

Artigo

Produtos Naturais Utilizados como Coagulantes e Floculantes para Tratamento de Águas: Uma Revisão sobre Benefícios e Potencialidades

Lima Júnior, R. N.;* Abreu, F. O. M. S.

Rev. Virtual Quim., 2018, 10 (3), 709-735. Data de publicação na Web: 28 de junho de 2018

<http://rvq.sbq.org.br>

Natural Products Used as Coagulants and Flocculants for Public Water Supply: A Review of Benefits and Potentialities

Abstract: The development of new coagulants and flocculants, based on nature-abundant biodegradable natural raw materials, has been gaining more space in research centers as an environmental technology that follows the concept of *eco friendly* materials and the principles of green chemistry proposed in the 1990s. When well exploited, these multifunctional agents can reduce the operational cost of water treatment and expand access to this resource. In view of the promising prospects for the use of natural products as sources of biocomposites, this review aims to compile the several studies developed in recent years that report on the obtaining and efficiency of natural materials such as coagulants and flocculants of water for supply, with emphasis on the chitosan, *Moringa oleifera* seeds and vegetable tannins. In parallel, it is also intended to expose the limitations and harms of traditional coagulants based on inorganic salts and synthetic polymers, as well as their mechanisms of action, in contrast to the main physico-chemical parameters used in the quality control of natural and treated waters.

Keywords: Natural products; Green chemistry; Natural coagulants; Water treatment.

Resumo

O desenvolvimento de novos coagulantes e floculantes, baseados em matérias-primas naturais biodegradáveis abundantes na natureza, vem ganhando cada vez mais espaço nos centros de pesquisa como uma tecnologia ambiental que segue o conceito de materiais *eco friendly* e os princípios da química verde propostos na década de 90. Quando bem explorados, esses agentes multifuncionais podem permitir a redução do custo operacional do tratamento de água e expandir o acesso a esse recurso. Em face as perspectivas promissoras do uso de produtos naturais como fontes de biocompostos, esta revisão tem como objetivos compilar os diversos estudos desenvolvidos nos últimos anos que relatam a obtenção e eficiência de materiais naturais como agentes coagulantes e floculantes de águas para abastecimento, com ênfase na quitosana, sementes da espécie *Moringa oleifera* e taninos vegetais. Em paralelo, pretende-se também expor as limitações e malefícios dos coagulantes tradicionais a base de sais inorgânicos e polímeros sintéticos, bem como seus mecanismos de atuação, contrastando com os principais parâmetros físico-químicos utilizados no controle de qualidade de águas naturais e tratadas.

Palavras-chave: Produtos Naturais; Química verde; Coagulantes naturais; Tratamento de águas.

* Universidade Estadual do Ceará, campus do Itaperi, Av. Dr. Silas Munguba, 1700, Itaperi, CEP 60714-903, Fortaleza-CE, Brasil.

✉ juniorkimica@gmail.com

DOI: [10.21577/1984-6835.20180052](https://doi.org/10.21577/1984-6835.20180052)

Produtos Naturais Utilizados como Coagulantes e Floculantes para Tratamento de Águas: Uma Revisão sobre Benefícios e Potencialidades

Raimundo N. Lima Júnior,* Flávia O. M. da S. Abreu

Universidade Estadual do Ceará, *campus* do Itaperi, Av. Dr. Silas Munguba, 1700, Itaperi, CEP 60714-903, Fortaleza-CE, Brasil.

* juniorkimica@gmail.com

Recebido em 4 de abril de 2018. Aceito para publicação em 28 de junho de 2018

- 1. Introdução**
- 2. Coagulantes e floculantes tradicionais utilizados no tratamento de águas**
 - 2.1.** Principais coagulantes e floculantes utilizados no tratamento de águas de abastecimento público
 - 2.2.** Desvantagens e malefícios de coagulantes a base de sais inorgânicos e floculantes poliméricos sintéticos
 - 2.3.** Mecanismos de coagulação e floculação
 - 2.4.** Determinação das dosagens ideais de coagulantes e floculantes – *Jar Test*
- 3. Parâmetros físico-químicos de qualidade das águas naturais e tratadas**
 - 3.1.** Turbidez
 - 3.2.** Matéria orgânica natural
 - 3.3.** Cor
 - 3.4.** pH
- 4. Produtos naturais utilizados como coagulantes e floculantes**
 - 4.1.** Quitosana
 - 4.2.** *Morínga oleífera*
 - 4.3.** Taninos vegetais
- 5. Outros estudos**
 - 5.1.** *Prosopis juliflora* e *Cactus latifaria*
 - 5.2.** *Margaritarea discoidea*
 - 5.3.** Alginato de algas
 - 5.4.** *Jatropha curcas*
- 6. Considerações finais**

1. Introdução

A disponibilidade de água para consumo humano em quantidade e qualidade equivalente é um dos objetivos do milênio almejados pela cúpula da Organização Mundial de Saúde (OMS). Esse desafio se intensifica em países em ascensão, regiões naturalmente áridas e polos agroindustriais emergentes, onde a demanda por água é fundamental para a produtividade e desenvolvimento econômico.¹

Com raras exceções, mananciais destinados ao abastecimento público que não recebam nenhum tipo de efluente (industrial, doméstico ou chorume) praticamente não existem mais. A diminuição

da qualidade das águas naturais é reflexo das diversas atividades antropogênicas da era contemporânea. Além dos poluentes tradicionais, contaminantes emergentes, tais como pesticidas, fármacos, disruptores endócrinos e seus metabólitos, cosméticos e nanopartículas surgem como novos desafios para os sistemas convencionais de produção de água potável.^{2,3}

Tipicamente, os sistemas produtores de água potável convencionais apresentam, em sua maioria, o esquema mostrado na Figura 1.⁴ As diversas operações unitárias combinadas de uma Estação de Tratamento de Água (ETA) permitem a distribuição de grandes quantidades de água tratada e segura, dos pontos de vista químico e microbiológico.

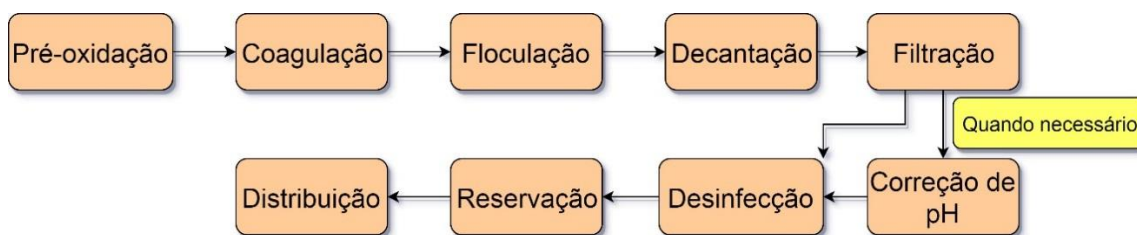


Figura 1. Esquema geral de uma Estação de Tratamento de Água convencional para tratamento de águas superficiais (adaptado de Vieira *et al.*, 2007)⁴

No entanto, contaminantes desconhecidos ou até então não quantificados, reflexos de mananciais poluídos pelas diversas atividades humanas, demonstraram a necessidade de adaptação dos sistemas produtores para acompanhar a dinâmica de geração e descarte de resíduos no meio ambiente, sobretudo nos corpos hídricos. A queda na qualidade da água bruta também impacta diretamente em maior consumo de produtos químicos e geração de resíduos ao final do processo de tratamento.⁵

A análise do ciclo de vida (ACV) comparativa entre plantas de tratamento de água, realizada por Bonton e colaboradores, 2012, demonstrou que os principais impactos ambientais dos sistemas convencionais de ciclo completo são devidos principalmente ao uso de carvão ativado para adsorção de matéria orgânica e às emissões e acumulação

de alumínio (utilizado como coagulante) no ambiente, sobretudo nos solos. Águas residuais oriundas dos processos de lavagem do sistema granular de filtração também contribuem para o passivo ambiental, pois configuram-se como efluentes com elevada carga metálica.⁶

O desenvolvimento de novos coagulantes e floculantes, baseados em matérias-primas naturais biodegradáveis abundantes na natureza, vem ganhando cada vez mais espaço nos centros de pesquisa como uma tecnologia ambiental que segue o conceito de materiais *eco friendly* (aqueles projetados para causar o menor dano natural possível) e os princípios da química verde propostos na década de 90.

Quatro destes (planejar produtos químicos biodegradáveis, evitar a geração de

resíduos desde o início do processo ao invés de limpá-los ao final, projetar produtos químicos eficientes e de baixa toxicidade e utilizar biomassa e matéria renovável) ficam evidentes ao considerarmos a substituição de produtos químicos industrializados, importados e que em sua cadeia produtiva consomem grandes quantidades de energia, solventes e reagentes perigosos.⁷ Um exemplo é a síntese do Policloreto de Alumínio (PAC), coagulante amplamente utilizado no tratamento de água. Uma de suas patentes de síntese envolve o uso de ácido clorídrico (HCl), altamente corrosivo e volátil, alumínio metálico (Al) e alumina (Al₂O₃), que são obtidos tipicamente por eletrólise (elevado gasto de energia).⁸

As principais vantagens dos coagulantes naturais frente aos inorgânicos e sintéticos incluem a alta disponibilidade da matéria-prima, muitas vezes renovável; baixa corrosividade sobre o sistema de distribuição; diminuição de até cinco vezes do volume de lodo gerado no processo, que além de biodegradável apresenta maior valor nutricional; em geral não apresentam riscos à saúde humana e animal; reduzem custos e perigos nos processos de tratamento de água e estimulam o desenvolvimento de tecnologias ambientalmente sustentáveis.⁹ Muitos deles, inclusive, baseiam-se em materiais derivados de resíduos de frutas, especiarias e subprodutos da indústria alimentícia.^{10,11}

Em face as perspectivas promissoras do uso de produtos naturais como fontes de biocompostos, esta revisão tem como objetivos compilar os diversos estudos desenvolvidos nos últimos anos que relatam a obtenção e eficiência de materiais naturais como agentes coagulantes e floculantes, com ênfase na quitosana, sementes da espécie *Moringa oleifera* e taninos vegetais. Ao final, são apresentados brevemente diversos outros trabalhos sobre coagulantes naturais

aplicados no tratamento de águas. Em paralelo, pretende-se também expor as limitações e malefícios dos coagulantes a base de sais inorgânicos e polímeros sintéticos, bem como seus mecanismos de atuação, contrastando com os principais parâmetros físico-químicos utilizados na mensuração da qualidade e segurança da água produzida em ETAs. A pesquisa foi realizada nas principais bases de dados nacionais e internacionais disponíveis na internet (ScienceDirect, Web of Science, SciELO, PubMed e Scopus) e contempla trabalhos acadêmicos e livros-texto especializados publicados nos últimos anos.

2. Coagulantes e floculantes tradicionais utilizados no tratamento de águas

2.1. Principais coagulantes e floculantes utilizados no tratamento de águas de abastecimento público

Sais inorgânicos, tais como sulfato de alumínio (Al₂(SO₄)₃), cloreto férrico (FeCl₃), sulfato ferroso (FeSO₄) e policloreto de alumínio (Al_n(OH)_mCl_{3n-m}, na qual a relação $m/3n$ representa a basicidade do composto), são utilizados rotineiramente como coagulantes para tratamento de águas. As principais espécies químicas coagulantes em solução, mostradas na Figura 2, são resultado de sucessivas reações de hidrólise e formação de aquocomplexos mono e polinucleares, com centros metálicos trivalentes de alumínio e ferro. Estas são, comumente, gelatinosas (quando utilizados em quantidades acima da concentração de saturação) e podem neutralizar as partículas coloidais por diferentes mecanismos.¹²

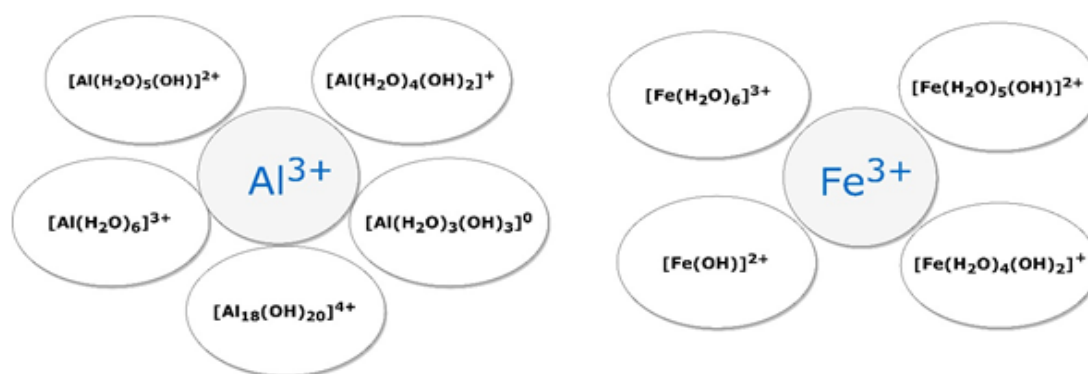


Figura 2. Principais espécies de alumínio (Al) e ferro (Fe) em solução (adaptado de Howe *et al.*, 2016)¹³

Os floculantes mais utilizados na atualidade são baseados em polímeros sintéticos orgânicos solúveis em água, que na maioria das vezes são derivados de matérias-primas não renováveis. Podem apresentar estruturas ramificadas ou lineares e serem classificados em catiônicos, aniônicos, anfóteros e não iônicos. Dentre os principais, destacam-se aqueles a base de poliácridamida, ácido poliacrílico, poli (cloreto de dialil dimetil amônio) e poliamina.^{12,14}

2.2. Desvantagens e malefícios de coagulantes a base de sais inorgânicos e floculantes poliméricos sintéticos

Possíveis impactos ambientais são constantemente discutidos como consequências da utilização de coagulantes inorgânicos a base de alumínio e ferro. Os resíduos gerados nos processos de coagulação e floculação são ricos em hidróxidos metálicos não biodegradáveis. O lodo obtido ao final apresenta potencial ecotoxicológico e necessita de tratamento e disposição ambiental correto, pois concentra diversos componentes orgânicos e inorgânicos, configurando-se como uma fonte de poluição secundária.¹⁵

Outra preocupação é o residual destes elementos na água tratada, sobretudo o alumínio. Para Driscoll e Letterman, 1988, cerca de 11% de todo o alumínio presente

naturalmente nas águas ou adicionado na forma de coagulante permanece como residual após o tratamento, sendo transportado pela rede de distribuição.¹⁶ Diversos estudos apontam para os malefícios da exposição humana a este metal, correlacionando-o com doenças neurodegenerativas como Parkinson e Doença de Alzheimer.¹⁷⁻¹⁹

Os possíveis impactos da exposição humana ao alumínio, bem como sua correlação com o residual presente na água potável e em alimentos são comumente discutidos na literatura. Encefalopatias, demência e distúrbios neurológicos são as principais manifestações fisiológicas observadas que indicam a neurotoxicidade crônica deste metal sobre o sistema nervoso.²⁰ Gauthier e colaboradores, 2000, concluíram haver possível relação entre o surgimento da Doença de Alzheimer e a exposição ao alumínio dissolvido na água.²¹ Rondeau e colaboradores, 2008, realizaram um estudo investigativo durante 15 anos com pessoas expostas a dosagens de 0,1 mg.L⁻¹ de alumínio na água de abastecimento e concluíram haver relação direta com o surgimento de casos de declínio cognitivo e demência.²²

Além de todas as suspeitas malélicas que o cercam, o alumínio possui baixa eficiência de coagulação em águas frias.¹² Baixas temperaturas afetam a solubilidade dos sais de alumínio (principalmente o Al₂(SO₄)₃) e

retardam a cinética das reações de hidrólise do cátion, responsáveis pela formação de espécies de elevada carga positiva (Figura 2), essenciais para a desestabilização das partículas coloidais em suspensão. Além das consequências cinéticas (influência da temperatura sobre as constantes de solubilidade, K_{ps} , e de hidrólise, K_h), ocorre ainda aumento da viscosidade e densidade da água fria, que favorecem a formação de flocos menores e mais frágeis.^{20,23}

Os polímeros flocculantes também

apresentam desvantagens do ponto de vista sanitário. Monômeros residuais, resultantes do processo de polimerização industrial ou de sua degradação natural, podem ser liberados nas águas e tornarem-se contaminantes preocupantes. Um exemplo é a acrilamida, cuja estrutura é mostrada na Figura 3, utilizada como matéria-prima em diversos setores da indústria química, incluindo produtos para tratamento de águas e efluentes.^{24,25}

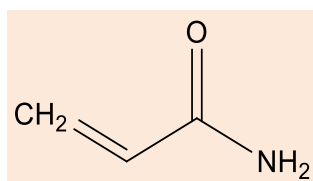


Figura 3. Estrutura química da acrilamida²⁶

A acrilamina é altamente solúvel em água. Conhecido agente neurotóxico, é classificada como uma substância provavelmente carcinogênica em humanos (grupo 2A), segundo a Agência Interacional de Pesquisa sobre o Câncer (IARC). Esta preocupação é realçada por estudos com animais que demonstraram a associação da presença de acrilamida em água potável ao surgimento de vários tipos de tumores (testículo, mama, útero, hipófise, tireoide e cavidade oral).²⁵

O receio da presença de resíduos de acrilamida na água potável levou diversas nações a estabelecerem limites permissíveis para esta substância. Brasil e Estados Unidos estipulam concentrações máximas de $0,5 \mu\text{g.L}^{-1}$. Na União Europeia, os níveis são ainda mais restritivos e alcançam $0,1 \mu\text{g.L}^{-1}$. Estes valores baseiam-se em diretrizes sobre a qualidade da água potável estabelecidas pela OMS.²⁵

Além da preocupação com a toxicidade de monômeros em solução, faz-se necessário também uma análise de possíveis impactos ambientais das moléculas poliméricas propriamente ditas. Comumente, polímeros catiônicos são mais tóxicos que aqueles

aniônicos e neutros, sobretudo para os organismos aquáticos residentes.²⁷

2.3. Mecanismos de coagulação e floculação

Coagulação e floculação são os principais fenômenos de interface responsáveis pela desestabilização do material coloidal presente nas águas naturais, que comumente, exibem carga elétrica superficial negativa, quando em pH neutro. Agentes coagulantes eficientes devem ser capazes de produzir espécies catiônicas em solução, promovendo a desestabilização das partículas do meio através de neutralização/redução de cargas. Flocculantes tem como objetivo básico promover a formação de flocos e agregados maiores e mais densos, favorecendo sua remoção em etapas posteriores do processo de tratamento, tais como sedimentação e filtração.¹² A Figura 4 mostra os processos iniciais envolvidos na formação de microflocos de matéria coloidal.

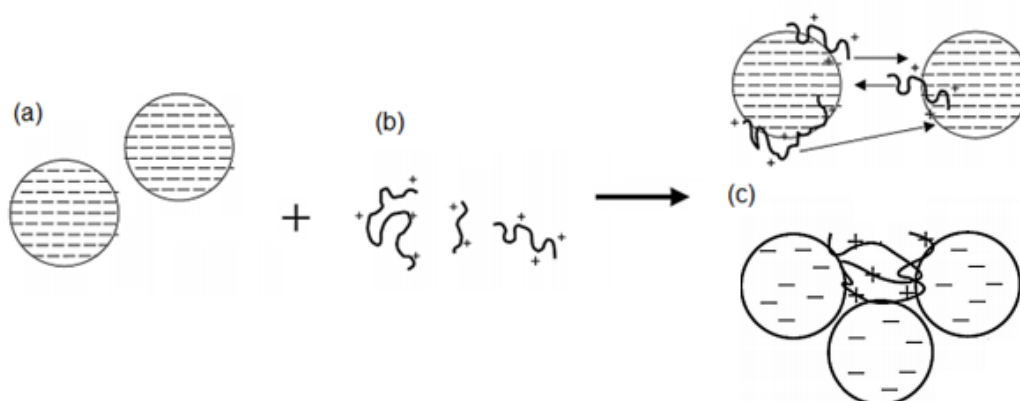


Figura 4. Fenômenos iniciais envolvidos nos processos de desestabilização de partículas coloidais em solução pelo uso de coagulante catiônico (adaptado de Lee, Robinson e Chong, 2014).¹² Cargas elétricas negativas comumente presentes na superfície das partículas coloidais dispersas nas águas naturais (a); Coagulante catiônico (b); Interação eletrostática entre coagulante catiônico e partícula coloidal e estabelecimento de forças atrativas (forças de Van der Waals) de agregação dos flocos, resultantes da redução da carga negativa superficial

Diversos mecanismos foram propostos com o objetivo de explicar os diferentes fenômenos físico-químicos envolvidos na remoção do material presente nas águas

naturais (dissolvido, coloidal e em suspensão). A Tabela 1 resume os de maior destaque na literatura.

Tabela 1. Mecanismos envolvidos nos processos de coagulação/floculação que resultam na desestabilização das partículas coloidais presentes nas águas naturais^{13,28}

Mecanismo	Fundamentação teórica	Aplicações Práticas
Adsorção e neutralização de cargas	Neutralização da carga negativa presente na superfície das partículas coloidais através do uso de cátions metálicos hidrolisados ou polímeros orgânicos catiônicos.	Uso de sais de alumínio e ferro e polímeros com grupos funcionais carregados positivamente.
Precipitação e varredura de flocos	Formação de precipitados insolúveis, amorfos e gelatinosos que aprisionam as partículas coloidais. Os núcleos formados ao redor das partículas crescem e varrem o meio adsorvendo/aprisionando outras partículas circundantes.	Dosagens elevadas de sais de alumínio e ferro, comumente maiores do que a concentração de saturação dos respectivos hidróxidos.
Adsorção e ponte interpartícula	Fundamenta-se na adsorção das partículas coloidais ao longo da estrutura dos polímeros por meio de interações coulombianas, ligações de hidrogênio, interações dipolo-dipolo e forças de Van der Waals. Sítios poliméricos disponíveis podem	Uso de polímeros não iônicos de elevada massa molecular.

	permitir a interação entre cadeias e a formação de pontes entre duas ou mais partículas, permitindo uma aglomeração mais eficiente.	
Compressão da dupla camada elétrica (DCE)	Compressão da dupla camada elétrica formada ao redor das partículas carregadas em solução. Ocorre pelo aumento da força iônica do meio ou pelo uso de cátions de elevada carga positiva.	Método pouco prático. As quantidades de sais de cátions monovalentes a serem adicionadas à água para causar um aumento substancial da força iônica resultariam em concentrações acima de limites aceitáveis para a água potável.

2.4. Determinação das dosagens ideais de coagulantes e floculantes – Jar Test

A qualidade das águas naturais e suas características químicas determinam as quantidades de coagulantes e floculantes necessários para um tratamento eficiente. Dois mananciais superficiais distintos

provavelmente necessitarão de quantidades diferentes de agentes químicos para a potabilização da água. A simulação das condições operacionais ótimas (concentração e tempo de mistura, por exemplo) podem ser estudadas em laboratório através do uso de um equipamento conhecido como *Jar Test* (teste de jarros), detalhado na Figura 5.



Figura 5. Jar Test utilizado para determinação de condições ótimas de coagulação, floculação e decantação²⁹

Neste equipamento, é possível simular a coagulação, através da mistura rápida entre os reagentes, e a floculação, reduzindo-se a rotação do sistema para indução de gradientes de velocidade que favoreçam a formação e o crescimento dos flocos. Os jarros possuem formato quadrado para minimizar a formação de vórtices, nos quais

as partículas girariam na mesma direção umas em relação às outras e reduziriam as possibilidades de colisões, fundamentais na mistura rápida (contato entre coagulante e particulado dissolvido/coloidal) e na mistura lenta (agregação de microflocos).¹³

Os procedimentos operacionais do

equipamento são descritos em detalhes pela *American Water Works Association*.³⁰ Na literatura, os testes da atividade coagulante de um dado composto em estudo iniciam pela ação deste sobre água sintética preparada em laboratório. O reagente tipicamente utilizado para este fim é o Kaolin (CAS 1332-58-7), um silicato de alumínio hidratado, de fórmula $Al_2Si_2O_7 \cdot 2H_2O$, capaz de originar suspensões de variados níveis de turbidez, preparadas pela dissolução de pequenas quantidades do reagente em água destilada, seguida de agitação constante e completa hidratação por 24 h.

3. Parâmetros físico-químicos de qualidade das águas naturais e tratadas

3.1. Turbidez

Um dos principais parâmetros físico-químicos avaliados no tratamento de águas naturais é a turbidez, caracterizada pela presença de materiais em suspensão (argila, lodo, esgotos sanitários/industriais, matéria

orgânica e micro-organismos em excesso) que provocam a absorção e/ou dispersão da luz. Nefelometria e turbidimetria, cujos princípios fundamentais são mostrados na Figura 6, são os principais métodos analíticos adotados atualmente para quantificar a turbidez em águas naturais e tratadas. Baseiam-se na dispersão (ou transmissão, no caso da turbidimetria) da radiação emitida por uma fonte luminosa ao passar pela amostra a ser analisada.³¹ Atualmente, a unidade de medida mais adotada na avaliação deste parâmetro é a NTU (unidade nefelométrica de turbidez).

Elevados níveis de turbidez podem interferir nas reações fotossintéticas naturais pela redução da entrada de luz nos ecossistemas. Além disso, pode contribuir para a formação de aglomerados de contaminantes indesejados e sítios de proteção de patógenos causadores de doenças de veiculação hídrica (vírus, bactérias e protozoários). A eficiência e segurança dos processos de potabilização de águas destinadas ao abastecimento público é tal qual menores forem os níveis de turbidez residual, principalmente do ponto de vista microbiológico.^{15,31}

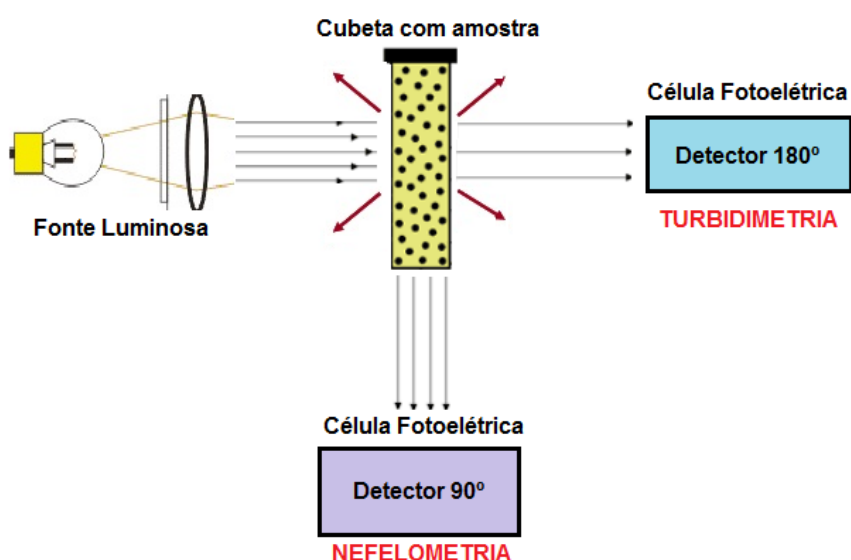


Figura 6. Fundamentos das técnicas de turbidimetria e nefelometria utilizadas na determinação da turbidez

3.2. Matéria orgânica natural

A matéria orgânica natural (MON) está presente comumente nas águas superficiais como resultado dos processos de decomposição de animais, vegetais, micro-organismos aquáticos e materiais arrastados pelas chuvas. Constitui-se basicamente de

uma fração hidrofílica (ácidos carboxílicos, carboidratos e proteínas) e outra hidrofóbica, formada predominantemente por substâncias húmicas complexas (ácidos húmicos e fúlvicos), ricas em núcleos aromáticos, estruturas fenólicas e duplas ligações conjugadas.³² A Figura 7 mostra a estrutura de uma substância húmica integrante da MON.

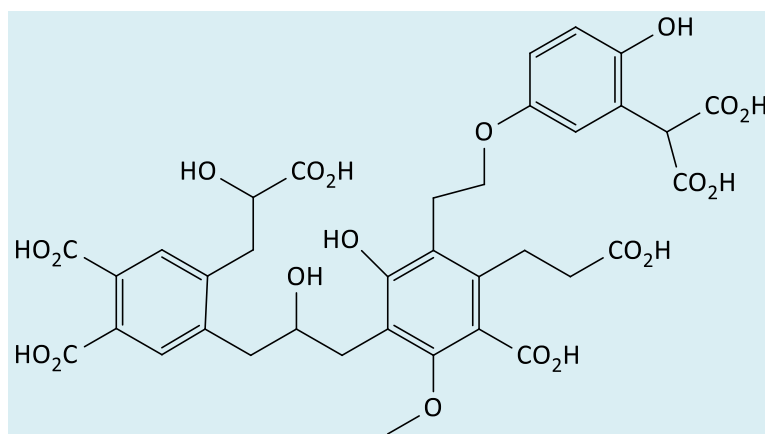


Figura 7. Estrutura de um ácido húmico integrante da MON²⁸

Os índices de MON nas águas destinadas ao abastecimento público tem aumentado significativamente nos últimos 20 anos, tanto por atividades antropogênicas impactantes quanto por variações naturais no ambiente. Hipóteses sugerem que inundações e secas prolongadas, resultantes das mudanças climáticas globais, podem ser alguns dos responsáveis por este aumento “natural” e consequente diminuição da qualidade das águas dos mananciais superficiais.³²

Maiores teores de MON nas fontes hídricas causam impactos diretos sobre a eficiência do tratamento e na qualidade da água distribuída e consumida pela população. Os principais impactos organolépticos incluem cheiro, sabor e odor na água tratada. Além disso, é possível haver transporte de metais e outros compostos, na forma de complexos solúveis, devido a estrutura quelante das substâncias húmicas. Um aumento nas dosagens de coagulantes e desinfetantes também é necessário, além dos maiores riscos da formação de subprodutos

de desinfecção (como o clorofórmio), notadamente aqueles derivados das reações entre o cloro residual presente na água e a MON.³³

O controle da quantidade e perfil químico da matéria orgânica natural é fundamental para a segurança e qualidade da água consumida pela população. Métodos físico-químicos de fracionamento (como o uso de conjuntos de resinas de troca iônica e técnicas cromatográficas) e medições espectroscópicas úteis na avaliação da MON presente nas águas (fluorescência, espectroscopias UV-visível e de infravermelho e ressonância magnética nuclear de ¹H, ¹³C e ¹⁵N) e na sua correlação com a formação de subprodutos de desinfecção são vastamente descritos na literatura, caracterizando-se como importantes ferramentas de rotinas analíticas em pequenos e/ou grandes laboratórios.³⁴⁻³⁸

As principais metodologias de rotina na avaliação da MON envolvem análises de

Carbono Orgânico Dissolvido (COD), Carbono Orgânico Total (COT), Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Absorção no Ultravioleta a 254 nm (UV_{254nm}). Esta última vem se destacando nas rotinas analíticas por apresentar forte correlação com as demais e ser de fácil e rápida execução. Este método baseia-se na absorção de radiação a 254 nm por parte das moléculas orgânicas e inorgânicas presentes na água, sendo proporcional às suas concentrações. Os principais cromóforos orgânicos de interesse, presentes na MON das águas, incluem compostos com estrutura aromática (Figura 7) e ligações C=C conjugadas. Interferentes inorgânicos como ferro, nitrato, nitrito e brometo também absorvem nessa região e devem ser considerados durante a marcha analítica.^{35, 39, 40, 41}

3.3. Cor

A água isenta de impurezas é livre de cor. No entanto, nas condições naturais ela praticamente não existe sem materiais dissolvidos ou em suspensão. A presença de substâncias húmicas e taninos pode contribuir para o surgimento de colorações amarelo-alaranjadas. Algas e seus produtos metabólicos (exsudatos) também contribuem para o surgimento de cor nas águas.⁴²

Íons inorgânicos, como ferro (Fe^{2+}) e manganês (Mn^{2+}), conferem colorações típicas às águas naturais, principalmente aquelas oriundas de mananciais subterrâneos. Sua remoção é realizada tradicionalmente através de operações de aeração (ou uso de oxidantes mais fortes que o oxigênio atmosférico), precipitação, filtração e controle de pH, sendo este último considerado um parâmetro chave na eficiência do processo.^{43,44}

Nas águas superficiais, o ferro combina-se com a matéria orgânica natural para dar origem a compostos que alteram as propriedades organolépticas desejadas para uma água potável. Estas mudanças visuais

perceptíveis podem causar repulsa por parte dos consumidores, que podem buscar outras fontes de abastecimento de aspecto mais agradável, mas não necessariamente seguras à saúde dos pontos de vista químico e microbiológico. Além das questões sanitárias, o excesso de ferro pode resultar no surgimento de manchas em roupas, louças e em outros utilitários.^{31,45}

3.4. Potencial hidrogeniônico (pH)

Nas redes de tratamento e distribuição de água potável, o controle do pH é fundamental para a estabilidade operacional do sistema. Tipicamente, águas tratadas apresentam pH entre 6 e 9,5. Quando abaixo do limite inferior, a água tende a ser corrosiva ou agressiva a certos materiais, como metais, estruturas de cimento e concreto armado. Acima do limite superior, há tendência da formação de incrustações por depósitos e precipitações de materiais antes solúveis.³¹

O pH também exerce influência significativa na eficiência das operações unitárias envolvidas no tratamento da água. A remoção da matéria orgânica natural presente nas águas superficiais pode ser otimizada através do controle do pH no qual coagulantes e floculantes atuam. Para águas de baixa turbidez, este controle é fundamental para a ocorrência do fenômeno de nucleação, responsável pela formação de microflocos. Hidróxido de sódio (NaOH), cal (CaO), dióxido de carbono (CO_2) e ácidos minerais são comumente utilizados para ajustes de pH e alcalinidade do meio.⁴⁶

O controle do pH de coagulação é fundamental na formação de espécies poliméricas de alumínio ativas no tratamento de águas eutrofizadas (ricas em nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo). Este controle é importante não apenas para a remoção efetiva da matéria orgânica natural, mas também para garantir que as concentrações de alumínio residual solúvel presentes na água sejam as menores

possíveis⁴⁷, o que é alcançado comumente quando o pH, na etapa de coagulação, encontra-se na faixa de 6,0 a 7,5.⁴⁸

4. Produtos naturais utilizados como coagulantes e floculantes

4.1. Quitosana

A quitosana é um copolímero linear formado por unidades de D-glucosamina e N-acetil-D-glucosamina, obtido através da reação de desacetilação em meio alcalino da

quitina, um dos polissacarídeos mais abundantes do planeta (perdendo apenas para a celulose). A quitina está presente na parede celular de fungos e nos exoesqueletos e carapaças de crustáceos marinhos, como caranguejos e camarões (15-40%), que atualmente constituem a principal fonte natural deste biopolímero a partir do aproveitamento de resíduos da indústria de frutos do mar.⁴⁹ As estruturas monoméricas da quitina e da quitosana estão descritas, respectivamente, na Figura 8, que representa a reação de desacetilação da quitina em meio alcalino.

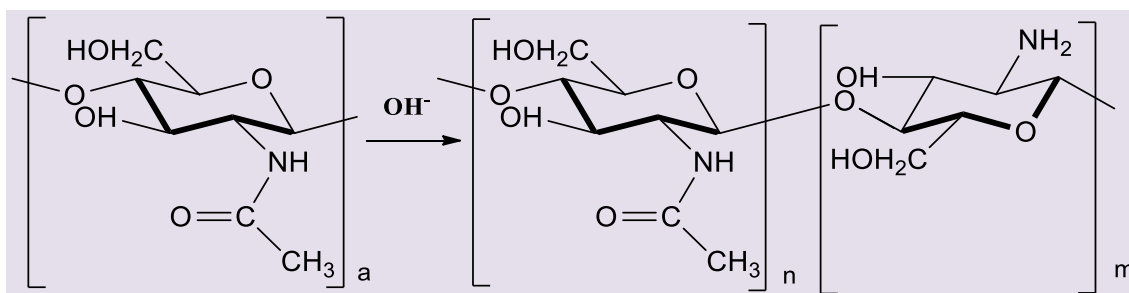


Figura 8. Reação de desacetilação alcalina da quitina e conversão em quitosana⁵⁰

As aplicações industriais do biopolímero quitosana são altamente diversificadas, principalmente nas áreas de engenharia, biomédica, química, farmacêutica, cosmética, têxtil, alimentar, biotecnologia e ambiental.⁵¹ As principais características que explicam essa versatilidade incluem biodegradabilidade, possibilidade de encapsulamento, habilidade de formar ligações de hidrogênio intermoleculares, eficiência na remoção de poluentes, ação sobre vírus, bactérias e fungos, além de tratar-se de um recurso natural renovável e não tóxico.⁵²

O crescente interesse pelo uso da quitosana como coagulante e floculante para o tratamento de águas de abastecimento e residuais baseia-se nas vantagens operacionais e ambientais que podem ser obtidas. Eficiente em águas frias, pode ser utilizada em dosagens bem menores (0,2-0,5

mg.L⁻¹ como coagulante e 0,1-100 mg.L⁻¹ como floculante) que os coagulantes a base de sais inorgânicos, sem consumo da alcalinidade natural das águas; promove a formação de flocos maiores e mais densos, que favorecem a velocidade de sedimentação e a redução do tempo de estabilização do sistema. O volume do lodo produzido é bem menor, quando comparado aos coagulantes a base de alumínio, causando menores impactos ambientais; o resíduo gerado, rico em matéria orgânica, pode ser degradado naturalmente por micro-organismos.^{27,52-54}

Quimicamente, a quitosana trata-se de um polímero natural capaz de originar polieletrólitos catiônicos com alta densidade de carga quando dissolvido em ácidos orgânicos diluídos, como ácido acético e fórmico, e inorgânicos, como o ácido clorídrico. Quando o pH é menor do que 6,5, o biopolímero torna-se solúvel e os grupos

amino primários ($-\text{NH}_2$) encontram-se predominantemente protonados (Figura 9), devido ao equilíbrio dinâmico estabelecido em solução entre sítios doadores e receptores de prótons ($\text{H}^+/-\text{NH}_2$), sendo este favorecido por uma maior disponibilidade de cátions H_3O^+ no meio (deslocamento do equilíbrio para formação da espécie protonada – QUIT-NH_3^+). Assim, por exemplo, em pH 5,5 o grau de protonação da quitosana é maior do que em pH 6,5; em pH 3, os grupos amino encontram-se completamente protonados. A protonação permite a interação da quitosana com os poluentes

naturais, que apresentam carga superficial negativa, através de mecanismos de neutralização de carga; o estabelecimento de pontes intracadeias favorece ainda a criação de uma rede adsorvente de partículas em suspensão.^{12,50,54-57}

Diversos trabalhos podem ser encontrados na literatura relatando a eficiência da quitosana como coagulante ou floculante para o tratamento de águas naturais e sintéticas (que são utilizadas para simular as condições ótimas de desempenho de cada coagulante). Alguns deles são citados e discutidos brevemente na Tabela 2.

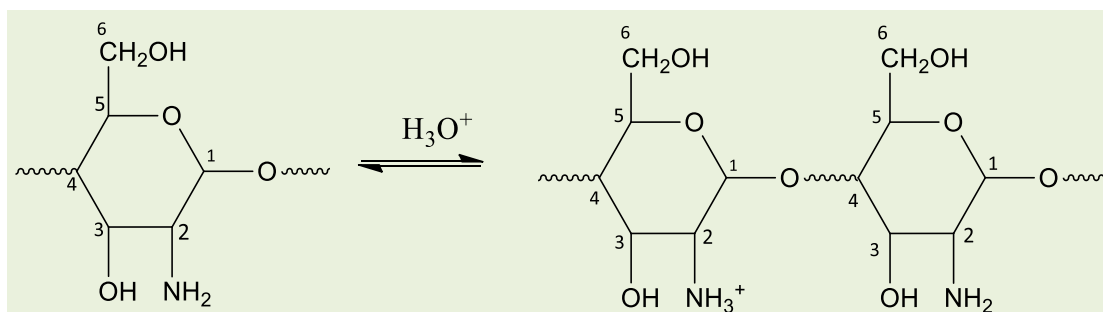


Figura 9. Reação de protonação parcial dos grupos amino da unidade monomérica da quitosana em meio ácido⁵⁴

Tabela 2. Aplicações da quitosana no tratamento de águas naturais e sintéticas

Matriz estudada	Poluentes	Referência	Principais resultados
Água natural bruta	Sólidos em suspensão, micro-organismos e material húmico.	58	A mistura de quitosana e cloreto de alumínio permitiu a redução da turbidez final e do residual de alumínio da água tratada.
		59	Redução de turbidez das águas de um rio e estudo da concentração ($0,5 \text{ mg.L}^{-1}$) e pH ótimo (7,0-7,5) para o coagulante.
		60	Quando aplicada isoladamente, a quitosana foi capaz de reduzir em 85% a turbidez da água. Quando combinada a coagulantes a base de alumínio a eficiência aumentou para 97% de redução de turbidez.

Água do mar	Sólidos presentes na água do mar oriundos dos materiais arrastados pelas chuvas (turbidez).	61	Maior eficiência de redução da turbidez utilizando-se quitosana (97,6%), quando comparada a $Al_2(SO_4)_3$ e $FeSO_4$, em condições alcalinas (pH 8,1) e dosagem ótima de 18 mg.L ⁻¹ .
Água sintética e natural	Matéria Orgânica (Carbono Orgânico Dissolvido e Carbono Orgânico Total).	62	O uso de um novo composto híbrido de quitosana-alumínio na remoção de matéria orgânica presente nas matrizes avaliadas permitiu a redução das dosagens de coagulantes inorgânicos aplicadas.

Além do uso no tratamento de água, a quitosana destaca-se por ser empregada como coagulante na indústria da cerveja⁶³, na remoção de corantes⁶⁴, na cadeia de produção de papel⁶⁵, no tratamento de resíduos da indústria alimentícia de óleo vegetal⁶⁶ e do leite⁶⁷ e em efluentes da galvanoplastia.⁶⁸

Embora a quitosana tenha sido utilizada extensamente como coagulante, sua baixa solubilidade em água em pH neutro ou alcalino limita sua eficiência (apesar de existirem registros de quitosanas solúveis em pH 10).⁶⁹ Este empecilho pode ser superado através da inserção de novos grupamentos químicos na estrutura original do polímero, que aumentem sua solubilidade e expandem as possibilidades de aplicação dos biomateriais derivados.⁷⁰ As principais reações de modificação incluem eterificação, aminação, oxidação, copolimerização de enxerto, esterificação e acilação, que aproveitam a grande quantidade de sítios ativos, formados por grupos amino e hidroxila, presentes na estrutura da quitosana.⁵⁴

Apesar de versátil, a quitosana apresenta alguns contrapontos que devem ser considerados. Sua qualidade depende diretamente da matéria-prima utilizada na obtenção (fonte de quitina). Na indústria, os

processos não são uniformes e podem gerar produtos com diferentes características estruturais (como o grau de desacetilação) que podem afetar a eficiência coagulante do material. O uso em excesso no tratamento de águas pode promover reestabilização das partículas coloidais (tornando-as carregadas positivamente) e incremento de matéria orgânica na água tratada, que é indesejável devido à possibilidade da formação de subprodutos de desinfecção quando em contato com o cloro residual comumente utilizado como agente desinfetante.^{52,54}

4.2. *Moringa oleifera*

Moringa oleifera (Lam) (MO) é uma planta tropical multiuso pertencente à família Moringaceae que pode atingir até 10 m de altura. Natural da Índia, atualmente encontra-se disseminada pela África, América e diversas regiões de clima compatível. Tolerante à seca, a espécie produz frutos (vagens) com sementes (cerca de 2.000/ano) de interesse ambiental que historicamente são utilizadas para a clarificação e remoção de micro-organismos de águas destinadas ao consumo humano.⁷¹⁻⁷⁴ A Figura 10 mostra os detalhes das diversas partes da planta.

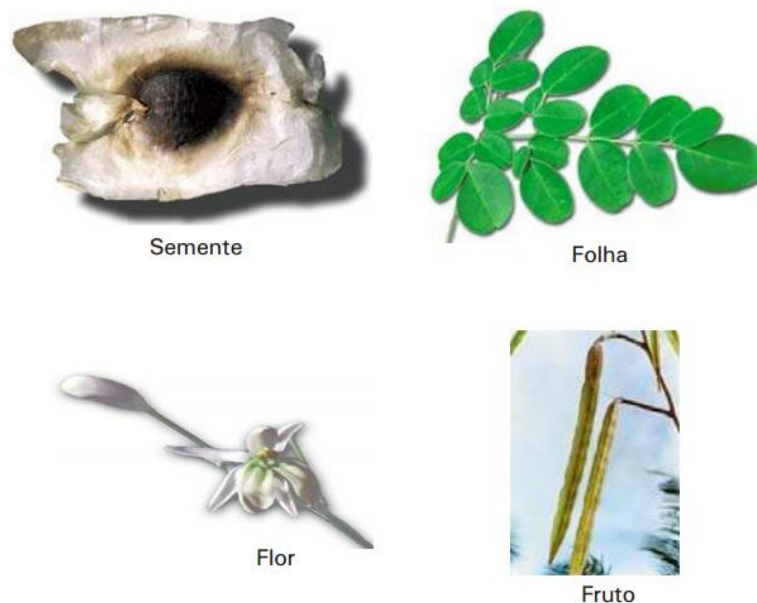


Figura 10. Detalhes das estruturas vegetais de *Moringa oleifera*⁷⁵

Cerca de 40% da massa bruta das sementes de *Moringa oleifera* é composta por óleos comestíveis e proteínas catiônicas, tidas como os principais agentes responsáveis pelo efeito coagulante sobre partículas coloidais presentes na água, e que atuam através de mecanismos de neutralização de cargas e formação de pontes.^{76,77} Estudos na literatura sugerem que este efeito está relacionado a um conjunto de proteínas de pequeno tamanho e massa molecular de 6,5 kDa, ou à presença de proteínas catiônicas diméricas, com peso molecular de 13 kDa.^{77,78}

As aplicações práticas de *Moringa oleifera* no tratamento de águas brutas envolvem o uso das sementes *in natura*, trituradas ou pulverizadas, ou ainda soluções aquosas previamente preparadas. Esta metodologia simples apresenta algumas desvantagens, como a introdução de mais matéria orgânica na água a ser tratada (que favorece a formação de subprodutos de desinfecção ao utilizar cloro gasoso como agente desinfetante) e a diminuição da eficiência de coagulação provocada pela presença de lipídeos e carboidratos nas sementes.⁷⁹

A extração e purificação das proteínas de interesse são estratégias que podem ser adotadas para otimizar a ação coagulante de

Moringa oleifera. Metodologias combinadas, tais como a extração de proteínas em tampão fosfato e posterior purificação por cromatografia de troca iônica, resultaram em um produto proteico ativo de elevada massa molecular (66 kDa).⁸⁰ A precipitação proteica utilizando sulfato de amônio $((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4)$ e posterior purificação por diálise e tratamento térmico também foi aplicada, resultando na obtenção de proteínas coagulantes termicamente estáveis, mesmo quando aquecidas a 121 °C.^{79,81}

As aplicações de *Moringa oleifera* como coagulante de águas e efluentes são extensamente relatadas no meio acadêmico.^{76,82,83,84} Um manual prático (escrito em linguagem simples) para o uso da espécie como coagulante de águas em comunidades rurais está disponível na literatura. Nele, é possível encontrar esquemas e ilustrações didáticas para a construção de sistemas isolados de potabilização que aproveitam as sementes da planta no tratamento físico-químico e microbiológico da água.⁷⁵

Os principais benefícios ambientais e operacionais obtidos com uso de *Moringa oleifera* como coagulante de águas incluem a não toxicidade das sementes, capacidade de remoção de micro-organismos, incluindo

Escherichia coli, inalteração do pH e condutividade elétrica da água tratada e geração de lodo biodegradável em volume 4 a 5 vezes menor quando comparado aos sais inorgânicos utilizados para a mesma finalidade.^{76,85,86} As limitações envolvem a necessidade de preparo prévio do coagulante e aplicações posteriores de agentes desinfetantes para eliminação de microorganismos patogênicos residuais.⁷⁵

4.3. Taninos vegetais

Amplamente difundidos na natureza, os

taninos constituem uma das maiores classes de metabólitos secundários das plantas, sendo encontrados em folhas, frutos, raízes e cascas. Quimicamente, são classificados como polímeros polihidroxifenólicos, solúveis em água, cuja massa molecular situa-se entre 500 a 3.000 Da, podendo ser classificados em hidrolisáveis e condensados. O primeiro grupo é formado por poliésteres que possuem como unidade básica o ácido gálico, que pode estar ligado a estruturas glicosídicas. O segundo é constituído por unidades monoméricas flavonoídicas do tipo flavan-3-ol ou flavan-3,4-diois.^{87,88} A Figura 11 mostra, respectivamente, as estruturas de taninos hidrolisáveis e condensados.

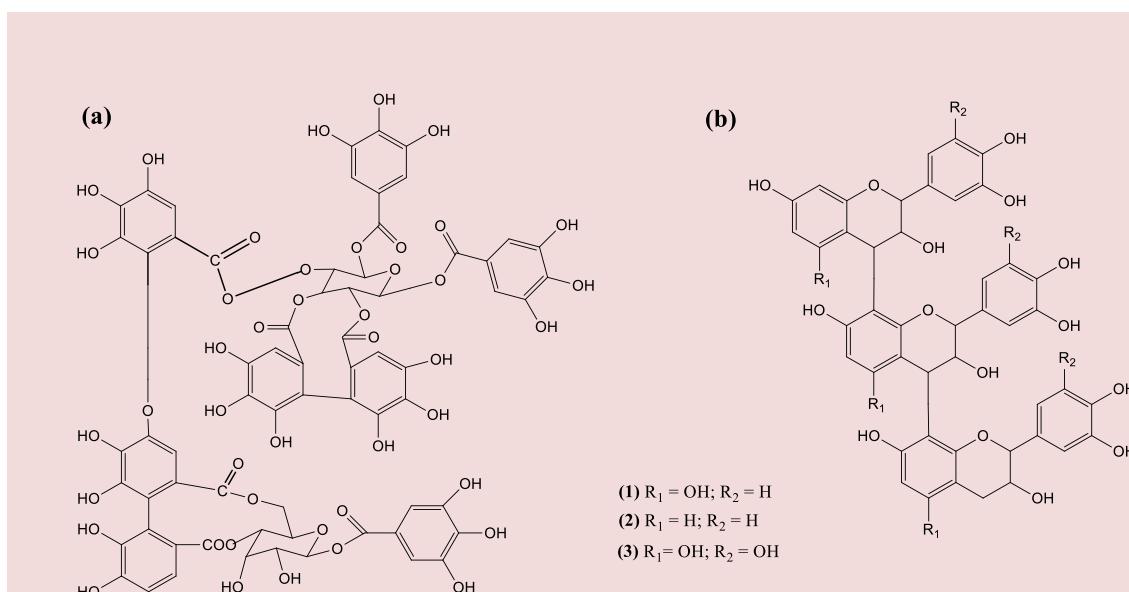


Figura 11. Estrutura química de taninos hidrolisáveis (a) e condensados (b)⁸⁸

Historicamente, os taninos têm sido utilizados na indústria de curtimento de couro devido sua habilidade de precipitar proteínas, como o colágeno, mas as possibilidades de aplicação são tão vastas quanto sua abundância na natureza.⁸⁹ No setor de saneamento básico, os taninos são aproveitados como constituintes de coagulantes e floculantes poliméricos catiônicos utilizados na clarificação de águas para consumo humano e no tratamento de efluentes industriais, devido sua capacidade de neutralizar cargas superficiais de

partículas coloidais em suspensão, promovendo sua aglomeração e sedimentação.⁹⁰

Os polímeros catiônicos a base de taninos são produzidos através da reação de Mannich, descrita na Figura 12, e envolvem um aldeído (geralmente metanal), um aminocomposto ou cloreto de amônio e o extrato de tanino. Na primeira etapa da síntese, ocorre a formação de um cátion imínio ($-\text{CH}_2\text{NH}_3^+$) pela reação entre o aldeído fórmico e o cloreto de amônio (ou uma

amina), em temperaturas que variam entre 50 a 100 °C. Em seguida, ocorre a reação do

intermediário formado com o tanino, originando o produto catiônico.⁹¹

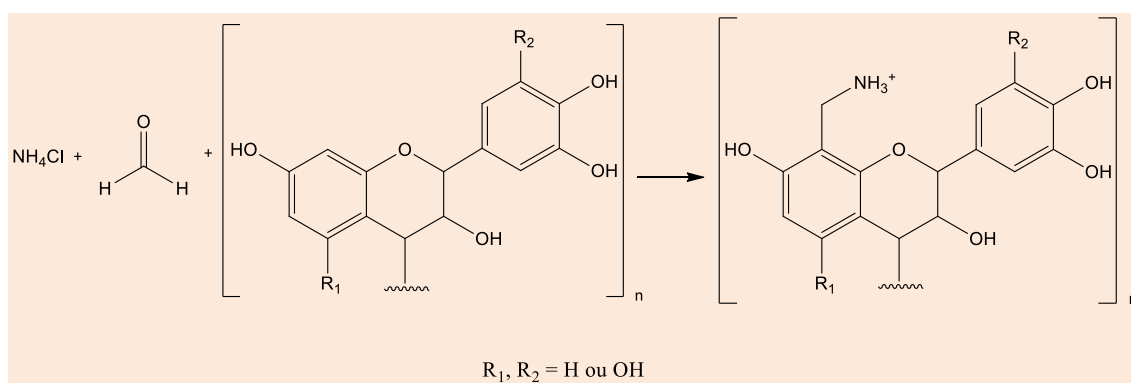


Figura 12. Obtenção de tanino catiônico polimérico via reação de Mannich⁸⁸

A reação de Mannich é fundamental para a transformação do tanino sem carga em um polímero catiônico, também chamado de tanato quaternário de amônio. O produto obtido apresenta caráter anfótero, devido à presença de grupos amino (protonados em meio ácido) e hidroxilas fenólicas (desprotonadas em meio alcalino), atuando como coagulante através de mecanismos de neutralização de cargas e formação de pontes.^{92,93}

Diversas espécies vegetais são relatadas na literatura como fontes de taninos. As principais são *Schinopsis balansae* (Engl.), conhecida como Quebracho, e a *Acacia*

mearnsii (De Wild.), ou acácia negra. A primeira é nativa da América do Sul e foi utilizada por muito tempo como fonte primária de taninos; dela obtém-se o *Silvafloc*, um agente coagulante a base de polímeros tânicos produzido predominantemente na Itália. A segunda, mostrada na Figura 13, é originária da Austrália e é considerada a principal fonte de taninos na atualidade (20 a 30% das cascas); largamente cultivada no sul do Brasil, a acácia negra serve como matéria-prima para a produção de diversos biocoagulantes, sendo o mais conhecido o *Tanfloc*.^{88, 94}

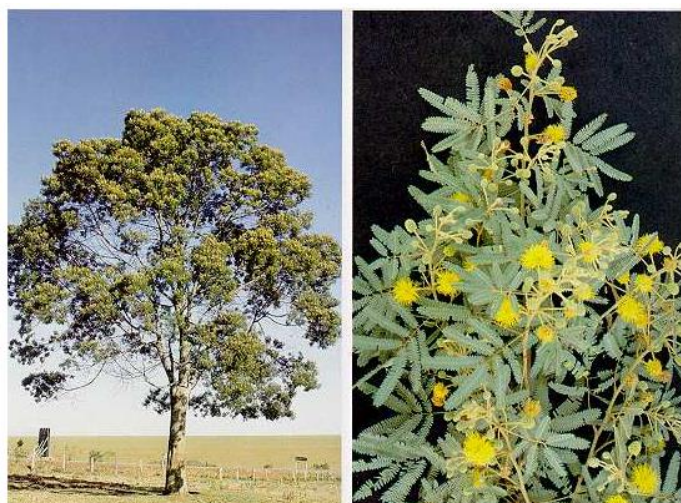


Figura 13. Visão geral (à esquerda) e detalhes das flores e folhas (à direita) da espécie *Acacia mearnsii* (acácia negra)⁹⁵

Os polímeros catiônicos a base de taninos apresentam diversas vantagens quando comparados aos coagulantes inorgânicos tradicionais: não alteram o pH da água tratada por não consumirem a alcalinidade do meio ao mesmo tempo que são efetivos numa ampla faixa de pH (4,5-8,0), redução do volume de lodo gerado, que é biodegradável, e solubilidade em água fria. A baixa toxicidade é evidenciada pela elevada DL_{50} (9.241 $mg \cdot kg^{-1}$), estimada em ratos; além disso, podem ser utilizados também para a remoção de compostos tóxicos presentes nas águas, produzidos por bactérias clorofiladas e

cianofíceas.^{90,91,96}

A Figura 14 compara a eficiência de remoção de turbidez de águas naturais superficiais através do uso de coagulantes orgânicos e inorgânicos. Nela, é possível observar uma significativa e superior capacidade de remoção de material coloidal em suspensão dos coagulantes a base de taninos (*Silvafloc* e *Tanfloc*), quando comparados a outros coagulantes naturais (*Moringa oleifera*) e inorgânicos ($Al_2(SO_4)_3$), submetidos às mesmas condições de estudo (dosagem de 15 $mg \cdot L^{-1}$, 20°C e pH natural da água).⁹³

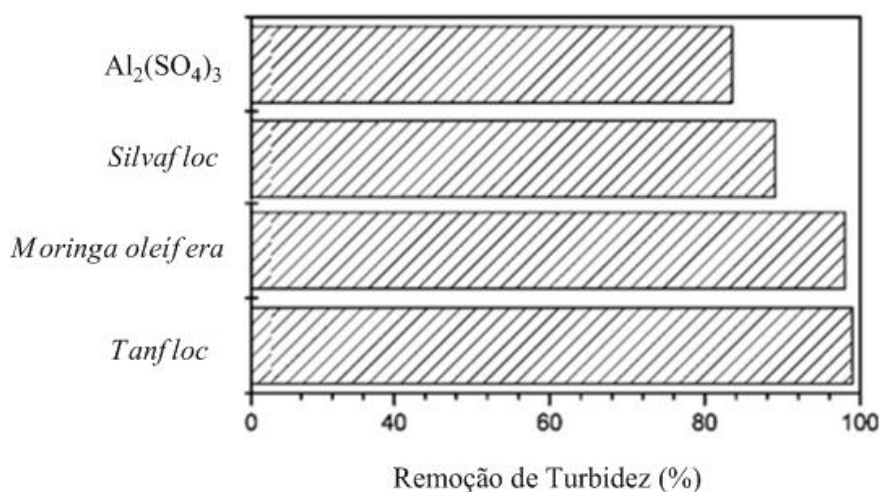


Figura 14. Comparação entre diversos coagulantes na remoção de turbidez de águas naturais superficiais⁹³

A eficiência de coagulantes a base de taninos na remoção de fármacos (trimetoprima), metais de transição (Cu^{2+} , Zn^{2+} e Ni^{2+}), surfactantes aniônicos (dodecilbenzenossulfonato de sódio) e corantes (violeta de alizarina 3R), que são considerados contaminantes emergentes presentes em concentrações traço nas águas superficiais, são relatados na literatura,⁸⁸ assim como também sua capacidade de redução da quantidade de algas presentes em ambientes tipicamente eutrofizados.⁹⁴

5. Outros estudos

5.1. *Prosopis juliflora* e *Cactus latifaria*

Um estudo sobre o uso de duas plantas indígenas como possíveis coagulantes naturais para águas de abastecimento realizado na Venezuela mostrou bons resultados. Os extratos brutos e das frações orgânicas (5% m/v) de *Prosopis juliflora* (Swartz) DC e *Cactus latifaria* foram avaliados quanto à capacidade de remoção de material

em suspensão de águas sintéticas de alta (100-200 NTU) e baixa turbidez (30-40 NTU). Os resultados mostraram dosagens ótimas para cada coagulante avaliado em torno de 10 mg.L⁻¹, resultando em eficiências de remoção de turbidez de 95% para *Cactus latifaria* e aproximadamente 85% para *Prosopis juliflora*.⁹⁷

Além de *Cactus latifaria*, diversas outras espécies de cactáceas foram estudadas quanto à sua ação coagulante, mostrando-se efetivas na remoção de turbidez de efluentes industriais e urbanos.⁹⁸ *Opuntia ficus indica* (L.) Mill foi avaliada quanto à capacidade de redução de turbidez de amostras de água do mar, de rio e residuais, obtendo-se rendimentos de 94%, com dosagens de 50 mg.L⁻¹ do material pulverizado. Os resultados mostraram também que a eficiência do processo de coagulação foi otimizada com o aumento da temperatura, fator fundamental para a exploração deste biocoagulante em regiões quentes, áridas e ricas em cactáceas.⁹⁹

O efeito coagulante promovido pelas cactáceas pode estar associado à presença de diversas pectinas, uma complexa família de polissacarídeos heterogêneos presentes na parede celular das plantas.¹⁰⁰

5.2. *Margaritarea discoidea*

O efeito coagulante de extratos aquosos das sementes da espécie *Margaritarea discoidea* (Baill.) G.L. Webster (Euphorbiaceae) (Figura 15.a), planta tropical amplamente difundida na África com históricas aplicações fitoterápicas, foi investigado em laboratório. Soluções estoque das sementes (2 g.L⁻¹) foram avaliadas quanto à capacidade de redução de turbidez de águas sintéticas. Os resultados, resumidos na Figura 15.b, mostraram eficiências superiores a 90% em todas as dosagens avaliadas. Em conclusão, sugere-se que o princípio ativo responsável pelo efeito coagulante seja uma espécie de galactomanana (polissacarídeo vegetal de reserva que consiste basicamente de unidades de manose e galactose) atuando através de mecanismos de adsorção e formação de pontes. Uma desvantagem deste biocoagulante frente aos demais é o surgimento de coloração esverdeada na água tratada, proporcional às dosagens aplicadas.¹⁵ Estudos como este ratificam a importância do conhecimento indígena sobre a biodiversidade de produtos naturais com propriedades coagulantes (galactomananas, pectinas, proteínas catiônicas, dentre outras).



Figura 15.a

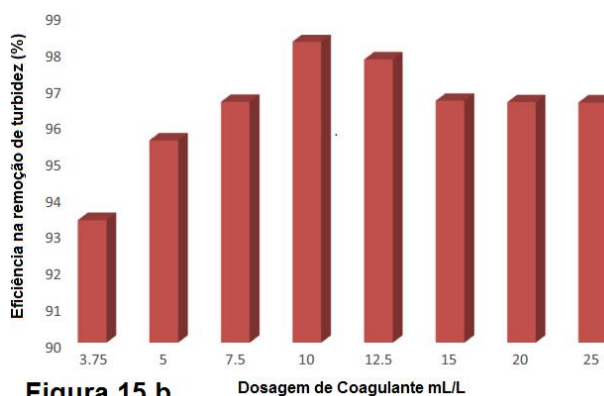


Figura 15.b

Figura 15. Visão geral da espécie *Margaritarea discoidea* (Fig 15.a) e eficiência do processo de redução de turbidez (Fig. 15.b)¹⁵

5.3. Alginato de algas

Alginatos constituem um grupo de

polissacarídeos naturalmente encontrados na parede celular de algas marinhas marrons (Phaeophyceae), ocorrendo na forma de sais mistos (Na-K-Ca) do ácido alginico.¹⁰¹ O efeito

sinérgico do uso de alginato de sódio e cloreto de cálcio na coagulação de águas sintéticas de alta (150 NTU), média (80 NTU) e baixa turbidez (10 NTU) foi avaliado com sucesso em laboratório. Quando em contato, estes dois reagentes originam um gel de alginato de cálcio, eficiente na remoção de partículas em suspensão, sobretudo em sistemas de alta turbidez (até 98% de eficiência utilizando-se 120 mg.L⁻¹ de Ca²⁺ e 0,2 mg.L⁻¹ de alginato).¹⁰²

Os íons Ca²⁺ promovem a neutralização de cargas superficiais das partículas coloidais, ao passo que o gel de alginato de cálcio formado no meio atua possivelmente através do estabelecimento de pontes entre as partículas em suspensão; não foram observadas variações significativas na alcalinidade e no pH da água tratada com o material. A principal desvantagem da utilização deste biopolímero no tratamento de águas reside no maior preço comercial, quando comparado aos sais de alumínio. Em 2010, as matérias-primas eram comercializadas por US\$ 12/kg (alginato

comercial) e US\$1/kg (cloreto de cálcio), ao passo que o sulfato de alumínio era vendido por US\$ 0,3-0,5/kg.¹⁰³

5.4. *Jatropha curcas*

Jatropha curcas L., conhecida tipicamente como pinhão manso ou pinhão-de-purga (Figura 16), é um arbusto de pequeno porte nativo na América tropical e pertencente à família Euphorbiaceae.¹⁰⁴ Abidin e colaboradores, 2013, investigaram a utilização do extrato das sementes desta espécie no tratamento de águas sintéticas preparadas para simular condições tipicamente encontradas em águas residuais.¹⁰⁵ Os resultados mostraram que para o biocoagulante avaliado, cujo princípio ativo é uma proteína catiônica solúvel, quanto maior a turbidez inicial, maior a eficiência de remoção, podendo alcançar até 99,4% em meios fortemente ácidos (pH entre 3 e 4), utilizando dosagens de 120 mg.L⁻¹.

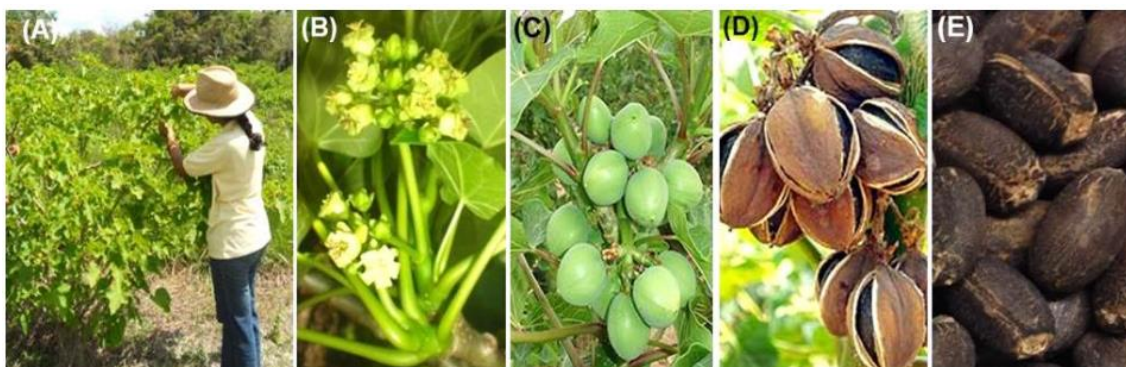


Figura 16. Características morfológicas de *Jatropha curcas* L: planta adulta (A); ramo florido (B); fruto verde (C); fruto seco (D); semente (E)¹⁰⁶

O desempenho coagulante das sementes de *Jatropha curcas* também foi avaliado por Pritchard e colaboradores, 2009, na purificação de águas de poços com elevados níveis de turbidez e índices de coliformes fecais.¹⁰⁷ Os resultados mostraram que em dosagens de 50 mg.L⁻¹ foi possível reduzir a turbidez em 92% e o teor de coliformes fecais em 80%, sem interferências significativas no

pH da água obtida. Embora a redução de micro-organismos fecais tenha sido significativa, ainda está aquém do que determinada a OMS, que preconiza um teor de zero UFC/100mL de água destinada ao consumo humano.

As limitações do uso de *Jatropha curcas* como coagulante devem-se à necessidade de

tratamento prévio das sementes, que apresentam substâncias tóxicas para animais. Sua fração lipofílica é rica em ésteres de forbol (Figura 17), compostos derivados de diterpenos tetracíclicos, que são responsáveis por efeitos pró-inflamatórios (hiperativação da proteína C quinase) e indução da formação de tumores. A curcina, uma proteína classificada como inativadora de ribossomos tipo 1, é outra toxina presente nas sementes, cuja principal característica é a

estimulação da proliferação celular (efeito mitógeno). Recentemente, proteínas com potencial alergênico semelhante à albumina 2S da mamona também foram identificadas. O teor e a toxicidade destes compostos, que podem provocar diarreia, vômito e vertigem em humanos, podem variar de acordo com o genótipo em estudo e as diferentes condições agroclimáticas aos quais a espécie é submetida.^{106,108-111}

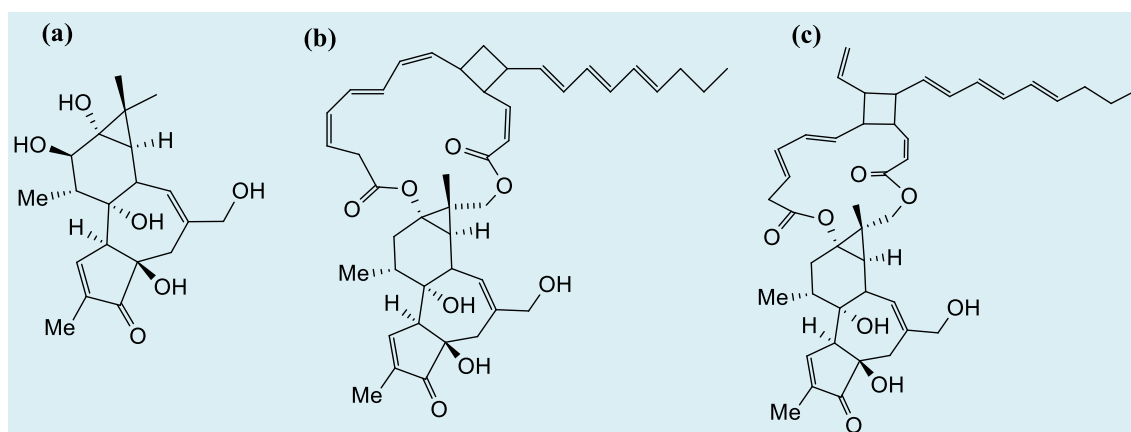


Figura 17. Estrutura do núcleo forbol (a)¹¹² e ésteres de forbol (b/c)¹¹³ encontrados em *Jatropha curcas*

6. Considerações finais

A crescente demanda por água potável em quantidade e qualidade despertou a busca por agentes químicos mais eficientes e economicamente viáveis. Os diversos poluentes emergentes encontrados nos mananciais superficiais e subterrâneos e subprodutos do tratamento são cada vez mais estudados e associados a problemas crônicos de saúde. Mesmo sem correlações definitivas e conclusivas sobre a influência do alumínio no surgimento da Doença de Alzheimer, este elemento continua sendo utilizado largamente como agente coagulante em sistemas de tratamento de água para abastecimento público; polímeros sintéticos são também aplicados para o mesmo fim, com a constante preocupação da liberação

de frações monoméricas potencialmente nocivas.

Os biocoagulantes emergem como uma tecnologia promissora no setor de saneamento ambiental. Destacam-se por serem solúveis em água e efetivos numa ampla faixa de pH, produzem menores volumes de lodo biodegradável e de baixo impacto ambiental, não são corrosivos e são constituídos em sua maioria por polímeros e proteínas vegetais de baixa toxicidade. Quando bem explorados, esses agentes multifuncionais podem permitir a redução do custo operacional do tratamento de água e expandir o acesso a esse recurso, tornando-o de fato universal.

As diversas possibilidades de aplicação dos biocoagulantes (tratamento de águas superficiais, subterrâneas e residuais) refletem a importância dos produtos naturais ao redor do mundo. Constituem-se como

uma opção sustentável para o desenvolvimento de processos químicos que vão ao encontro dos princípios da química verde; aliado a isso existe ainda a possibilidade de geração de renda em países em desenvolvimento devido ao aproveitamento de matérias-primas abundantes ou subutilizadas.

Referências Bibliográficas

- ¹ Molina, N. F.; Rodríguez, E. J. M.; Ariza, C. P. Coagulantes naturales en sistemas de flujo continuo, como sustituto del $Al_2(SO_4)_3$ para clarificación de aguas. *Producción + Limpia* **2016**, *11*, 41. [CrossRef]
- ² Hespanhol, I. Reúso potável direto e o desafio dos poluentes emergentes. *Revista USP* **2015**, *106*, 79.
- ³ Benotti, M. J.; Trenholm, R. A.; Vanderford, B. J.; Holady, J. C.; Stanford, B. D.; Snyder, S. A. Pharmaceuticals and endocrine disrupting compounds in U.S. drinking water. *Environmental Science & Technology* **2009**, *43*, 597. [CrossRef] [PubMed]
- ⁴ Vieira, P.; Rosa, M. J.; Alegre, H. Estações de tratamento de água para consumo humano em Portugal. ITH 44. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa, 2007.
- ⁵ Oliveira, T. F. de.; *Dissertação de Mestrado*, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010. [Link]
- ⁶ Bonton, A.; Bouchard, C.; Barbeau, B.; Jedrzejak, S. Comparative life cycle assessment of water treatment plants. *Desalination* **2012**, *284*, 42. [CrossRef]
- ⁷ Sanderson, K. It's not easy being green. *Nature* **2011**, *469*, 18. [Link] [PubMed]
- ⁸ Truchlaeff, C. Processo de fabricação do policloreto de alumínio - PAC, tendo como matérias-primas o ácido clorídrico, alumínio metálico e alumina. **2007** (BR nº PI 0601081-4 A2)
- ⁹ Teixeira, M. R.; Camacho, F. P.; Sousa, V. S.; Bergamasco, R. Green technologies for cyanobacteria and natural organic matter water treatment using natural based products. *Journal of Cleaner Production* **2017**, *162*, 484. [CrossRef]
- ¹⁰ Choy, S. Y.; Prasad, K. M. N.; Wu, T. Y.; Raghunandan, M. E.; Ramanan, R. N. Utilization of plant-based natural coagulants as future alternatives towards sustainable water clarification. *Journal of Environmental Sciences* **2014**, *26*, 2178. [CrossRef] [PubMed]
- ¹¹ Oladoja, N. A. Headway on natural polymeric coagulants in water and wastewater treatment operations. *Journal of Water Process Engineering*, **2015**, *6*, 174. [CrossRef]
- ¹² Lee, C. S.; Robinson, J.; Chong, M. F. A review on application of flocculants in wastewater treatment. *Process Safety and Environmental Protection* **2014**, *92*, 489. [CrossRef]
- ¹³ Howe, K. J.; Hand, D. W.; Crittenden, J. C.; Trussell, R. R.; Tchobanoglous, G. *Princípios de Tratamento de Água*, Cengage Learning: São Paulo, 2016.
- ¹⁴ Singh, R. P.; Karmakar, G. P.; Rath, S. K.; Karmakar, N. C.; Pandey, S. R.; Tripathy, T.; Panda, J.; Kanan, K.; Jain, S. K.; Lan, N. T. Biodegradable drag reducing agents and flocculants based on polysaccharides: materials and applications. *Polymer Engineering & Science* **2000**, *40*, 46. [Link]
- ¹⁵ Oladoja, N. A.; Saliu, T. D.; Ololade, I. A.; Anthony, E. T.; Bello, G. A. A new indigenous green option for turbidity removal from aqueous system. *Separation and Purification Technology* **2017**, *186*, 166. [CrossRef]
- ¹⁶ Driscoll, C. T.; Letterman, R. D. Chemistry and fate of Al(III) in treated drinking water. *Journal of Environmental Engineering* **1988**, *114*, 21. [Link]
- ¹⁷ Banks, W.A.; Niehoff, M.L.; Drago, D.; Zatta, P. Aluminum complexing enhances amyloid β protein penetration of blood-brain barrier. *Brain Research* **2006**, *1116*, 215. [CrossRef] [PubMed]
- ¹⁸ Polizzi, S.; Pira, E.; Ferrara, M.; Bugiani, M.; Papaleo, A.; Albera, R.; Palmi, S. Neurotoxic effects of aluminium among foundry workers and Alzheimer's disease. *Neurotoxicology* **2002**, *23*, 761. [CrossRef] [PubMed]
- ¹⁹ Walton, J.R. Aluminum's involvement in the progression of Alzheimer's disease.

- Journal of Alzheimer's Disease* **2013**, *35*, 7. [PubMed]
- ²⁰ Rosalino, M. R. R.; Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, 2011. [Link]
- ²¹ Gauthier, E.; Fortier, I.; Courchesne, F.; Pepin, P.; Mortimer, J.; Gauvreau, D. Aluminum forms in drinking water and risk of Alzheimer's disease. *Environmental Research* **2000**, *84*, 234. [CrossRef] [PubMed]
- ²² Rondeau, V.; Jacqmin-Gadda, H.; Commenges, D.; Helmer, C.; Dartigues, J. F. Aluminium and silica in drinking water and the risk of Alzheimer's disease or cognitive decline: findings from 15-year follow-up of the PAQUID cohort. *American Journal of Epidemiology* **2008**, *169*, 489. [CrossRef] [PubMed]
- ²³ Lima, G. J. de A.; Dissertação de Mestrado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2007. [Link]
- ²⁴ Criddle, J.; *A Review of the Mammalian and Aquatic Toxicity of Polyelectrolytes*. Water Research Center: London, 1990.
- ²⁵ Neri, V. C. de C.; Dissertação de Mestrado, Fundação Oswaldo Cruz, 2004. [Link]
- ²⁶ B, R. V.; M, A. M. R. Acrilamida en los alimentos. *Revista Chilena de Nutrición* **2007**, *34*. [CrossRef]
- ²⁷ Bolto, B.; Gregory, J. Organic polyelectrolytes in water treatment. *Water Research* **2007**, *41*, 2301. [CrossRef] [PubMed]
- ²⁸ Duan, J.; Gregory, J. Coagulation by hydrolysing metal salts. *Advances in Colloid & Interface Science* **2003**, *100*, 475.
- ²⁹ Pontius, F. W. Chitosan as a drinking water treatment coagulant. *American Journal of Civil Engineering* **2016**, *4*, 205. [CrossRef]
- ³⁰ American Water Works Association. *Operational control of coagulation and filtration process*. Manual of water supply practices, 3 ed., Denver, CO, 2011.
- ³¹ Richter, C. A.; Azevedo Neto, J. M. de. *Tratamento de Água: Tecnologia atualizada*. Blucher: São Paulo, 1991.
- ³² Matilainen, A.; Vepsäläinen, M.; Sillanpää, M. Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: A review. *Advances in Colloid and Interface Science* **2010**, *159*, 189. [CrossRef] [PubMed]
- ³³ Jacangelo, J. G.; Demarco, J.; Owen, D. M.; Randtke, S. J. Selected processes for removing NOM: An overview. *Journal American Water Works Association*, **1995**, *87*, 64.
- ³⁴ Kim, H. C.; Yu, M. J. Characterization of natural organic matter in conventional water treatment processes for selection of treatment processes focused on DBPs control. *Water Research* **2005**, *39*, 4779. [CrossRef] [PubMed]
- ³⁵ Hillebrand, F. J.; Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018. [Link]
- ³⁶ Azevedo, J. C. R.; Nozaki, J. Análise de fluorescência de substâncias húmicas extraídas da água, solo e sedimento da Lagoa dos Patos - MS. *Química Nova* **2008**, *31*, 1324. [CrossRef]
- ³⁷ Mills, G. L.; Quinn, J. G. Isolation of dissolved organic matter and copper-organic complexes from estuarine waters using reverse-phase liquid chromatography. *Marine Chemistry* **1981**, *10*, 93. [CrossRef]
- ³⁸ Piccolo, A.; Conte, P.; Trivellone, E.; Lagen, B. V.; Buurman, P. Reduced heterogeneity of a lignite humic acid by preparative HPSEC following interaction with an organic acid. Characterization of size-separates by Pyr-GC-MS and ¹H-NMR spectroscopy. *Environmental Science & Technology* **2002**, *36*, 76. [CrossRef]
- ³⁹ Chang, E. E.; Chiang, P. C.; Lin, T. F. Development of surrogate organic contaminant parameters for source water quality standards in Taiwan, ROC. *Chemosphere* **1998**, *37*, 596. [CrossRef]
- ⁴⁰ Standard Methods Committee. Disponível em: <http://edgeanalytical.com/wp-content/uploads/Inorganic_SM5910.pdf>. Acesso em: 25 janeiro 2018.
- ⁴¹ Leenheer, J. A.; Croué, J. P. Aquatic organic matter. *Environmental Science & Technology* **2003**, *1*, 19. [Link]
- ⁴² Gregor, J. E.; Fenton, E.; Brokenshire, G.; Van Den Brink, P.; O'sullivan, B. Interactions of calcium and aluminium ions with alginate. *Water Research* **1996**, *30*, 1319. [CrossRef]
- ⁴³ Pacini, V. A.; Ingallinella, A. M.; Sanguinetti, G. Removal of iron and manganese using biological roughing up flow filtration

- technology. *Water Research* **2005**, *39*, 4463. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- ⁴⁴ Ellis, D.; Bouchard, C.; Lantagne, G. Removal of iron and manganese from groundwater by oxidation and microfiltration. *Desalination* **2000**, *130*, 255. [[CrossRef](#)].
- ⁴⁵ Chaturvedi, S.; Dave, P. N. Removal of iron for safe drinking water. *Desalination* **2012**, *303*, 1. [[CrossRef](#)]
- ⁴⁶ Gregor, J. E.; Nokes, C. J.; Fenton, E. Optimising natural organic matter removal from low turbidity waters by controlled pH adjustment of aluminium coagulation. *Water Research* **1997**, *31*, 2949. [[CrossRef](#)]
- ⁴⁷ Hu, C.; Liu, H.; Qu, J.; Wang, D.; Ru, J. Coagulation behavior of aluminum salts in eutrophic water: significance of Al₁₃ species and pH control. *Environmental Science & Technology* **2005**, *40*, 325. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- ⁴⁸ Gregory, D.; Carlson, K. Relationship of pH and floc formation kinetics to granular media filtration performance. *Environmental Science & Technology* **2003**, *37*, 1398. [[CrossRef](#)]
- ⁴⁹ Kurita, K. Chitin and Chitosan: Functional biopolymers from marine crustaceans. *Marine Biotechnology* **2006**, *8*, 203. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- ⁵⁰ Rinaudo, M. Chitin and chitosan: Properties and applications. *Progress in Polymer Science* **2006**, *31*, 603. [[CrossRef](#)]
- ⁵¹ Laranjeira, M. C. M.; Fávere, V. T. de. Quitosana: biopolímero funcional com potencial industrial biomédico. *Química Nova* **2009**, *32*, 672. [[CrossRef](#)]
- ⁵² Renault, F.; Sancey, B.; Badot, P. -M.; Crini, G. Chitosan for coagulation/flocculation processes – An eco-friendly approach. *European Polymer Journal* **2009**, *45*, 1337. [[CrossRef](#)]
- ⁵³ Roussy, J.; Van Vooren, M.; Dempsey, B. A.; Guibal, E. Influence of chitosan characteristics on the coagulation and the flocculation of bentonite suspensions. *Water Research* **2005**, *39*, 3247. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- ⁵⁴ Yang, R.; Li, H.; Huang, M.; Yang, H.; Li, A. A review on chitosan-based flocculants and their applications in water treatment. *Water Research* **2016**, *95*, 59. [[CrossRef](#)]
- ⁵⁵ Guibal, E.; Van Vooren, M.; Dempsey, B. A.; Roussy, J. A review of the use of chitosan for the removal of particulate and dissolved contaminants. *Separation Science and Technology* **2006**, *11*, 2487. [[CrossRef](#)]
- ⁵⁶ Sorlier, P.; Denuziere, A.; Viton, C.; Domard, A. Relation between the degree of acetylation and the electrostatic properties of chitin and chitosan. *Biomacromolecules* **2001**, *2*, 765. [[Link](#)] [[PubMed](#)]
- ⁵⁷ Fávere, V. T. de.; *Tese de Doutorado*, Universidade Federal de Santa Catarina, 1994. [[Link](#)]
- ⁵⁸ Hu, C. Y.; Lo, S. L.; Chang, C. L.; Chen, F. L.; Wu, Y. D.; Ma, J. L. Treatment of highly turbid water using chitosan and aluminum salts. *Separation and Purification Technology* **2013**, *104*, 322. [[CrossRef](#)]
- ⁵⁹ Divakaran, R.; Pillai, V. N. S. Flocculation of river silt using chitosan. *Water Research* **2002**, *36*, 2414. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- ⁶⁰ Zemmouri, H.; Drouiche, M.; Sayeh, A.; Lounici, H.; Mameri, N. Chitosan application for treatment of Beni-Amrane's water Dam. *Energy Procedia* **2013**, *36*, 558. [[CrossRef](#)]
- ⁶¹ Altaher, H. The use of chitosan as a coagulant in the pre-treatment of turbid sea water. *Journal of Hazardous Materials* **2012**, *233-234*, 97. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- ⁶² Ng, M.; Liana, A. E.; Liu, S.; Lim, M.; Chow, C. W. K.; Wang, D.; Drikas, M.; Amal, R. Preparation and characterisation of new-polyaluminum chloride-chitosan composite coagulant. *Water Research* **2012**, *46*, 4614. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- ⁶³ Gassara, F.; Antzak, C.; Ajila, C. M.; Sarma, S. J.; Brar, S. K.; Verma, M. Chitin and chitosan as natural flocculants for beer clarification. *Journal of Food Engineering* **2015**, *166*, 80. [[CrossRef](#)]
- ⁶⁴ Guibal, E.; Roussy, J. Coagulation and flocculation of dye-containing solutions using a biopolymer (Chitosan). *Reactive and Functional Polymers* **2007**, *67*, 33. [[CrossRef](#)]
- ⁶⁵ Nicu, R.; Bobu, E.; Miranda, R.; Blanco, A. Flocculation efficiency of chitosan for papermaking applications. *BioResource* **2013**, *8*, 768. [[Link](#)]

- ⁶⁶ Ahmad, A. L.; Sumathi, S.; Hameed, B. H. Coagulation of residue oil and suspended solid in palm oil mill effluent by chitosan, alum and PAC. *Chemical Engineering Journal* **2006**, *118*, 99. [CrossRef]
- ⁶⁷ Chi, F. H.; Cheng, W. P. Use of Chitosan as coagulant to treat wastewater from milk processing plant. *Journal of Polymers and the Environment* **2006**, *14*, 411. [CrossRef]
- ⁶⁸ Li, S. X.; Lian, Y. Q.; Mai, J. F.; Tan, J. X.; Hu, S. J.; Xia, W. Q.; Duan, W. W. Removal of hexavalent chromium and turbidity in drinking water by chitosan. *Advanced Materials Research* **2012**, *433*, 793. [Link]
- ⁶⁹ Silva, H. S. R. C.; Santos, K. S. C. R. dos.; Ferreira, E. I. Quitosana: derivados hidrossolúveis, aplicações farmacêuticas e avanços. *Química Nova* **2006**, *29*, 776. [Link]
- ⁷⁰ Muzzarelli, R. A. A.; Muzzarelli, C. Chitosan Chemistry: Relevance to the biomedical sciences. *Advances in Polymer Science* **2005**, *186*, 151. [CrossRef]
- ⁷¹ Katayon, S.; Noor, M. J. M. M.; Asma, M.; Ghani, L. A. A.; Thamer, A. M.; Azni, I. Effects of storage conditions of *Moringa oleifera* seeds on its performance in coagulation. *Bioresource Technology* **2006**, *97*, 1455. [CrossRef] [PubMed]
- ⁷² Bhatia, S.; Othman, Z.; Ahmad, A. L. Pretreatment of palm oil mill effluent (POME) using *Moringa oleifera* seeds as natural coagulant. *Journal of Hazardous Materials* **2007**, *145*, 120. [CrossRef] [PubMed]
- ⁷³ Jahn, S. A. A. Using Moringa seeds as coagulants in developing countries. *Journal American Water Works Association* **1988**, *80*, 43.
- ⁷⁴ Nwaiwu, N. E.; Zalkiful, M. A.; Raufu, I. A. Seeking an alternative antibacterial and coagulation agent for household water treatment. *Journal of Applied Phytotechnology in Environmental Sanitation* **2012**, *1*, 1.
- ⁷⁵ Pinto, N. de O.; Hermes, L. C. Sistema simplificado para melhoria da qualidade da água consumida nas comunidades rurais do Semiárido do Brasil. Disponível em <http://www.cnpma.embrapa.br/download/documentos_53.pdf>. Acesso em: 20 dezembro 2017.
- ⁷⁶ Franco, C. S.; Batista, M. D. A.; Oliveira, L. F. C. de.; Kohn, G. P.; Fia, R. Coagulação com semente de *Moringa oleifera* preparada por diferentes métodos em águas com turbidez de 20 a 100 UNT. *Engenharia Sanitária e Ambiental* **2017**, *22*, 781. [CrossRef]
- ⁷⁷ Ndabigengesere, A.; Narasiah, K. S.; Talbot, B. G. Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using *Moringa oleifera*. *Water Research* **1995**, *29*, 703. [CrossRef]
- ⁷⁸ Gassenschmidt, U.; Jany, K. D.; Tauscher, B.; Niebergall, H. Isolation and characterization of a flocculating protein from *Moringa oleifera* Lam. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects*, **1995** *1243*, 477. [CrossRef]
- ⁷⁹ Dezfooli, S. M.; Uversky, V. N.; Saleem, M.; Baharudin, F. S.; Hitam, S. M. S.; Bachmann, R. T. A simplified method for the purification of an intrinsically disordered coagulant protein from defatted *Moringa oleifera* seeds. *Process Biochemistry* **2016**, *51*, 1085. [CrossRef]
- ⁸⁰ Agrawal, H.; Shee, C.; Sharma, A. K. Isolation of a 66 kDa protein with coagulation activity from seeds of *Moringa oleifera*. *Journal of Agriculture and Biological Sciences* **2007**, *3*, 418. [Link]
- ⁸¹ Ghebremichael, K. A.; Gunaratna, K. R.; Henriksson, H.; Brumer, H.; Dalhammar, G. A simple purification and activity assay of the coagulant protein from *Moringa oleifera* seed. *Water Research* **2005**, *39*, 2338. [CrossRef] [PubMed]
- ⁸² Lo Monaco, P. A. V.; Matos, A. T. de.; Ribeiro, I. C. A.; Nascimento, F. da S.; Sarmiento, A. P. Use of extract of moringa seeds as coagulant agent in treatment of water supply and wastewater (Portuguese). *Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science* **2010**, *5*, 222. [CrossRef]
- ⁸³ Camacho, F. P.; Sousa, V. S.; Bergamasco, R.; Teixeira, M. R. The use of *Moringa oleifera* as a natural coagulant in surface water treatment. *Chemical Engineering Journal* **2017**, *313*, 226. [CrossRef]
- ⁸⁴ Sengupta, M. E.; Keraita, B.; Olsen, A.; Boateng, O. K.; Thamsborg, S. M.; Pálsdóttir, G. R.; Dalsgaard, A. Use of *Moringa oleifera*

- seed extracts to reduce helminth egg numbers and turbidity in irrigation water. *Water Research* **2012**, *46*, 3646. [CrossRef] [PubMed]
- ⁸⁵ Pereira, D. F.; Araújo, N. A.; Santos, T. M.; Santana, C. R.; Silva, G. F. da. Aproveitamento da torta da *Moringa oleifera* Lam para tratamento de água produzida. *Exacta* **2011**, *9*, 323. [CrossRef]
- ⁸⁶ Frighetto, R. T. S.; Frighetto, N.; Schneider, R. P.; Lima, P. C. F. O Potencial da Espécie *Moringa oleifera* (Moringaceae). I. A planta como fonte de coagulante natural no saneamento de águas e como suplemento alimentar. *Revista Fitos* **2013**, *3*, 78. [Link]
- ⁸⁷ Arcila, H. R.; Peralta, J. J. Agentes naturales como alternativa para el tratamiento del agua. *Revista Facultad de Ciencias Básicas* **2016**, *11*, 136. [CrossRef]
- ⁸⁸ Mangrich, A. S.; Doumer, M. E.; Mallmann, A. S.; Wolf, C. R. Green chemistry in water treatment: use of coagulant derived from *Acacia mearnsii* tannin extracts. *Revista Virtual de Química* **2014**, *6*, 2. [CrossRef]
- ⁸⁹ Vieira, A. M.; Kachba, Y. R.; Franco, M. L. R. de S.; Oliveira, K. F. de.; Godoy, L. C. de.; Gasparino, E. Curtimento de peles de peixe com taninos vegetal e sintético. *Acta Scientiarum: Animal Sciences* **2008**, *30*, 359. [CrossRef]
- ⁹⁰ Coral, L. A.; Bergamasco, R.; Bassetti, F. J. Estudo da viabilidade de utilização do polímero natural (TANFLOC) em substituição ao sulfato de alumínio no tratamento de águas para consumo. Disponível em <<http://www.advancesincleanerproduction.net/second/files/sessoes/4a/4/F.%20J.%20Bassetti%20-%20Resumo%20Exp.pdf>>. Acesso em: 25 dezembro 2017.
- ⁹¹ Nakano, F. de P.; Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2016. [Link]
- ⁹² Graham, N.; Gang, F.; Fowler, G.; Watts, M. Characterisation and coagulation performance of a tannin-based cationic polymer: A preliminary assessment. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* **2008**, *327*, 9. [CrossRef]
- ⁹³ Sánchez-Martín, J.; González-Velasco, M.; Beltrán-Heredia, J. Surface water treatment with tannin-based coagulants from Quebracho (*Schinopsis balansae*). *Chemical Engineering Journal* **2010**, *165*, 851. [CrossRef]
- ⁹⁴ Gallardo, M. A. B.; *Monografia de Graduação*, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, 2017.
- ⁹⁵ Silva, T. S. S. da.; *Dissertação de Mestrado*, Escola Nacional de Saúde Pública, Fundação Oswaldo Cruz, 1999. [Link]
- ⁹⁶ Sánchez-Martín, J.; Beltrán-Heredia, J.; Solera-Hernández, C. Surface water and wastewater treatment using a new tannin-based coagulant. Pilot plant trials. *Journal of Environmental Management* **2010**, *91*, 2051. [CrossRef] [PubMed]
- ⁹⁷ Díaz, A.; Rincon, N.; Escorihuela, A.; Fernandez, N.; Chacin, E.; Forster, C. F. A preliminary evaluation of turbidity removal by natural coagulants indigenous to Venezuela. *Process Biochemistry* **1999**, *35*, 391. [CrossRef]
- ⁹⁸ Rebah, F. B.; Siddeeg, S. M. Cactus an eco-friendly material for wastewater treatment: A review. *Journal of Materials and Environmental Sciences* **2017**, *8*, 1770. [Link]
- ⁹⁹ Zhang, J.; Zhang, F.; Luo, Y.; Yang, H. A preliminary study on cactus as coagulant in water treatment. *Process Biochemistry* **2006**, *41*, 730. [CrossRef]
- ¹⁰⁰ Belbahloul, M.; Zouhri, A.; Anouar, A. Biofloculants extraction from cactaceae and their application in treatment of water and wastewater. *Journal of Water Process Engineering* **2015**, *7*, 306. [CrossRef]
- ¹⁰¹ Garcia-Cruz, C. H.; Foggetti, U.; Silva, A. N. da. Alginato bacteriano: aspectos tecnológicos, características e produção. *Química Nova* **2008**, *31*, 1800. [CrossRef]
- ¹⁰² Devrimci, H.; Yuksel, A. M.; Sanin, F. D. Algal alginate: A potential coagulant for drinking water treatment. *Desalination* **2012**, *299*, 16. [CrossRef]
- ¹⁰³ Bixler, H. J.; Porse, H. A decade of change in the seaweed hydrocolloids industry. *Journal of Applied Phycology* **2010**, *23*, 321. [CrossRef]
- ¹⁰⁴ Openshaw, K. A review of *Jatropha curcas*. *Biomass and Bioenergy* **2000**, *19*, 1. [CrossRef]

- ¹⁰⁵ Abidin, Z. Z.; Shamsudin, N. S. M.; Madehi, N.; Sobri, S. Optimisation of a method to extract the active coagulant agent from *Jatropha curcas* seeds for use in turbidity removal. *Industrial Crops and Products* **2013**, *41*, 319. [CrossRef]
- ¹⁰⁶ Virgens, I. O.; Castro, R. D. de.; Loureiro, M. B.; Fernandez, L. G. *Jatropha curcas* L.: aspectos morfofisiológicos e químicos. *Brazilian Journal of Food Technology* **2017**, *20*, 1. [CrossRef]
- ¹⁰⁷ Pritchard, M.; Mkandawire, T.; Edmondson, A.; O'Neill, J. G.; Kululanga, G. Potential of using plant extracts for purification of shallow well water in Malawi. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* **2009**, *34*, 13. [CrossRef]
- ¹⁰⁸ Heller, J. Physic Nut, *Jatropha curcas* L. Disponível em: <https://www.bioversityinternational.org/uploads/tx_news/Physic_nut_Jatropha_curcas_L_161.pdf>. Acesso em: 20 dezembro 2017.
- ¹⁰⁹ Souza, M. V. dos S.; Esteves, M. B. Composição mitogênica da *Jatropha curcas* e seus efeitos imunomoduladores. *Revista Diálogos & Ciência* **2017**, *2*, 67. [Link]
- ¹¹⁰ Santos, C. S.; Silva, S. M. da.; Lima, J. N. L. O.; Lima, H. C.; Parente, T. M.; Almeida, J. S. Espécies vegetais tóxicas da família Euphorbiaceae: uma análise sobre a distribuição e os casos de intoxicação registrados em Araguaína, TO. *Revista Desafios* **2017**, *4*, 95. [CrossRef]
- ¹¹¹ Gonçalves, S. B.; Mendonça, S.; Laviola, B. G. Substâncias tóxicas, alergênicas e antinutricionais presentes no pinhão-mansão e seus derivados e procedimentos adequados ao manuseio. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/736979/1/ct01.pdf>>. Acesso em 29 maio 2018.
- ¹¹² Fuentes, J. C.; Castro, V.; Jakupovic, J.; Murillo, R. Diterpenos e outros constituintes de *Croton hirtus* (Euphorbiaceae). *Jornal de Biologia Tropical* **2004**, *52*. [Link]
- ¹¹³ Rodrigues, D. A.; *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal de Viçosa, 2015. [Link]