso, os resíduos gerados no tratamento de água, como lodos com alto teor de sólidos e alumínio, eram dispostos sem nenhum tipo de preocupação, tendo os corpos d'água como destino final. Com o advento de leis que obrigam as ETAs a dispor de maneira adequada seus resíduos, o interesse por produtos alternativos ao sulfato de alumínio cresceu, em especial por produtos que produzissem menor quantidade de lodo ou então que não contivessem metais em sua composição, o que tornaria possível a sua utilização como adubo. Além disso, estudos posteriores apontaram uma possível correlação entre intoxicação por alumínio e doenças de-

generativas do sistema nervoso, aumentando ainda mais a pressão por busca de produtos alternativos. Neste contexto de busca por produtos para tratamento de água que sejam menos danosos ao ambiente surgiram os coagulantes de origem vegetal, em especial os obtidos a partir de taninos.

Considerando os pontos negativos expostos como motivação, o presente trabalho tem por objetivo testar e comparar o desempenho do sulfato de alumínio a dois produtos obtidos a partir de taninos como agentes coagulantes no tratamento de água, considerando as normas regulamentadoras em âmbito nacional e estadual como referência. Adicionalmente, objetivou-se levantar uma hipótese sobre os mecanismos envolvidos na ação dos coagulantes vegetais testados, pois sua estrutura molecular difere bastante dos produtos atualmente utilizados para o tratamento de água.

2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo serão abordados os conceitos necessários para o desenvolvimento e o melhor entendimento deste trabalho. Num primeiro momento será apresentada uma breve revisão sobre as tecnologias de tratamento e potabilização da água, bem como os parâmetros de qualidade exigidos de acordo com a legislação vigente e os principais agentes coagulantes e floculantes que foram testados neste trabalho.

2.1 Tecnologias de Tratamento e Potabilização da Água

Em grande parte dos países do mundo e, principalmente, em países em desenvolvimento, como o Brasil, o processo que predomina nas estações de tratamento de água (ETA) é o chamado de ciclo completo ou convencional. Esse ciclo é caracterizado pelas etapas de coagulação, floculação, sedimentação, filtração e desinfecção. No Brasil, há 2817 municípios que dispõem de ETA com tratamento convencional, dentre os quais 545 estão na região Sul, 1087 no Sudeste, 230 no Centro-Oeste, 851 no Nordeste e 104 no Norte. Considerando que vários municípios possuem mais de uma estação de tratamento, se estima que mais de 3500 ETAs estejam em operação no país. (LIBÂNIO, 2010; IBGE, 2012).

De acordo com DI BERNARDO e DANTAS (2005), a coagulação pode ser definida como um processo físico de remoção de impurezas da água, que ocorre na unidade de mistura rápida da ETA. Tem início segundos após a adição do agente coagulante, quando ocorre a formação de espécies hidrolisadas com caráter catiônico que, por atração eletrostática, agrupa as partículas com carga negativa presentes na água a ser tratada, tais como sólidos, compostos orgânicos dissolvidos e microrganismos. Sob o ponto de vista da eletrostática, o que caracteriza a etapa de coagulação é a redução do potencial zeta das partículas em suspensão, através da adição de espécies iônicas adequadas. A coagulação dá-se quando as espécies hidrolisadas catiônicas, oriundas do agente coagulante, baixam o potencial zeta, diminuindo a intensidade das forças de repulsão do material suspenso até o ponto em que as forças de Van der Waals predominem e promovam a aglutinação das partículas (LIBÂNIO, 2010).

Floculação é a etapa do ciclo de tratamento da água que consiste de um conjunto de processos físicos tem por objetivo promover o contato entre as partículas contaminantes. Como o potencial zeta fora reduzido na etapa de coagulação, é possível que as forças de

Van der Waals sejam suficientes para promover o agrupamento das partículas em flocos, que são mais facilmente removidos. Essa etapa ocorre na unidade de mistura lenta da ETA e possui bastante importância na remoção das partículas suspensas e coloidais, pois a eficiência de remoção desse material está diretamente relacionada ao tamanho dos flocos (KAWAMURA, 1991).

O processo de sedimentação consiste de uma separação gravitacional, baseada na diferença de densidade entre os flocos e a água. O material que sedimenta constitui o conhecido lodo de ETA, sendo formado principalmente por matéria orgânica, microrganismos e espécies metálicas, sendo estas provenientes dos corpos hídricos ou do agente coagulante (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

A filtração é definida como um processo físico no qual as partículas ou flocos de materiais suspensos são retidos quando a suspensão é forçada a cruzar por entre os vazios de um meio poroso. As principais forças atuantes no processo são a de arraste, relacionada ao fluxo de escoamento e a de adsorção, relacionada à afinidade entre as partículas e a superfície do meio poroso. Para tratamento de água de abastecimento, o material mais utilizado para formar o meio poroso é a areia (LIBÂNIO, 2010). Esse processo possui função primordial na remoção das partículas responsáveis por características indesejáveis na água, tais como cor e turbidez. É a etapa de filtração também a responsável por corrigir eventuais falhas ocorridas nos processos anteriores (coagulação, floculação e sedimentação/flotação), assegurando a qualidade da água tratada (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

A etapa de desinfecção consiste em destruir ou inativar microrganismos remanescentes, que não foram removidos nos processos anteriores, através de agentes físicos e/ou químicos. Os agentes físicos atuam ionizando moléculas orgânicas dos microrganismos, formando radicais livres com alta reatividade, danificando as células. Destacam-se as radiações UV e gama e, a nível domiciliar, a fervura. Os agentes químicos usualmente atacam os microrganismos através do mecanismo de oxidação, ocasionando ruptura da parede celular e a difusão do agente desinfectante para o interior da célula. Dentre os produtos mais utilizados, merecem destaque o ozônio, dióxido de cloro, cloro e o peróxido de hidrogênio (DANIEL *et al*, 2001; DIBERNARDO; DANTAS, 2005).

O cloro é o agente oxidante mais usado em todo o mundo. O ozônio é um poderoso oxidante e possui ação germicida superior contra bactérias e vírus, em comparação com o

cloro, porém precisa ser preparado in situ, assim como o dióxido de cloro, o que demanda equipamentos especiais. Além de agente desinfectante, o ozônio vem sendo utilizado com outras finalidades, tais como auxiliar de remoção de turbidez e cor e em processos biológicos aeróbios (DI BERNARDO; DANTAS, 2005; LIBÂNIO, 2010).

2.2 Parâmetros de Qualidade da Água

Para determinar os parâmetros de qualidade da água, há a portaria do Ministério da Saúde (MS) nº 2914 de 12 de Dezembro de 2011 que dispõe sobre os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e define o padrão de potabilidade através de valores máximos de concentração de diversas substâncias consideradas nocivas e/ou indesejáveis. Os parâmetros básicos de análises físico-químicas são temperatura, potencial hidrogeniônico (pH), dureza, alcalinidade, turbidez, cor aparente e verdadeira.

A temperatura da água está diretamente relacionada com a energia cinética do movimento aleatório das moléculas e sintetiza o fenômeno de transferência de calor ao meio líquido, através dos mecanismos de radiação, condução e convecção. Possui influência direta na coagulação, etapa presente na maioria das tecnologias de tratamento de água, tornando o processo menos eficiente em baixas temperaturas. O pH expressa a concentração de íons hidrogênio (H⁺), indicando o caráter ácido, básico ou neutro de uma solução. Águas com elevado pH tendem a formar incrustações nas máquinas e tubulações dos sistemas de abastecimento (DI BERNARDO; DANTAS, 2005; LIBÂNIO, 2010).

A alcalinidade é uma medida da capacidade de tamponamento, ou seja, de resistir às mudanças de pH. Deve-se principalmente à presença em solução de íons carbonato e bicarbonato, mas íons como o hidróxido, o fosfato, o silicato, o borato e a amônia também podem contribuir. Esse parâmetro influencia significativamente a etapa de coagulação com sulfato de alumínio, pois o íon Al³⁺ tende a capturar íons hidróxido da solução, diminuindo o valor do pH. Isso implica na necessidade de se adicionar alcalinizantes (usualmente cal) para deixar o valor de pH na faixa adequada, o que acarreta em maior custo de tratamento e maior concentração de íons Ca²⁺ em solução, aumentando o valor de dureza. (DI BERNARDO; DANTAS, 2005; LIBÂNIO, 2010).

A dureza é a propriedade relacionada à concentração de determinados íons em solução, especialmente o Ca²⁺ e o Mg²⁺ combinados com bicarbonatos, sulfatos, cloretos e

nitratos. Altas concentrações desses íons resultam em problemas, tais como incrustações, aumentando o custo de manutenção de equipamentos e dificuldade de formar espuma, aumentando o consumo de água e sabão nas operações de limpeza doméstica. Pode ser classificada em temporária e permanente, sendo a primeira referente à presença de bicarbonatos e a última, à presença de sulfatos, cloretos e nitratos (SPERLING, 2005).

O fenômeno de turbidez ocorre devido às partículas sólidas suspensas no meio líquido, diminuindo sua transparência. Normalmente é esperado atingir a especificação de turbidez após as etapas de coagulação, floculação e sedimentação/flotação, pois o excesso de flocos pode ocasionar entupimento precoce do filtro de areia, demandando limpeza e paralisando toda a ETA. Já no processo de desinfecção, uma elevada turbidez dificulta a ação dos agentes desinfetantes, pois os flocos podem servir de barreira para os microrganismos. Além disso, a própria matéria orgânica floculada pode reagir com os desinfetantes, diminuindo a eficiência da desinfecção (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Assim como para a turbidez, a cor é definida como a diminuição da transparência de um meio líquido, diferindo apenas no agente causador que, no caso da cor, são as espécies coloidais (diâmetro inferior a $1\mu\text{m}$) orgânicas (ácidos orgânicos, corantes, lignina) e inorgânicas, como ferro e manganês. Pode ser dividida em duas categorias: aparente e verdadeira. A cor aparente é causada pelas partículas suspensas, as mesmas responsáveis pela turbidez. Já a cor verdadeira só pode ser mensurada depois de se separar ou remover a matéria suspensa do seio do líquido por centrifugação ou filtração em membrana. A análise da cor verdadeira é bastante importante, pois indica a quantidade de matéria orgânica dissolvida na água. Na etapa de desinfecção, essa matéria orgânica dissolvida pode ser oxidada, consumindo o agente que deveria atacar os microrganismos. Se o desinfetante for halogenado, há ainda a possibilidade de formação de compostos potencialmente cancerígenos, como os da classe dos trihalometanos (SPERLING, 2005; LIBÂNIO, 2010).

O potencial hidrogeniônico ou pH é uma medida da concentração de espécies ácidas, mais exatamente íons H^+ , em solução. É uma variável cujo controle é crítico em tratamento de efluentes, especialmente nos casos onde se deseja remover contaminantes metálicos pelo processo de precipitação, pois a solubilidade muda em várias ordens de grandeza com variações relativamente pequenas de pH. No tratamento de água para abastecimento o controle do pH é importante para assegurar que os agentes coagulantes

(principalmente os da classe dos sais inorgânicos) atuem com máxima eficiência e que o intervalo permitido pela legislação não seja excedido (LIBÂNIO, 2010).

Dentre os principais poluentes de águas de rios e lagos estão os resíduos orgânicos (naturais ou antrópicos) e os inorgânicos (partículas suspensas de minerais e sais dissolvidos, também de origem natural ou antrópica). Esses dois grupos de compostos formam o que é chamado de teor de sólidos e é um dos parâmetros avaliados em efluentes e águas tratadas. O teor de sólidos é dividido em dois grupos: sólidos voláteis e sólidos fixos. No grupo dos sólidos voláteis estão as partículas orgânicas, que sofrem oxidação a dióxido de carbono quando aquecidas, enquanto os sólidos fixos são formados pelos minerais e sais inorgânicos, que não volatilizam, mesmo após aquecimento. O percentual de cada classe de sólidos no efluente a ser tratado é determinante para a escolha da tecnologia a ser adotada (SPERLING, 2005).

Os sólidos voláteis podem ser abatidos através do processo de coagulação e floculação convencional, ou então através do processo de tratamento por lodos ativados, onde microrganismos utilizarão a matéria orgânica como substrato, consumindo os poluentes. Efluentes que possuem elevado teor de metais, como os oriundos de curtumes e empresas de galvanoplastia, usualmente são tratados no processo físico-químico, via precipitação. Normalmente isso se dá através da formação de hidróxidos, por alcalinização do efluente, pois a solubilidade dessas espécies é muito baixa em valores de pH elevados (LIBÂNIO, 2010).

A capacidade da água em conduzir corrente elétrica depende da concentração das espécies salinas dissolvidas e das propriedades dos íons, como carga e tamanho, sendo mensurada através da condutividade. Algumas aplicações que precisam de água com baixo teor de sais, como as utilizadas nos sistemas de vapor, adotam a condutividade como parâmetro a ser controlado. Por ser uma propriedade afetada por diversos fatores, é utilizada apenas como um indicador qualitativo na mensuração de outras propriedades, como o teor de sais e sólidos fixos (SPERLING, 2005).

2.3 Agentes Coagulantes e Floculantes

Dentre os coagulantes encontrados no mercado atualmente, os sais inorgânicos são os mais empregados e como floculantes utilizam-se os polímeros sintéticos e os a base de tanino. Contudo, dependendo do efluente que se deseja tratar, um mesmo produto pode

ser reponsável pela coagulação e pela floculação. Dependendo da estrutura molecular e da densidade de carga, um mesmo produto pode realizar ambas as tarefas.

2.3.1 *Sais Inorgânicos*

Os mais comuns são os sulfatos e cloretos de ferro (III) e alumínio. O sulfato de alumínio é utilizado como coagulante desde o século XVIII na Inglaterra. Ao serem dissolvidos em água os íons Al^{3+} e Fe^{3+} neutralizam as cargas negativas das partículas suspensas, reduzindo o potencial zeta e permitindo o agrupamento em flocos desses materiais. Dentre esses sais, o sulfato de alumínio é o mais utilizado devido ao seu baixo custo, fácil manuseio e grande disponibilidade, pois é fabricado a partir de dois materiais bastante comuns (bauxita e ácido sulfúrico). Usualmente apresenta teor de 3 a 6% de ácido sulfúrico não reagido e traços de metais pesados como chumbo, cádmio e mercúrio (LIBÂNIO, 2010).

A exposição ao alumínio através da água e alimentos tem sido associada a uma variedade de doenças fisiológicas e neurológicas, como a doença de Alzheimer. Por esse ponto de vista, o uso de agentes coagulantes isentos de alumínio seria uma boa alternativa, visando eliminar ou ao menos reduzir a concentração desse metal da água destinada ao abastecimento (SRNIVASAN *et al*, 1999; FLATEN, P., 2001).

Segundo a 4ª edição dos “Guias de Qualidade da Água para Beber” da Organização Mundial da Saúde (OMS) de 2011 (Guidelines for Drinking Water Quality – World Health Organization, 2011), a principal via de exposição da população ao alumínio é através da ingestão de alimentos e água. Ademais, há poucos indícios de que a ingestão por via oral de alumínio seja altamente tóxica, apesar de estar presente de maneira generalizada em alimentos industrializados, água, produtos de higiene etc. Ainda segundo a OMS, apesar de a associação entre a doença de Alzheimer e a ingestão de alumínio não poder ser totalmente descartada, há indícios de que a relação positiva apontada por diversos estudos da área médica seja casual, porque as pesquisas não seriam claras e específicas o suficiente para apurar esse tipo de informação.

2.3.2 *Polímeros Sintéticos*

Dentre os polímeros sintéticos utilizados no tratamento de água, merecem atenção também os polímeros inorgânicos, em especial o Cloreto de Polialumínio (PAC) e os polí-

meros iônicos orgânicos. Denomina-se como PAC a família de sais que possuem fórmula química $AlnCl_{(3n-m)}(OH)_m$, onde “n” e “m” dependem das concentrações de alumínio e ácido clorídrico utilizadas durante a síntese. Frente aos sais inorgânicos, possui vantagens tais como menor dosagem requerida e consumo de alcalinidade. Por outro lado, possui custos mais elevados que os sulfatos de alumínio e ferro, o que pode ser compensado devido à maior eficiência (VALENCIA, 1992).

Polímeros podem apresentar cargas ao longo da cadeia se suas unidades constituintes possuírem grupos funcionais polares, como carboxilas e grupos amino. Figuram como exemplos dessa classe de produtos os poliácridatos e as poliamidas. Como vantagens do uso desse tipo de produto figuram razoável independência do pH de coagulação e, devido à alta densidade de carga, menor dosagem. Em contrapartida, há o maior custo e, em certos casos, menor remoção de turbidez (BOLTO; GREGORY, 2007; MATILAINEN *et al.*, 2010).

2.3.3 Polímeros Naturais e Taninos

Há na natureza diversas substâncias que possuem potencial para utilização como agente coagulante-floculante no tratamento de água para abastecimento e efluentes. Compostos que apresentam estrutura polimérica e apresentam muitos grupos funcionais com alta polaridade, como quitosanas, alginatos e o amido são, junto com os taninos, os produtos mais utilizados para obtenção de coagulantes-floculantes. Por serem obtidos a partir de fontes renováveis e serem formados por matéria orgânica, possuem elevada biodegradabilidade de baixa toxicidade, tornando o manejo dos lodos oriundos do tratamento de água menos dispendioso e perigoso (LEE, C. S.; ROBINSON, J.; CHONG, M. F, 2014).

Taninos são compostos da classe dos polifenóis, encontrados em uma grande variedade de plantas superiores e tradicionalmente utilizados na indústria do couro como agente de curtimento, em um dos mais antigos processos de transformação dominados pelo homem. A mais antiga conceituação química de tanino se resume a defini-los como “substâncias orgânicas de extrato vegetal capazes de precipitar proteínas” (BELAVSKI, 1965). A Figura 2.1 apresenta a estrutura básica dos taninos. Nas posições R_1 e R_2 normalmente há hidroxilas ou ligação com outra unidade básica.

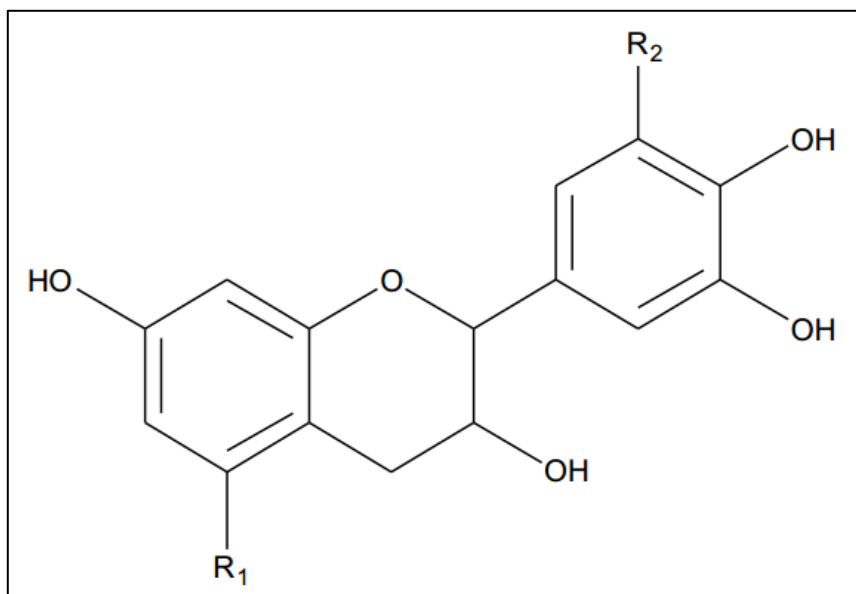


Figura 2.1: Principal monômero dos taninos (adaptado de MANGRICH *et al*, 2014)

Uma das principais classificações dos taninos é aquela que os divide em dois grandes grupos: os condensados e os hidrolisáveis. Ambos os grupos apresentam estrutura polimérica, sendo o primeiro grupo constituído principalmente por flavonoides, e o segundo grupo formado pela esterificação de ácidos fenólicos com açúcares. A denominação “hidrolisável” deve-se à facilidade de hidrólise das ligações formadas na esterificação, enquanto a denominação “condensado” se deve à dificuldade de quebra das ligações C-C, que mantém a molécula íntegra. Tanto os taninos hidrolisáveis quanto os condensados possuem diversos grupos hidroxila ligados aos anéis, o que confere boa capacidade de complexação de substâncias orgânicas e íons metálicos (BELAVSKI, 1965). As Figura 2.2 e Figura 2.3 evidenciam as diferenças entre os dois grupos

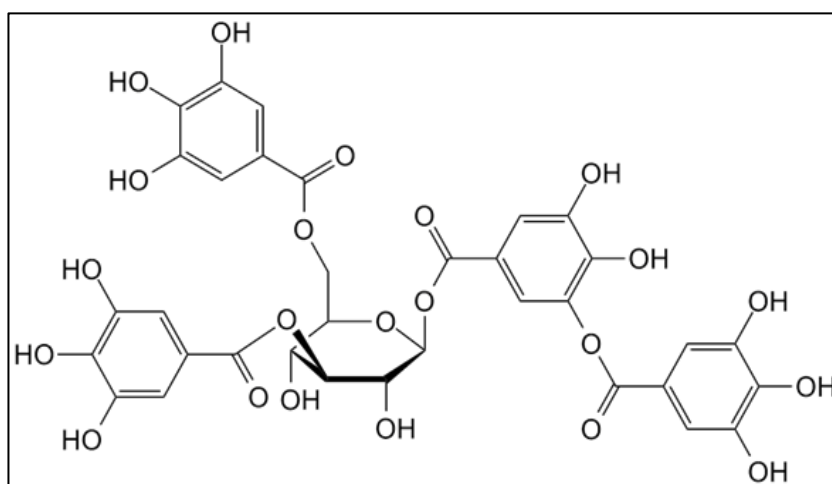


Figura 2.2: Molécula de tanino hidrolisável (adaptado de MANGRICH *et al*, 2014)

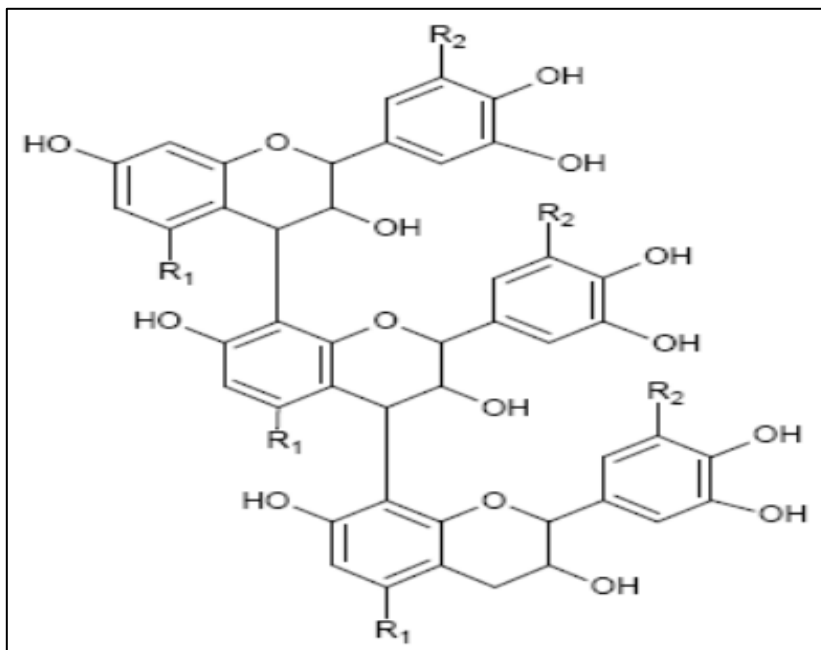


Figura 2.3: Molécula de tanino condensado (adaptado de MANGRICH *et al*, 2014)

ZHAN e ZHAO (2003) testaram a remoção de chumbo de águas ácidas usando um adsorvente produzido a partir de taninos e observaram remoções de até 91%, mostrando que compostos a base de tanino possuem aplicação no tratamento de efluentes contaminados com metais pesados. Segundo SÁNCHEZ-MÁRTIN *et al* (2010), um coagulante/floculante comercial, obtido a partir dos taninos da Acácia Negra (*Acacia mearnsii*) apresentou a mesma capacidade de remoção de turbidez que o sulfato de alumínio, mas com dosagem até 40% menor. Também foi observado que a eficiência na remoção de turbidez diminui com a temperatura, mas não de maneira abrupta, mantendo remoção de turbidez acima de 80% na temperatura de 40°C. Esses resultados indicam que é possível modificar a estrutura dos taninos, de modo a manter a alta eficiência em diferentes condições ou aumentar a remoção de um poluente específico.

Testes em laboratório e plantas-piloto tem demonstrado que coagulantes/floculantes a base de tanino não sofrem grande influência do pH, sendo considerado eficiente na faixa de 5,0 até 8,0. Como o produto não consome alcalinidade do meio onde atua, o pH se mantém praticamente constante, minimizando o consumo de álcalis, que são utilizados em grande quantidade no tratamento com sais de alumínio e ferro. Além disso, os flocos formados possuem forma irregular, com grande área superficial, tornando a etapa de floculação mais eficiente. Isso resulta em menores valores de cor e turbidez para o clarificado, além de menor consumo de coagulante/floculante. Como o lodo gerado no decantador está isento de alumínio, há a possibilidade de ser aproveitado como adubo, se

seus demais constituintes não o tornarem impróprio para essa finalidade (SÁNCHEZ-MÁRTIN *et al.*, 2014., ALGAYER, C. S. *et al.*, 2012, VANACÔR, 2005).

Em relação aos efeitos tóxicos dos taninos, há estudos indicando danos hepáticos e intestinais como consequências de dietas ricas em taninos. Por conta disso, estudos foram feitos em cobaias de laboratório para verificar problemas oriundos da ingestão de taninos através da água. Os resultados mostraram que, para concentrações de até 110ppm de taninos na água, nenhum dano ao fígado ou rins foi observado (JONG *et al.*, 2001 apud VANACÔR, 2005).

A empresa TANAC S.A., situada no município de Montenegro/RS, fabrica diversos produtos a base de tanino de Acácia Negra, vegetal abundante na região. Entre tais produtos estão os coagulantes/floculantes da linha Tanfloc®, que serão empregados no presente trabalho. A seguir apresenta-se sua descrição, segundo o fabricante:

Os produtos da linha Tanfloc são obtidos de um extrato vegetal da casca da acácia negra. É constituído por uma combinação de polifenóis, com característica catiônica, de fácil aplicação e alta eficiência. Composto majoritariamente de unidades flavonoides de massa molecular média de 1200g/gmol e pequenas porções de açúcares, gomas hidrocoloidais e sais solúveis. Uma modificação química é realizada, tornando-o um polímero orgânico-catiônico (TANAC, 2012).

3 Materiais e Métodos

A fim de atender os objetivos propostos na introdução deste trabalho, foram feitos ensaios de laboratório que permitiram realizar um estudo comparativo entre os coagulantes a base de taninos e o sulfato de alumínio, este como o produto mais utilizado no tratamento de água em ETAs.

O estudo comparativo foi feito em termos do desempenho de cada um dos produtos, mensurado através da análise dos parâmetros de qualidade da água diretamente alterados pelo processo de coagulação e floculação (turbidez, sólidos totais e fixos, pH) e da comparação com os valores permitidos pela legislação. Além disso, a aparência do floco e o tempo de sedimentação foram avaliados de maneira qualitativa. A avaliação da estabilidade coloidal das amostras e a observação das diferenças no processo de coagulação e floculação foram feitas através de medidas de potencial zeta. Os agentes coagulantes/floculantes a base de taninos utilizados nesse trabalho foram os Tanfloc® SG e SM, fornecidos pela TANAC S.A. O sulfato de alumínio e as instalações necessárias para a execução desse trabalho foram as do Laboratório de Estudos em Couro e Meio Ambiente (LACOURO), vinculado ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

3.1 Preparo das Soluções

As soluções de sulfato de alumínio, Tanfloc SG e Tanfloc SM utilizadas foram preparadas através da diluição do produto sólido em água deionizada suficiente para produzir 1 L de solução, conforme mostrado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Preparo das soluções de coagulante

Coagulante	Concentração Desejada (ppm)	Massa (g)
Sulfato de Alumínio	10000	10,0014±0,0001
Tanfloc SG	10000	10,0011±0,0001
Tanfloc SM	10000	10,0017±0,0001

3.2 Procedimento Experimental

Para simular em escala de bancada os processos de coagulação, floculação e sedimentação para efluentes de diversas características, se utilizou o equipamento conhecido por

“teste de jarros” ou “Jar-Test”. Seu emprego permitiu determinar os parâmetros físico-químicos (temperatura, pH e concentração de coagulante) e hidráulicos (tempos de mistura rápida e lenta, gradiente de velocidade) ótimos para clarificação de determinado efluente. É item fundamental de qualquer ETA que faça uso do processo tradicional de tratamento de água, pois permite definir os parâmetros ótimos para tratamento de maneira rápida e com baixo consumo de produtos químicos.

Neste trabalho, os tempos de mistura rápida (T_{mr}), mistura lenta (T_{ml}) e sedimentação (T_s), assim como as velocidades de agitação em cada uma dessas etapas (N_{mr} e N_{ml}) foram mantidos constantes em valores considerados ótimos, de acordo com as pesquisas de SÁNCHEZ-MÁRTIN *et al* (2009). Os ensaios foram realizados a temperatura ambiente, que ficou em torno de 25 °C. Não se realizou ajuste de pH, pois segundo SÁNCHEZ-MÁRTIN *et al* (2009), o pH natural da água bruta, encontra-se dentro da faixa ótima para coagulantes a base de taninos, que é de 5,0 a 8,0. Além disso, é desejável que os agentes coagulantes/floculantes sejam capazes de agir eficazmente no pH em que a água bruta se encontra naturalmente ou próximo disso, evitando despesas elevadas com ácidos, álcalis e diminuindo a concentração residual desses produtos, contribuindo para uma água tratada de melhor qualidade. Desse modo, a concentração de coagulante/floculante é o único parâmetro cujo efeito fora avaliado. O equipamento de Jar Test utilizado é da marca *Spencer*[®], com cubas de 1 L de volume.

O procedimento experimental adotado neste trabalho seguiu as seguintes etapas:

- Coleta de amostra: a água utilizada nesse trabalho foi coletada no Arroio Dilúvio, na cidade de Porto Alegre – RS, coletada no dia 20/08/2014, nas proximidades do cruzamento entre as avenidas Ipiranga e Getúlio Vargas (coordenadas 30°02'53.2"S 51°13'17.2"W);
- Armazenamento: as amostras foram acondicionadas em bombonas opacas de 30 L e armazenadas em geladeira, na temperatura de 5 °C;
- Ensaio de coagulação, floculação e sedimentação: realizados em equipamento do tipo Jar-Test, com cubas de 1 L. Foram executadas seis séries de experimentos, para testar os três agentes coagulantes em duplicata. As amostras nas cubas foram postas em agitação prévia na velocidade N_{mr} (100 rpm) e então a solução de coa-

gulante foi adicionada. Após transcorrido o tempo Tmr (2 min) a velocidade de agitação foi reduzida para Nml (30 rpm), permanecendo nesse valor durante o tempo Tml (20 min), para promover a floculação. Após, os agitadores foram removidos e a solução permaneceu em repouso durante o tempo Ts (60 min), para promover a sedimentação dos flocos.

- Coleta e análise em triplicata de parâmetros (turbidez, pH, teor de sólidos, condutividade e potencial zeta) para a amostra bruta e os sobrenadantes obtidos após tratamento com cada um dos agentes coagulantes.

As variáveis testadas nos ensaios adotados nos ensaios de coagulação, floculação e sedimentação são apresentadas na tabela 3.2. As séries de experimentos realizadas são mostradas na Tabela 3.3.

Tabela 3.2: Parâmetros fixados nos ensaios

Parâmetro	Unidade	Valor
Tmr	min	2
Tml	min	20
Ts	min	60
Nmr	min ⁻¹	100
Nml	min ⁻¹	30
Temperatura	°C	25

Tabela 3.3: Planejamento dos experimentos

Tanfloc SG	Coagulantes Utilizados	
	Tanfloc SM	Sulfato de Alumínio
	Séries de Experimentos	
I e II	III e IV	V e VI
Nome do Experimento e Concentração (mg/L)		
SG 0	SM 0	SA 0
SG 5	SM 5	SA 5
SG 10	SM 10	SA 10
SG 15	SM 15	SA 15
SG 20	SM 20	SA 20
SG 25	SM 25	SA 25
SG 30	SM 30	SA 30
SG 40	SM 40	SA 40
SG 50	SM 50	SA 50
SG 60	SM 60	SA 60
SG 70	SM 70	SA 70
SG 80	SM 80	SA 80

3.3 Análise dos Parâmetros de Qualidade

A seleção dos parâmetros a serem analisados ocorreu de modo a evidenciar as diferenças entre cada agente coagulante-floculante testado. Os parâmetros de qualidade da Portaria Nº 2914/11 do MS diretamente influenciados pelo processo de coagulação, floculação e sedimentação foram observados, dentro da disponibilidade de equipamentos no laboratório onde este trabalho fora realizado.

Após essas considerações, os parâmetros selecionados para avaliação foram: Turbidez, Teor de Sólidos, pH, Condutividade e Potencial Zeta. A velocidade de sedimentação e a aparência do floco também foram avaliadas, em caráter qualitativo.

3.3.1 Turbidez

A turbidez da água bruta e dos clarificados foi medida em um turbidímetro de bancada ISO da marca Hanna Instruments®, modelo HI 88713. As medições foram feitas em triplicata, sendo o valor adotado obtido a partir da média das medições. A calibração do instrumento foi feita com soluções padrão fornecidas pelo fabricante. Os testes posteriores (teor de sólidos, aspecto do floco, velocidade de sedimentação e potencial zeta) foram feitos para a concentração considerada ótima para remoção de turbidez. Foi conside-

rada como ótima a concentração que apresentou maior remoção de turbidez de maneira consistente, desconsiderando os erros experimentais.

3.3.2 Teor de Sólidos (Totais, Fixos e Voláteis)

O teor de sólidos totais das amostras (ST) foi determinado através do método de resíduo de evaporação. Os frascos, previamente tarados, receberam uma alíquota de 100 mL de amostra e foram aquecidos à temperatura de 60°C, para redução de volume. Após, a evaporação foi concluída em estufa a 105 °C, onde os frascos permaneceram por aproximadamente 12 h, sendo posteriormente acondicionados em dessecadores. Depois de atingirem a temperatura ambiente, foram pesados em balança analítica. O processo foi repetido até peso constante. O teor de sólidos totais é calculado segundo a equação 3.1.

$$ST = \frac{(M2-M1)}{V} \quad (3.1)$$

Onde:

- M2 é a massa do frasco após evaporação, expressa em gramas (g);
- M1 é a massa do frasco vazio, expressa em gramas (g);
- V é o volume de amostra, expresso em litros (L);
- ST é o teor de sólidos totais, expresso em gramas por litro (g/L).

Para determinação dos sólidos totais fixos (STF), os frascos com amostra obtidos ao término da análise de sólidos totais foram calcinados em forno mufla a temperatura de 600 °C durante 2 h. Após a calcinação foram acondicionados em dessecadores. Depois de atingirem a temperatura ambiente, os frascos foram pesados e o teor de sólidos totais fixos foi determinado segundo a equação 3.2.

$$STF = \frac{(M1-M3)}{V} \quad (3.2)$$

Onde:

- M1 é a massa do frasco com resíduo da evaporação, expressa em g;
- M3 é a massa do frasco após calcinação, expressa em g;

- V é o volume de amostra, expresso em L;
- STF é o teor de sólidos totais fixos, expresso em g/L;

O teor de sólidos totais voláteis (STV) é determinado pela diferença entre o ST e o STF, conforme a equação 3.3.

$$STV = ST - STF \quad (3.3)$$

3.3.3 Aparência do Floco e Velocidade de Sedimentação

Para que haja alta velocidade de sedimentação e o lodo formado possua elevado teor de sólidos, o processo de floculação deve se dar de maneira tal que as partículas coaguladas se aglutinem em flocos grandes. Como os parâmetros hidráulicos foram fixados, essas avaliações foram feitas de maneira qualitativa, para verificar apenas se há diferença significativa entre os flocos formados pela ação dos diferentes agentes de coagulação e floculação avaliados. A velocidade de sedimentação foi avaliada através da contagem do tempo necessária para um floco pré-selecionado cruzar um caminho de 10 cm, marcados na superfície da cuba onde se deu a sedimentação.

3.3.4 Potencial Zeta e pH

O equipamento utilizado foi um analisador de potencial zeta da Malvern®, modelo Zetasizer nano Z. O valor adotado foi aquele que apresentou menor desvio padrão, após três medidas com 100 varreduras cada. Para medição do pH foi utilizado um pHmetro marca Digimed, modelo DM-22.

4 Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos durante a realização deste trabalho, com a discussão dos mesmos.

4.1 Caracterização da Água Bruta

A tabela 4.1 apresenta os resultados da caracterização da amostra bruta.

Tabela 4.1: Caracterização da água bruta

Parâmetro	Unidade	Valor	Desvio Padrão	Parâmetro
pH	-	7,54	0,69	6,0 – 9,5 ⁽¹⁾
Turbidez	NTU EPA	12,0	0,32	5,0 ⁽¹⁾
Sólidos Totais	g/L	0,407	0,018	-
Sólidos Totais Fixos	g/L	0,201	0,005	-
Sólidos Totais Voláteis	g/L	0,206	0,010	-
Potencial Zeta	mV	-12,6	1,32	-
Condutividade	μS/cm	363,7	12,7	250 ⁽²⁾

(1): portaria 2914/11, Ministério da Saúde; (2): recomendação da Organização Mundial da Saúde

4.2 Remoção de Turbidez

As figuras 4.1 e 4.2 mostram a turbidez residual e o percentual de remoção obtido para diferentes concentrações dos agentes coagulantes/floculantes.

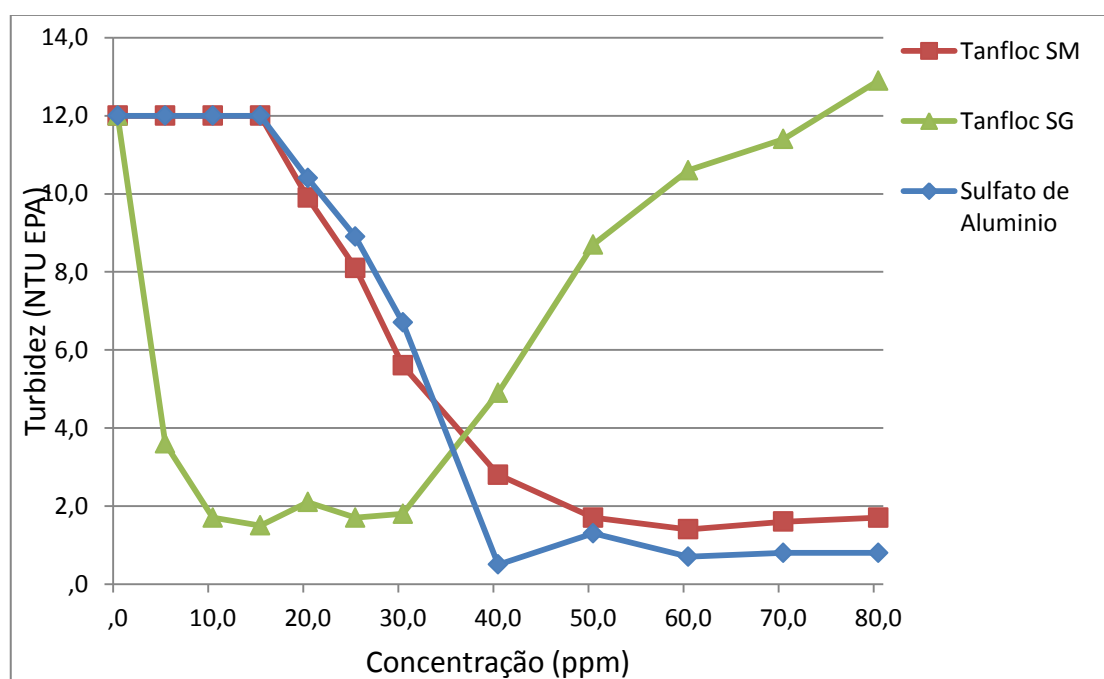


Figura 4.1: Concentração média final de turbidez para cada concentração do agente coagulante-floculante testado

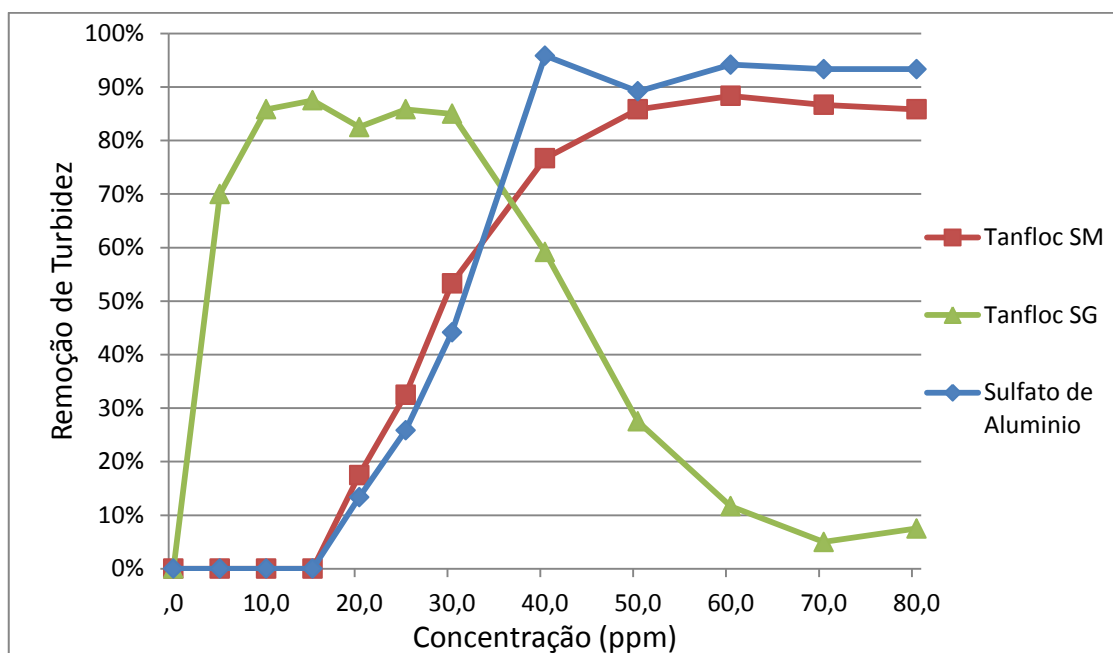


Figura 4.2: Percentual de remoção médio de turbidez para cada concentração do agente coagulante-floculante testado

A análise das Figuras 4.1 e 4.2 revela que todos os produtos testados foram capazes de remover o material suspenso da água com eficiência suficiente para atingir o padrão de potabilidade legal, que é de 5 NTU (Portaria 2914/11 – Ministério da Saúde). Embora o padrão para turbidez tenha sido atingido para todos os produtos testados, o Tanfloc SG foi o que demandou menor concentração para tal, portanto foi considerado como o agente coagulante/floculante com melhor desempenho. Levando em conta a remoção de turbidez e a sedimentabilidade dos flocos formados (avaliada apenas em caráter qualitativo) as concentrações consideradas ótimas foram: 30 ppm para o Tanfloc SG, 70 ppm para o Tanfloc SM e 30 ppm para o sulfato de alumínio.

O aumento da turbidez observado para concentrações superiores a 30 ppm de Tanfloc SG pode ser explicado pelo fenômeno de inversão de cargas, que ocorre quando o coagulante é adicionado em excesso. Quando há dosagem excessiva, a carga superficial das partículas suspensas, que originalmente é negativa, passa a ser positiva, intensificando novamente as forças de repulsão, e como consequência, inibindo a formação dos flocos. Possivelmente o mesmo fenômeno não fora observado para os demais produtos porque as concentrações testadas não foram altas o suficiente.

4.3 Remoção de Sólidos

A Tabela 4.2 apresenta a remoção de sólidos totais e o teor residual de sólidos fixos e voláteis dos clarificados obtidos para a concentração ótima, definida a partir do resultado da análise de turbidez, para cada um dos coagulantes.

Analisando os dados da Tabela 4.2 é possível observar que a maior parte dos sólidos remanescentes nos clarificados é constituída por elementos não voláteis, normalmente sais inorgânicos. O sulfato de alumínio foi o coagulante que apresentou menor teor de sólidos voláteis, pois ao contrário dos Tanfloc SG e SM, não adiciona matéria orgânica à solução.

Tabela 4.2: Teor de sólidos e percentual de remoção

Amostra	Concentração ótima (mg/L)	ST (mg/L)	STF (mg/L)	STV (mg/L)	Remoção de STV	Remoção de STF	Remoção de ST
Bruta	-	407,2	201,0	206,2	-	-	-
SA 70	70	196,5	185,7	10,8	92,3%	17,3%	51,8%
SM 70	70	185,9	170,5	15,4	84,8%	15,2%	54,4%
SG 30	30	190,4	178,1	12,3	88,6%	11,4%	53,3%

A partir destes resultados também é possível concluir que os agentes coagulantes testados são mais eficientes na remoção de matéria orgânica do que inorgânica. Em águas pouco salinas isso não constitui problema, mas para tratar efluentes com alto teor de matéria inorgânica é preciso efetuar tratamentos adicionais, como precipitação química ou troca iônica.

4.4 Variação do pH e da Condutividade

Analisando a Figura 4.3 pode-se observar uma leve diminuição do pH nas amostras tratadas com os Tanfloc SG e SM. Isso se deve ao fato de que as soluções desses produtos são ácidas e pequenos volumes foram adicionados (1 mL para cada 10 ppm) para realizar os ensaios de coagulação e floculação. Por outro lado, o sulfato de alumínio apresentou uma variação de pH mais acentuada, pois quando dissolvido em água sofre hidrólise, liberando íons H^+ no meio, acidificando a amostra.

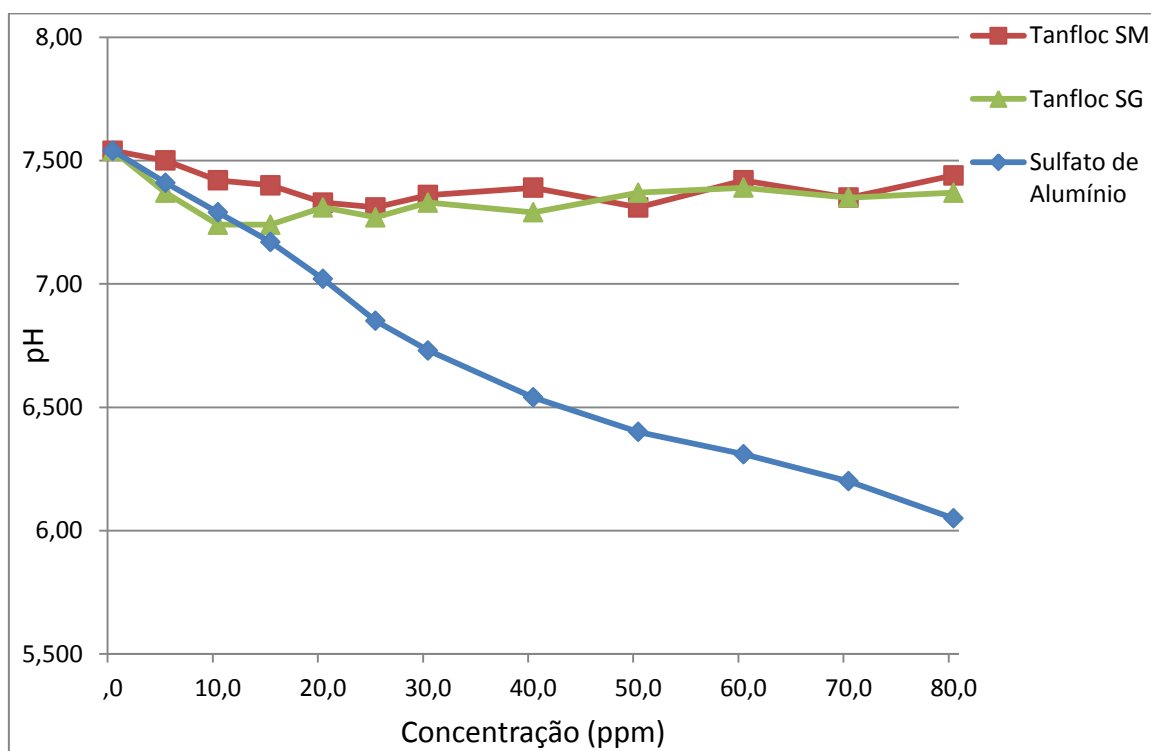


Figura 4. 3: Variação do pH em função da concentração de coagulante

A Figura 4.4 mostra como a condutividade variou com a concentração de agente coagulante dosada. Observou-se que a condutividade se manteve estável para as amostras tratadas com taninos, ao passo que a amostra tratada com sulfato de alumínio apresentou valores crescentes de condutividade a partir da concentração de 40 ppm. Isso se deve ao fato que após todo o material suspenso ter sido agrupado em flocos, o sulfato de alumínio dissociado ficou livre na solução, contribuindo para o aumento da condutividade. Não se observou o mesmo fenômeno para os Tanfloc SG e SM, pois esses produtos apresentam alta massa molecular, o que implica em baixa mobilidade e, por consequência, acabam contribuindo pouco para o aumento de condutividade da solução.

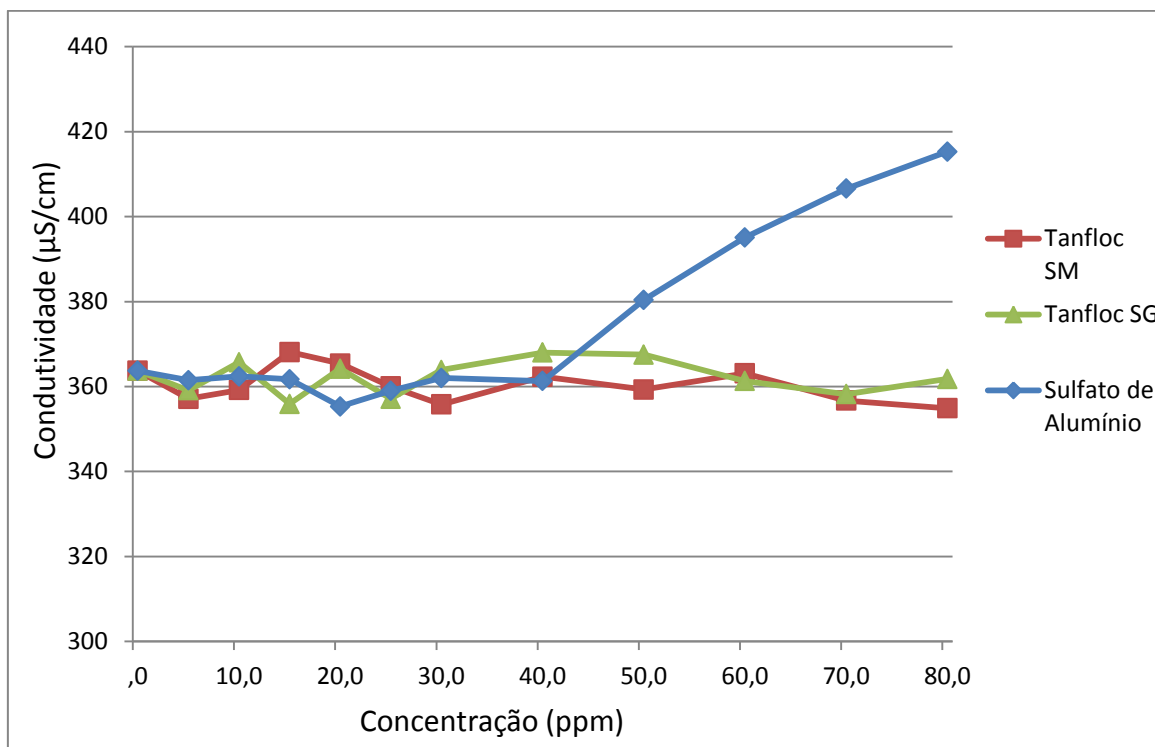


Figura 4.4: Variação da condutividade em função da concentração de coagulante

Águas com elevada condutividade indicam excesso de sais dissolvidos, o que pode levar a problemas renais crônicos na população consumidora. Além disso, o acréscimo de condutividade observado é causado pelo alumínio dissolvido e, conforme comentado na revisão bibliográfica, vários estudos apontam relação entre intoxicação crônica por alumínio e doenças.

4.5 Velocidade de Sedimentação e Aspecto do Floco

A Tabela 4.3 mostra, de maneira qualitativa e comparativa, a velocidade de sedimentação e a aparência dos flocos formados durante o processo de floculação. Tais resultados mostram que há diferença entre os flocos formados por cada um dos produtos testados. A velocidade de sedimentação é um parâmetro que está relacionado ao dimensionamento dos tanques utilizados para remoção dos flocos, sendo que quanto maior a velocidade, menor o volume de tanque requerido para o processo. Dentre os testes realizados, o Tanfloc SG na concentração de 30 ppm foi o que formou flocos mais adequados para a remoção por sedimentação.

Tabela 4.3: Velocidade de sedimentação e Aspecto do floco

Amostra	Velocidade de Sedimentação (cm/min)	Aspecto do Floco
SA 70	2,5	Pouco denso e claro
SM 70	3,6	Pouco denso e escuro
SG 30	4,4	Denso e escuro

As figuras 4.5, 4.6 e 4.7 ilustram a aparência dos flocos para cada uma das condições avaliadas.

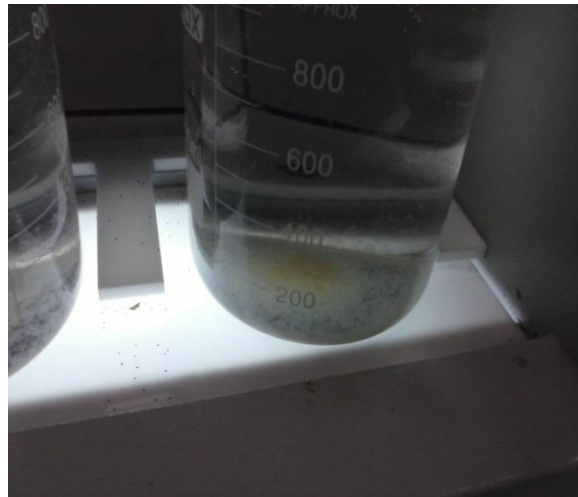


Figura 4.5: Flocos após adição de 70 mg/L de sulfato de alumínio

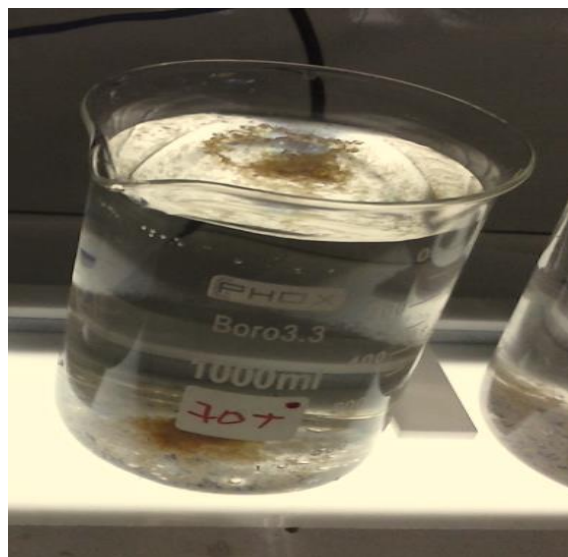


Figura 4.6: Flocos após adição de 70 mg/L de Tanfloc SM



Figura 4.7: Flocos após adição de 30 mg/L de Tanfloc SG

4.6 Variação do Potencial Zeta

Na Figura 4.8 é possível observar que há similaridade na variação do potencial zeta para as amostras tratadas com Tanfloc SG e SM. Isso é indicativo de que ambos os produtos procedem com a coagulação de maneira semelhante e de que possuem estrutura molecular similar.

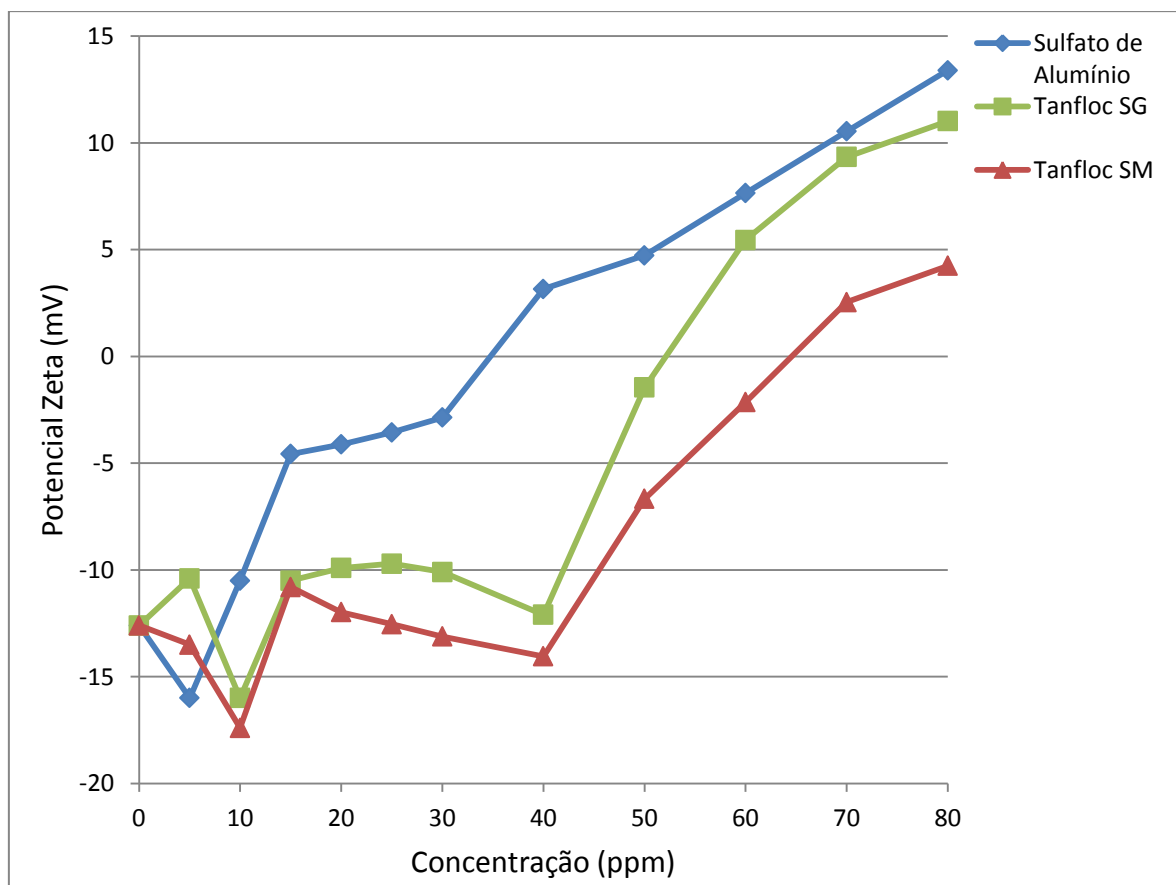


Figura 4. 8: Potencial zeta em função da concentração de coagulante

A diferença pode se dar, provavelmente, pela quantidade de grupos funcionais catiônicos presentes em cada molécula, o que altera a densidade de carga. Uma hipótese para o comportamento observado em baixas concentrações (até 40 ppm) é o mecanismo de interação do material suspenso com as moléculas de tanino ser mais elaborado, devido à complexidade das moléculas envolvidas.

A variação do potencial zeta para o tratamento com sulfato de alumínio se deu de maneira crescente para todo o intervalo de concentração avaliado, conforme mostra a Figura 4. 8. O perfil obtido se mostra coerente com o comportamento esperado, pois parte dos íons Al^{3+} permanece em solução após a sedimentação, neutralizando as cargas superficiais das partículas remanescentes.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

Por meio dos ensaios comparativos entre o sulfato de alumínio e os coagulantes de origem vegetal Tanfloc SG e Tanfloc SM, assim como o que foi abordado na revisão bibliográfica, foi possível se chegar a algumas conclusões.

Frente ao tratamento convencional de água para abastecimento, a alternativa proposta se mostrou promissora, pois os parâmetros de potabilidade avaliados foram atingidos. Por outro lado, é preciso avaliar também a viabilidade econômica e as implicações sob o ponto de vista da saúde pública geradas pelo processo alternativo proposto.

É válido citar também o fato de que os resíduos sólidos oriundos do tratamento proposto apresentam potencial de aplicação na agricultura ou compostagem, pois estão isentos de alumínio. Consequentemente, a água tratada também apresentará menores teores desse metal, o que é desejável, pois apesar de as pesquisas sobre a toxicidade do alumínio não serem conclusivas, esse elemento não é vital para o corpo humano.

Os coagulantes vegetais avaliados se mostraram capazes de atingir o padrão de potabilidade em concentrações menores ou iguais que o sulfato de alumínio. As concentrações ótimas obtidas para o Tanfloc SM e o sulfato de alumínio foram de 70 ppm e de 30 ppm para o Tanfloc SG. Essa diminuição na concentração de coagulante dosada reduz a massa de lodo formada, minimizando os custos do tratamento. Por outro lado, as análises de teor de sólidos e condutividade mostraram que nenhum dos produtos testados possui boa capacidade de remover material inorgânico, o que pode ser um problema principalmente no tratamento de água rica em ferro, pois esse metal confere cor amarelada e altera o gosto da água. Há ainda a questão da remoção de metais pesados, mas não era objetivo do trabalho avaliar especificamente a remoção destes poluentes.

As medidas de potencial zeta para as amostras tratadas com sulfato de alumínio apresentaram resultado coerente com o esperado. Resultado semelhante era esperado para as amostras tratadas com Tanfloc SG e Tanfloc SM, o que não foi observado. Como já discutido, uma hipótese para essa divergência é o fato de a natureza química de um sal inorgânico ser bastante distinta de um polímero orgânico.

Para trabalhos futuros na mesma linha de pesquisa é possível realizar ensaios de coagulação e floculação utilizando coagulantes obtidos a partir de taninos sintéticos, com estrutura conhecida, para se avaliar com precisão a influência de diferentes estruturas

moleculares e grupos funcionais, a fim de definir que tipo de estrutura é eficiente na remoção de contaminantes comuns em águas de rios e lagos. Também é possível refazer os ensaios utilizando um efluente industrial concentrado, para observar se os coagulantes a base de tanino são eficientes na remoção de contaminantes de outras espécies em outras faixas de concentração.

6 Referências

- ALGAYER, C.S. *et al.* Classificação dos lodos formados durante o processo de coagulação/floculação da água com os coagulantes PAC e *Moringa oleifera*. ENGEVISTA, V. 14, n. 3. p. 302-309, dezembro 2012.
- BELAVSKI, E. O Curtume no Brasil. Porto Alegre: Editora Globo, 1965
- BOLTO, B.; GREGORY, J. Organic Polyelectrolytes in water treatment. Water Research 41 (11): 2301-2304, 2007.
- DE HEREDIA, J. B. *et al.* New tannin-based coagulant for water treatment. Ingenieria Quimica (Spain), v. 43, n. 490, p. 72-76, 2011.
- DI BERNARDO. L; DANTAS. A. D. Métodos e Técnicas de Tratamento de Água. Vol. 1 e 2. 2ªed. Editora Rima, São Carlos, 2005.
- FLATEN, T. P. Aluminium as a risk factor in Alzheimer's disease, with emphasis on drinking water. Brain Research Bulletin, v. 55, n. 2, p. 187-196, 2001
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em <http://censo2010.ibge.gov.br>. Acessado em 15/09/2014.
- KAWAMURA, S. Effectiveness of natural polyelectrolytes in water treatment. Journal American Water Works Association, v. 83, n. 10, p. 88-91, 1991.
- LEE, C. S.; ROBINSON, J.; CHONG, M. F. A review on application of flocculants in wastewater treatment. Process Safety and Environmental Protection, v. 92, n. 6, p. 489-508, 11// 2014. ISSN 0957-5820.
- LIBÂNIO, M. Fundamentos de Qualidade e Tratamento da Água. Campinas: Átomo, 2010.
- MANGRICH, A. S. *et al.* Green chemistry in water treatment: Use of coagulant derived from *Acacia mearnsii* tannin extracts. Revista Virtual de Química, v. 6, n. 1, p. 2-15, 2014.
- MATILAINEN, A.; VEPSÄLÄINEN, M.; SILLANPÄÄ, M. Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: A review. Advances in Colloid and Interface Science, v. 159, n. 2, p. 189-197, 9/15/ 2010. ISSN 0001-8686.
- Ministério da Saúde. Anexo II da portaria N° 2914, de 12 de dezembro de 2011. Disponível em http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html. Acessado em 19/09/2014.
- Organização Mundial da Saúde. Guias de Qualidade da Água para Beber (Guidelines for Drinking Water Quality). Disponível em http://whqlibdoc.who.int/publications/2011/9789241548151_eng.pdf?ua=1. Acessado em 20/09/2014.

SÁNCHEZ-MARTÍN, J.; BELTRÁN-HEREDIA, J.; COCO-RIVERO, B. Chapter 15 - Quebracho colorado: A New Source for Water Coagulant-Performance on Dye Removal. A New Source for Water Coagulant-Performance on Dye Removal. In: (Ed.). The Role of Colloidal Systems in Environmental Protection, 2014. p.347-362.

SÁNCHEZ-MARTÍN, J.; GONZÁLEZ-VELASCO, M.; BELTRÁN-HEREDIA, J. Surface water treatment with tannin-based coagulants from Quebracho (*Schinopsis balansae*). Chemical Engineering Journal, v. 165, n. 3, p. 851-858, 12/15/ 2010. ISSN 1385-8947.

SPERLING, M. Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 3ª Ed., Vol. 1. Belo Horizonte, 2005.

SRINIVASAN, P T; VIRARAGHAVAN, T; SUBRAMANIAN, K S (1999). Aluminum in drinking water: An overview. Wat San 25 (1): 345-349.

TANAC S.A. Ficha de Segurança de Produto Químico do Tanfloc SG, versão atualizada em 10/12/2012. Disponível em http://www.tanac.com.br/sites/default/files/CT_TANFLOC_SG_PT_0.pdf. Acessado em 26/09/2014.

VALENCIA, J. A. Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación Del Agua. Lima: CEPIS, 1992.

VANACÔR, R. N. Avaliação do coagulante orgânico *Veta Organic* utilizado em estação de tratamento de água para abastecimento. 2005. Dissertação (Mestrado em engenharia de recursos hídricos). Programa de Pós-Graduação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ZHAN, X.-M., ZHAO, X., Mechanism of lead adsorption from aqueous solutions using an adsorbent synthesized from natural condensed tannin, Water Research 37 (16) (2003) 3905–3912.