

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**KARINA CARDOSO VALVERDE**

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE TRATAMENTO DE ÁGUA UTILIZANDO A  
ASSOCIAÇÃO DO COAGULANTE NATURAL *Moringa oleifera* LAM E  
COAGULANTES QUÍMICOS**

Maringá

2014

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE TRATAMENTO DE ÁGUA UTILIZANDO A  
ASSOCIAÇÃO DO COAGULANTE NATURAL *Moringa oleifera* LAM E  
COAGULANTES QUÍMICOS**

Karina Cardoso Valverde

Mestre em Engenharia Química, UEM, 2007.

Orientadoras:

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Rosângela Bergamasco

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Onélia Aparecida Andreo dos Santos

Tese de Doutorado apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Estadual de Maringá, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Química, área de Desenvolvimento de Processos (Linha de Pesquisa: Gestão, Controle e Preservação Ambiental).

Maringá

2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
(Biblioteca Central - UEM, Maringá, PR, Brasil)

V215a Valverde, Karina Cardoso  
Avaliação do processo de tratamento de água utilizando a associação do coagulante natural *Moringa oleifera* Lam e coagulantes químicos.-- Maringá, 2014.  
184 f. : color., figs., tabs.  
Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Rosângela Bergamasco.  
Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Onélia Aparecida Andreo dos Santos.  
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2014.  
1. Água potável - Tratamento. 2. *Moringa oleifera* Lam. 3. Coagulantes químicos. I. Bergamasco, Rosângela, orient. II. Santos, Onélia Aparecida Andreo dos, orient. III. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Química. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. IV. Título.

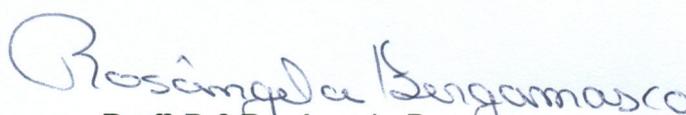
623.8542

MGC-001122

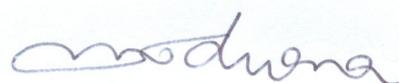
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

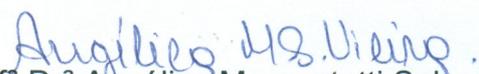
Esta é a versão final da Tese de Doutorado apresentada por Karina Cardoso Valverde perante a Comissão Julgadora do Curso de Doutorado em Engenharia Química em 06 de junho de 2014.

COMISSÃO JULGADORA

  
Profª Drª Rosângela Bergamasco  
Orientadora / Presidente

  
Profª Drª Lucila Adriani Coral  
Membro

  
Profª Drª Grasiela Scaramal Madrona  
Membro

  
Profª Drª Angélica Marquetotti Salcedo Vieira  
Membro

  
Drª Leticia Nishi  
Membro

## AGRADECIMENTOS

Ao meu querido marido Rodrigo, pelo apoio na decisão de iniciar o doutorado, pela paciência e capacidade de entender os inúmeros momentos de ausência no decorrer desse trabalho. Eu sei o quanto foi difícil ficar longe e esperar...

A toda a minha amada família, pela força e incentivo. Pai, tia Lê, Isa e vó Isolina, muito obrigada pela acolhida em suas casas. Meus dias foram muito mais fáceis e alegres com vocês por perto.

As minhas queridas orientadoras, professoras Rosângela e Onélia, pela orientação e atenção disponibilizada no decorrer do doutorado. Professora Rosângela, obrigada por ter me aceito novamente após 5 anos de término do mestrado, você sabe que foi fundamental para me ajudar a decidir pelo doutorado.

A minha grande amiga Priscila, pelos desabafos, pela realização de ensaios em conjunto, pela enorme ajuda prestada em vários momentos de dúvidas e dedicação em tentar solucionar os problemas surgidos no desenvolvimento desse trabalho.

Ao pessoal do laboratório: Pri, Le Nishi, Milene, Tássia, Aline, Fran, Livia, Marcela, Flavinha, Letícia, Carole, Cynthia, Simone, Mari, Natália e Driano, pelas conversas do dia-a-dia, risadas, trabalhos em equipe, colaboração e auxílio prestado sempre que necessário.

Aos alunos de iniciação científica, Gabriela, Noelle, Flávia e Rodrigo, pela ajuda na parte experimental, quando solicitado.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Química (DEQ) e Programa de Pós-graduação (PEQ).

Ao Professor Gabriel, da Universidade Federal do Sergipe (UFS), por gentilmente ceder as sementes de *M. oleifera* utilizadas nesse trabalho.

A Sanepar de Maringá, pelas amostras de água bruta fornecidas. Especialmente ao Arcioni, pelo seu interesse em sempre colaborar.

A CAPES, pela bolsa de estudo concedida durante a realização do doutorado.

Enfim, a todos que de algum modo contribuíram para a realização desse trabalho.

# **AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE TRATAMENTO DE ÁGUA UTILIZANDO A ASSOCIAÇÃO DO COAGULANTE NATURAL *Moringa oleifera* LAM E COAGULANTES QUÍMICOS**

**AUTORA: KARINA CARDOSO VALVERDE**

**ORIENTADORAS:**

**PROF<sup>a</sup>. DR<sup>a</sup>. ROSÂNGELA BERGAMASCO**

**PROF<sup>a</sup>. DR<sup>a</sup>. ONÉLIA APARECIDA ANDREO DOS SANTOS**

Tese de Doutorado; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química; Universidade Estadual de Maringá; Av. Colombo, 5790, BL E46 – 09; CEP: 87020-900 – Maringá – PR, Brasil, defendida em 06/06/2014. 164 p.

## **RESUMO**

A utilização de coagulantes naturais, tais como a *Moringa oleifera* Lam tem sido amplamente estudada com a finalidade de produzir água tratada de melhor qualidade, além de diminuir a utilização de produtos químicos no processo. Assim, este trabalho tem como objetivo avaliar o processo de coagulação/floculação, sedimentação e filtração utilizando a associação dos coagulantes natural e químico: *M. oleifera* e cloreto férrico, *M. oleifera* e policloreto de alumínio (PAC), e *M. oleifera* e sulfato de alumínio. Nos ensaios, a água de estudo utilizada era proveniente da Bacia do Rio Pirapó, Maringá, PR, com turbidez inicial em torno de 70 UNT. Primeiramente, foram realizados ensaios a fim de avaliar os diferentes métodos de preparo do coagulante natural obtido a partir das sementes de *M. oleifera*. Após, foi avaliado o tempo de degradação do coagulante *M. oleifera* em pó integral. Em relação à associação dos coagulantes, foi realizado o estudo da otimização das condições de operação na etapa de coagulação/floculação e sedimentação, tais como: velocidades e tempos de mistura e sedimentação. A fim de construir os diagramas de coagulação, variou-se o pH de coagulação e a dosagem da solução padrão dos coagulantes natural e químicos. A etapa de filtração rápida descendente, com a utilização de um filtro de camada dupla (areia e antracito) foi estudada a fim de avaliar se é possível obter água potável. De um modo geral, pode-se considerar que o

pó integral das sementes de *M. oleifera* é um propício coagulante natural e na associação dos coagulantes, contribuiu significativamente para a redução da quantidade de coagulantes químicos aplicados ao processo. Verificou-se também que os parâmetros de mistura afetam a eficiência de remoção dos parâmetros de qualidade. Pode-se verificar que os resultados obtidos para a caracterização físico, química e microbiológica da água tratada foram bastante expressivos e condizem com os valores solicitados pela legislação (Portaria nº. 2914 do Ministério da Saúde), inclusive para o parâmetro trihalometanos. A associação dos coagulantes *M. oleifera* e PAC apresentou melhores resultados em termos de valores residuais de cor aparente, turbidez, compostos com absorção em UV<sub>254nm</sub> e COD, em comparação com as demais associações estudadas, o que está relacionado ao tamanho das partículas formadas e ao potencial zeta. É pertinente citar que a utilização de 80% de *M. oleifera* com 20% de coagulante químico (cloreto férrico, PAC, ou sulfato de alumínio) são indicadas para a obtenção de água potável, nas condições de operação estudadas, sendo obtidas eficiências de remoção em torno de 99% para cor aparente, 96% para turbidez e 89% para compostos com absorção em UV<sub>254nm</sub>. Contudo, a etapa de desinfecção deve ser acrescentada ao processo, a fim de garantir a ausência de microrganismos. Conclui-se, então, que a utilização da *M. oleifera* como coagulante associada ao cloreto férrico, PAC ou sulfato de alumínio, nas condições ótimas do processo de coagulação/floculação, sedimentação e filtração, garantem a eficiência de remoção dos parâmetros de qualidade da água, assim como a possibilidade de produção de água com o devido padrão de potabilidade exigido pela legislação.

**Palavras-chave:** *Moringa oleifera* Lam; Coagulantes químicos; Tratamento convencional de água.

# **EVALUATION OF WATER TREATMENT PROCESS USING A ASSOCIATION OF NATURAL COAGULANT *Moringa oleifera* LAM AND CHEMICALS COAGULANTS**

**AUTHOR: KARINA CARDOSO VALVERDE**

**SUPERVISORS:**

**PROF<sup>a</sup>. DR<sup>a</sup>. ROSÂNGELA BERGAMASCO**

**PROF<sup>a</sup>. DR<sup>a</sup>. ONÉLIA APARECIDA ANDREO DOS SANTOS**

Doctorate Thesis; Chemical Engineering Post-Graduate Program; State University of Maringá; 5790, Colombo Avenue, BL E46-09; ZIPE COD: 87020-900 – Maringá – PR, Brazil, presented on 6<sup>th</sup> June, 2014. 164 p.

## **ABSTRACT**

The use of natural coagulants, such as *Moringa oleifera* Lam (*M. oleifera*) has been largely studied in order to produce a better quality of treated water, also reduce the use of chemical coagulants in the process. This study purpose to evaluate the process of coagulation/flocculation, sedimentation and filtration using the association of natural and chemical coagulants: *M. oleifera* and ferric chloride, *M. oleifera* and aluminum polychloride (PAC), and *M. oleifera* and aluminum sulphate. In the tests it was used raw water provides from the Pirapó River basin, Maringá, PR, with an initial turbidity of about 70 NTU. Firstly, tests were conducted to evaluate the different methods of preparation of natural coagulant obtained from the *M. oleifera* seeds. After this, it was evaluated the degradation time of *M. oleifera* coagulant whole powder. Regarding the association of coagulants, the study of the optimization of operating conditions was performed in terms of coagulation/flocculation and sedimentation, such as: speed and mixing times and sedimentation. In order to build the coagulation diagrams, the pH ranged from clotting and the dosage of standard solution of natural and chemical coagulants. The descending fast filtration step using a double layer filter sand and anthracite were studied to evaluate the possibility to obtain potable water. In generally, it can be considerate that the whole powder seeds of *M. oleifera* is a suitable natural coagulant and coagulant association, contributing significantly to reduce the quantity of

chemical coagulants applied to the process. It has been observed that the mixing parameters affect the removal efficiency of the quality parameters. It has been found that the results obtained for the physical, chemical and microbiological characteristics of treated water were quite significant and consistent with the values required by the legislation (Ordinance n°. 2914 of the Ministry of Health), including the trihalomethanes parameter. The association of *M. oleifera* coagulant and PAC showed better results in terms of residual values of apparent color, turbidity, compounds with absorption at UV<sub>254nm</sub> and dissolved organic carbon in comparison with other associations studied, which is related to the size of the particles formed and zeta potential. It is pertinent to mention that the use of 80% of *M. oleifera* with 20% chemical coagulant (ferric chloride, PAC or aluminum sulphate) are suitable for the production of drinking water, the operating conditions studied efficiencies obtained with removing around 99% for apparent color, 96% for turbidity and 89% for compounds with absorption at UV<sub>254nm</sub>. However, the disinfection step should be added to the process to ensure the absence of microorganisms. It can be concluded that the use of *M. oleifera* as coagulant associated with ferric chloride, PAC or aluminum sulphate, in optimal conditions of the coagulation/flocculation, sedimentation and filtration process ensures removal efficiency of water quality parameters as well as the possibility of producing water with potability standards required by legislation.

**Keywords:** *Moringa oleifera* Lam; Chemical coagulants; Conventional water treatment.

## SUMÁRIO

SEÇÃO	PÁGINA
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>20</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>22</b>
<b>2.1 OBJETIVO GERAL</b> .....	<b>22</b>
<b>2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	<b>22</b>
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>23</b>
<b>3.1 ÁGUA E SUA QUALIDADE PARA O ABASTECIMENTO</b> .....	<b>23</b>
<b>3.2 TRATAMENTO CONVENCIONAL DE ÁGUA</b> .....	<b>25</b>
<b>3.2.1 Indicadores de Qualidade da Água e a Influência na Eficiência do Tratamento</b> .....	<b>26</b>
3.2.1.1 Características físicas da água .....	26
3.2.1.1.1 <i>Cor</i> .....	26
3.2.1.1.2 <i>Turbidez</i> .....	27
3.2.1.1.3 <i>Temperatura</i> .....	28
3.2.1.1.4 <i>Sólidos</i> .....	28
3.2.1.2 Características químicas da água .....	29
3.2.1.2.1 <i>Compostos orgânicos</i> .....	29
3.2.1.2.2 <i>pH – Potencial hidrogeniônico</i> .....	30
3.2.1.2.3 <i>Alcalinidade e acidez</i> .....	31
3.2.1.2.4 <i>Dureza total</i> .....	31
3.2.1.3 Características microbiológicas da água .....	32
<b>3.2.2 Coagulação/Floculação</b> .....	<b>32</b>
3.2.2.1 Coagulantes .....	36
3.2.2.1.1 <i>Coagulantes químicos</i> .....	36
3.2.2.1.2 <i>Coagulantes naturais</i> .....	40
<b>3.2.3 Sedimentação</b> .....	<b>45</b>
<b>3.2.4 Filtração</b> .....	<b>46</b>
<b>3.3 TRATAMENTO DE ÁGUA COM <i>M. oleifera</i></b> .....	<b>49</b>
<b>3.3.1 Mecanismo de Coagulação com <i>M. oleifera</i></b> .....	<b>52</b>
<b>3.3.2 Vantagens da Utilização da <i>M. oleifera</i> como Coagulante Natural no Tratamento de Água</b> .....	<b>54</b>

<b>3.4 DIAGRAMAS DE COAGULAÇÃO .....</b>	<b>55</b>
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>58</b>
<b>4.1 COLETA E CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA DE ESTUDO .....</b>	<b>60</b>
<b>4.2 ENSAIOS DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO E SEDIMENTAÇÃO .....</b>	<b>62</b>
<b>4.3 MÉTODOS DE PREPARO PARA OBTENÇÃO DO COAGULANTE NATURAL A PARTIR DAS SEMENTES DE <i>M. oleifera</i> .....</b>	<b>63</b>
<b>4.3.1 Preparo do Coagulante <i>M. oleifera</i> em Pó Integral .....</b>	<b>65</b>
<b>4.3.2 Preparo do Coagulante <i>M. oleifera</i> em Pó Desengordurado .....</b>	<b>66</b>
<b>4.3.3 Preparo do Coagulante <i>M. oleifera</i> em Solução .....</b>	<b>66</b>
<b>4.3.4 Condições de Operação do Processo .....</b>	<b>67</b>
<b>4.4 PREPARO DOS COAGULANTES QUÍMICOS .....</b>	<b>67</b>
<b>4.4.1 Preparo da Solução Padrão de Cloreto Férrico .....</b>	<b>68</b>
<b>4.4.2 Preparo da Solução Padrão de PAC .....</b>	<b>68</b>
<b>4.4.3 Preparo da Solução Padrão de Sulfato de Alumínio .....</b>	<b>68</b>
<b>4.5 TEMPO DE DEGRADAÇÃO DO COAGULANTE <i>M. oleifera</i> EM PÓ INTEGRAL.....</b>	<b>68</b>
<b>4.6 ENSAIOS PRELIMINARES PARA A OTIMIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO NA ETAPA DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO E SEDIMENTAÇÃO .....</b>	<b>69</b>
<b>4.7 DIAGRAMAS DE COAGULAÇÃO .....</b>	<b>70</b>
<b>4.8 DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES ÓTIMAS DO PROCESSO DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO E SEDIMENTAÇÃO A PARTIR DOS DIAGRAMAS DE COAGULAÇÃO .....</b>	<b>73</b>
<b>4.9 ETAPA DE FILTRAÇÃO .....</b>	<b>73</b>
<b>4.9.1 Análises Realizadas Após a Etapa de Filtração .....</b>	<b>76</b>
<b>4.9.1.1 Trihalometanos totais .....</b>	<b>76</b>
<b>4.9.1.2 Tamanho das partículas e potencial zeta .....</b>	<b>77</b>
<b>4.10 ENSAIOS COMPLEMENTARES .....</b>	<b>77</b>
<b>4.11 ANÁLISE ESTATÍSTICA .....</b>	<b>78</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>79</b>
<b>5.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA DE ESTUDO .....</b>	<b>79</b>
<b>5.2 ENSAIOS DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO E SEDIMENTAÇÃO REALIZADOS NA ETAPA DE AVALIAÇÃO DOS DIFERENTES MÉTODOS DE PREPARO DO COAGULANTE <i>M. oleifera</i> .....</b>	<b>80</b>
<b>5.3 ESTUDO DO TEMPO DE DEGRADAÇÃO DO COAGULANTE <i>M. oleifera</i> EM PÓ INTEGRAL .....</b>	<b>88</b>

<b>5.4 ENSAIOS DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO E SEDIMENTAÇÃO REALIZADOS NA ETAPA DE OTIMIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DOS PARÂMETROS DE MISTURA E SEDIMENTAÇÃO .</b>	<b>90</b>
<b>5.4.1 Otimização das Condições de Operação para a Associação dos Coagulantes <i>M. oleifera</i> e Cloreto Férrico .....</b>	<b>91</b>
<b>5.4.2 Otimização das Condições de Operação para a Associação dos Coagulantes <i>M. oleifera</i> e PAC .....</b>	<b>92</b>
<b>5.4.3 Otimização das Condições de Operação para a Associação dos Coagulantes <i>M. oleifera</i> e Sulfato de Alumínio .....</b>	<b>94</b>
<b>5.4.4 Condições de Operação Ótimas para a Associação dos Coagulantes ...</b>	<b>94</b>
<b>5.5 ENSAIOS DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO E SEDIMENTAÇÃO REALIZADOS PARA A CONSTRUÇÃO DOS DIAGRAMAS DE COAGULAÇÃO.....</b>	<b>95</b>
<b>5.5.1 Associação dos Coagulantes <i>M. oleifera</i> e Cloreto Férrico .....</b>	<b>96</b>
<b>5.5.2 Associação dos Coagulantes <i>M. oleifera</i> e PAC .....</b>	<b>98</b>
<b>5.5.3 Associação dos Coagulantes <i>M. oleifera</i> e Sulfato de Alumínio .....</b>	<b>101</b>
<b>5.6 DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES ÓTIMAS DO PROCESSO DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO E SEDIMENTAÇÃO .....</b>	<b>104</b>
<b>5.7 ENSAIOS DE FILTRAÇÃO .....</b>	<b>106</b>
<b>5.7.1 Tamanho das Partículas .....</b>	<b>112</b>
<b>5.7.2 Potencial Zeta .....</b>	<b>113</b>
<b>5.8 CONDIÇÕES OTIMIZADAS DO TRATAMENTO DE ÁGUA COM A ASSOCIAÇÃO DOS COAGULANTES .....</b>	<b>115</b>
<b>5.9 ENSAIOS COMPLEMENTARES .....</b>	<b>117</b>
<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>119</b>
<b>7 SUGESTÕES .....</b>	<b>122</b>
<b>8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>123</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>138</b>
<b>APÊNDICE A – Gradientes de velocidade .....</b>	<b>139</b>
<b>APÊNDICE B – Distribuição granulométrica do coagulante <i>M. oleifera</i> em pó</b>	<b>140</b>
<b>APÊNDICE C – Distribuição granulométrica dos materiais filtrantes .....</b>	<b>141</b>
<b>APÊNDICE D – Eficiências de remoção dos diferentes métodos de preparo do coagulante <i>M. oleifera</i> (Cor aparente) .....</b>	<b>142</b>
<b>APÊNDICE E – Eficiências de remoção dos diferentes métodos de preparo do coagulante <i>M. oleifera</i> (Turbidez) .....</b>	<b>145</b>

<b>APÊNDICE F</b> – Eficiências de remoção dos diferentes métodos de preparo do coagulante <i>M. oleifera</i> (Compostos com absorção em UV <sub>254nm</sub> ) .....	148
<b>APÊNDICE G</b> – Eficiências de remoção de cor aparente, turbidez e compostos com absorção em UV <sub>254nm</sub> para as condições de operação estudadas na etapa de coagulação/floculação e sedimentação ( <i>M. oleifera</i> e cloreto férrico) .....	151
<b>APÊNDICE H</b> – Figuras das eficiências de remoção para as condições de operação estudadas na etapa de coagulação/floculação e sedimentação ( <i>M. oleifera</i> e cloreto férrico) .....	154
<b>APÊNDICE I</b> – Valores residuais obtidos para as condições de operação estudadas ( <i>M. oleifera</i> e cloreto férrico) .....	155
<b>APÊNDICE J</b> – Eficiências de remoção de cor aparente, turbidez e compostos com absorção em UV <sub>254nm</sub> para as condições de operação estudadas na etapa de coagulação/floculação e sedimentação ( <i>M. oleifera</i> e PAC) .....	156
<b>APÊNDICE K</b> – Figuras das eficiências de remoção para as condições de operação estudadas na etapa de coagulação/floculação e sedimentação ( <i>M. oleifera</i> e PAC) .....	159
<b>APÊNDICE L</b> – Valores residuais obtidos para as condições de operação estudadas ( <i>M. oleifera</i> e PAC) .....	160
<b>APÊNDICE M</b> – Eficiências de remoção de cor aparente, turbidez e compostos com absorção em UV <sub>254nm</sub> para as condições de operação estudadas na etapa de coagulação/floculação e sedimentação ( <i>M. oleifera</i> e sulfato de alumínio) .....	161
<b>APÊNDICE N</b> – Figuras das eficiências de remoção para as condições de operação estudadas na etapa de coagulação/floculação e sedimentação ( <i>M. oleifera</i> e sulfato de alumínio) .....	164
<b>APÊNDICE O</b> – Valores residuais obtidos para as condições de operação estudadas ( <i>M. oleifera</i> e sulfato de alumínio) .....	165
<b>APÊNDICE P</b> – Eficiências de remoção obtidas para a construção dos diagramas de coagulação da associação dos coagulantes <i>M. oleifera</i> e cloreto férrico .....	166
<b>APÊNDICE Q</b> – Eficiências de remoção obtidas para a construção dos diagramas de coagulação da associação dos coagulantes <i>M. oleifera</i> e PAC .....	168
<b>APÊNDICE R</b> – Eficiências de remoção obtidas para a construção dos diagramas de coagulação da associação dos coagulantes <i>M. oleifera</i> e sulfato de alumínio .....	170
<b>APÊNDICE S</b> – Valores residuais e eficiências de remoção obtidos após a etapa de filtração para a associação dos coagulantes <i>M. oleifera</i> e cloreto férrico .....	172
<b>APÊNDICE T</b> – Valores residuais e eficiências de remoção obtidos após a etapa de filtração para a associação dos coagulantes <i>M. oleifera</i> e PAC .....	174
<b>APÊNDICE U</b> – Valores residuais e eficiências de remoção obtidos após a etapa de filtração para a associação dos coagulantes <i>M. oleifera</i> e sulfato de alumínio .....	176
<b>ANEXOS</b> .....	178

<b>ANEXO A</b> – Caracterização das sementes de <i>M. oleifera</i> .....	179
<b>ANEXO B</b> – Alcalinidade e acidez volátil .....	180
<b>ANEXO C</b> – Dureza total .....	181
<b>ANEXO D</b> – Sólidos suspensos totais, fixos e voláteis .....	182
<b>ANEXO E</b> – Sólidos totais, fixos e voláteis; Sólidos dissolvidos totais .....	183
<b>ANEXO F</b> – Curvas de calibração para trihalometanos .....	184

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	PÁGINA
Figura 1 – Representação do processo de coagulação/floculação e sedimentação	33
Figura 2 – Cloreto férrico .....	37
Figura 3 – PAC .....	38
Figura 4 – Sulfato de alumínio .....	39
Figura 5 – Árvore de <i>M. oleifera</i> .....	42
Figura 6 – Estrutura de glucosinolato presente nas sementes de <i>M. oleifera</i> .....	53
Figura 7 – Etapas do trabalho .....	58
Figura 8 – Local de coleta da água de estudo .....	60
Figura 9 – Equipamento <i>Jar Test</i> .....	62
Figura 10 – Fluxograma das etapas dos ensaios de coagulação/floculação e sedimentação .....	62
Figura 11 – Fluxograma para a avaliação dos diferentes métodos de preparo do coagulante <i>M. oleifera</i> .....	64
Figura 12 – Fluxograma dos diferentes tipos de coagulante natural: (A) Coagulante <i>M. oleifera</i> em pó; (B) Coagulante <i>M. oleifera</i> em solução .....	64
Figura 13 – <i>M. oleifera</i> (com casca, descascada e em pó integral) .....	65
Figura 14 – Fluxograma das etapas dos ensaios para a construção dos diagramas de coagulação .....	71
Figura 15 – Esquema da etapa de filtração rápida descendente .....	74
Figura 16 – Coluna de filtração .....	74
Figura 17 – Eficiências de remoção do parâmetro cor aparente para os métodos de preparo do coagulante <i>M. oleifera</i> nas formas $Po_{int}$ , $S_{int-sal}$ e $S_{des-sal}$ .....	84
Figura 18 – Eficiências de remoção do parâmetro turbidez para os métodos de preparo do coagulante <i>M. oleifera</i> nas formas $Po_{int}$ , $S_{int-sal}$ e $S_{des-sal}$ .....	86
Figura 19 – Eficiências de remoção do parâmetro compostos com absorção em $UV_{254nm}$ para os métodos de preparo do coagulante <i>M. oleifera</i> nas formas $Po_{int}$ , $S_{int-sal}$ e $S_{des-sal}$ .....	87
Figura 20 – Avaliação do tempo de degradação do coagulante <i>M. oleifera</i> em pó integral para o parâmetro cor aparente .....	89
Figura 21 – Avaliação do tempo de degradação do coagulante <i>M. oleifera</i> em pó integral para o parâmetro turbidez .....	89
Figura 22 – Avaliação do tempo de degradação do coagulante <i>M. oleifera</i> em pó integral para o parâmetro compostos com absorção em $UV_{254nm}$ .....	89
Figura 23 – Diagrama de coagulação para a associação dos coagulantes <i>M. oleifera</i> e cloreto férrico contendo curvas de remoção de cor aparente .....	96

Figura 24 – Diagrama de coagulação para a associação dos coagulantes <i>M. oleifera</i> e cloreto férrico contendo curvas de remoção de turbidez .....	97
Figura 25 – Diagrama de coagulação para a associação dos coagulantes <i>M. oleifera</i> e cloreto férrico contendo curvas de remoção de compostos com absorção em UV <sub>254nm</sub> .....	97
Figura 26 – Diagrama de coagulação para a associação dos coagulantes <i>M. oleifera</i> e PAC contendo curvas de remoção de cor aparente .....	99
Figura 27 – Diagrama de coagulação para a associação dos coagulantes <i>M. oleifera</i> e PAC contendo curvas de remoção de turbidez .....	99
Figura 28 – Diagrama de coagulação para a associação dos coagulantes <i>M. oleifera</i> e PAC contendo curvas de remoção de compostos com absorção em UV <sub>254nm</sub> .....	100
Figura 29 – Diagrama de coagulação para a associação dos coagulantes <i>M. oleifera</i> e sulfato de alumínio contendo curvas de remoção de cor aparente .....	102
Figura 30 – Diagrama de coagulação para a associação dos coagulantes <i>M. oleifera</i> e sulfato de alumínio contendo curvas de remoção de turbidez .....	102
Figura 31 – Diagrama de coagulação para a associação dos coagulantes <i>M. oleifera</i> e sulfato de alumínio contendo curvas de remoção de compostos com absorção em UV <sub>254nm</sub> .....	103
Figura 32 – Ensaio complementares de eficiência de remoção de cor aparente para os volumes da água de estudo de 400 mL e 700 mL .....	117
Figura 33 – Ensaio complementares de eficiência de remoção turbidez para os volumes da água de estudo de 400 mL e 700 mL .....	118
Figura 34 – Ensaio complementares de eficiência de remoção de compostos com absorção em UV <sub>254nm</sub> para os volumes da água de estudo de 400 mL e 700 mL .....	118

## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA	PÁGINA
Tabela 1 – Parâmetros de qualidade, seus respectivos métodos de análise e equipamentos .....	61
Tabela 2 – Conjunto de peneiras .....	66
Tabela 3 – Condições de operação para o processo de coagulação/ floculação e sedimentação com a <i>M. oleifera</i> e coagulantes químicos .....	69
Tabela 4 – Condições de operação para a associação dos coagulantes natural e químicos .....	70
Tabela 5 – Dosagem ótima dos coagulantes .....	70
Tabela 6 – Dosagem dos coagulantes na associação para a construção dos diagramas de coagulação .....	72
Tabela 7 – Condições de operação ótimas para a associação dos coagulantes .....	72
Tabela 8 – Caracterização da água de estudo .....	79
Tabela 9 – Eficiências de remoção dos parâmetros, para os diferentes métodos de preparo do coagulante <i>M. oleifera</i> na dosagem de 50 mg.L <sup>-1</sup> .....	81
Tabela 10 – Valores das eficiências de remoção para as melhores condições de operação na associação dos coagulantes <i>M. oleifera</i> e cloreto férrico .....	91
Tabela 11 – Valores das eficiências de remoção para as melhores condições de operação na associação dos coagulantes <i>M. oleifera</i> e PAC .....	93
Tabela 12 – Valores das eficiências de remoção para as melhores condições de operação na associação dos coagulantes <i>M. oleifera</i> e sulfato de alumínio .....	94
Tabela 13 – Valores das eficiências de remoção e residuais obtidos para as condições de operação ótimas na associação dos coagulantes .....	95
Tabela 14 – Pontos de estudo definidos para a associação dos coagulantes <i>M. oleifera</i> e cloreto férrico .....	105
Tabela 15 – Pontos de estudo definidos para a associação dos coagulantes <i>M. oleifera</i> e PAC .....	105
Tabela 16 – Pontos de estudo definidos para a associação dos coagulantes <i>M. oleifera</i> e sulfato de alumínio .....	106
Tabela 17 – Caracterização da água tratada, por meio da associação dos coagulantes <i>M. oleifera</i> e cloreto férrico, após a etapa de filtração .....	107
Tabela 18 – Caracterização da água tratada, por meio da associação dos coagulantes <i>M. oleifera</i> e PAC, após a etapa de filtração .....	108
Tabela 19 – Caracterização da água tratada, por meio da associação dos coagulantes <i>M. oleifera</i> e sulfato de alumínio, após a etapa de filtração .....	109
Tabela 20 – Tamanho das partículas .....	112
Tabela 21 – Potencial zeta .....	114

Tabela 22 – Eficiências de remoção após o processo de coagulação/floculação, sedimentação e filtração .....	115
Tabela 23 – Condições otimizadas do processo de coagulação/floculação, sedimentação e filtração .....	116

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

$\text{Al}^{3+}$  – cátion alumínio

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  – sulfato de alumínio

ANOVA – análise de variância

$\text{CaCO}_3$  – carbonato de cálcio

$\text{CH}_3\text{COOH}$  – ácido acético

$\text{Cl}^-$  – ânion cloreto

Co – cobalto

$\text{CO}_2$  – dióxido de carbono

COD – carbono orgânico dissolvido

COT – carbono orgânico total

d – dia

DIC – delineamento inteiramente casualizado

*E. coli* – *Escherichia coli*

EDTA – ácido etileno diamino tetracético

ETA(s) – Estação(ões) de Tratamento de Água

$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  – cloreto férrico

$G_{\text{ML}}$  – gradiente de mistura lenta

$G_{\text{MR}}$  – gradiente de mistura rápida

H – carga hidráulica

$\text{H}^+$  – cátion hidrogênio

$\text{H}_2\text{SO}_4$  – ácido sulfúrico

HCl – ácido clorídrico

kDa – kilodalton

L – espessura da camada filtrante de cada componente do filtro

M – concentração molar ou molaridade, unidade:  $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$

MON – matéria orgânica natural

mV – milivolts

N – concentração normal ou normalidade, unidade:  $\text{eq} \cdot \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  ou N (normal)

$\text{Na}^+$  – cátion sódio

NaCl – cloreto de sódio

NaOH – hidróxido de sódio

$\text{NH}_4\text{Cl}$  – cloreto de amônio

NH<sub>4</sub>OH – hidróxido de amônio

UNT – unidade nefelométrica de turbidez

P.A. – para análise

PAC – policloreto de alumínio

*Po<sub>int</sub>* – coagulante *M. oleifera* em pó integral

*Po<sub>int-32</sub>* – coagulante *M. oleifera* em pó integral Tyler 32

*Po<sub>int-48</sub>* – coagulante *M. oleifera* em pó integral Tyler 48

*Po<sub>des</sub>* – coagulante *M. oleifera* em pó desengordurado

*Po<sub>des-32</sub>* – coagulante *M. oleifera* em pó desengordurado Tyler 32

*Po<sub>des-48</sub>* – coagulante *M. oleifera* em pó desengordurado Tyler 48

Pt – platina

Q – taxa de filtração

SDT – sólidos dissolvidos totais

*S<sub>des-sal</sub>* – coagulante *M. oleifera* em solução desengordurada salina

*S<sub>int-aqu</sub>* – coagulante *M. oleifera* em solução integral aquosa

*S<sub>int-sal</sub>* – coagulante *M. oleifera* em solução integral salina

SF – sólidos fixos

SSF – sólidos suspensos fixos

SST – sólidos suspensos totais

SSV – sólidos suspensos voláteis

ST – sólidos totais

SV – sólidos voláteis

THM – trihalometanos

THMT – trihalometanos totais

T<sub>ML</sub> – tempo de mistura lenta

T<sub>MR</sub> – tempo de mistura rápida

T<sub>S</sub> – tempo de sedimentação

UFC – Unidade formadoras de colônias em 100 mL

uH – unidade Hazen: (mg Pt-Co).L<sup>-1</sup>

UV<sub>254nm</sub> – absorção por raios ultravioleta no comprimento de onda de 254nm

V<sub>ML</sub> – velocidade de mistura lenta

V<sub>MR</sub> – velocidade de mistura rápida

ε – porosidade

ρ – massa específica

## 1 INTRODUÇÃO

A água potável é um recurso vital para todos os seres humanos e sua disponibilidade é uma grande preocupação no mundo atual. Apesar de o Brasil possuir 12% do volume da água doce superficial do mundo, a disponibilidade da água não se resume apenas ao seu aspecto quantitativo. Os vários usos da água possuem requisitos de qualidade que, quando não atendidos, representam um fator limitante para o seu aproveitamento (ANA, 2012).

Uma água é dita potável somente quando é inofensiva à saúde do homem, agradável aos sentidos e adequada aos usos domésticos. Pequenas comunidades, áreas rurais e subúrbios, muitas vezes carecem de fontes adequadas de água, sendo importante então haver técnicas alternativas de tratamento na tentativa de minimizar ou resolver esse problema.

No processo de tratamento de água, o coagulante utilizado pode contribuir para um resultado mais eficiente em termos de remoção das impurezas presentes. Cada coagulante apresenta propriedades inerentes à sua classe (BORBA, 2001) e, dada a importância da etapa de coagulação, se tornam imprescindíveis estudos mais aprofundados sobre os diferentes tipos de coagulantes e sua influência na etapa de coagulação. Caso a coagulação não seja efetuada com êxito, as demais etapas estarão prejudicadas, a ponto de, em certas situações, ser necessário o descarte de toda a água da Estação de Tratamento de Água (ETA), por não se enquadrar nos padrões de potabilidade.

Os coagulantes químicos (também chamados de sintéticos ou inorgânicos) mais empregados nas ETAs são os provenientes de sais trivalentes de ferro e alumínio. Entretanto, a utilização de coagulantes a base de alumínio requer um controle sobre o valor residual de alumínio na água tratada destinada ao consumo humano, principalmente pelo fato de estar relacionado com doenças neurológicas.

Embora o estudo de coagulantes naturais para a clarificação de água não seja uma inovação, a busca por novos coagulantes naturais de baixo custo e elevada eficiência se torna uma tarefa importante, tanto em termos econômicos quanto em relação à proteção ambiental. Em vários países, principalmente da África, inúmeras plantas são utilizadas como coagulantes naturais, sendo esta uma alternativa à utilização dos coagulantes químicos comumente aplicados no tratamento convencional de água.

Diversos trabalhos realizados têm demonstrado que a utilização da *Moringa oleifera* Lam (*M. oleifera*) como agente coagulante natural pode ser uma opção viável, já que possui propriedades com potencial para uso na coagulação da água. Inúmeros pesquisadores

já comprovaram que esse coagulante é efetivo na remoção de partículas suspensas da água, tendo ainda a vantagem adicional de não alterar significativamente a qualidade química da água em termos de pH e alcalinidade, além de não causar corrosão. Por outro lado, tende a alterar a quantidade de matéria orgânica na água, pois se trata de uma planta oleaginosa rica em substâncias orgânicas. Além disso, tem-se a limitação quando se trata de água de baixa turbidez, sendo a associação dos coagulantes natural e químico uma alternativa.

Na associação dos coagulantes, uma pequena dosagem de *M. oleifera*, que é um produto renovável e biodegradável, pode reduzir significativamente o consumo de coagulantes químicos, sendo uma alternativa vantajosa analisando a questão ambiental.

Vale citar que, como normalmente não é possível obter água totalmente clarificada apenas por meio do uso da coagulação/floculação e sedimentação, a filtração também deve ser inserida no processo, a fim de remover as partículas suspensas e coloidais que resistem a outros processos de tratamento.

Assim, a avaliação do processo de coagulação/floculação, sedimentação e filtração, utilizando a associação dos coagulantes *M. oleifera* com os coagulantes químicos: cloreto férrico, policloreto de alumínio (PAC) e sulfato de alumínio é importante.

Uma forma interessante a fim de definir a dosagem ótima do coagulante e o pH adequado a serem utilizados fundamenta-se na realização de ensaios em *Jar Test*, que resultam na construção de diagramas de coagulação. Esses diagramas são instrumentos interessantes para definir regiões ótimas de remoção de cor aparente, turbidez e compostos com absorção em  $UV_{254nm}$ , uma vez que há possibilidade de conseguir grande economia no consumo de produtos químicos para o tratamento de água (PAVANELLI, 2001) quando se definem faixas de pH e dosagem do coagulante.

Desse modo, o estudo da eficiência do processo de coagulação/floculação, sedimentação e filtração no tratamento de água potável, utilizando a associação dos coagulantes natural e químicos (*M. oleifera* e cloreto férrico, *M. oleifera* e PAC, *M. oleifera* e sulfato de alumínio), por meio da utilização da ferramenta diagramas de coagulação é de suma importância por avaliar a qualidade da água e seu padrão de potabilidade.

## 2 OBJETIVOS

Essa seção apresenta os objetivos, tanto geral quanto específicos, propostos para a realização do trabalho.

### 2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desse trabalho é avaliar a eficiência do processo de coagulação/floculação, sedimentação e filtração, utilizando a associação dos coagulantes *Moringa oleifera* Lam com os coagulantes químicos (também chamados de sintéticos ou inorgânicos): cloreto férrico, policloreto de alumínio (PAC), e sulfato de alumínio, no tratamento de água superficial.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar diferentes métodos de preparo do coagulante natural obtido a partir das sementes de *M. oleifera*, a fim de melhorar a ação coagulante.
- Estudar o tempo de degradação do coagulante *M. oleifera* em pó integral.
- Otimizar as condições de operação na etapa de coagulação/floculação e sedimentação para cada associação avaliada: *M. oleifera* e cloreto férrico, *M. oleifera* e PAC, e *M. oleifera* e sulfato de alumínio, em relação aos parâmetros de mistura e sedimentação do processo.
- Avaliar a eficiência da associação do coagulante natural *M. oleifera*, com os coagulantes químicos, em diferentes dosagens e pHs de coagulação, por meio da utilização de diagramas de coagulação, a fim de obter faixas de remoções eficientes na etapa de coagulação/floculação e sedimentação para a produção de água potável.
- Estudar a etapa de filtração para as condições ótimas identificadas no processo de coagulação/floculação e sedimentação.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Essa seção apresenta os temas pertinentes à revisão bibliográfica, referente aos principais itens abordados no desenvolvimento do trabalho.

#### **3.1 ÁGUA E SUA QUALIDADE PARA O ABASTECIMENTO**

Água quimicamente pura é encontrada na natureza somente quando está sob a forma de vapor. Quando as moléculas de água se condensam, as impurezas começam a se acumular. No entanto, a pureza química da água é indispensável e desejável (HELLER; PÁDUA, 2006).

As águas brutas contêm grande parte das substâncias e elementos facilmente absorvidos pelo organismo, constituindo, portanto, fonte essencial ao desenvolvimento do ser humano, já que 60% da água utilizada é ingerida na forma líquida (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Assim, a água é essencial à manutenção da vida, devendo estar disponível em quantidade e qualidade suficiente para abastecer a população. Para isso, é necessário que atenda aos padrões de potabilidade definido pela Portaria nº. 2914 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011) a qual determina as Normas de Qualidade de Água para Consumo Humano, sendo um conjunto de valores máximos permissíveis das características físico-químicas, microbiológicas e organolépticas das águas destinadas ao consumo humano.

O desenvolvimento sem um planejamento ambiental apropriado é um fator preocupante. Sabe-se que há poucas regiões no mundo ainda livres dos problemas da perda de fontes potenciais de água doce, da degradação da qualidade da água e da poluição das fontes superficiais e subterrâneas. Além disto, a industrialização e o aumento populacional têm intensificado a contaminação dos mananciais, tornando indispensável o tratamento de água destinada ao consumo humano (DI BERNARDO; DANTAS, 2005). Entretanto, garantir o acesso à água potável para toda a população não é fácil, pois é necessário infraestrutura adequada para o tratamento e o abastecimento.

A degradação dos corpos d'água vem ocorrendo, em intensidades e tempos variados, em grande parte dos centros urbanos brasileiros. Os impactos dessa degradação têm reflexos econômicos, tais como o aumento do custo de tratamento das águas destinadas ao abastecimento, o aumento de custos hospitalares com internações, a perda de produtividade na

agricultura e na pecuária, a redução da pesca, a perda da biodiversidade e a perda de valores turísticos, culturais e paisagísticos (ANA, 2012).

No Brasil, dados indicam que 77% da água consumida pela população é tratada (DI BERNARDO; DANTAS, 2005). Apesar de quase 2 bilhões de pessoas no mundo obtenham acesso a fontes de água isenta de microrganismos, entre 1990 e 2010, mais de 780 milhões ainda utilizam água superficial ou água de poços desprotegidos (UNICEF/WHO, 2012).

Segundo Borba (2001) e Silva (2005) as pessoas que habitam pequenas cidades, comunidades da periferia, vilas municipais do interior do país, bem como a zona rural, geralmente são abastecidas com água contaminada contendo microrganismos patogênicos e/ou dotada de substâncias químicas tóxicas com teores inadequados para a ingestão humana.

Assim, a realidade nos leva a situações em que muitas pessoas, hoje, captam e consomem água superficial sem nenhum tratamento. Apesar de inadmissíveis, fatos assim fazem parte do cotidiano de diversas comunidades (HELLER; PÁDUA, 2006).

Quando se trata da contaminação bacteriana, sabe-se que as enfermidades que os microrganismos podem produzir nos seres vivos são diversas, como simples transtornos gastrointestinais e vômito (MADRONA, 2010). Os principais agentes patogênicos presentes na água se referem às bactérias *Salmonella*, *Shigella*, *Klebsiella*, *Escherichia coli* e *Enterobacter*, e aos protozoários *Giardia lamblia* e *Entamoeba histolytica* (BODLUND, 2013). Assim, o comprometimento da qualidade da água pode ocasionar várias doenças, tais como: cólera, dengue, febre tifoide, malária, hepatite infecciosa, disenterias, entre outras (CARDOSO, 2007).

Ali et al. (2010) e Asrafuzzaman, Fakhruddin e Hossain (2011) destacam que mais de 6 milhões de crianças morrem de diarreia em países em desenvolvimento por ano. Somente no ano de 2011, foram registrados quase 600 mil casos de cólera no mundo (WHO, 2013). Desse modo, pode-se dizer que grande parte das doenças que se alastram nos países em desenvolvimento é proveniente da água de qualidade insatisfatória (DI BERNARDO; DANTAS, 2005). Ali et al. (2010) e Pise e Halkude (2012) asseguram que mais de 1 bilhão de pessoas ainda não possuem água potável.

A cada ano, várias pessoas sofrem com infecções causadas por água contaminada, sendo necessário então remover a maior quantidade possível de material sólido e microrganismos antes de utilizá-la para o consumo humano (PATERNIANI; MANTOVANI; SANT'ANNA, 2009).

### 3.2 TRATAMENTO CONVENCIONAL DE ÁGUA

Considera-se como tratamento convencional de água aquele em que é realizado o processo de coagulação/floculação, sedimentação, filtração e desinfecção. De acordo com Libânio (2005), o tratamento de água consiste na remoção de partículas suspensas e coloidais, matéria orgânica, microrganismos e outras substâncias deletérias à saúde humana, porventura presentes nas águas brutas.

A cor, a turbidez, o sabor, o odor e diversos tipos de contaminantes orgânicos e inorgânicos presentes na água geralmente estão associados a partículas suspensas ou dissolvidas, que podem requerer a coagulação química da água, a fim de facilitar a remoção dessas impurezas (HELLER; PÁDUA, 2006). Vale destacar que a remoção de cor e turbidez é um dos passos mais importantes em um sistema de tratamento de água.

Segundo Di Bernardo e Dantas (2005), do ponto de vista tecnológico, água de qualquer qualidade pode ser transformada em água potável, porém, os custos envolvidos e a confiabilidade na operação e manutenção podem inviabilizar totalmente o uso de determinado curso d'água como fonte de abastecimento.

O desconhecimento dos fatores que interferem no tratamento convencional de água e sua não otimização no que se refere ao tipo de coagulante e auxiliar de coagulação, dosagem, pH, tempo e gradiente de velocidade de mistura rápida comprometem seriamente o desempenho de uma ETA (HELLER; PÁDUA, 2006).

Convém citar que a desinfecção tem a função de inativar os microrganismos patogênicos por intermédio de agentes físicos e/ou químicos e é obrigatória caso o intuito seja a produção de água potável para fornecimento coletivo. Os microrganismos, pela ação do desinfetante, se tornam incapazes de se reproduzir e transmitir qualquer enfermidade, estando, portanto, inativados (LIBÂNIO, 2005). Em geral, pode-se dizer que no tratamento de água, bactérias e vírus são inativados no processo de desinfecção, enquanto protozoários e helmintos são removidos por meio da filtração (HELLER; PÁDUA, 2006).

Heller e Pádua (2006) afirmam que mesmo compreendendo que o uso de alguns desinfetantes químicos no tratamento de água pode resultar na formação de subprodutos potencialmente nocivos à saúde humana, tais como os trihalometanos (THM), os riscos decorrentes da formação desses subprodutos são normalmente pequenos, em comparação com aqueles que podem advir da desinfecção inadequada.

Richter (2009) destaca que a água distribuída por sistemas que usam o cloro como agente desinfetante apresenta até quase o dobro de risco de ocorrência de câncer de

cólon quando comparada com a água tratada em sistemas que não utilizam cloro. Assim, esses resultados sugerem a revisão da prática de manter residuais elevados de cloro nos sistemas de distribuição e a procura por alternativas de tratamento.

### **3.2.1 Indicadores de Qualidade da Água e a Influência na Eficiência do Tratamento**

A água bruta contém vários compostos do próprio ambiente natural ou introduzidos a partir das diversas atividades humanas. Esses compostos tornam as águas superficiais diferentes de acordo com as características físico-químicas e microbiológicas.

O excesso de impurezas na água pode causar sérios danos à saúde humana e às suas atividades econômicas. Assim, é indispensável realizar a caracterização física, química e biológica da água que, em conjunto, indicarão quão impactado está o manancial, em que classe de qualidade da água o mesmo pode ser incluído, quais as restrições para seu uso e qual tecnologia de tratamento será mais adequada, em função dos usos previstos (HELLER; PÁDUA, 2006).

Desta forma, como milhões de pessoas estão expostas a níveis perigosos de poluentes químicos e contaminantes biológicos em sua água potável devido ao manejo inadequado da população urbana, de águas residuais industriais ou agrícolas (WHO, 2013), é necessário monitorar vários parâmetros, conhecidos como indicadores de qualidade da água, e realizar um processo físico, químico e/ou microbiológico a fim de remover as impurezas presentes na água. Esses indicadores se referem às características físicas, químicas e microbiológicas da água, especificadas a seguir.

#### **3.2.1.1 Características físicas da água**

As características físicas são importantes para avaliar o desempenho das ETAs (JOSHUA; VASU, 2013). Do ponto de vista sanitário, apresentam pequena importância.

##### **3.2.1.1.1 Cor**

Na água bruta, a cor é decorrente da presença de matéria orgânica originada da decomposição de plantas e animais, denominada substância húmica (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

A cor da água é produzida pela reflexão da luz em partículas minúsculas, denominadas coloides, finamente dispersas, de origem predominantemente orgânica e dimensão inferior a 1  $\mu\text{m}$ . Pode ser também resultado da presença de ferro e manganês ou do lançamento de diversos resíduos industriais (LIBÂNIO, 2005).

Para efeito de caracterização das águas para abastecimento, se distingue a cor aparente, na qual se consideram partículas suspensas, da cor verdadeira. A determinação da segunda realiza-se após a filtração da amostra para remoção dessas partículas suspensas (DI BERNARDO; DANTAS, 2005; HELLER; PÁDUA, 2006).

Para que uma água tratada seja distribuída a população, sua cor aparente deve atender as exigências da Portaria nº. 2914 do Ministério da Saúde, que estabelece o valor máximo de 15 uH (BRASIL, 2011).

#### 3.2.1.1.2 Turbidez

A turbidez como característica física acaba por se constituir em uma interferência da concentração de partículas suspensas na água obtida a partir da passagem de um feixe de luz através da amostra (LIBÂNIO, 2005), sendo expressa por meio de unidade nefelométricas de turbidez (UNT) ou unidade de turbidez (uT), as quais são correspondentes, 1:1.

Este parâmetro de qualidade deve-se à presença de matéria particulada em suspensão na água, tais como: matéria orgânica e inorgânica finamente dividida, fitoplâncton, e outros organismos microscópicos (HELLER; PÁDUA, 2006), os quais podem apresentar ampla faixa de tamanho.

Segundo Libânio (2005) a determinação da turbidez adquiriu primazia como parâmetro no monitoramento da quase totalidade das ETAs pela simplicidade e rapidez da análise. Além disso, é um parâmetro muito importante para a seleção da tecnologia de tratamento e controle operacional dos processos (HELLER; PÁDUA, 2006).

Valores de turbidez acima do aceitável podem prejudicar a etapa de desinfecção, pois partículas suspensas conferem proteção a microrganismos diversos, tornando-os resistentes a agentes desinfetantes como o cloro, além de deixar a água com um aspecto turvo e esteticamente indesejável (FRANCO, 2009). Níveis de turbidez mais elevados são frequentemente associados com maiores níveis de microrganismos causadores de doenças tais como: vírus, parasitas e algumas bactérias. Esses organismos podem causar sintomas em curto prazo, como náuseas, cólicas, diarreia e dores de cabeça associadas (EPA, 2009).

Conforme indicado na Portaria nº. 2914 do Ministério da Saúde, a água pode apresentar até 5 UNT de turbidez como padrão de aceitação para consumo humano (BRASIL, 2011).

#### 3.2.1.1.3 *Temperatura*

Di Bernardo e Dantas (2005) afirmam que a temperatura influi nas reações de hidrólise do coagulante, na eficiência da desinfecção, na solubilidade dos gases, na sensação de sabor e odor e, em especial, no desempenho das unidades de mistura rápida, floculação, sedimentação e filtração.

Temperaturas superiores a 10°C favorecem a coagulação, devido ao aumento da eficiência de remoção propiciado pela elevação da taxa de colisões entre as partículas em suspensão da água, ao passo que temperaturas inferiores a 10°C dificultam a ocorrência de colisões entre as espécies hidrolisáveis e as partículas por conta da menor energia cinética das moléculas de água (FRANCO, 2009). Assim, a etapa de coagulação realiza-se de forma menos exitosa a baixas temperaturas (LIBÂNIO, 2005). A formação dos flocos também sofre influência com a variação de temperatura, cujo aumento tende a acelerar o processo até certos limites.

Heller e Pádua (2006) citam que temperaturas elevadas da água aumentam o potencial de crescimento de microrganismos, e podem aumentar a sensação de gosto e odor da água, além da cor e corrosão. Geralmente, utiliza-se temperatura ambiente no processo de tratamento de água, principalmente pela facilidade.

#### 3.2.1.1.4 *Sólidos*

Todas as impurezas presentes na água, à exceção dos gases dissolvidos, contribuem para a carga de sólidos. Esses podem ser classificados de acordo com seu tamanho e características químicas. Na prática, a classificação é feita separando os sólidos em dois grupos: em suspensão e dissolvidos. Quanto à caracterização química, os sólidos podem ser classificados em fixos e voláteis (HELLER; PÁDUA, 2006), sendo quantificados a partir de métodos gravimétricos.

Segundo Konradt-Moraes (2004), em saneamento, os sólidos nas águas correspondem a toda matéria que permanece como resíduo, após evaporação, secagem ou calcinação da amostra a uma temperatura pré-estabelecida durante um tempo fixado. Em linhas gerais, as operações de secagem, calcinação e filtração definem as diversas frações de sólidos presentes na água.

Quantidades em excesso de substâncias dissolvidas na água podem torná-la imprópria ao consumo humano. Consta na Portaria nº. 2914 do Ministério da Saúde que a água destinada ao consumo humano pode atingir até 1000 mg.L<sup>-1</sup> como valor máximo de sólidos dissolvidos totais (SDT) (BRASIL, 2011).

### 3.2.1.2 Características químicas da água

As características químicas da água são de grande importância do ponto de vista sanitário, pois determinadas substâncias podem inviabilizar o uso de certas tecnologias de tratamento (HELLER; PÁDUA, 2006). Essas características devem-se à presença de substâncias dissolvidas e são de grande importância tendo em vista as consequências sobre o organismo dos consumidores (KONRADT-MORAES, 2004).

#### 3.2.1.2.1 Compostos orgânicos

A matéria orgânica natural (MON) consiste de substâncias húmicas, aminoácidos, açúcares, ácidos alifáticos, ácidos aromáticos e um grande número de outras moléculas orgânicas (BONGIOVANI, 2014), sendo encontrada em fontes de águas subterrâneas e superficiais.

Segundo Di Bernardo e Dantas (2005), a MON presente nas águas superficiais contém compostos que podem ser agrupados em substâncias não húmicas e húmicas. As substâncias não húmicas incluem aquelas com característica química definida, tais como: carboidratos, proteínas, aminoácidos, gorduras, graxas e ácidos orgânicos de baixa massa molar. Elas são facilmente atacadas por microrganismos e têm tempo de vida relativamente curto. Já as substâncias húmicas são mais estáveis e abrangem os ácidos orgânicos de coloração escura quimicamente complexos, hidrofílicos e com alta massa molar. Essas substâncias são formadas pela biodegradação de tecidos vegetais e animais, e respondem como a maior parte da MON em águas superficiais.

A interferência da matéria orgânica no processo de tratamento de água pode ser verificada por meio da determinação do carbono orgânico dissolvido (COD) e da absorção por raios ultravioleta no comprimento de onda de 254nm (compostos com absorção em UV<sub>254nm</sub>) (LIBÂNIO, 2005). Di Bernardo e Dantas (2005) citam que esses dois parâmetros de qualidade fornecem informações importantes sobre a MON.

A constituição da MON, na maioria das pesquisas, está relacionada às substâncias húmicas, que compreendem cerca de 50% do COD das águas superficiais,

podendo atingir 80% em águas coloridas (CESCO, 2007). De acordo com Bongiovani (2014) o COD é definido como a fração do carbono orgânico total (COT) capaz de passar através de membranas de 0,45  $\mu\text{m}$ .

A análise de compostos com absorção em  $\text{UV}_{254\text{nm}}$  identifica os grupos de compostos orgânicos alifáticos, aromáticos, complexos multi aromáticos, além das substâncias húmicas (KONRADT-MORAES, 2004), mostrando-se como uma alternativa da representação da matéria orgânica.

Além disso, a interferência da MON é utilizada para verificar o potencial de formação de trihalometanos (THM) em água, que são resultantes da reação entre as substâncias químicas que são utilizadas no tratamento de desinfecção (cloro livre) e a matéria orgânica naturalmente presente na água (BONGIOVANI, 2014). Richter (2009) afirma que os THM são, provavelmente, uma das principais causas da ocorrência de casos de câncer na bexiga e no baixo trato intestinal.

Os compostos orgânicos não são contemplados pelo padrão de potabilidade da Portaria n°. 2914 do Ministério da Saúde, entretanto, o limite para trihalometanos totais (THMT) é de 0,1  $\text{mg.L}^{-1}$  na água destinada ao consumo (BRASIL, 2011).

#### 3.2.1.2.2 pH – Potencial hidrogeniônico

Expressa a intensidade de uma condição ácida ou alcalina de uma solução. Águas brutas tendem a apresentar pH próximo da neutralidade, devido à sua capacidade de tamponamento. Entretanto, as próprias características do solo, a presença de ácidos húmicos ou uma atividade fotossintética intensa pode contribuir para a elevação ou redução natural do pH (HELLER; PÁDUA, 2006).

Segundo Libânio (2005), o pH talvez se constitua no parâmetro de maior frequência de monitoramento na rotina operacional das ETAs, pela interferência em diversos processos e operações unitárias inerentes à potabilização.

Para cada água existem faixas de valores de pH para as quais ocorrem uma eficiente coagulação/floculação, permitindo a remoção de cor e turbidez. Essas faixas dependem das características das impurezas da água e das propriedades do coagulante utilizado.

O padrão de potabilidade estabelece amplo intervalo para pH da água tratada, objetivando minimizar as perspectivas de corrosão ou incrustação nas redes de distribuição (LIBÂNIO, 2005). O condicionamento final da água após o tratamento pode exigir também a correção de pH, a fim de evitar tais problemas.

Recomenda-se pela Portaria n°. 2914 do Ministério da Saúde que no sistema de distribuição, o pH da água seja mantido na faixa de 6 a 9,5 (BRASIL, 2011). É pertinente citar que o pH da água pode ser facilmente alterado adicionando-se solução ácida ou básica.

#### 3.2.1.2.3 Alcalinidade e acidez

Alcalinidade e acidez estão relacionadas à capacidade da água neutralizar bases e ácidos, respectivamente. A alcalinidade é devida a concentração de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, mas pode incluir contribuições de boratos, fosfatos, silicatos. Já a acidez da água é devido à presença de ácidos minerais fortes, ácidos fracos, tais como ácido carbônico, ácidos fúlvicos e húmicos, e sais de metais hidrolisados como ácidos fortes (HELLER; PÁDUA, 2006).

Di Bernardo e Dantas (2005) garantem que a alcalinidade influi na coagulação química quando se utiliza como agente coagulante o sulfato de alumínio e o cloreto férrico, visto que esses são doadores de prótons em solução. Se a alcalinidade for baixa, a coagulação pode exigir a adição de alcalinizante para o ajuste do pH.

Desta forma, para que a floculação tenha um bom desempenho, é primordial que a água em questão não apresente valores extremos de alcalinidade (FRANCO, 2009).

A alcalinidade e a acidez não têm significado sanitário, não sendo contempladas pelo padrão de potabilidade da Portaria n°. 2914 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011), porém devem ser monitoradas a fim de evitar incrustações nas tubulações e problemas relacionados à corrosão no sistema de abastecimento de água (HELLER; PÁDUA, 2006).

#### 3.2.1.2.4 Dureza total

A dureza é definida como a soma de cátions polivalentes presentes na água e é expressa em termos de quantidade equivalente de  $\text{CaCO}_3$  (DI BERNARDO; DANTAS, 2005). Os principais íons metálicos que conferem dureza a água são o cálcio e o magnésio, e em menor grau, o íon ferro, manganês e estrôncio, todos quase sempre associados ao íon sulfato (HELLER; PÁDUA, 2006).

Se a dureza é menor que a alcalinidade da água, toda a dureza é de carbonatos; se é superior, há uma parcela de dureza não carbonatada associada a outros íons, como sulfatos (RICHTER, 2009).

A dureza total não apresenta significado sanitário e seu inconveniente é de natureza econômica por reduzir a formação da espuma, elevando o consumo de sabões e

xampus (LIBÂNIO, 2005; HELLER; PÁDUA, 2006). A Portaria n°. 2914 do Ministério da Saúde estabelece o valor máximo de 500 mg.L<sup>-1</sup> para esse parâmetro de qualidade (BRASIL, 2011).

### 3.2.1.3 Características microbiológicas da água

Segundo Konradt-Moraes (2004), o papel da água na transmissão de certas doenças infecciosas e parasitárias é fato bastante conhecido. Portanto, uma avaliação de potabilidade da água deve passar, necessariamente, pelo parâmetro bacteriológico.

A identificação e a quantificação de vírus, bactérias, protozoários e helmintos apresenta limitações técnico-analíticas e financeiras, motivos pelos quais, usualmente, a verificação da qualidade microbiológica da água destinada ao consumo humano é feita indiretamente, por meio de organismos indicadores de contaminação, tais como a bactéria *E. coli* ou coliformes termotolerantes (HELLER; PÁDUA, 2006).

A presença do grupo coliforme deve ser considerada como indicio de poluição fecal. A presença de *E. coli* é uma indicação definitiva de poluição recente e, portanto, se trata de uma condição nociva ou perigosa, exigindo imediata ação corretiva. Heller e Pádua (2006) reforçam o fato de que o indicador mais preciso de contaminação é a *E. coli*, sendo que sua detecção deve ser preferencialmente adotada.

Para Di Bernardo e Dantas (2005) a relação dos coliformes com os organismos patogênicos pode não existir, pois a presença desses pressupõe a necessidade de um portador na população contribuinte, enquanto o número de coliformes totais ou fecais depende da existência de um despejo orgânico, não estéril, estranho ao corpo receptor. É fácil entender, porém, que há certa correlação entre o número de coliformes e organismos patogênicos, correlação essa baseada na probabilidade de que quanto maior o número de coliformes, maior a probabilidade de presença de organismos patogênicos.

A Portaria n°. 2914 do Ministério da Saúde estabelece ausência de coliformes totais e *E. coli* na água tratada, a fim de garantir a eficiência do tratamento e a potabilidade da água (BRASIL, 2011).

### 3.2.2 Coagulação/Floculação

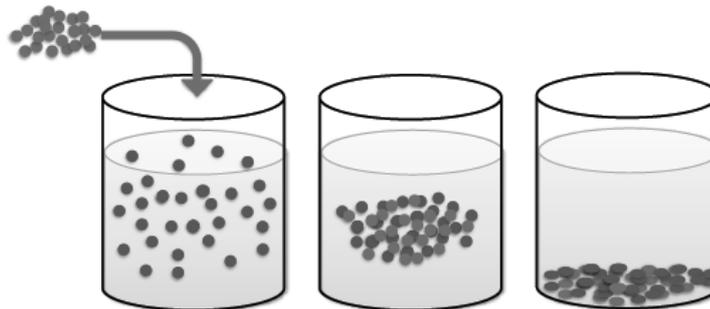
De maneira geral, as partículas dispersas em águas cujo pH se encontra entre 4 e 10 apresentam cargas negativas devido à adsorção seletiva de íons eletronegativos.

Como na prática, as águas a serem tratadas estão dentro dessa faixa, o processo de coagulação/floculação se desenvolveu baseado nas cargas negativas das impurezas da água (CAMPOS; POVINELLI, 1976).

Considerando que as partículas coloidais presentes na água apresentam baixa velocidade de sedimentação, se torna imprescindível a coagulação química nas ETAs, visando à redução da quantidade de material suspenso e dissolvido antes da filtração (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

De acordo com Campos e Povinelli (1976), a coagulação/floculação é a transformação das impurezas invisíveis, que estão na água em suas diversas formas, em partículas maiores, mais densas e conseqüentemente mais pesadas, chamadas flocos, capazes de serem retirados por meio da sedimentação, filtração ou flotação. Na Figura 1 é apresentado o esquema de coagulação/floculação e sedimentação, realizada por meio da adição do coagulante.

Figura 1 – Representação do processo de coagulação/floculação e sedimentação



Fonte: (BODLUND, 2013)

Devido a gama de produtos químicos e a natureza distinta das águas de estudo, é essencial a realização de experimentos em *Jar Test*, para definir as condições adequadas de coagulação (HELLER; PÁDUA, 2006). Para Franco (2009), esses ensaios permitem a constatação de possíveis deficiências na aplicação de coagulantes. Assim, a dosagem ideal de cada coagulante deve ser definida em laboratório, objetivando melhor eficiência e economia.

Os termos coagulação e floculação são utilizados como sinônimos, uma vez que ambos significam o processo integral de aglomeração das partículas. A coagulação resulta de dois mecanismos básicos, a coagulação eletrocinética, em que o potencial zeta é reduzido por íons ou coloides de cargas opostas e a ortocinética, em que as micelas se agregam e

formam flocos que aglomeram as partículas em suspensão (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Vale citar que o potencial zeta é a medida do potencial elétrico entre a superfície externa da camada compacta que se desenvolve ao redor da partícula e do meio líquido em que ela está inserida (DI BERNARDO; DANTAS, 2005). Segundo Okuda et al. (2001a) este parâmetro consiste em um método analítico para avaliar a coagulação da água. Lédo (2008) destaca que a medida do potencial zeta é uma maneira efetiva de controlar o comportamento do coloide, pois indica mudanças no potencial da superfície e na relação das forças de repulsão. No tratamento de água, a análise do potencial zeta permite avaliar se o pH e a dosagem do coagulante empregado são favoráveis à eficiência do processo.

Libânio (2005) afirma que a etapa de coagulação consiste essencialmente na desestabilização das partículas coloidais e suspensas, sendo realizada pela conjunção de ações físicas e reações químicas entre o coagulante, a água e as impurezas.

Especificamente, é um processo químico utilizado para desestabilizar as partículas, no qual se adiciona um agente químico para gerar íons carregados positivamente na água, que contém coloides carregados negativamente. Como resultado, ocorre uma redução na repulsão existente entre as partículas (SILVA, 2005). Do ponto de vista eletrostático, a coagulação é a redução do potencial zeta pela adição de íons específicos (LÉDO, 2008).

Em soluções aquosas, os íons metálicos de ferro ou alumínio, positivamente carregados, formam fortes ligações com os átomos de oxigênio podendo coordenar moléculas de água ao redor, liberando os átomos de hidrogênio (aumentando a concentração de  $H^+$ ) e reduzindo o pH da solução. Esse processo denomina-se hidrólise e os produtos formados constituem as espécies hidrolisadas de ferro e alumínio. Posteriormente, verifica-se o transporte dessas espécies para o contato com as impurezas presentes, etapa denominada de mistura rápida, causando devido à magnitude da dosagem e ao pH de coagulação, sua desestabilização ou envolvimento nos precipitados (LIBÂNIO, 2005).

Pritchard et al. (2010a) garantem que uma mistura rápida de poucos segundos é importante após a adição de um coagulante para assegurar uma dispersão uniforme e aumentar a oportunidade de contato entre as partículas. Desta forma, para que o processo de coagulação seja eficiente, é necessário que ocorra uma mistura intensa e uniforme do coagulante na água, de modo que a probabilidade de contato do coagulante com as partículas antes do final das reações seja a maior possível.

A floculação, por sua vez, é uma das operações unitárias da clarificação baseada em fenômenos físicos, que visa reduzir o número de partículas presentes na massa

líquida. Para tal, são fornecidas condições adequadas de tempo e agitação para que ocorram os choques entre as partículas anteriormente desestabilizadas pela ação do coagulante, objetivando a formação dos flocos (LIBÂNIO, 2005).

Libânio (2005) afirma que o movimento aleatório das partículas coloidais de dimensão inferior a 1  $\mu\text{m}$  permite que ocorram os primeiros choques. Os contatos entre as partículas desestabilizadas se iniciam na unidade de mistura rápida, decorrentes da ação da gravidade. Os flocos adquirem diferentes velocidades de sedimentação, concorrendo para que no movimento descendente ocorram mais choques e a consequente formação dos flocos mais pesados.

Richter (2009) assegura que quanto maior o gradiente de velocidade, mais rápida é a taxa de aglutinação das partículas, porém os flocos crescerão até um limite máximo, acima do qual as forças de cisalhamento os quebram em partículas menores. Assim, uma agitação muito intensa pode fazer com que os flocos formados desagreguem espontaneamente (LIBÂNIO, 2005). É pertinente destacar que o tempo de mistura lenta também auxilia na formação dos flocos.

O mecanismo de formação dos flocos ocorre por meio da neutralização entre a acidez do coagulante e a alcalinidade da água que por atração eletrostática entre as cargas positivas resultantes da ionização do coagulante e as cargas negativas das partículas, formam os flocos. Esses são maiores, mais pesados, dotados de ligações iônicas e têm tendência a precipitarem quando há uma diminuição da velocidade de fluxo da água (BORBA, 2001).

Borba (2001) e Silva (2005) sugerem que quando a coagulação/floculação é realizada por polieletrólitos, não ocorre reações de neutralização entre o coagulante e a água para formar complexos gelatinosos, como ocorre com os coagulantes derivados de sais de alumínio e ferro. Esse acontecimento é devido ao fato deles já serem constituídos de complexos dotados de grandes cadeias moleculares, que apresentam sítios com cargas positivas ou negativas, que têm grande capacidade de adsorção de partículas ao seu redor. Por esse motivo, a coagulação/floculação com polieletrólitos, praticamente independe da alcalinidade da água, podendo ocorrer numa grande faixa de valores de pH (entre 4 e 12).

Convém lembrar que quando a coagulação/floculação não é realizada de modo adequado, compromete-se o desempenho de todas as unidades de tratamento a jusante, aumentando os riscos sanitários da água produzida (HELLER; PÁDUA, 2006).

### 3.2.2.1 Coagulantes

A utilização de coagulantes para a remoção de cor, turbidez, matéria orgânica e demais impurezas presentes na água, têm sido realizada com sucesso no tratamento para a produção de água potável. Esta é uma etapa importante no processo de tratamento, uma vez que tais produtos relacionam-se diretamente com os aspectos estéticos da água distribuída à população, à medida que são responsáveis pela remoção do aspecto turvo característico das águas coletadas (FRANCO, 2009).

O material particulado causa turbidez à água e as substâncias dissolvidas são responsáveis pela cor, havendo evidência de que o sabor e o odor estejam associados a partículas coloidais. Essas impurezas comumente possuem carga superficial negativa em meio aquoso. Quando ocorre a dispersão do coagulante, são originadas espécies hidrolisadas que reagem quimicamente e reduzem a força repulsiva que tende a manter as impurezas estáveis, de modo a facilitar a remoção nas unidades posteriores do tratamento (HELLER; PÁDUA, 2006).

De acordo com Madrona et al. (2010) e Vijay Kumar et al. (2012) muitos coagulantes são amplamente utilizados nos processos convencionais de tratamento de água, com base nas suas características químicas. Podem-se citar os coagulantes químicos (também chamados de sintéticos ou inorgânicos) e naturais.

#### 3.2.2.1.1 Coagulantes químicos

Os coagulantes mais empregados nas ETAs são os inorgânicos, normalmente sais trivalentes de ferro e alumínio, principalmente por terem baixo custo e capacidade coagulante já comprovada (BAGHVAND et al., 2010; BONGIOVANI, VALVERDE, BERGAMASCO, 2013; SANTOS et al., 2013). No entanto, é evidente que as características da água bruta irão influenciar na escolha do coagulante.

Esses coagulantes, quando adicionados à água, sofrem reações de hidrólise, produzindo espécies hidrolisadas em solução e hidróxidos, que precipitam quando o limite de solubilidade é excedido. A formação e o equilíbrio entre as espécies hidrolisadas dependem da dosagem do coagulante e do pH de coagulação (ASSIS, 2006).

A coagulação realizada com sais de alumínio e ferro resulta de dois fenômenos. O primeiro, essencialmente químico, consiste na reação do coagulante com a água e na formação de espécies hidrolisadas com carga positiva, o qual depende da concentração do metal e do pH final da mistura. O segundo, fundamentalmente físico, consiste no

transporte das espécies hidrolisadas para que haja contato com as impurezas presentes na água (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

O presente trabalho considera o uso de três coagulantes químicos, os quais foram escolhidos por serem bastante utilizados e apresentarem bons resultados em termos de eficiência de remoção, sendo: cloreto férrico, policloreto de alumínio (PAC) e sulfato de alumínio, conforme especificados a seguir.

### Cloreto férrico

O cloreto férrico (Figura 2) é um coagulante comumente utilizado para o tratamento de água, atuando em uma ampla faixa de pH, entre 5 e 11 (SPINELLI, 2001), com a produção de flocos com boas características de sedimentação.

Figura 2 – Cloreto férrico



Fonte: (AUTOR)

Quando adicionado a água a ser tratada ocorre o processo de hidrólise deste coagulante de modo que, em seguida, os complexos de ferro formados adquirem cargas positivas. A agregação das partículas presentes na água tratada com a floculação é resultante da neutralização das cargas negativas dos sólidos da água pelos complexos de ferro (FRANCO, 2009). Contudo, esse coagulante só tem eficiência se a água bruta contiver alcalinidade. Caso contrário, não ocorrerá a coagulação/floculação, devido ao excesso de prótons liberado pelo coagulante (BORBA, 2001). Em comparação com o sulfato de alumínio, o cloreto férrico tem baixo consumo de alcalinidade, e conseqüentemente, menor redução de pH.

### Policloreto de alumínio (PAC)

Borba (2001) afirma que nos últimos anos, têm sido desenvolvidos diversos compostos poliméricos de ferro e alumínio, constituindo um novo tipo de coagulante bastante

utilizado nos países do primeiro mundo, conhecido como polímeros inorgânicos. O método de preparo desses coagulantes polimerizados é complexo e envolve tanto sais de alumínio quanto de ferro em condições especiais, resultando em agregados como o PAC. Esse é um coagulante inorgânico, que possui cadeias de polímeros pré-formadas, exibindo uma alta concentração de carga catiônica na unidade polimérica.

O PAC (Figura 3), geralmente formulado como  $Al_n(OH)_mCl_{3n-m}$  e combinado com pequenas quantidades de outros compostos, é eficaz em uma faixa de pH compreendida entre 6 e 9 (CONSTANTINO; YAMAMURA, 2009).

Figura 3 – PAC



Fonte: (AUTOR)

A velocidade de formação dos flocos com a utilização do PAC é superior aos coagulantes tradicionais, garantindo aos flocos uma maior massa e, conseqüentemente, uma precipitação mais rápida e eficiente (CONSTANTINO; YAMAMURA, 2009). Assim, substitui com facilidade outros coagulantes inorgânicos.

Segundo Madrona et al. (2012), o PAC é amplamente utilizado como coagulante devido à sua elevada eficiência e baixa toxicidade. Esse coagulante, na maioria das vezes, mostra-se superior ao sulfato de alumínio em relação à eliminação de substâncias coloidais. Sua eficácia é em média 2,5 vezes superior, em igualdade de dosagem ao íon  $Al^{3+}$ , a de outros sais de alumínio comumente utilizados (PAVANELLI, 2001).

Constantino e Yamamura (2009) sugerem que o PAC libera durante a hidrólise, em igualdade de dosagem de íons metálicos, uma quantidade de ácido menor do que a liberada pelo uso dos coagulantes tradicionais, tais como o sulfato de alumínio e o cloreto férrico. Isso provoca uma menor variação do pH do meio tratado e também um menor consumo de alcalinizante para ajustar o pH (PAVANELLI, 2001). Kalibbala (2012) afirma

que, como o sulfato de alumínio e o cloreto férrico são coagulantes mais ácidos do que o PAC, há uma maior exigência no controle da alcalinidade após a adição do coagulante no tratamento de água.

Entretanto, a utilização de agentes coagulantes a base de sais de alumínio requer um controle rígido sobre o valor residual de alumínio na água tratada destinada ao consumo humano (MADRONA, 2010).

### Sulfato de alumínio

O sulfato de alumínio (Figura 4) se destaca como o coagulante químico mais utilizado no Brasil no tratamento de água de abastecimento público, em razão da alta eficiência na remoção de sólidos em suspensão e pelo baixo custo para sua aquisição (OKUDA et al., 1999; LO MONACO et al., 2010; MADRONA et al., 2010). Contudo, o uso extensivo do sulfato de alumínio tem sido discutido devido ao alumínio remanescente na água tratada e a grande quantidade de lodo produzido.

Figura 4 – Sulfato de alumínio



Fonte: (AUTOR)

O efeito desse coagulante é fortemente dependente do pH, sendo mais efetivo na faixa de 5,5 a 8 (FRANCO, 2009). Há ainda o problema da reação do alumínio com a alcalinidade natural presente na água, que leva a uma redução do pH (GIDDE; BHALERAO, 2011).

Outra questão a ser considerada é a qualidade do lodo gerado (JOSHUA; VASU, 2013). Segundo Lo Monaco et al. (2010) após o sal ser solubilizado, o  $Al^{3+}$  será adsorvido no material sólido em suspensão. O material sedimentado é, por essa razão, muito rico em alumínio, o que dificulta a disposição final desse material no meio ambiente.

Clayton (1989) afirma que se o alumínio residual estiver presente na água em uma concentração acima de  $0,2 \text{ mg.L}^{-1}$ , pode trazer sérios riscos à saúde humana como

distúrbios gastrointestinais, erupções na pele e úlceras. Além disso, elevadas concentrações de alumínio podem estar relacionadas com doenças neurológicas (MUYIBI; EVISON, 1995), além de acelerar o processo degenerativo do Mal de Alzheimer (OKUDA et al., 2001b; KONRADT-MORAES, 2004; VIJAYARAGHAVAN; SIVAKUMAR; VIMAL KUMAR, 2011; GIDDE; BHALERAO; MALUSARE, 2012; RAVIKUMAR; SHEEJA, 2012; JOSHUA; VASU, 2013).

#### 3.2.2.1.2 *Coagulantes naturais*

Os coagulantes de origem orgânica naturais, conhecidos universalmente como polieletrólitos, são representados por compostos constituídos de grandes cadeias moleculares, dotados de sítios com cargas positivas ou negativas (BORBA, 2001). Porém, apenas os polieletrólitos catiônicos, ou seja, aqueles que apresentam cargas positivas, podem ser utilizados sem a aplicação do coagulante primário (SPINELLI, 2001).

Nos últimos anos, a utilização de vários coagulantes naturais tem sido estudada como uma opção interessante ao tratamento de água normalmente realizado com a adição de coagulantes químicos. O uso de coagulantes de origem vegetal, para clarificação de água, quando possível, é de grande valia em termos ecológicos e ambientais.

De acordo com Asrafuzzaman, Fakhruddin e Hossain (2011) e Awad, Wang e Li (2013) pesquisas sobre coagulantes naturais têm recebido atenção de pesquisadores do mundo todo, principalmente por causa de sua disponibilidade abundante na natureza, baixo custo e comportamento multifuncional. Para Franco (2009) a utilização desses coagulantes é interessante a fim de determinar a sua eficiência e a viabilidade de se tornarem substitutos aos coagulantes químicos.

Diversos trabalhos relacionados a coagulantes naturais (ABALIWANO; GHEBREMICHAEL; AMY, 2008; DALEN et al., 2009; AMAGLOH; BENANG, 2009; MADRONA et al., 2010; PRITCHARD et al., 2010a; GIDDE, BHALERAO; MALUSARE, 2012; MANGALE et al., 2012; PISE; HALKUDE, 2012; VALVERDE et al., 2013; BONGIOVANI et al., 2014) se preocuparam inicialmente em substituir ou auxiliar os coagulantes convencionais com o intuito de melhorar a etapa de coagulação/floculação no tratamento de água, tanto pela qualidade dos flocos produzidos, quanto pela redução de metais no lodo gerado.

Assim, o homem tem buscado na biodiversidade dos recursos naturais um coagulante natural biodegradável para a clarificação de água superficial, que apresente baixa toxicidade e seja de uso simples, barato e de fácil obtenção e aplicação (SILVA, 2005).

A utilização de coagulantes naturais pode proporcionar atenuação nos problemas ligados ao consumo de água não potável e despejos de águas residuárias, sem tratamento, em corpos hídricos receptores (LO MONACO et al., 2010). Esses coagulantes têm demonstrado benefícios quando comparados aos coagulantes químicos, especificamente em relação à biodegradabilidade, baixa toxicidade e baixo índice de produção de lodos residuais (KAWAMURA, 1991; MADRONA et al., 2012). Além disso, coagulantes naturais são normalmente seguros para a saúde (OKUDA et al., 2001b; BINA et al., 2010; RODRÍGUEZ-NÚÑES et al., 2012; JOSHUA; VASU, 2013) e não há efeitos tóxicos relatados na literatura (SÁNCHEZ-MARTÍN; BELTRÁN-HEREDIA; PERES, 2012; EGBUIKWEM; SANGODOYIN, 2013).

Por outro lado, a presença de um polieletrólito orgânico natural na água, pode aumentar o teor de matéria orgânica e causar o aparecimento de sabores desagradáveis e odores ruins, caso essa matéria orgânica não seja eliminada durante as fases da coagulação/floculação, sedimentação e filtração (BORBA, 2001; SILVA, 2005). O aumento do COD deve ser comentado, porque não há nenhuma maneira de evitar esse efeito quando se trabalha com extrato de matéria orgânica natural.

Todavia, a introdução de novos coagulantes no tratamento de água, exige responsabilidade por parte das autoridades sanitárias, pois é bastante provável que a água tratada ainda contenha resíduos que serão ingeridos pelos consumidores. Deste modo, o uso de coagulantes naturais deve ser amplamente pesquisado, levando em conta, principalmente, o aspecto da saúde pública.

Em vários países asiáticos, africanos e sul-americanos, inúmeras plantas estão sendo utilizadas com o intuito de clarificar a água bruta. Atualmente, alguns biopolímeros vêm sendo investigados mais intensamente que outros, tais como: a *M. oleifera* (BONGIOVANI; VALVERDE; BERGAMASCO, 2013; SANTOS et al., 2013), a quitosana (KONRADT-MORAES, 2004; CARVALHO, 2008; BINA et al., 2010), os taninos vegetais (VIJAYARAGHAVAN; SIVAKUMAR; VIMAL KUMAR, 2011) e as sementes de Nirmali (*Strychnos potatorum*) (ASRAFUZZAMAN; FAKHRUDDIN; HOSSAIN, 2011; MUTHURAMAN; SASIKALA; PRAKASH, 2013). Por ser um dos coagulantes naturais com eficiência comprovada no tratamento de água (AWAD; WANG; LI, 2013), a *M. oleifera* foi escolhida como objeto de estudo da pesquisa em questão.

*M. oleifera*

É uma planta pertencente à família *Moringaceae* que é composta de apenas 1 gênero (*Moringa*) e 14 espécies (JAHN, 1989; NDABIGENGESERE; NARASIAH; TALBOT, 1995; LEA, 2010; SANTOS et al., 2011; PISE; HALKUDE, 2012). A *M. oleifera* é a espécie mais cultivada atualmente (ABALIWANO, GHEBREMICHAEL; AMY, 2008; ALO; ANYIM; ELOM, 2012).

Nativa do Norte da Índia, a *M. oleifera* se desenvolve atualmente em vários países dos trópicos (LEA, 2010; SANTOS et al., 2011), entre eles: Egito, Filipinas, Tailândia, Malásia, Paquistão, Singapura, Jamaica e Nigéria (BEZERRA; MOMENTÉ; MEDEIROS FILHO, 2004). No Brasil, a *M. oleifera* é conhecida como quiabo de quina. No Nordeste, é chamada de lírio branco (HELLER; PÁDUA, 2006; MARACAJÁ et al., 2010). Também pode ser chamada de acácia branca e noz-de-ben (CARDOSO, 2007).

Essa planta pode ser facilmente propagada por se adaptar em locais com pluviometria baixa e climas quentes, não ter exigências quanto ao tipo de solo (GIDDE; BHALERAO; MALUSARE, 2012), só mostrando impossibilidade de se desenvolver em locais encharcados (HELLER; PÁDUA, 2006; SANTOS et al., 2011), temperaturas abaixo de 8°C e períodos de geada (LEA, 2010; POUMAYE et al., 2012). De acordo com Abaliwano, Ghebremichael e Amy (2008), é uma árvore que varia de 5 a 12 m de altura (Figura 5), sendo suas sementes produzidas em frutos.

Figura 5 – Árvore de *M. oleifera*



Fonte: (MANGALE et al., 2012)

A *M. oleifera* é descrita como uma planta de múltiplo uso por diversos pesquisadores (NDABIGENGESERE; NARASIAH, 1998; GUEYRARD et al., 2000; GALLÃO; DAMASCENO; BRITO, 2006; ABDULSALAM et al., 2007; GIDDE; BHALERAO; MALUSARE, 2012; MANGALE SAPANA; CHONDE; RAUT, 2012). Folhas, frutos verdes, flores e sementes são ditas como sendo de valor alimentar e medicinal (VIJAY KUMAR et al., 2012).

Para Lea (2010) e Dubey et al. (2013), a *M. oleifera* é um alimento importante que teve enorme atenção como um nutriente natural dos trópicos. A ingestão regular pode prevenir a anemia e demais formas de desnutrição (ABALIWANO; GHEBREMICHAEL; AMY, 2008). Suas flores são muito procuradas pelas abelhas, por apresentarem propriedades melíferas (SILVA, 2005). Todas as partes dessa planta têm propriedades antimicrobianas, embora as folhas apresentem o maior índice antibacteriano contra *Salmonella* (NWAIWU; ZALKIFUL; RAUFU, 2012).

Segundo Heller e Pádua (2006), as folhas apresentam alto valor protéico, sendo consumida por algumas pessoas. Essas folhas são uma fonte rica de  $\beta$ -caroteno, ácido ascórbico, proteínas, vitamina C, ferro, cálcio e potássio e atuam como uma boa fonte de antioxidantes naturais (KATAYON et al., 2006; DUBEY et al., 2013). A quantidade de vitamina A é superior à quantidade encontrada em brócolis, cenoura, couve, espinafre e alface (BEZERRA; MOMENTÉ; MEDEIROS FILHO, 2004).

O gênero *Moringa* e, particularmente, a espécie *Moringa oleifera* Lam se destaca como um dos mais promissores coagulantes naturais (JAHN, 1989; SUTHERLAND; FOLKARD; GRANT, 1990; NDABIGENGESERE; NARASIAH, 1996; SILVA, 2005; HELLER; PÁDUA, 2006; ABALIWANO; GHEBREMICHAEL; AMY, 2008; AMAGLOH; BENANG, 2009; ALI et al., 2010; MADRONA et al., 2010; PRITCHARD et al., 2010a; VIJAYARAGHAVAN; SIVAKUMAR; VIMAL KUMAR, 2011; MANGALE et al., 2012; POUMAYE et al., 2012; VIJAY KUMAR et al., 2012), apesar de 7 espécies terem demonstrado o efeito coagulante (PEREIRA et al., 2011).

O óleo da semente apresenta valor comercial e pode ser extraído sem que a mesma perca seu poder de coagulação, de acordo com Heller e Pádua (2006) e Lea (2010). Pode ser utilizado no preparo de alimentos, já que é rico em ácido oleico (DUBEY et al., 2013), na fabricação de sabonetes, cosméticos e como combustível. A pasta resultante da extração pode ser usada como um condicionador do solo, fertilizante ou ainda na alimentação animal (SANTANA et al., 2010).

Considerando o fato de que a *M. oleifera* pode ser produzida localmente, já que se trata de uma planta, o seu uso como coagulante na purificação de água deve ser incentivado (AMAGLOH; BENANG, 2009) como uma alternativa segura e barata (AWAD; WANG; LI, 2013).

Em alguns países em desenvolvimento da África, como Sudão e Nigéria, a população rural emprega sementes de *M. oleifera* a fim de obter água clarificada (JAHN, 1981; YONGABI, 2010; VIJAY KUMAR et al., 2012). Segundo Fatombi et al. (2012) e Egbuikwem e Sangodoyin (2013), é recomendado a utilização desse coagulante natural em áreas rurais, onde não há instalações disponíveis para tratamento de água. Rolim et al. (2011) afirmam que a população do meio rural brasileiro pode aumentar a dosagem do pó obtido a partir das sementes de *M. oleifera* (2 g dissolvidos em 100 mL de água) a fim de promover a coagulação de maneira eficaz. Desse modo, esse coagulante natural pode ser utilizado no tratamento de água para uso doméstico (RAVIKUMAR; SHEEJA, 2012).

O maior interesse dos pesquisadores que estudam a coagulação com a *M. oleifera* está relacionado com a utilização de diferentes partes da planta e diversos métodos para a obtenção do coagulante natural. Nwaiwu, Zalkiful e Raufu (2012) citam que as sementes de *M. oleifera* apresentam o melhor potencial de coagulação/floculação, quando comparadas às folhas, vagens e cascas. Ndabigengesere e Narasiah (1998) sugerem que as proteínas ativas estão contidas apenas nas sementes, de acordo com resultados obtidos experimentalmente.

Silva (2005) garante que a *M. oleifera* satisfaz as características exigidas para um bom coagulante primário, ou seja, oferece uma redução em termos de turbidez na ordem de 90% a 95%. Poumaye et al. (2012) avaliaram que esse biopolímero pode ser usado na clarificação da água com eficiência elevada.

Estudos realizados por Pritchard et al. (2010a) investigaram o desempenho de *M. oleifera* em comparação com o sulfato de alumínio, indicando que o biopolímero possui capacidade de remoção de turbidez e *E. coli* suficiente para incentivar a sua utilização para o tratamento de águas turvas, especialmente em países em desenvolvimento.

Diversos pesquisadores também investigaram o comportamento da *M. oleifera* em conjunto com sais de alumínio e obtiveram resultados promissores (ABALIWANO; GHEBREMICHAEL; AMY, 2008; DALEN et al., 2009; BINA et al., 2010; Nwaiwu; BELLO, 2011; FATOMBI et al., 2012; RODRÍGUEZ-NÚÑES et al., 2012; VALVERDE et al., 2013).

Em termos de caracterização, a semente da *M. oleifera* possui elevado teor de proteínas e lipídeos (BEZERRA; MOMENTÉ; MEDEIROS FILHO, 2004). Gidde, Bhalerao e Malusare (2012) determinaram 37% de proteínas, 37% de lipídeos e 16% de carboidratos na composição da semente de *M. oleifera*. Valores similares de composição para proteínas e lipídeos foram encontrados por Ndabigengesere, Narasiah e Talbot (1995). Gallão, Damasceno e Brito (2006) por sua vez, verificaram que a proteína é o composto encontrado em maior quantidade nas sementes de *M. oleifera*, em torno de 40%, seguido pelo teor de lipídios em torno de 20%. Já Madrona (2010) encontrou valores de proteínas e lipídeos próximos a 30%.

Para Lea (2010), há evidências que o desempenho da mesma espécie de sementes de *M. oleifera* em relação à eficiência de remoção dos parâmetros de qualidade pode diferir significativamente com base exclusivamente no local de cultivo.

### 3.2.3 Sedimentação

A sedimentação, também conhecida como decantação, consiste na operação unitária que traduz a eficiência das etapas que a precedeu, ou seja, a coagulação e floculação (LIBÂNIO, 2005).

Segundo Carvalho (2008), o processo de sedimentação para a remoção de partículas sólidas em suspensão é um dos mais comuns no tratamento de água e consiste na utilização de forças gravitacionais para separação de partículas de densidade superior à da água, depositando-as em uma superfície ou zona de armazenamento.

Para Franco (2009), é um fenômeno físico no qual as partículas suspensas apresentam movimento descendente em meio líquido de menor massa específica, resultando na formação de um sistema bifásico constituído por uma fase líquida e outra sólida. Posteriormente, a camada sólida constituída pelo lodo é removida periodicamente nas ETAs.

Di Bernardo e Dantas (2005) afirmam que a ocorrência da sedimentação das partículas suspensas propicia a clarificação do meio líquido, e quanto maior a velocidade de sedimentação, menor será o tempo de residência necessário para a clarificação da água. Essa velocidade de sedimentação dos flocos vai depender da qualidade da água bruta, das características químicas da coagulação e dos parâmetros físicos da floculação. A velocidade de sedimentação também é proporcional ao peso e ao tamanho da partícula.

De acordo com Joshua e Vasu (2013) a sedimentação remove até 60% de sólidos suspensos e 75% de bactérias. Libânio (2005) assegura que esse processo remove

principalmente matéria orgânica coloidal, substâncias tóxicas de origem orgânica e inorgânica, microrganismos em geral e os precursores da formação de THM, elevando a qualidade da água.

A eficiência da unidade de sedimentação diminui quando ocorre mau funcionamento das unidades de coagulação/floculação, o que pode acontecer por problemas operacionais ou quando a água bruta apresenta baixa concentração de sólidos, uma vez que isso resulta em menor taxa de contato entre as partículas e os produtos da hidrólise do coagulante, limitando o transporte de massa (HELLER; PÁDUA, 2006).

As partículas que não são removidas na sedimentação, sejam por seu pequeno tamanho, ou por serem de densidade muito próxima a da água, deverão ser removidas posteriormente na etapa de filtração (CARVALHO, 2008).

### 3.2.4 Filtração

A Portaria nº. 2914 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011) exige que “toda água para consumo humano suprida por manancial superficial e distribuída por meio de canalização deve incluir tratamento por filtração”.

Normalmente, não é possível obter água totalmente clarificada apenas por meio de coagulação/floculação e sedimentação, sendo necessário então, o uso da etapa de filtração, que consiste na remoção de partículas suspensas e coloidais e de microrganismos presentes na água, que escoam em um meio granular (CARDOSO, 2007).

Libânio (2005) destaca que a filtração constitui-se no processo que tem como função primordial a remoção das partículas responsáveis pela cor e turbidez, cuja presença reduziria a eficácia da desinfecção, na inativação dos microrganismos patogênicos. Nas ETAs convencionais, cabe a filtração provavelmente a função mais relevante, por se constituir na etapa em que as falhas, porventura ocorridas nas etapas anteriores, possam ser corrigidas, assegurando a qualidade da água tratada.

Franco (2009) sugere que o tipo de filtro mais utilizado na remoção de resíduos remanescentes da etapa de sedimentação é o filtro rápido por gravidade, composto por camadas de areia, antracito (carvão antracitoso) e brita, que são revestidas por uma estrutura de concreto, dotada de drenos que regularizam o fluxo da água filtrada. Nesse tipo de filtro rápido o processo é físico-químico e o fluxo do leito é, usualmente, descendente (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

A filtração rápida pode ser entendida como uma quantidade de subcamadas que progressiva e sequencialmente, vão exaurindo sua capacidade de retenção de partículas. Na filtração descendente, a água com maior quantidade de impurezas encontra primeiramente as subcamadas de menor porosidade. À medida que as partículas são retidas nos vazios intergranulares causam o estreitamento dos canais do meio filtrante e o consequente aumento da velocidade intersticial. Esse aumento da velocidade intersticial, responsável pelas forças de cisalhamento, faz com que parte das partículas retidas seja arrastada para subcamadas inferiores ocorrendo a filtração com ação de profundidade (BRASIL, 2006). Abreu (2009) ressalta que a filtração rápida de camada dupla, com areia e antracito, pode ser realizada com alta taxa de filtração, de  $240 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  a  $600 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ .

Segundo Richter (1977), para que se possa obter uma água tratada de melhor qualidade na saída do filtro, deve-se operá-los a taxas declinantes, de tal forma que haja o controle da vazão, de maneira que esta diminua com aumento de depósitos no meio filtrante, isto é, com a diminuição da porosidade, o arraste de sólidos para a água tratada seria assim, reduzido. Esse sistema é mais vantajoso, pois acompanha a tendência natural de redução de vazão no meio filtrante a medida que o mesmo vai colmatando (BONGIOVANI, 2014).

A espessura relativa das camadas do leito filtrante tem influência direta na duração da carreira de filtração. Quanto maior a razão entre o volume da areia e o de antracito, maior será o tempo entre lavagens consecutivas. Bons resultados foram obtidos com um leito filtrante constituído de 40% de areia e 60% de antracito (RICHTER, 1977).

As propriedades do material filtrante são importantes, pois afetam a eficiência de filtração. Estas propriedades incluem: tamanho, formato, massa específica e dureza. A porosidade do leito granular formado pelos grãos também merece atenção (RICHTER, 1977).

A ordem de colocação das camadas no filtro é determinada pela densidade dos materiais filtrantes, de forma que o material mais denso é colocado na camada inferior e o menos denso na camada superior. A granulometria decresce na direção do escoamento, favorecendo o melhor aproveitamento da capacidade de acumulação de sólidos do meio filtrante, com menor desenvolvimento da perda de carga (BRASIL, 2006). Normalmente, as massas específicas da areia e antracito estão no intervalo de  $2,55 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  a  $2,65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  e  $1,30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  a  $1,80 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , respectivamente (RICHTER, 2009).

Quanto menor o valor do coeficiente de desuniformidade (relação entre os tamanhos dos grãos correspondentes às percentagens de 60% e 10% (em peso) do material

que passa pelas peneiras), mais uniforme é a areia e o antracito, portanto, mais profunda será a penetração da impureza no leito filtrante e mais longa será a duração da carreira de filtração (DI BERNARDO; PAZ, 2008). Abreu (2009) recomenda valores inferiores a 1,60 para filtros de camada dupla. O tamanho efetivo, que corresponde ao tamanho equivalente a 10% (em peso) do material que passa, deve estar na faixa de 0,40 mm a 0,60 mm para a areia e 0,90 mm a 1,10 mm para o antracito.

Brinck (2009) sugere que a escolha da granulometria de um meio filtrante depende de diversas variáveis, tais como: taxa de filtração, carga hidráulica, qualidade do afluente, qualidade desejável do efluente, sistema de lavagem e espessura da camada filtrante. Desse modo, no projeto de um filtro, uma série de variáveis devem ser controladas de modo a garantir a melhor qualidade possível da água com carreiras de filtração de duração razoável. Com uma operação cuidadosa, admitindo que não haja falhas de projeto e de construção, o rendimento de filtros chega a superar 90% em termos de remoção de turbidez (RICHTER, 1977).

A ação conjunta de três mecanismos distintos, o transporte, a aderência e o desprendimento, é a responsável pela remoção da turbidez presente na água. O mecanismo de transporte conduz as partículas suspensas para as proximidades da superfície dos coletores (meio filtrante). Na superfície, a adesão se dá por forças superficiais que são maiores do que as forças de cisalhamento, retendo partículas com diâmetros de 0,01  $\mu\text{m}$  a 10  $\mu\text{m}$  no meio filtrante (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Durante a operação, os sólidos são removidos e acumulados dentro dos espaços vazios e no topo na superfície do leito filtrante. Esse entupimento leva a um aumento gradual de perda de carga se a taxa de escoamento for mantida. Após um período de operação (carreira de filtração), o filtro rápido é lavado por retro lavagem, no qual o leito é fluidificado, e cuidados devem ser tomados para não haver perdas de material com o descarte da água de lavagem (BRINCK, 2009). Di Bernardo e Paz (2008) destacam que a introdução de água no sentido ascensional com velocidade relativamente alta deve promover a fluidificação parcial do meio granular com liberação das impurezas retidas.

É pertinente ressaltar que a filtração constitui uma barreira sanitária importante, podendo reter microrganismos patogênicos que resistem a outros processos de tratamento. Em suma, Madrona (2010) afirma que a filtração é uma operação de polimento para a qualidade da água.

Na água filtrada, a turbidez assume a função de indicador sanitário, e não meramente estético, já que baixos valores de turbidez indicam também a eficiência da

filtração na remoção de microrganismos (HELLER; PÁDUA, 2006). Di Bernardo e Dantas (2005) asseguram que água filtrada com turbidez consistentemente inferior a 1 UNT apresenta, em geral, concentração relativamente baixa de microrganismos, podendo a desinfecção final ser realizada com sucesso.

### 3.3 TRATAMENTO DE ÁGUA COM *M. oleifera*

A obtenção da solução coagulante à base das sementes de *M. oleifera* é reportada de diferentes maneiras na literatura não havendo, no entanto, padronização para tal procedimento (ARANTES; RIBEIRO; PATERNIANI, 2012). Assim, é necessário definir a melhor forma de aplicação desse coagulante no tratamento de água.

Diferentes métodos para melhorar a eficiência de remoção de turbidez de águas superficiais e residuárias têm sido propostos por pesquisadores, tais como: utilização da *M. oleifera* em pó (DALEN et al., 2009; MANGALE et al., 2012; MANGALE SAPANA; CHONDE; RAUT, 2012), preparo da solução por extração aquosa (MUYIBI; EVISON, 1995; KATAYON et al., 2006; AMAGLOH; BENANG, 2009; PRITCHARD et al., 2010b; ROLIM et al., 2011; GIDDE, BHALERAO; MALUSARE, 2012; PISE; HALKUDE, 2012; VALVERDE et al., 2013) e preparo da solução por extração salina (OKUDA et al., 2001b; YARAHMADI et al., 2009; MADRONA et al., 2012; SÁNCHEZ-MARTÍN; BELTRÁN-HEREDIA; PERES, 2012).

Procedimentos quanto à utilização desse coagulante natural desengordurado também foram estudados por Ali et al. (2010), Bichi, Agunwamba e Muyibi (2012) e Nwaiwu, Zalkiful e Raufu (2012). Como resultado da extração do óleo produziram um óleo comestível como subproduto.

Assim, um grande desafio a ser considerado na aplicação da *M. oleifera* para tratamento de águas como biopolímero natural consiste em estabelecer padrões na forma de aplicação (SILVA; MATOS, 2008).

Amagloh e Benang (2009) e Santos et al. (2011) asseguram que quando o pó das sementes é adicionado à água turva, as proteínas formam cargas positivas a partir da atração eletrostáticas com as partículas carregadas negativamente, tais como: barro, argila, bactérias e outras partículas tóxicas presentes na água. O processo de floculação ocorre quando as proteínas se ligam com as cargas negativas formando flocos, agregando as partículas presentes na água.

Estudos vêm sendo realizados para determinar riscos potenciais relacionados ao uso das sementes da *M. oleifera* no tratamento de águas. Até o momento, nenhuma evidência foi encontrada de que as sementes possam causar efeitos secundários nos seres humanos, especialmente com as baixas doses necessárias para o tratamento de água (SUTHERLAND; FOLKARD; GRANT, 1990; SCHWARZ, 2000; LEA, 2010; SANTOS et al., 2011). Dessa forma, pode-se afirmar que o tratamento de água com a *M. oleifera* não apresenta nenhum risco à saúde (ASRAFUZZAMAN; FAKHRUDDIN; HOSSAIN, 2011; VALVERDE et al., 2013) já que além de atuar como agente clarificante de águas turvas e coloridas, essas sementes também possuem inúmeros usos na alimentação humana (CARDOSO et al., 2008).

Segundo Lea (2010), Mangale Sapana, Chonde e Raut (2012), Nwaiwu, Zalkiful e Raufu (2012) e Muthuraman, Sasikala e Prakash (2013) a *M. oleifera* não é tóxica para o homem. No entanto, Maracajá et al. (2010) e Rolim et al. (2011) sugerem que é necessário analisar a toxicidade da planta para que ela realmente possa ser utilizada pela população sem prejuízos.

Vale citar que a *M. oleifera* pode clarificar águas com alta, média ou baixa turbidez, já que de acordo com Santos et al. (2011), a capacidade de reduzir a turbidez da água tem sido atribuída a diversos compostos, incluindo proteínas catiônicas com atividade coagulante.

Contudo, Yarahmadi et al. (2009) afirmam que a eficiência do extrato da semente de *M. oleifera* diminui com a redução da turbidez. Lea (2010) destaca que a *M. oleifera* não é um coagulante eficiente para águas de baixa turbidez, no caso, menor que 50 UNT. Isso sugere limitação da ação do agente coagulante da *M. oleifera*, assim como a necessidade de determinar uma dosagem ótima (SILVA; MATOS, 2008). Essa dosagem ótima se refere a menor quantidade de coagulante dosado que resulte na maior redução em termos de parâmetros de qualidade da água bruta, no menor espaço de tempo possível.

Ghebremichael et al. (2005) verificaram que para água com turbidez inicial na faixa de 250 UNT e 300 UNT, a atividade de coagulação das sementes de *M. oleifera* é similar à encontrada com a utilização do sulfato de alumínio. Lea (2010) evidencia que para águas de alta turbidez, essa similaridade na atividade de coagulação é confirmada.

Para Katayon et al. (2006) a eficiência da coagulação depende da turbidez inicial da água bruta, já que remoções mais eficientes desse parâmetro foram obtidas para água com turbidez inicial elevada, fato condizente com os resultados obtidos por Okuda et al. (2001b).

Estudos realizados por Cardoso et al. (2008) demonstraram que o tempo de mistura rápida, mistura lenta e sedimentação influencia na remoção de cor e turbidez, durante o processo de coagulação/floculação com sementes de *M. oleifera*. Como esses parâmetros de operação afetam a eficiência global de remoção das impurezas contidas na água bruta, não devem ser simplesmente adotados, mas sim fixados a partir de estudos de tratabilidade em laboratório (JULIO; FIORAVANTE; OROSKI, 2008).

Deve-se ressaltar também que a quantidade de *M. oleifera* a ser utilizada na coagulação precisa ser determinada previamente para cada tipo de água a ser tratada, assim como ocorre quando se utilizam os coagulantes sintéticos, já que há casos em que as sementes não apresentam eficiência satisfatória na potabilização da água bruta (HELLER; PÁDUA, 2006).

Segundo Madrona (2010), muitas vezes a utilização exclusiva de coagulantes não permite a formação dos flocos suficientemente densos, determinantes para a obtenção de uma taxa de sedimentação aceitável. Nesses casos, a utilização de auxiliares de coagulação/floculação, conhecidos como polieletrólitos, é necessária.

Amagloh e Benang (2009) recomendam em casos de baixa eficiência de remoção dos parâmetros de qualidade, a associação da *M. oleifera* com outro coagulante para que haja resultados mais promissores. Vijayaraghavan, Sivakumar e Vimal Kumar (2011) citam que essa associação dos coagulantes é necessária. Abaliwano, Ghebremichael e Amy (2008) sugerem o uso de *M. oleifera* como auxiliar de coagulação a fim de reduzir o consumo dos coagulantes químicos em até 50%.

Valverde et al. (2013) constataram que a associação da *M. oleifera* e sulfato de alumínio proporcionam um aumento na eficiência de remoção de cor aparente e turbidez da água bruta. Dalen et al. (2009) citam que essa associação dos coagulantes pode melhorar efetivamente o saneamento de água em países subdesenvolvidos, principalmente porque a *M. oleifera* pode ser cultivada localmente.

Di Bernardo e Dantas (2005) destacam que como auxiliares de coagulação, os biopolímeros apresentam vantagens em uma ETA, tais como: melhoria da qualidade da água decantada e filtrada, redução do consumo do coagulante primário, redução dos gastos com produtos químicos, redução no volume do lodo no decantador e diminuição da ocorrência da deposição de lodo na rede e nos reservatórios de distribuição.

Um fato importante segundo Borba (2001) é que a *M. oleifera* somente apresenta bom rendimento como coagulante ou como auxiliar de coagulação, quando as sementes estão em bom estado de conservação, caracterizada por apresentar cor branca da

polpa, boa textura e consistência, além de ausência de umidade, fungos e bactérias. Acredita-se que o mau estado de conservação das sementes é responsável pela degradação de sua proteína coagulante.

De acordo com Katayon et al. (2006), a eficiência da coagulação depende da temperatura de armazenamento e embalagem, mas a eficiência da coagulação diminui com o passar do tempo de armazenamento das sementes. Entretanto, Pritchard et al. (2010b) afirmam que as sementes de *M. oleifera* são consideradas altamente ativas pelo fato de produzirem altas reduções na turbidez da água bruta por um período máximo de 18 meses, sendo que o desempenho começa a decair significativamente a ponto de tornar o coagulante ineficiente após 24 meses, especialmente para água bruta com turbidez inferior a 100 UNT. Desta forma, é interessante utilizar sementes colhidas recentemente a fim de garantir a eficácia do tratamento de água.

### 3.3.1 Mecanismo de Coagulação com *M. oleifera*

Segundo Cardoso (2007) muitos estudos são realizados no sentido de isolar e caracterizar o princípio ativo coagulante encontrado nas sementes da *M. oleifera*. Supõe-se que as sementes de *M. oleifera* são utilizadas como coagulante na clarificação de água devido à presença de uma proteína catiônica solúvel capaz de reduzir a turbidez da água tratada (PRITCHARD et al., 2010a; SANTOS et al., 2011; ALO; ANYIM; ELOM, 2012; GIDDE; BHALERAO; MALUSARE, 2012).

Madrona (2010) afirma que os resultados encontrados na literatura apresentam diferentes massas moleculares para a proteína presente nas sementes de *M. oleifera*, com variações de 6,5 kDa até 30 kDa. O ponto isoelétrico está na faixa de 9,6 a 11 (GASSENSCHMIDT et al., 1995; MUYIBI; EVISON, 1995; NDABIGENGESERE; NARASIAH; TALBOT, 1995; GHEBREMICHAEL et al., 2005; JOSHUA; VASU, 2013).

Jahn (1989) isolou o produto coagulante presente nas sementes *M. oleifera* e dessa forma identificou seis polipeptídios, que são formados por várias unidades de aminoácidos. A análise de aminoácidos apresentou teores elevados de glutamina, arginina e prolina, além de outros compostos (GASSENSCHMIDT et al., 1995). Mangale Sapaná, Chonde e Raut (2012) também observaram a presença de ácido glutâmico e metionina.

Ghebremichael et al. (2005) demonstraram a heterogeneidade das proteínas coagulantes presentes na *M. oleifera* por cromatografia em coluna de trocador catiônico, e detectaram que o composto ativo não é uma proteína única, mas sim uma mistura de proteínas

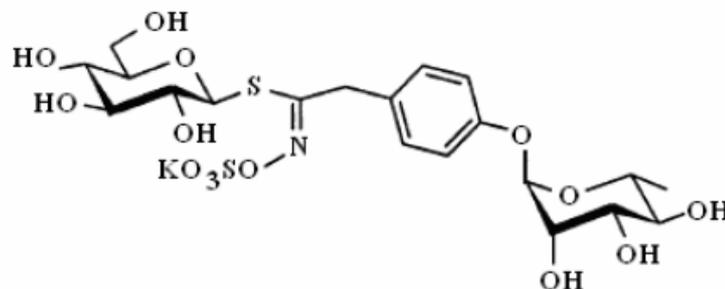
com características físicas similares. Adicionalmente, os autores confirmaram que as proteínas são os principais componentes ativo em extratos de sementes (MADRONA, 2010).

De acordo com Ghebremichael et al. (2005) essa mistura de proteínas encontrada é resistente e ainda possui atividade de coagulação após 5 h de tratamento térmico a 95°C. Uma vez que essa propriedade as torna menos susceptíveis a deterioração, pode ser vista como um pré-requisito para a utilização dos coagulantes naturais. Devido às elevadas temperaturas médias em países tropicais (35°C a 40°C), esses não seriam adequados caso fossem sensíveis ao calor (BODLUND, 2013).

Okuda et al. (2001a) encontraram um composto coagulante em extrato salino das sementes de *M. oleifera* que não era proteína, polissacarídeo ou lipídeo, e sim um polieletrólito orgânico com massa molar em torno de 3 kDa.

Gueyrard et al. (2000) observaram que há mais evidência de que o responsável pela ação coagulante seja um composto amídico. As sementes de *M. oleifera* contêm entre 8 e 10% de glucosinolatos (Figura 6), que são uma classe homogênea de combinações de tiosacarídeos naturais.

Figura 6 – Estrutura de glucosinato presente nas sementes de *M. oleifera*



Fonte: (GUEYRARD et al., 2000)

O mecanismo de coagulação na extração aquosa parece ser o de adsorção e neutralização de cargas (RIBEIRO, 2010; MANGALE SAPANA; CHONDE; RAUT, 2012; POUMAYE et al., 2012) baseado em resultados obtidos pelo potencial zeta.

De acordo com Ndabigengesere, Narasiah e Talbot (1995) e Madrona (2010) pode-se aceitar que os prováveis mecanismos envolvidos no processo de coagulação utilizando *M. oleifera* sejam adsorção e neutralização de cargas ou adsorção e formação de pontes, sendo difícil a definição de um mecanismo exato, pois na realidade esses podem ocorrer simultaneamente, segundo os autores.

Okuda et al. (2001a) investigaram o mecanismo de coagulação do componente ativo extraído e purificado das sementes de *M. oleifera* com solução salina. Os

autores sugerem que o mecanismo de adsorção e formação de pontes não é provável para esse componente ativo, devido à sua baixa massa molar. Já o mecanismo de adsorção e neutralização de cargas também não é responsável pela coagulação com a solução salina.

Desta forma, apesar de diversas pesquisas já realizadas, o mecanismo de atuação da *M. oleifera* como coagulante ainda não está bem definido.

### 3.3.2 Vantagens da Utilização da *M. oleifera* como Coagulante Natural no Tratamento de Água

Okuda et al. (1999) e Pereira et al. (2011) afirmam que o coagulante extraído das sementes da *M. oleifera* se destaca dos coagulantes químicos por ser natural e biodegradável, além de ser comestível (AMAGLOH; BENANG, 2009; MANGALE SAPANA; CHONDE; RAUT, 2012). Essas questões podem ser interessantes para o desenvolvimento sustentável (POUMAYE et al., 2012).

Dependendo da qualidade da água bruta, o emprego de biopolímeros tais como os contidos na *M. oleifera*, pode possibilitar vantagens, entre as quais se destacam a redução de gastos com produtos químicos e o aumento da eficiência de remoção de cor e turbidez da água.

Vale citar que o lodo produzido durante o processo de coagulação por meio da utilização da *M. oleifera* é inócuo (NDABIGENGESERE; NARASIAH, 1998) e apresenta volume entre quatro e cinco vezes menor do que o lodo produzido pelo processo quando da utilização do sulfato de alumínio ou cloreto férrico (NDABIGENGESERE; NARASIAH; TALBOT, 1995; ABALIWANO; GHEBREMICHAEL; AMY, 2008; PISE; HALKUDE, 2012; RAVIKUMAR; SHEEJA, 2012). Silva (2011) constatou em sua pesquisa que lodos provenientes da utilização do coagulante natural *M. oleifera* no processo de coagulação/floculação e sedimentação para tratamento da água bruta possuem uma biodegradabilidade superior quando comparados aos lodos gerados por coagulantes químicos, especificamente o PAC.

A *M. oleifera* também não altera significativamente o pH (SCHWARZ, 2000; ABALIWANO; GHEBREMICHAEL; AMY, 2008; RAVIKUMAR; SHEEJA, 2012) e a alcalinidade da água após o tratamento (NDABIGENGESERE; NARASIAH, 1998; ABDULSALAM et al., 2007; PISE; HALKUDE, 2012), e não causa problemas de corrosão (NDABIGENGESERE; NARASIAH, 1996; GHEBREMICHAEL et al., 2005; GALLÃO; DAMASCENO; BRITO, 2006).

Apesar de haver divergências em relação à atividade antimicrobiana da *M. oleifera*, diversos pesquisadores (GHEBREMICHAEL et al., 2005; ABALIWANO; GHEBREMICHAEL; AMY, 2008; AMAGLOH; BENANG, 2009; ALO; ANYIM; ELOM, 2012; MANGALE et al., 2012; BODLUND, 2013; EGBUIKWEM; SANGODOYIN, 2013) sugerem que esse coagulante é efetivo na remoção de bactérias, já que resultados na ordem de 90% a 99% foram encontrados (JAHN, 1981; MUYIBI; EVISON, 1995; SILVA, 2005; HELLER; PÁDUA, 2006; SANTOS et al., 2011; VIJAY KUMAR et al., 2012; JOSHUA; VASU, 2013). Bichi, Agunwamba e Muyibi (2012) obtiveram remoções de *E. coli* entre 45% e 100%, baseado em alterações nas velocidades e tempos de mistura, além da dosagem do extrato aquoso desengordurado aplicado nos ensaios. Poumaye et al. (2012) encontraram remoções de 47% para *E. coli*, após o tratamento com extrato de *M. oleifera* aquosa. Assim, pode-se dizer que os efeitos antimicrobianos de *M. oleifera* são atribuídos à floculação e à ação bactericida, segundo Nwaiwu e Lingmu (2011) e Mangale Sapana, Chonde e Raut (2012).

Heller e Pádua (2006) relatam que a semente de *M. oleifera*, quando utilizada como coagulante, também apresenta elevado potencial de remoção de toxinas, produzida por cianobactérias.

Desta forma, a utilização dessas sementes é uma alternativa viável em substituição aos sais metálicos, que são utilizados no tratamento de água em todo o mundo (NDABIGENGESERE; NARASIAH, 1996; SILVA; MATOS, 2008; ALI et al., 2010; SÁNCHEZ-MARTÍN; BELTRÁN-HEREDIA; PERES, 2012), devido à sua propriedade coagulante. Awad, Wang e Li (2013) afirmam que a *M. oleifera* é um coagulante viável na substituição parcial dos coagulantes químicos.

Segundo Vijayaraghavan, Sivakumar e Vimal Kumar (2011) há escassez de estudos abrangentes que comparam a eficiência da associação dos coagulantes natural e químicos. Assim, a aplicação da *M. oleifera* com outros coagulantes tradicionais, tais como o cloreto férrico, PAC ou sulfato de alumínio, a fim de atuar como um auxiliar no tratamento de águas, é uma opção importante a ser estudada.

### 3.4 DIAGRAMAS DE COAGULAÇÃO

Uma forma bastante interessante de definir a dosagem do coagulante e o respectivo pH de coagulação fundamenta-se na realização de ensaios em reatores estáticos, ou seja, *Jar Test*, que culminem com a elaboração dos diagramas de coagulação. Esses ensaios

consistem em submeter inicialmente um volume da água bruta a forte agitação simultânea à dispersão do coagulante, visando simular a operação de mistura rápida. Após um pequeno intervalo de tempo, a rotação é significativamente reduzida para que haja condições da formação dos flocos, para, posteriormente, o volume permanecer em repouso para a coleta das amostras da água decantada, objetivando reproduzir, respectivamente, as etapas de coagulação/floculação e sedimentação (LIBÂNIO, 2005).

Diagramas de coagulação são instrumentos para a previsão das condições em que o processo de coagulação/floculação e sedimentação pode ocorrer. A utilização de ferramentas matemáticas capazes de definir as melhores condições a partir de um conjunto de variáveis é de extrema importância para a obtenção das condições otimizadas do processo.

Ferrari, Julio e Julio (2011) destacam que os resultados da variação das dosagens do coagulante em ampla faixa de pH podem ser utilizados na elaboração de diagramas de coagulação, onde diferentes curvas de isoeffiência são geradas de acordo com o parâmetro de controle que se pretende estudar.

Os diagramas de coagulação consistem em plotar os valores de remoção dos parâmetros de qualidade avaliados, variando o pH de coagulação e a dosagem do coagulante e assim, obter faixas onde essas percentagens de remoção são consideráveis, para finalmente escolher os pontos ótimos (pontos de estudo) do processo (CARDOSO, 2007; VALVERDE et al., 2013). Plotam-se nas ordenadas a dosagem do coagulante em  $\text{mg.L}^{-1}$  e nas abcissas o pH de coagulação. Cada ponto do interior do gráfico corresponde à remoção percentual do parâmetro de interesse, usualmente cor ou turbidez, associada ao par de valores pH – dosagem do coagulante (LIBÂNIO, 2005).

É interessante extrapolar as faixas de concentração dos coagulantes que são geralmente utilizados em uma ETA, de modo que a mesma não fique presa a uma única dosagem associada e a um único pH de coagulação, e sim, esteja dentro de uma zona ótima de utilização específica (LIBÂNIO, 2005).

Kim, Moon e Lee (2001) garantem que a utilização desses diagramas é importante para o planejamento, análise e interpretação dos resultados obtidos nos ensaios realizados em *Jar Test*.

Sendo a coagulação vastamente empregada no tratamento de água, uma ferramenta que seja capaz de predizer qual pH mais efetivo para que a coagulação ocorra e a dosagem do coagulante necessária, é extremamente útil (KIM; MOON; LEE, 2001). Pavanelli (2002) afirma que o diagrama de coagulação constitui-se em uma ferramenta de grande utilidade para definir as regiões eficientes de coagulação, para as quais se tem turbidez

remanescente, após floculação e sedimentação, condizente com as desejáveis para que a filtração funcione apropriadamente.

É importantíssimo determinar o pH de coagulação apropriado assim como a dosagem de coagulante adequada. Tem-se observado que em muitas ETAs ocorre grande desperdício de coagulante, devido à sobredosagem desse produto, a qual poderia ser reduzida por meio de estudos de tratabilidade da água bruta (HELLER; PÁDUA, 2006). O estudo de Pavanelli (2002) em relação à comparação dos diagramas de coagulação para diversos coagulantes, tais como cloreto férrico e sulfato de alumínio, comprovou que nem sempre grandes dosagens proporcionam remoções eficientes de turbidez.

Desta forma, estudos baseados no diagrama de coagulação vêm sendo realizados, podendo-se conseguir grande economia no consumo de produtos químicos para o tratamento de água (PAVANELLI, 2001). Além disso, é possível conseguir a minimização do lodo gerado e melhorar a eficiência da etapa de coagulação/floculação para a obtenção de água potável.

A partir desses diagramas, definem-se as regiões otimizadas de remoção dos parâmetros, considerando a qualidade da água utilizada, conforme as condições experimentais estudadas. Ou seja, o diagrama de coagulação é específico para cada coagulante e para cada água bruta em que é empregado.

Obviamente que antes da realização dos ensaios para a construção dos diagramas de coagulação devem ser definidas as velocidades e os tempos de mistura rápida e lenta ( $V_{MR}$ ,  $T_{MR}$ ,  $V_{ML}$ ,  $T_{ML}$ ) além do tempo de sedimentação ( $T_S$ ) a serem utilizados nos ensaios realizados.

Quando se trata de escala real, a confecção do diagrama se fundamenta em duas perspectivas principais: a adequação/otimização de uma estação existente ou o levantamento de parâmetros para o projeto de uma nova estação. Assim, recomenda-se que se defina no diagrama não apenas uma dosagem e respectivo pH de coagulação, mas uma região ótima na qual a estação comumente operará, permitindo pequenas variações de dosagem do coagulante e pH de coagulação (LIBÂNIO, 2005).

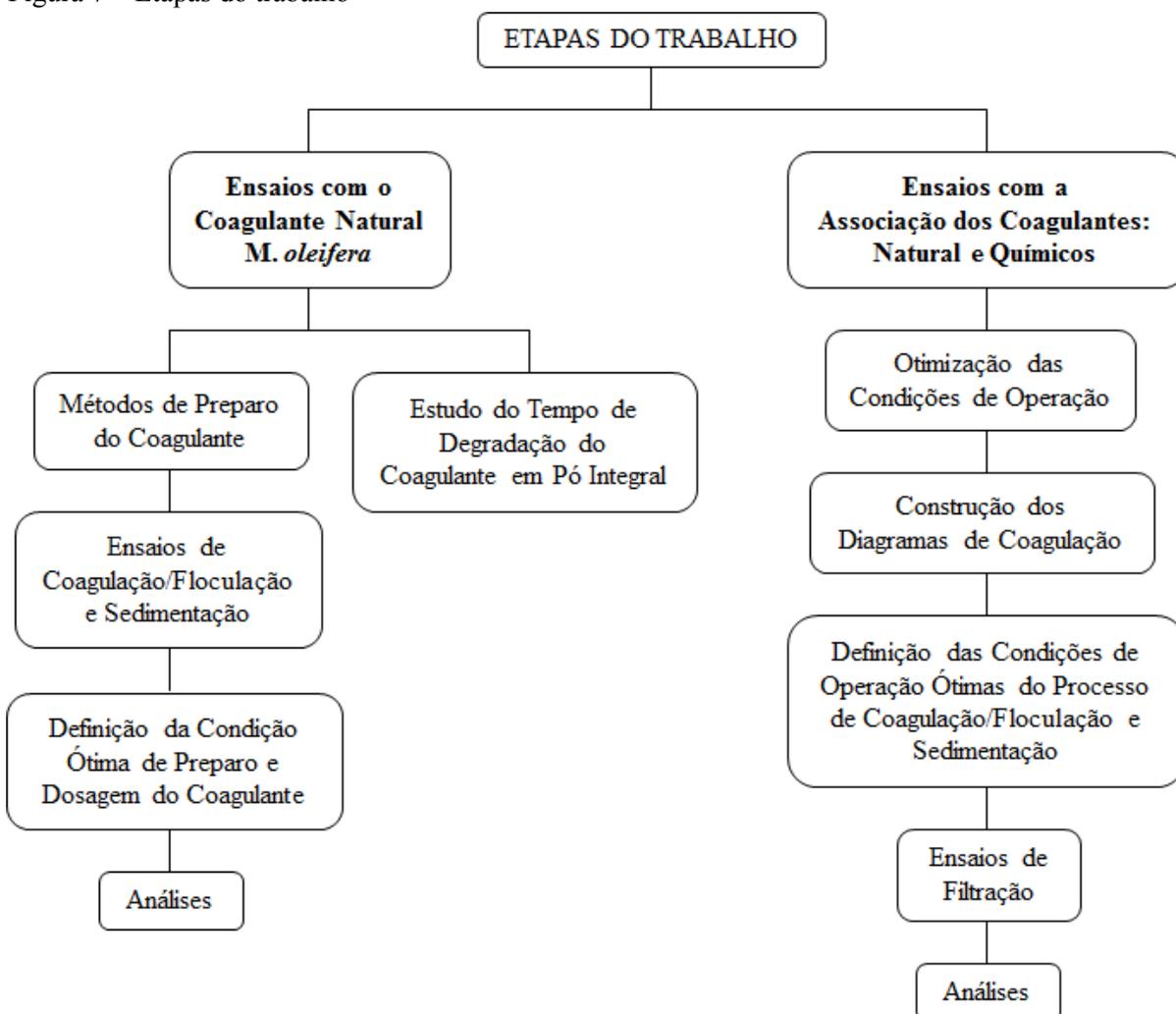
## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nessa seção serão apresentados os procedimentos empregados durante o desenvolvimento do estudo.

Toda a parte experimental do trabalho foi realizada no Laboratório de Gestão, Controle e Preservação Ambiental, do Departamento de Engenharia Química (DEQ), e no Complexo de Centrais de Apoio à Pesquisa (COMCAP) da Universidade Estadual de Maringá (UEM), utilizando a água de estudo coletada na Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar), localizada na cidade de Maringá, Paraná, proveniente da bacia do Rio Pirapó.

A pesquisa foi dividida em 6 etapas principais, conforme apresentado no fluxograma abaixo (Figura 7).

Figura 7 – Etapas do trabalho



Primeiramente, foram avaliados os diferentes métodos de preparo do coagulante obtido a partir das sementes de *M. oleifera*, já que diversos procedimentos são citados na literatura, a fim de padronizar a forma de preparo desse coagulante natural a ser utilizado no decorrer da pesquisa.

O tempo de degradação do coagulante *M. oleifera* em pó integral foi estudado a fim de verificar se o poder coagulante é alterado em relação ao tempo de armazenamento desse produto.

Como pesquisas considerando a associação da *M. oleifera* com os coagulantes químicos são escassas, considerou-se interessante estudar o comportamento dessa associação em termos de eficiência de remoção dos parâmetros de qualidade. Desse modo, as demais etapas do trabalho se referem à utilização conjunta do coagulante natural (*M. oleifera*) com coagulantes químicos (cloreto férrico, PAC e sulfato de alumínio).

Assim, foram realizados ensaios para avaliar a remoção de cor aparente, turbidez e compostos de absorção em  $UV_{254nm}$ , com o objetivo de otimizar as condições de operação na etapa de coagulação/floculação e sedimentação para serem utilizadas nas próximas etapas do trabalho, tais como: velocidades de mistura rápida e lenta ( $V_{MR}$  e  $V_{ML}$ ), tempos de mistura rápida e lenta ( $T_{MR}$  e  $T_{ML}$ ) e tempos de sedimentação ( $T_S$ ).

Na quarta etapa do trabalho foram executados ensaios de coagulação/floculação e sedimentação com a variação do pH e a dosagem dos coagulantes, com o objetivo de construir os diagramas de coagulação a partir dos resultados da eficiência de remoção dos parâmetros de qualidade obtidos.

Na etapa seguinte, foram definidas as condições ótimas do processo de coagulação/floculação e sedimentação a partir dos resultados dos diagramas de coagulação.

Na última etapa desse trabalho, foram realizados ensaios de coagulação/floculação, sedimentação e filtração em algumas condições ótimas do processo, de forma a verificar se os resultados obtidos seriam satisfatórios em termos de produção de água potável.

Ensaio complementares também foram realizados a fim de avaliar se o volume da água de estudo utilizado nos ensaios de coagulação/floculação e sedimentação influenciaria a eficiência de remoção dos parâmetros de qualidade.

Cada uma das etapas será detalhada a seguir.

#### 4.1 COLETA E CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA DE ESTUDO

A água de estudo utilizada no desenvolvimento da pesquisa proveniente da bacia do Rio Pirapó, Maringá, PR, foi coletada na Sanepar (Figura 8), após a realização do pré-tratamento no ponto de captação, onde as etapas de gradeamento e desarenação contribuem para a diminuição da quantidade de sólidos grosseiros na água. Foram realizadas 4 coletas da água de estudo no decorrer deste trabalho, e água coletada foi armazenada em refrigerador à temperatura média de 4°C.

Figura 8 – Local de coleta da água de estudo



Fonte: (AUTOR)

A caracterização da água de estudo foi realizada por meio dos seguintes parâmetros de qualidade: cor aparente, turbidez, compostos com absorção em  $UV_{254nm}$ , temperatura, pH, carbono orgânico dissolvido (COD), alcalinidade e acidez volátil, dureza total, sólidos nas diversas frações, coliformes totais e *E. coli*. Os métodos analíticos e equipamentos utilizados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros de qualidade, seus respectivos métodos de análise e equipamentos

<b>Parâmetros de qualidade</b>	<b>Métodos de análise</b>	<b>Equipamentos</b>
Cor aparente	Espectrofotométrico <sup>(1)</sup>	Espectrofotômetro DR 5000 Hach
Turbidez	Nefelométrico <sup>(1)</sup>	Turbidímetro 2100P Hach
Compostos com absorção em UV <sub>254nm</sub>	Espectrofotométrico <sup>(1)</sup>	Espectrofotômetro DR 5000 Hach
Temperatura	Escala termométrica <sup>(2)</sup>	Termômetro de mercúrio L-151/08 Incoterm
pH	Potenciométrico <sup>(2)</sup>	Medidor Thermo Scientific Orion VSTAR92 Versastar
COD	Combustão a 680°C e detecção do CO <sub>2</sub> em infravermelho <sup>(2)</sup>	Analizador de carbono orgânico total TOC-L CPH Shimadzu
Alcalinidade e acidez volátil <sup>(3)</sup>	Titulométrico	
Dureza total <sup>(4)</sup>	Titulométrico com EDTA	
Sólidos <sup>(5)</sup>	Gravimétrico <sup>(1)</sup>	-
Coliformes totais	Bacteriológico <sup>(2)</sup>	
<i>E. coli</i>	Placa Petrifilm TM EC 3M Company	

(1) Procedimento recomendado pelo Standard Methods for the Examination for Water and Wastewater (APHA, 1995).

(2) Procedimento recomendado pelo manual do equipamento.

(3) Metodologia descrita no Anexo B.

(4) Metodologia descrita no Anexo C.

(5) Referem-se às análises de sólidos suspensos totais (SST), sólidos suspensos fixos (SSF), sólidos suspensos voláteis (SSV) (Anexo D), sólidos totais (ST), sólidos fixos (SF), sólidos voláteis (SV) e sólidos dissolvidos totais (SDT) (Anexo E).

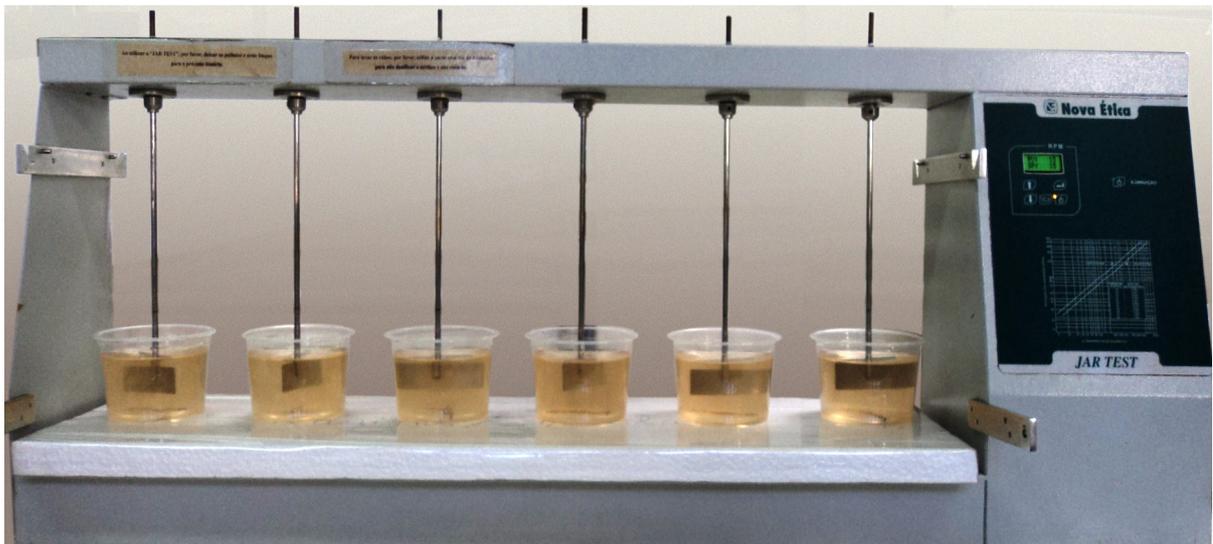
Optou-se por trabalhar com água de estudo com valores de turbidez inicial na faixa de  $70 \pm 10$  UNT, uma vez que, segundo dados obtidos na Sanepar, a turbidez média anual em 2012 foi 62,8 UNT. Desta forma, justifica-se o desenvolvimento do trabalho considerando uma situação real em termos de água bruta, relacionado ao município de Maringá.

Vale citar que houve um monitoramento constante das condições climáticas, juntamente com a Sanepar, a fim de realizar a coleta da água de estudo somente quando a turbidez estivesse de acordo com aquela pré-determinada. Também se preocupou em coletar amostra em quantidade suficiente a fim de atender a demanda para a realização dos ensaios referentes à etapa da pesquisa em questão.

## 4.2 ENSAIOS DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO E SEDIMENTAÇÃO

Os ensaios de coagulação/floculação foram realizados em *Jar Test* simples Nova Ética, Modelo 218/LDB06 de seis provas, com regulador de rotação das hastes misturadoras (Figura 9). A agitação foi proporcionada por agitadores situados na parte superior do equipamento, e controlada por um seletor de rotações (0 a 600 rpm).

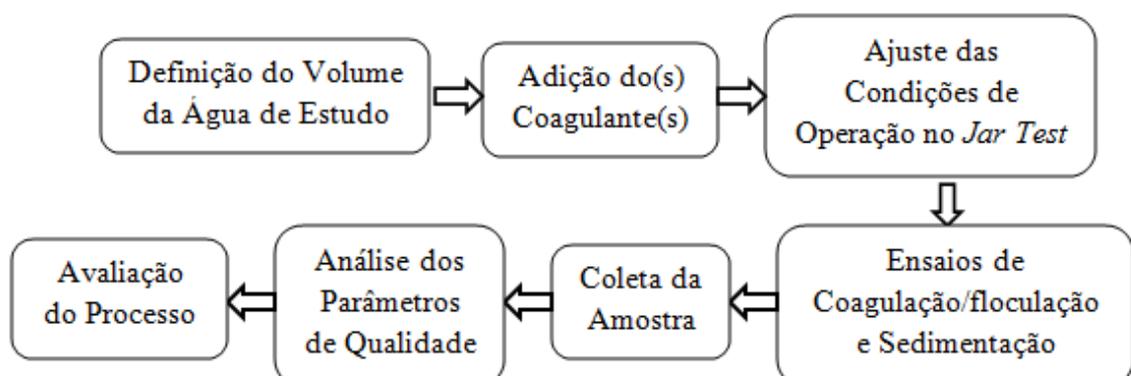
Figura 9 – Equipamento *Jar Test*



Fonte: (AUTOR)

Na Figura 10 são apresentadas, de forma resumida, as etapas referentes ao procedimento realizado nos ensaios de coagulação/floculação e sedimentação.

Figura 10 – Fluxograma das etapas dos ensaios de coagulação/floculação e sedimentação



Foram utilizados recipientes contendo volume da água de estudo variável (400 mL ou 700 mL), baseado na quantidade de amostra a ser retirada para as análises subsequentes. Em cada um desses recipientes, foram adicionadas quantidades pré-determinadas do(s) coagulante(s) em questão. Todos os ensaios foram realizados em duplicata.

A temperatura da água foi mantida na faixa de  $25 \pm 3^\circ\text{C}$  para a realização dos ensaios (VALVERDE et al., 2013), uma vez que a temperatura influi significativamente na viscosidade da água (CARDOSO et al., 2008), e foi medida conforme método de análise descrito na Tabela 1 (seção 4.1).

Para a etapa de avaliação dos diferentes métodos de preparo do coagulante natural obtido a partir das sementes de *M. oleifera* (seção 4.3) e tempo de degradação do coagulante (seção 4.5), as velocidades e tempos foram fixados em: 100 rpm (velocidade de mistura rápida –  $V_{MR}$ ), 3 min (tempo de mistura rápida –  $T_{MR}$ ), 15 rpm (velocidade de mistura lenta –  $V_{ML}$ ), 15 min (tempo de mistura lenta –  $T_{ML}$ ), 60 min (tempo de sedimentação –  $T_S$ ) (CARDOSO, 2007; MADRONA et al., 2012). Para as demais etapas, as condições de operação utilizadas no *Jar Test* foram otimizadas e serão descritas posteriormente. No Apêndice A são apresentados os valores correspondentes em termos de gradientes de velocidade.

Após o processo de coagulação/floculação e sedimentação, a amostra de água tratada foi retirada de cada um dos recipientes, contando com o auxílio de uma pipeta graduada de 20 mL. Para a realização da etapa de filtração, essa amostra foi retirada por meio do auxílio de uma bomba peristáltica (Masterflex).

Os parâmetros de qualidade foram avaliados de acordo com a metodologia apresentada na Tabela 1 (seção 4.1).

A avaliação do processo de coagulação/floculação e sedimentação foi realizada especificamente com base na redução percentual dos parâmetros: cor aparente, turbidez e compostos com absorção em  $UV_{254\text{nm}}$ .

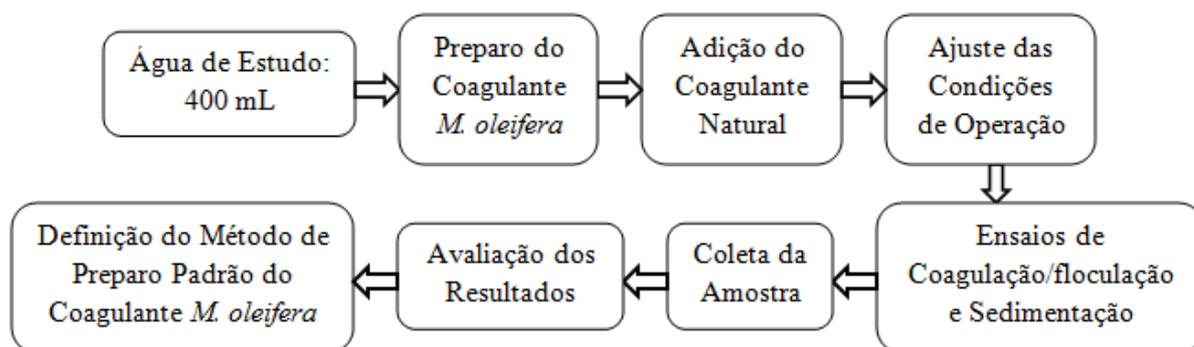
### **4.3 MÉTODOS DE PREPARO PARA OBTENÇÃO DO COAGULANTE NATURAL A PARTIR DAS SEMENTES DE *M. oleifera***

No decorrer do trabalho, o coagulante natural obtido a partir das sementes de *M. oleifera* será identificado como coagulante *M. oleifera*.

Optou-se por utilizar sementes provenientes da Universidade Federal do Sergipe (UFS), Aracaju, SE, em todo o trabalho. No Anexo A é apresentada a caracterização das mesmas. Dois lotes das sementes de *M. oleifera* utilizados no trabalho, com recebimento em novembro de 2012 e maio de 2013, foram gentilmente cedidos pela UFS.

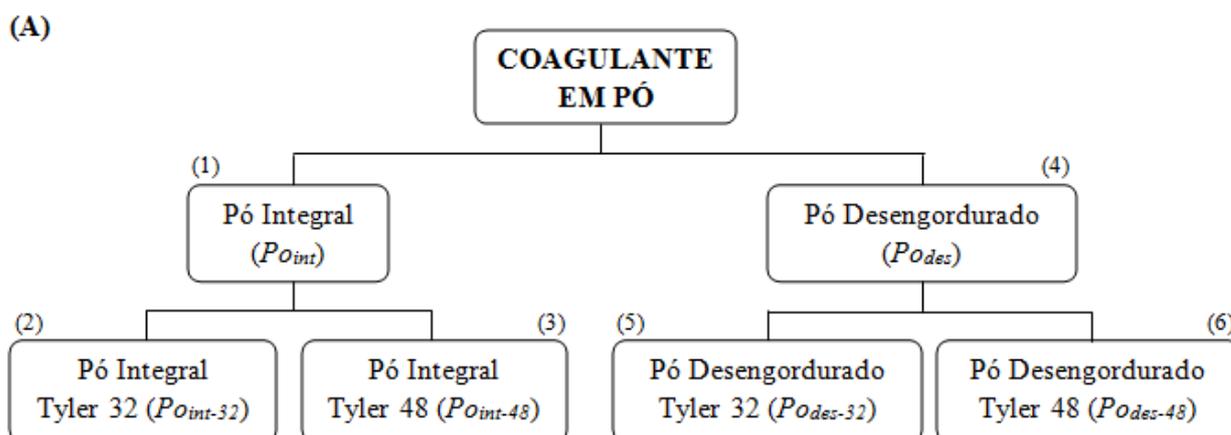
Na Figura 11 são apresentadas, de modo resumido, as etapas envolvidas no processo de avaliação dos diferentes métodos de preparo do coagulante *M. oleifera*.

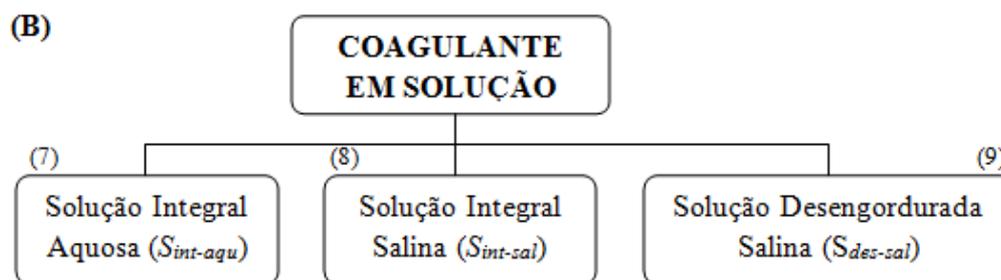
Figura 11 – Fluxograma para a avaliação dos diferentes métodos de preparo do coagulante *M. oleifera*



Nove métodos de preparo do coagulante *M. oleifera* foram propostos, conforme especificados na Figura 12.

Figura 12 – Fluxograma dos diferentes tipos de coagulante natural: (A) Coagulante *M. oleifera* em pó; (B) Coagulante *M. oleifera* em solução





O procedimento para a obtenção dos diferentes métodos de preparo do coagulante *M. oleifera* é descrito detalhadamente a seguir. As sementes de *M. oleifera* com casca foram embaladas e armazenadas em refrigerador a temperatura média de 4°C.

#### 4.3.1 Preparo do Coagulante *M. oleifera* em Pó Integral

Para a utilização como coagulante natural em pó integral sem granulometria específica ( $Po_{int}$ ), 15 g de sementes de *M. oleifera*, previamente descascadas, foram trituradas em liquidificador doméstico (NL-41 Mondial) durante 3 min e retidas em estufa com circulação e renovação de ar (SX CR/42 Digital Timer) a 40°C até massa constante (AMAGLOH; BENANG, 2009) (Figura 13). Esse coagulante foi utilizado por um período máximo de 7 dias, exceto no estudo do tempo de degradação.

Figura 13 – *M. oleifera* (com casca, descascada e em pó integral)



Fonte: (AUTOR)

Para a obtenção do coagulante com granulometria específica, Tyler 32 e Tyler 48 ( $Po_{int-32}$  e  $Po_{int-48}$ ), 10 g do coagulante *M. oleifera* em pó integral foram

homogeneizadas em um conjunto de peneiras (Bertel) com aberturas entre 3,350 mm e 0,300 mm durante 1 h (Tabela 2).

Tabela 2 – Conjunto de peneiras

Peneiras Tyler	6	12	20	32	48
Aberturas (mm)	3,350	1,400	0,850	0,500	0,300

As frações obtidas com abertura de 0,500 mm e 0,300 mm foram denominadas  $Po_{int-32}$  e  $Po_{int-48}$ , respectivamente. De acordo com a distribuição granulométrica (Apêndice B), essas foram as granulometrias nas quais se obteve a maior massa retida de pó triturado a partir das sementes de *M. oleifera*, justificando a escolha de tais granulometrias nos ensaios de preparo do coagulante natural.

#### 4.3.2 Preparo do Coagulante *M. oleifera* em Pó Desengordurado

Realizou-se a extração química do óleo no extrator contínuo soxhlet (segundo adaptações da metodologia proposta por IAL (2008) por meio da pesagem de 10 g de sementes de *M. oleifera* trituradas). O pó foi transferido para um cartucho de extração e levado ao extrator, acrescentando 170 mL de hexano, com a evaporação do solvente ocorrendo em um ciclo de 3 h (ALI et al., 2010; NWAIWU; ZALKIFUL; RAUFU, 2012) em temperatura média de 70°C (MUYIBI et al., 2003). O extrato desengordurado obtido foi lavado com 500 mL de água destilada na temperatura de 40°C. A secagem desse pó desengordurado ( $Po_{des}$ ) foi realizada em estufa com circulação e renovação de ar (SX CR/42 Digital Timer) a 40°C até massa constante (AMAGLOH; BENANG, 2009), pois o limite de tolerância para não degradar a ação das proteínas é de 60°C (SANTANA et al., 2010).

De modo a obter a granulometria desejada do pó desengordurado, Tyler 32 e Tyler 48 ( $Po_{des-32}$  e  $Po_{des-48}$ ), utilizou-se o agitador de peneiras, conforme descrito na seção anterior.

#### 4.3.3 Preparo do Coagulante *M. oleifera* em Solução

Foram preparadas soluções na concentração de 1% m.v<sup>-1</sup>. Para a extração aquosa, adicionou-se 100 mL de água destilada ( $S_{int-aqu}$ ) e para a extração salina, 100 mL de

solução NaCl 1M ( $S_{int-sal}$ ). Essas extrações foram realizadas por turbólise, em liquidificador doméstico (NL-41 Mondial) por 3 min, misturadas em agitador magnético (KT/C Ika® RH) durante 30 min, a fim de melhorar a respectiva extração, e filtradas a vácuo (Bomba ZA.60S Vacuum Technology SRL; Holder acrílico Millipore) (MADRONA et al., 2010).

Para a obtenção do coagulante *M. oleifera* em solução desengordurada salina ( $S_{des-sal}$ ), utilizou-se o procedimento de extração química do óleo seguido do método da extração salina, já descritos.

De acordo com a literatura (NDABIGENGESERE; NARASIAH; TALBOT, 1995; OKUDA et al., 1999; KATAYON et al., 2006), o método de extração do composto ativo da semente de *M. oleifera* com solvente apresenta como desvantagem a instabilidade do coagulante. Visto que o tempo de conservação dessas soluções é limitado, pois ocorre o processo natural de biodegradação, optou-se por preparar esse coagulante nos dias de execução dos ensaios em *Jar Test*.

#### 4.3.4 Condições de Operação do Processo

Nessa etapa, o volume da água de estudo utilizado em cada recipiente foi de 400 mL.

As dosagens do coagulante *M. oleifera* utilizadas nos ensaios de coagulação/floculação e sedimentação foram: 10 mg.L<sup>-1</sup>, 25 mg.L<sup>-1</sup>, 50 mg.L<sup>-1</sup>, 100 mg.L<sup>-1</sup>, 150 mg.L<sup>-1</sup> e 200 mg.L<sup>-1</sup>.

Segundo Rolim et al. (2011) a concentração de até 200 mg.L<sup>-1</sup> de extrato do coagulante *M. oleifera* não representa nenhum risco à saúde, por isso optou-se por trabalhar com dosagens de no máximo esse valor.

As condições de operação utilizadas nessa etapa foram: 100 rpm ( $V_{MR}$ ), 3 min ( $T_{MR}$ ), 15 rpm ( $V_{ML}$ ), 15 min ( $T_{ML}$ ) e 60 min ( $T_S$ ).

#### 4.4 PREPARO DOS COAGULANTES QUÍMICOS

Quando os ensaios visam, em princípio, o tratamento convencional de água, a concentração de 1% m.v<sup>-1</sup> (10000 mg.L<sup>-1</sup>) é adequada (LIBÂNIO, 2005). Assim, as soluções padrões dos coagulantes químicos foram preparadas nessa concentração.

#### 4.4.1 Preparo da Solução Padrão de Cloreto Férrico

Para o preparo da solução padrão desse coagulante, dissolveu-se 1 g de cloreto de ferro (ICO) P.A. (Synth) em água destilada e completou-se o volume para 100 mL, com o objetivo de obter uma solução padrão com concentração de 1% m.v<sup>-1</sup>.

#### 4.4.2 Preparo da Solução Padrão de PAC

Para o preparo da solução padrão desse coagulante, foi considerada uma concentração de 1% v.v<sup>-1</sup>, ou seja, para cada 1 mL de PAC (Guaíba Química), completou-se o volume em balão volumétrico para 100 mL com água destilada.

O PAC utilizado nos ensaios durante este trabalho foi gentilmente cedido pela Sanepar.

#### 4.4.3 Preparo da Solução Padrão de Sulfato de Alumínio

Para o preparo da solução padrão desse coagulante, dissolveu-se 1 g de sulfato de alumínio hidratado P.A. (Vetec) em água destilada e completou-se o volume para 100 mL, a fim de obter uma solução padrão com concentração de 1% m.v<sup>-1</sup>.

### 4.5 TEMPO DE DEGRADAÇÃO DO COAGULANTE *M. oleifera* EM PÓ INTEGRAL

Foi avaliado o tempo de degradação do coagulante em pó integral proveniente das sementes de *M. oleifera*, de um mesmo lote, previamente preparado de acordo com a metodologia apresentada na seção 4.3.1. Esse pó integral foi devidamente embalado em sacos de polietileno e acondicionado em recipientes com tampa, sendo armazenado em refrigerador à temperatura média de 4°C. O objetivo foi verificar se o poder coagulante da *M. oleifera* é alterado em relação ao tempo de armazenamento do produto.

Nessa etapa, o volume da água de estudo utilizado em cada recipiente foi de 400 mL. A dosagem do coagulante *M. oleifera* em pó integral utilizado nos ensaios de coagulação/floculação e sedimentação foi de 50 mg.L<sup>-1</sup>.

Os ensaios de coagulação/floculação e sedimentação, conforme descrito na seção 4.2, foram realizados a cada 7 dias durante um período total de 7 semanas.

#### 4.6 ENSAIOS PRELIMINARES PARA A OTIMIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO NA ETAPA DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO E SEDIMENTAÇÃO

Esse estudo foi realizado a fim de avaliar o efeito da associação da *M. oleifera* e dos coagulantes químicos: cloreto férrico, PAC e sulfato de alumínio, em termos de eficiência de remoção de cor aparente, turbidez e compostos com absorção em  $UV_{254nm}$ , em função da alteração das velocidades ( $V_{MR}$  e  $V_{ML}$ ) e tempos ( $T_{MR}$ ,  $T_{ML}$  e  $T_S$ ), com o objetivo de obter as condições de operação adequadas para a água bruta encontrada na região de Maringá.

As condições de trabalho que consideram o processo de coagulação/floculação e sedimentação somente com a *M. oleifera* são baseadas em experimentos previamente realizados por Cardoso (2007) e trabalhos publicados por Cardoso et al. (2008), Madrona et al. (2012) e Valverde et al. (2013). Já as condições de trabalho quando da utilização dos coagulantes químicos são baseadas em informações fornecidas pela Sanepar, já que priorizou-se adotar condições reais de operação da ETA de Maringá. Na Tabela 3 são apresentadas essas condições.

Tabela 3 – Condições de operação para o processo de coagulação/floculação e sedimentação com a *M. oleifera* e coagulantes químicos

Parâmetros (unidades)	Condições de operação	
	<i>M. oleifera</i>	Coagulantes químicos
$V_{MR}$ (rpm)	100	110
$T_{MR}$ (min)	3	1
$V_{ML}$ (rpm)	15	45
$T_{ML}$ (min)	15	15
$T_S$ (min)	60	15

Assim, os valores dos parâmetros definidos para a associação dos coagulantes natural e químicos foram alterados utilizando as condições de operação adequadas para a *M. oleifera* e para os coagulantes químicos, além dos valores médios entre as mesmas. Na Tabela 4 são apresentadas as condições avaliadas nos ensaios preliminares para a otimização das condições de operação na etapa de coagulação/floculação e sedimentação para a associação dos coagulantes *M. oleifera* e cloreto férrico, *M. oleifera* e PAC, e *M. oleifera* e sulfato de alumínio.

Tabela 4 – Condições de operação para a associação dos coagulantes natural e químicos

Parâmetros	Condições de operação			
V <sub>MR</sub>	100 rpm	105 rpm	110 rpm	
T <sub>MR</sub>	1 min	2 min	3 min	
V <sub>ML</sub>	15 rpm	30 rpm	45 rpm	
T <sub>ML</sub>		15 min		
T <sub>S</sub>	15 min	30 min	45 min	60 min

Nessa etapa, o volume da água de estudo utilizado em cada recipiente foi de 700 mL.

As dosagens ótimas utilizadas para a associação dos coagulantes nos ensaios foram adaptadas segundo recomendações da Sanepar e com base nos valores citados na literatura (BAGHVAND et al., 2010; MAKKI et al., 2010; JOSHUA; VASU, 2013), e são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Dosagem ótima dos coagulantes

Coagulantes	Dosagem ótima (mg.L <sup>-1</sup> )
<i>M. oleifera</i>	50
Cloreto férrico	10
PAC	12,5
Sulfato de alumínio	25

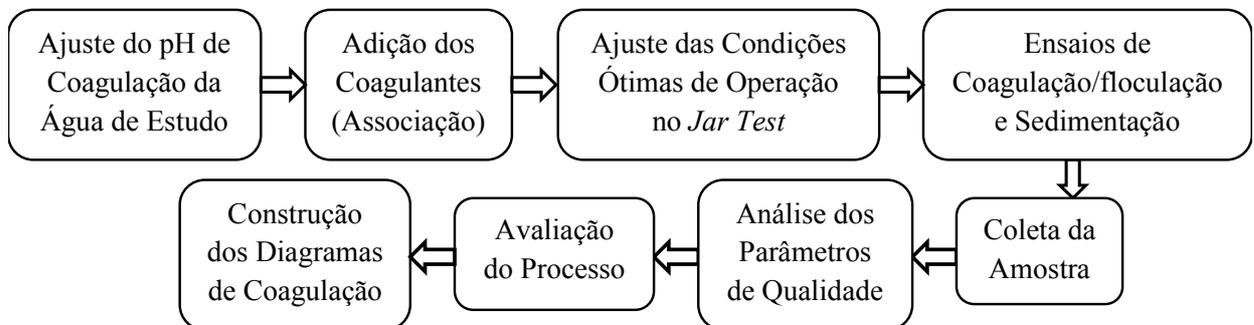
Nos ensaios de coagulação/floculação e sedimentação, optou-se por sempre adicionar a dosagem previamente definida do coagulante químico seguido do coagulante *M. oleifera* (PISE; HALKUDE, 2012).

#### 4.7 DIAGRAMAS DE COAGULAÇÃO

Os diagramas de coagulação construídos no programa 3DField (contornos de superfícies em três dimensões), versão 3.5.3.0, foram obtidos por meio da realização de ensaios de coagulação/floculação e sedimentação, avaliando a eficiência de remoção de cor aparente, turbidez e compostos com absorção em UV<sub>254nm</sub>, em função da variação do pH de coagulação e da dosagem dos coagulantes nas associações: *M. oleifera* e cloreto férrico, *M. oleifera* e PAC, e *M. oleifera* e sulfato de alumínio.

Na Figura 14 são apresentadas, de forma resumida, as etapas referentes aos ensaios realizados para a construção dos diagramas de coagulação.

Figura 14 – Fluxograma das etapas dos ensaios para a construção dos diagramas de coagulação



Nessa etapa, o volume da água de estudo utilizado em cada recipiente foi de 400 mL.

Foi adotada a faixa de pH entre 4 e 10, com a finalidade de avaliar o comportamento da associação dos coagulantes em um amplo intervalo de valores. O pH de coagulação da água de estudo foi corrigido com solução de hidróxido de sódio (NaOH) 0,1N e 1N; e ácido clorídrico (HCl) 0,1N e 1N.

As dosagens dos coagulantes utilizadas nas associações estudadas foram, no máximo, correspondentes aos valores ótimos de cada coagulante, previamente apresentados na Tabela 5 (seção 4.6). Para essa etapa do trabalho, foram utilizadas as dosagens apresentadas na Tabela 6, segundo adaptações da metodologia proposta por Nwaiwu e Bello (2011) em relação às percentagens (%) dos coagulantes.

Tabela 6 – Dosagem dos coagulantes na associação para a construção dos diagramas de coagulação

Ponto	% Coagulante (Natural/Químico)	Dosagem dos coagulantes (mg.L <sup>-1</sup> )			
		Químicos			Natural
		Cloreto férico	PAC	Sulfato de alumínio	<i>M. oleifera</i>
1	100%/0%	0	0	0	50
2	90%/10%	1	1,25	2,5	45
3	80%/20%	2	2,5	5	40
4	70%/30%	3	3,75	7,5	35
5	60%/40%	4	5	10	30
6	50%/50%	5	6,25	12,5	25
7	40%/60%	6	7,5	15	20
8	30%/70%	7	8,75	17,5	15
9	20%/80%	8	10	20	10
10	10%/90%	9	11,25	22,5	5
11	0%/100%	10	12,5	25	0

Para a realização dos ensaios de coagulação/floculação e sedimentação, as condições de operação ótimas utilizadas para a associação dos coagulantes natural e químicos são apresentadas na Tabela 7. Vale citar que essas condições foram obtidas por meio da realização de ensaios durante esse trabalho.

Tabela 7 – Condições de operação ótimas para a associação dos coagulantes

Associação dos coagulantes ( <i>M. oleifera</i> )	Parâmetros do processo				
	V <sub>MR</sub> (rpm)	T <sub>MR</sub> (min)	V <sub>ML</sub> (rpm)	T <sub>ML</sub> (min)	T <sub>S</sub> (min)
Cloreto férrico	100	3	30	15	15
PAC	100	1	45	15	15
Sulfato de alumínio	105	1	30	15	15

#### **4.8 DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES ÓTIMAS DO PROCESSO DE COAGULAÇÃO/ FLOCULAÇÃO E SEDIMENTAÇÃO A PARTIR DOS DIAGRAMAS DE COAGULAÇÃO**

A partir da análise dos resultados obtidos por meio dos diagramas de coagulação para a associação dos coagulantes *M. oleifera* e cloreto férrico, *M. oleifera* e PAC, e *M. oleifera* e sulfato de alumínio, diversos pontos de estudo foram definidos, levando em consideração as eficiências de remoção dos parâmetros de qualidade: cor aparente, turbidez e compostos com absorção em UV<sub>254nm</sub>, assim como as dosagens dos coagulantes natural e químicos, e pHs de coagulação utilizados no processo de coagulação/floculação e sedimentação. Dessa forma, obteve-se as condições ótimas do processo.

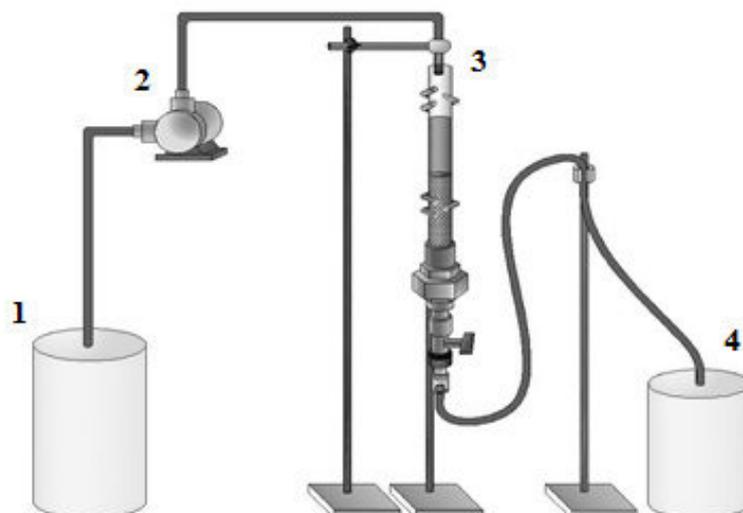
#### **4.9 ETAPA DE FILTRAÇÃO**

Antes e após os processos de coagulação, floculação, sedimentação e filtração foram monitoradas as características da água, a fim de determinar a qualidade da água tratada.

Nessa etapa, foi utilizado um filtro rápido descendente com camada dupla: areia e antracito, operando com ação de profundidade, no qual as impurezas são retidas ao longo do meio filtrante. No Apêndice C são apresentadas as curvas de distribuição granulométrica da areia e do antracito, assim como os cálculos para a determinação do tamanho efetivo e coeficiente de desuniformidade.

O sistema experimental era composto por uma coluna em acrílico de 6,4 cm de diâmetro interno e 35 cm de altura, conforme esquematizado na Figura 15, de acordo com a metodologia proposta por Bongiovani (2014).

Figura 15 – Esquema da etapa de filtração rápida descendente



- (1) Tanque de alimentação.
- (2) Bomba peristáltica.
- (3) Filtro rápido descendente de areia e antracito.
- (4) Tanque de armazenamento de saída do filtro.

Fonte: (BONGIOVANI, 2014)

A coluna de filtração rápida descendente, com altura total de 20 cm (Figura 16) foi construída considerando uma camada de areia com espessura de 6 cm e granulometria entre 0,42 mm e 2,00 mm, e uma camada de antracito com espessura de 9 cm e granulometria entre 0,71 mm e 2,40 mm, tendo como suporte uma tela (BONGIOVANI, 2014) e 5 cm de seixos rolados entre 1/4” e 1/8”. Os materiais utilizados cedidos gentilmente pela Sanepar foram previamente lavados, a fim de evitar a contaminação da coluna de filtração.

Figura 16 – Coluna de filtração



Fonte: (AUTOR)

A quantidade de material filtrante a ser colocada no filtro depende da porosidade ( $\varepsilon$ ), da área do filtro ( $A$ ), da espessura da camada filtrante de cada componente do filtro ( $L$ ), e da massa específica do material granular ( $\rho$ ). Assim, a massa de material filtrante ( $m$ ) a ser colocada na coluna de filtração é dada pela Equação 1 (DI BERNARDO, 2003):

$$m = (1 - \varepsilon) \cdot A \cdot L \cdot \rho \quad (1)$$

A porosidade do leito equivale a 0,42 e 0,47, e a massa específica do material granular é  $2,65 \text{ g.cm}^{-3}$  e  $1,48 \text{ g.cm}^{-3}$ , para a areia e antracito, respectivamente (RICHTER, 1977). Dessa forma, o filtro com camada dupla foi preenchido com uma massa de material filtrante igual a 297 g de areia e 227 g de antracito.

Para a colocação do material no sistema experimental, a coluna de filtração foi parcialmente preenchida com água, a fim de minimizar a formação de bolhas de ar, conforme recomendações de Di Bernardo (2003).

Segundo Richter (1977) a carga hidráulica para os materiais filtrantes: areia e antracito, geralmente utilizada no projeto de filtros rápidos é dada pelas Equações 2 e 3, respectivamente:

$$H = 0,005 \cdot Q \cdot L_{\text{areia}} \quad (2)$$

$$H = 0,0009 \cdot Q \cdot L_{\text{antracito}} \quad (3)$$

De acordo com o sistema experimental proposto por Bongiovani (2014) foi adotada taxa de filtração ( $Q$ ) de  $240 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  (equivalente a uma vazão de  $535 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ ), taxa mínima a ser utilizada para filtração rápida utilizando camada dupla, a qual foi estimada uma carga hidráulica real ( $H$ ) de 7,2 cm e 1,9 cm de coluna d'água para a areia e o antracito, obtendo uma carga hidráulica total de 9,1 cm.

Primeiramente, realizou-se a limpeza da coluna de filtração por meio da passagem de água da torneira, seguida de água destilada. Após, realizou-se a alimentação do filtro com água tratada (após os ensaios de coagulação/floculação e sedimentação) em fluxo contínuo, por meio do auxílio de uma bomba peristáltica (Masterflex).

A medição da vazão foi realizada em um único ponto, na saída do filtro, com o auxílio de um cronômetro e uma proveta de 1000 mL. Caso a vazão estivesse diferente do valor adequado ( $535 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ ) efetuava-se o ajuste na saída do filtro até a vazão se manter constante, para somente depois iniciar a marcação do tempo de filtração. Monitorou-se a

vazão na saída do filtro continuamente, em intervalos de 3 min, e o início da coleta da amostra de água tratada se deu nos minutos finais de filtração, ou seja, após 15 min decorridos, para um período total de filtração de 21 min (CENTURIONE FILHO; DI BERNARDO, 2003; JULIO et al., 2009), a fim de obter uniformidade nos ensaios.

Como o objetivo do filtro foi somente analisar a qualidade do filtrado, este foi operado a taxas declinantes, ou seja, as taxas foram alteradas ao longo do tempo, de tal forma a manter sempre a mesma carga hidráulica.

#### 4.9.1 Análises Realizadas Após a Etapa de Filtração

Após a definição das condições ótimas do processo de coagulação/floculação e sedimentação realizou-se uma investigação mais detalhada em relação às eficiências de remoção dos parâmetros de qualidade obtidos após a etapa de filtração, avaliando, posteriormente, o enquadramento de diversos parâmetros de qualidade na Portaria nº. 2914 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011).

Assim, foi realizada a caracterização da água tratada após o processo de coagulação/floculação, sedimentação e filtração, verificando o valor residual de cor aparente, turbidez, compostos com absorção em UV<sub>254nm</sub>, temperatura, pH, COD, alcalinidade e acidez volátil, dureza total, SDT, coliformes totais e *E. coli*, conforme a metodologia descrita na Tabela 1 (seção 4.1). Analisou-se ainda a formação de trihalometanos totais (THMT), tamanho das partículas e potencial zeta, conforme detalhado a seguir.

Dessa forma, foram definidas as condições otimizadas do processo de coagulação/floculação, sedimentação e filtração para cada associação dos coagulantes *M. oleifera* e cloreto férrico, *M. oleifera* e PAC, e *M. oleifera* e sulfato de alumínio, considerando água de estudo com turbidez inicial de  $70 \pm 10$  UNT.

##### 4.9.1.1 Trihalometanos totais

Para a realização do processo de desinfecção, em balões volumétricos com 500 mL de água de estudo ou tratada (após o processo de filtração), adicionou-se  $1,5 \text{ mg.L}^{-1}$  de hipoclorito de sódio 4-6% P.A. (Vetec), que é a dosagem utilizada pela Sanepar. Essas vidrarias foram envolvidas com papel alumínio, a fim de haver ausência de luz para minimizar a degradação do cloro. Optou-se pelo tempo de contato de 8 h, que é o tempo de

residência necessário para que a água tratada seja distribuída para a população. Para cessar a reação de cloro residual com a MON após o tempo de contato, foram adicionados às amostras de água tratada o sequestrante de cloro residual livre (solução de tiosulfato de sódio P.A. ACS Synth), com posterior análise de THMT (BONGIOVANI, 2014).

Para a quantificação de THMT nas amostras de água tratada, utilizou-se o método da adição do padrão interno, fluorbenzeno (Sulpeco 99%), o qual é usado para medir a resposta relativa em referência a outros compostos da amostra (BONGIOVANI, 2014).

As curvas de calibração de cada THM (clorofórmio, bromodiclorometano, dibromoclorometano e bromofórmio) são apresentadas no Anexo F, e a análise de THMT foi realizada em cromatógrafo gasoso (FOCUS CG Thermo Electron Corporation) com coluna capilar: dimensão de 30 m x 0,25 mm e espessura do filme de 0,25  $\mu\text{m}$  (HP-5MS Agilente Technologies), sistema de separação por *purge and trap*, e detecção e quantificação por espectrometria de massa (DSQ II Thermo Electron Corporation).

#### 4.9.1.2 Tamanho das partículas e potencial zeta

Verificou-se o tamanho das partículas e o potencial zeta (DELSA<sup>TM</sup> NANO C Beckman Coulter) a fim de avaliar o comportamento da associação dos coagulantes após o processo de coagulação/floculação e sedimentação.

Para a análise do tamanho de partículas, o equipamento utiliza espectroscopia de correlação de fótons, que determina o tamanho da partícula pela medida da taxa de flutuações na intensidade de luz laser dispersada por partículas que se difundem através de um fluido. Para a medida do potencial zeta em pH neutro, o equipamento utiliza dispersão de luz eletroforética, que determina o movimento das partículas carregadas sob um campo elétrico aplicado a partir do deslocamento de Doppler da luz dispersa (BONGIOVANI, 2014).

## 4.10 ENSAIOS COMPLEMENTARES

Foram realizados ensaios de coagulação/floculação e sedimentação, conforme descrito na seção 4.2, utilizando volume da água de estudo de 400 mL e 700 mL, a fim de verificar se esse volume poderia influenciar na eficiência de remoção dos parâmetros de qualidade, com a dosagem de 50  $\text{mg.L}^{-1}$  do coagulante *M. oleifera* em pó integral

adicionada ao processo, nas seguintes condições de operação: 100 rpm ( $V_{MR}$ ), 3 min ( $T_{MR}$ ), 15 rpm ( $V_{ML}$ ), 15 min ( $T_{ML}$ ) e 60 min ( $T_S$ ).

#### 4.11 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para a comparação dos resultados foram realizados a análise de variância (ANOVA) e o teste de comparação de médias, teste de Tukey, com 95% de confiança ( $p$ -valor  $< 0,05$ ), para verificar as diferenças significativas, por meio do programa estatístico SISVAR (FERREIRA, 2011), versão 5.3.

Para a avaliação da remoção dos parâmetros de qualidade: cor aparente, turbidez e compostos com absorção em  $UV_{254nm}$ , após os processos de coagulação/floculação e sedimentação realizados na etapa do método de preparo do coagulante *M. oleifera* (seção 4.3) utilizou-se o delineamento fatorial  $9 \times 6$ , sendo os fatores: métodos (nove métodos de preparo da *M. oleifera* para a utilização como coagulante natural) e dosagens (seis dosagens de *M. oleifera*), com duas repetições, totalizando 108 ensaios.

Para a etapa do tempo de degradação do coagulante *M. oleifera* em pó integral (seção 4.5) foram avaliadas as eficiências de remoção dos parâmetros de qualidade em função do tempo de armazenamento, por meio do delineamento inteiramente casualizado (DIC), com duas repetições, totalizando 18 ensaios.

Considerando os ensaios preliminares para a otimização das condições de operação na etapa de coagulação/floculação e sedimentação (seção 4.6) utilizou-se o delineamento fatorial  $27 \times 4$ , sendo os fatores: ensaios (vinte e sete variações quanto à  $V_{MR}$ ,  $T_{MR}$ ,  $V_{ML}$  e  $T_{ML}$ ) e tempos de sedimentação (quatro variações quanto ao  $T_S$ ), com duas repetições, totalizando 216 ensaios para cada uma das associações dos coagulantes estudadas (*M. oleifera* e cloreto férrico, *M. oleifera* e PAC, e *M. oleifera* e sulfato de alumínio).

Para a etapa de construção dos diagramas de coagulação (seção 4.7) foram avaliadas as eficiências de remoção dos parâmetros de qualidade por meio do DIC, já que cada pH de coagulação foi analisado individualmente, com duas repetições, totalizando 154 ensaios para cada uma das associações dos coagulantes estudadas.

Para a etapa dos ensaios complementares (seção 4.10) foram avaliadas as eficiências de remoção de cor aparente, turbidez e compostos com absorção em  $UV_{254nm}$  em função dos volumes da água de estudo, por meio do DIC, com duas repetições, totalizando 8 ensaios.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nessa seção serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios realizados no decorrer do trabalho.

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA DE ESTUDO

Na Tabela 8 são apresentados os resultados dos parâmetros analisados a fim de caracterizar a água de estudo, conforme metodologias citadas na Tabela 1 (seção 4.1). Vale lembrar que foram realizadas 4 coletas de água de estudo durante o trabalho, com turbidez inicial de  $70 \pm 10$  UNT.

Tabela 8 – Caracterização da água de estudo

Parâmetros de qualidade (unidade)	Água de estudo			
	1	2	3	4
Cor aparente (uH)	357	386	426	417
Turbidez (UNT)	69,4	72,9	74,9	79,9
UV <sub>254nm</sub> (cm <sup>-1</sup> )	0,296	0,275	0,294	0,263
Temperatura (°C)	25	22	19	20
pH	8,120	7,813	7,940	7,537
COD (mg.L <sup>-1</sup> )	3,100	3,410	ND <sup>(*)</sup>	4,160
Alcalinidade (mg.L <sup>-1</sup> )	25,0	24,5	31,0	26,0
Acidez volátil (mg.L <sup>-1</sup> )	24	36	54	42
Dureza total (mg.L <sup>-1</sup> )	24,75	21,25	25,75	27,50
SST (mg.L <sup>-1</sup> )	11,00	27,67	32,33	37,00
SSF (mg.L <sup>-1</sup> )	5,00	16,33	22,0	34,00
SSV (mg.L <sup>-1</sup> )	6,00	11,33	10,33	3,00
ST (mg.L <sup>-1</sup> )	118,67	98,67	192,00	208,00
SF (mg.L <sup>-1</sup> )	94,00	4,67	78,67	99,33
SV (mg.L <sup>-1</sup> )	24,67	94,00	113,33	108,67
SDT (mg.L <sup>-1</sup> )	107,67	71,00	159,67	171,00
Coliformes totais (UFC) <sup>(1)</sup>	7000	5900	1400	1200
<i>E. coli</i> (UFC) <sup>(1)</sup>	2000	2200	800	200

(\*) ND: não determinado.

(1) UFC: Unidade formadoras de colônias em 100 mL.

Considerando que esse trabalho utiliza água bruta, é importante citar que os compostos naturais podem ocasionar variações em sua composição (MADRONA, 2010). Segundo a Resolução nº. 357 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2005) a água de estudo se enquadra na classe 2, já que pode ser destinada ao abastecimento após tratamento convencional.

Não foi possível determinar o valor de COD para a água de estudo 3, pois o equipamento estava em fase de manutenção no período de coleta da amostra. Como há interferência nos resultados dessa análise após o armazenamento da água, optou-se por não avaliar esse parâmetro nessa coleta.

Os valores de alcalinidade foram superiores a  $24,5 \text{ mg.L}^{-1}$ . Heller e Pádua (2006) afirmam que águas brutas com valores de alcalinidade inferiores a  $24 \text{ mg.L}^{-1}$  têm pouca capacidade tamponante e, por isso, são mais suscetíveis a alterações no pH.

Em relação aos parâmetros bacteriológicos avaliados, verificou-se claramente a presença de coliformes totais e *E. coli*. Assim, tornou-se necessário o acompanhamento dessas análises após o tratamento de água.

Vale destacar que o tempo decorrido entre a coleta das amostras e o início do exame bacteriológico nunca ultrapassou o limite de armazenamento previsto pelo Standard Methods for the Examination for Water and Wastewater, que é de 24 h (APHA, 1995).

## **5.2 ENSAIOS DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO E SEDIMENTAÇÃO REALIZADOS NA ETAPA DE AVALIAÇÃO DOS DIFERENTES MÉTODOS DE PREPARO DO COAGULANTE *M. oleifera***

A partir do delineamento experimental proposto (seção 4.11) realizou-se a análise de variância (ANOVA) com 95% de nível de confiança, onde os resultados obtiveram um p-valor  $< 0,001$ , para os parâmetros: cor aparente, turbidez e compostos com absorção em  $\text{UV}_{254\text{nm}}$ , demonstrando haver diferenças significativas em relação aos métodos de preparo do coagulante *M. oleifera* e as dosagens estudadas. Diante disto, tornou-se necessário utilizar um teste de comparação de médias, tipo Tukey, para verificar quais as diferenças encontradas.

A água utilizada nessa etapa da pesquisa corresponde à água de estudo 1, conforme a Tabela 8 (seção 5.1).

Os resultados obtidos quanto à eficiência de remoção de cor aparente, turbidez e compostos com absorção em  $\text{UV}_{254\text{nm}}$  para todos os métodos de preparo das

sementes de *M. oleifera* propostos, nas dosagens entre 10 mg.L<sup>-1</sup> e 200 mg.L<sup>-1</sup>, são apresentados nos Apêndices D, E e F, respectivamente.

De forma geral, a dosagem de 50 mg.L<sup>-1</sup> apresentou as melhores eficiências de remoção para os parâmetros de qualidade avaliados, considerando os nove métodos de preparo propostos. Segundo alguns pesquisadores (MUYIBI; EVISON, 1995; JOSHUA; VASU, 2013) essa dosagem é suficiente para a remoção dos parâmetros quando se estuda o processo de coagulação/floculação e sedimentação com extrato aquoso de *M. oleifera* e água bruta com turbidez inicial entre 50 UNT e 150 UNT.

Assim, optou-se, no primeiro momento, por apresentar somente os resultados obtidos para a dosagem de 50 mg.L<sup>-1</sup>, a fim de definir os métodos de preparo do coagulante *M. oleifera* mais eficientes, dentre os nove estudados.

A média geral de eficiência de remoção dos parâmetros avaliados para cada método de preparo do coagulante *M. oleifera* considerando a dosagem 50 mg.L<sup>-1</sup> está apresentada na Tabela 9.

Tabela 9 – Eficiências de remoção dos parâmetros, para os diferentes métodos de preparo do coagulante *M. oleifera* na dosagem de 50 mg.L<sup>-1</sup>

Métodos de preparo	Eficiências de remoção (%) <sup>(1)</sup>		
	Cor aparente	Turbidez	UV <sub>254nm</sub>
<i>Po<sub>int</sub></i>	79,8 ± 1,21 <sup>d</sup>	84,0 ± 0,50 <sup>d e</sup>	66,8 ± 0,58 <sup>c</sup>
<i>Po<sub>int-32</sub></i>	78,8 ± 0,93 <sup>d</sup>	84,9 ± 1,19 <sup>d e</sup>	61,2 ± 1,02 <sup>c</sup>
<i>Po<sub>int-48</sub></i>	76,8 ± 3,22 <sup>d</sup>	82,9 ± 2,57 <sup>d</sup>	64,4 ± 3,35 <sup>c</sup>
<i>Po<sub>des</sub></i>	2,2 ± 0,00 <sup>a</sup>	35,0 ± 0,90 <sup>a</sup>	8,7 ± 0,00 <sup>b</sup>
<i>Po<sub>des-32</sub></i>	43,2 ± 0,19 <sup>c</sup>	60,6 ± 0,21 <sup>c</sup>	13,8 ± 1,02 <sup>b</sup>
<i>Po<sub>des-48</sub></i>	30,5 ± 2,07 <sup>b</sup>	44,5 ± 2,72 <sup>b</sup>	0,0 ± 0,02 <sup>a</sup>
<i>S<sub>int-aqu</sub></i>	35,5 ± 0,37 <sup>b</sup>	60,5 ± 0,00 <sup>c</sup>	14,2 ± 0,25 <sup>b</sup>
<i>S<sub>int-sal</sub></i>	82,9 ± 0,37 <sup>d</sup>	89,3 ± 0,47 <sup>e</sup>	66,2 ± 0,00 <sup>c</sup>
<i>S<sub>des-sal</sub></i>	77,9 ± 3,52 <sup>d</sup>	84,0 ± 1,76 <sup>d e</sup>	62,0 ± 2,32 <sup>c</sup>

(1) Resultados expressos em valores médios ± desvio padrão. Dentro de uma mesma coluna, as médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de nível de significância.

De acordo com a Tabela 9, avaliando os três métodos de preparo do coagulante *M. oleifera* nas formas pó integral (*Po<sub>int</sub>*, *Po<sub>int-32</sub>* e *Po<sub>int-48</sub>*) observou-se variações nas remoções entre 76% e 80% para cor aparente, 83% e 85% para turbidez, e 61% e 67% para compostos com absorção em UV<sub>254nm</sub>. Aplicando a análise estatística, observou-se que

não houve diferença significativa para os parâmetros de qualidade, sendo possível utilizar tanto o pó integral quanto o pó com granulometria específica. Desta forma, pela facilidade no preparo do coagulante *M. oleifera* seria mais vantajoso utilizar o pó integral ( $Po_{int}$ ).

Aos flocos formados nos processos de coagulação/floculação deve-se fornecer condições que os permitam depositar pela ação da gravidade, durante o período de sedimentação, resultando na clarificação do sobrenadante. Esse fato não foi observado nas amostras do pó desengordurado ( $Po_{des}$ ,  $Po_{des-32}$  e  $Po_{des-48}$ ) que apresentaram valores de remoção inferiores aos demais métodos de preparo do coagulante *M. oleifera*, para os três parâmetros de qualidade avaliados, sendo esses entre 0% a 60,6%.

Pode-se observar visualmente durante os ensaios que, como grande parte do pó desengordurado permaneceu em suspensão, houve a coleta de um número expressivo de partículas suspensas durante a amostragem, o que interferiu significativamente na eficiência de remoção. Segundo Santos et al. (2013) uma possível explicação pode estar relacionada ao fato de que durante o processo de extração do óleo das sementes de *M. oleifera* utilizando o solvente hexano, pode ter ocorrido a remoção ou degradação de outras substâncias além do óleo, no caso algumas proteínas que podem atuar na capacidade coagulante, diminuindo assim a sua eficiência na remoção dos parâmetros de qualidade da água.

O  $Po_{des}$  apresentou a menor eficiência em termos de remoção dentre todos os métodos de preparo propostos no trabalho (Tabela 9). Isso sugere que o pó desengordurado continha diâmetros das partículas variados, inclusive frações com abertura menor que 0,300 mm (Apêndice B), influenciando negativamente nos resultados obtidos.

Partículas menores geralmente têm baixa eficiência de remoção de matéria orgânica e turbidez no processo de coagulação/floculação. Essas partículas geralmente decantam mais lentamente do que partículas maiores (ZHAO et al., 2012). Observou-se nos ensaios que o  $Po_{des-32}$  apresentou remoções superiores ao  $Po_{des-48}$ . Considerou-se então que quanto menor o tamanho das partículas das sementes de *M. oleifera* desengorduradas, menor a eficiência do processo, já que se supõe que não há condições para a formação dos flocos densos, conseqüentemente dificultando o processo de sedimentação.

Para o coagulante *M. oleifera* em solução integral aquosa ( $S_{int-aqu}$ ), as eficiências de remoção foram de 35,5% para cor aparente, 60,5% para turbidez, e 14,2% para compostos com absorção em  $UV_{254nm}$ . Madrona et al. (2010) constataram que os resultados obtidos para a extração aquosa das sementes de *M. oleifera* não foram representativos em

termos de eficiência de remoção de cor aparente e turbidez, o que também pode ser observado nos resultados apresentados.

O estudo de Katayon et al. (2006) mostrou que o coagulante *M. oleifera* em solução integral aquosa ( $S_{int-aqu}$ ) pode não ser eficaz, já que 50% de remoção de turbidez foi obtida para uma água de estudo com turbidez inicial entre 23 UNT e 90 UNT. Muyibi e Evison (1995) verificaram que o isolamento feito com água é bastante eficaz no tratamento com turbidez elevada ( $> 100$  UNT), enquanto que para água com baixa turbidez apresenta-se ineficiente.

Para a solução salina ( $S_{int-sal}$  e  $S_{des-sal}$ ), as eficiências de remoção foram de aproximadamente 80% para cor aparente, 85% para turbidez e 63% para compostos com absorção em  $UV_{254nm}$ . Assim, verificou-se que a capacidade de coagulação do coagulante *M. oleifera* em solução salina ( $S_{int-sal}$  e  $S_{des-sal}$ ) apresentou resultados de remoção superiores em relação à solução aquosa ( $S_{int-aqu}$ ), fato também observado por Okuda et al. (2001b) e Madrona et al. (2012).

Okuda et al. (1999) afirmam que o sal por si só apresenta um efeito de clarificação. A intensidade iônica, ou seja, a grande quantidade de íons  $Na^+$  e  $Cl^-$  na solução aumenta a atividade desse coagulante. Isso ocorre porque o princípio ativo, obtido nesse caso, apresenta composição diferente daquele extraído em água (OKUDA et al., 2001a).

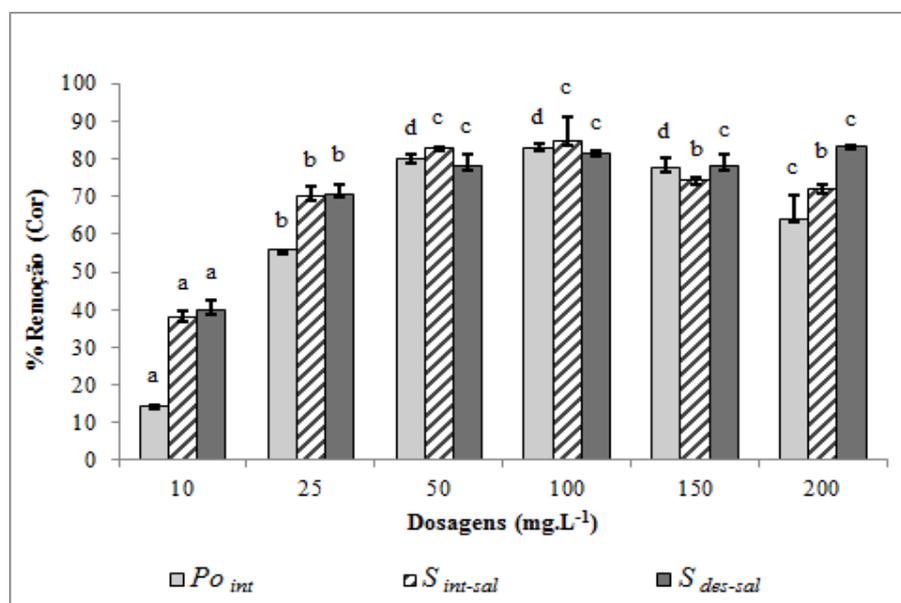
O mecanismo de coagulação na extração aquosa parece ser o de adsorção e neutralização de cargas (MANGALE SAPANA; CHONDE; RAUT, 2012). Okuda et al. (2001b), sugerem que o mecanismo de adsorção e formação de pontes não é provável para a extração salina, devido à sua massa molar, e o mecanismo de adsorção e neutralização de cargas também não é responsável pela coagulação com a solução salina. Assim, pode-se dizer que o mecanismo de atuação da *M. oleifera* como coagulante ainda não está bem definido.

Segundo Ndabigengesere, Narasiah e Talbot (1995), uma maior solubilidade dos coagulantes é alcançada por meio da elevação na salinidade durante o processo de extração. O aumento da densidade de cargas, devido à dissociação do sal, pode contribuir para essa melhora no processo de coagulação/floculação (MADRONA et al., 2010). Isso pode explicar porque tanto a solução integral quanto a desengordurada salina ( $S_{int-sal}$  e  $S_{des-sal}$ ) apresentaram boas remoções, ao contrário do coagulante *M. oleifera* em pó, que apresentou melhores remoções sem a extração do óleo ( $PO_{int}$ ,  $PO_{int-32}$  e  $PO_{int-48}$ ) conforme demonstrado na Tabela 9.

Desse modo, considerando os diferentes métodos de preparo do coagulante estudados, o  $Po_{int}$ , a  $S_{int-sal}$  e a  $S_{des-sal}$  são recomendados para a remoção dos parâmetros de qualidade avaliados. Assim, os resultados dos ensaios realizados com esses três métodos de preparo serão demonstrados a seguir, para as dosagens entre  $10 \text{ mg.L}^{-1}$  e  $200 \text{ mg.L}^{-1}$ .

Na Figura 17 são apresentadas as médias dos resultados obtidos para a eficiência de remoção do parâmetro cor aparente, considerando os métodos de preparo do coagulante *M. oleifera* nas formas  $Po_{int}$ ,  $S_{int-sal}$  e  $S_{des-sal}$  em função das dosagens de  $10 \text{ mg.L}^{-1}$ ,  $25 \text{ mg.L}^{-1}$ ,  $50 \text{ mg.L}^{-1}$ ,  $100 \text{ mg.L}^{-1}$ ,  $150 \text{ mg.L}^{-1}$  e  $200 \text{ mg.L}^{-1}$ .

Figura 17 – Eficiências de remoção do parâmetro cor aparente para os métodos de preparo do coagulante *M. oleifera* nas formas  $Po_{int}$ ,  $S_{int-sal}$  e  $S_{des-sal}$



\*Considerando cada método de preparo do coagulante *M. oleifera* individualmente, as médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si em relação à dosagem do coagulante, pelo teste de Tukey a 5% de nível de significância.

Observou-se pelos resultados da Figura 17, que as dosagens de  $10 \text{ mg.L}^{-1}$  e  $25 \text{ mg.L}^{-1}$  apresentaram resultados de remoções de cor aparente inferiores às demais. Isso pode indicar que a quantidade de coagulante adicionada ao processo de coagulação/floculação não foi suficiente para promover a clarificação da água.

As melhores remoções de cor aparente obtidas foram de 79,8%, 82,9% e 77,9% para a dosagem de  $50 \text{ mg.L}^{-1}$ , e 83%, 84,7% e 81,6% para a dosagem de  $100 \text{ mg.L}^{-1}$ , considerando os coagulantes natural  $Po_{int}$ ,  $S_{int-sal}$  e  $S_{des-sal}$ , respectivamente. Verificou-se também que 77,6% de remoção foi obtido com a dosagem de  $150 \text{ mg.L}^{-1}$  para o coagulante *M. oleifera* em  $Po_{int}$  e para a  $S_{des-sal}$ , remoções de 77,8% e 83,5% foram obtidas com as dosagens

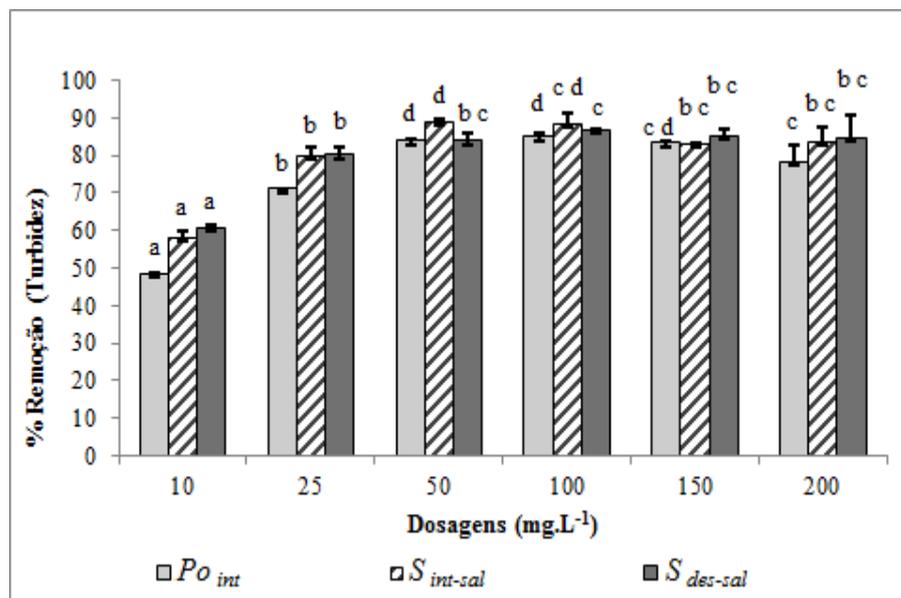
de 150 mg.L<sup>-1</sup> e 200 mg.L<sup>-1</sup>, respectivamente, não havendo diferença estatisticamente significativa.

Mangale Sapana, Chonde e Raut (2012) observaram que a cor da água subterrânea foi totalmente removida após o processo de coagulação/floculação e sedimentação utilizando o pó integral das sementes de *M. oleifera*, nas dosagens entre 50 mg.L<sup>-1</sup> e 150 mg.L<sup>-1</sup>. Já neste trabalho, remoções próximas a 80% para a cor aparente foram verificadas.

Percebeu-se uma redução na eficiência de remoção de cor aparente na dosagem de 200 mg.L<sup>-1</sup> para o preparo dos coagulantes natural  $P_{o_{int}}$  e  $S_{int-sal}$ . Segundo Muyibi e Evison (1995), Bina et al. (2010) e Mangale et al. (2012), o excesso de coagulante pode resultar em sítios poliméricos saturados, provocando a desestabilização das partículas devido à impossibilidade de formar mais pontes. Quando se adiciona um polieletrólito catiônico em excesso em uma água a ser clarificada, as partículas em suspensão adquirirão cargas positivas e permanecerão dispersas no meio líquido, devido à reversão das cargas elétricas (BORBA, 2001). Assim, erros na dosagem do coagulante podem conduzir à reversão da carga superficial das impurezas presentes na água, ocorrendo o fenômeno de reestabilização, que pode comprometer seriamente a eficiência das ETAS (HELLER; PÁDUA, 2006).

Na Figura 18 são apresentadas as médias dos resultados obtidos para a eficiência de remoção do parâmetro turbidez, considerando os métodos de preparo do coagulante *M. oleifera* nas formas  $P_{o_{int}}$ ,  $S_{int-sal}$  e  $S_{des-sal}$  em função das dosagens de 10 mg.L<sup>-1</sup>, 25 mg.L<sup>-1</sup>, 50 mg.L<sup>-1</sup>, 100 mg.L<sup>-1</sup>, 150 mg.L<sup>-1</sup> e 200 mg.L<sup>-1</sup>.

Figura 18 – Eficiências de remoção do parâmetro turbidez para os métodos de preparo do coagulante *M. oleifera* nas formas  $Po_{int}$ ,  $S_{int-sal}$  e  $S_{des-sal}$



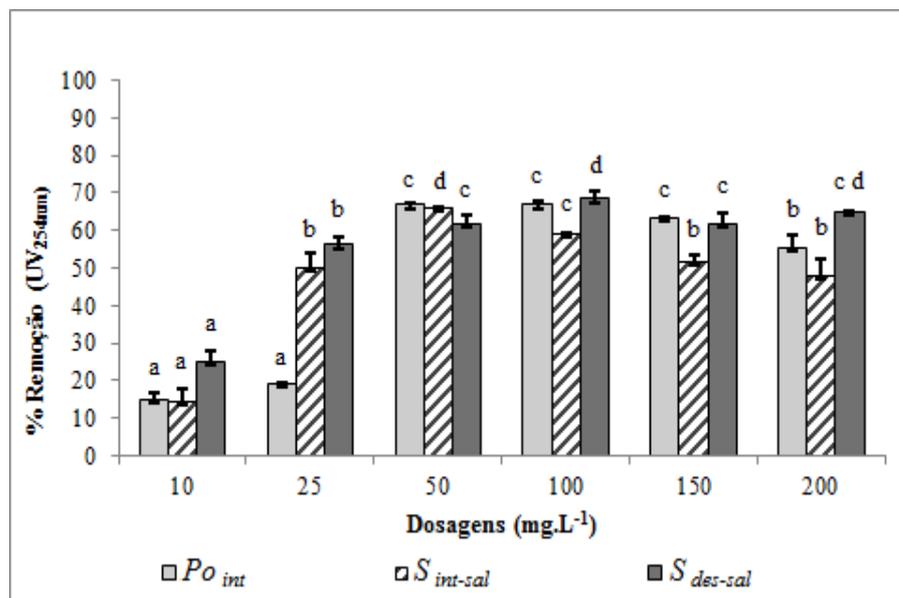
\*Considerando cada método de preparo do coagulante *M. oleifera* individualmente, as médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si em relação à dosagem do coagulante, pelo teste de Tukey a 5% de nível de significância.

Observando a Figura 18, as melhores remoções de turbidez obtidas para o coagulante *M. oleifera* em  $Po_{int}$  foram de 84%, 85% e 83,4% para as dosagens entre 50 mg.L<sup>-1</sup> e 150 mg.L<sup>-1</sup>. Para a  $S_{int-sal}$ , remoções de 89,3% e 88,4% foram obtidas para as dosagens de 50 mg.L<sup>-1</sup> e 100 mg.L<sup>-1</sup>, respectivamente. Já a  $S_{des-sal}$  não apresentou diferença estatística para as dosagens de 25 mg.L<sup>-1</sup> a 200 mg.L<sup>-1</sup>, verificando remoções entre 80,2% e 86,7%.

Pode-se observar de maneira geral, uma tendência similar em relação à remoção dos parâmetros: cor aparente e turbidez. Esse fato ocorreu porque os dois parâmetros de qualidade de água estão relacionados com a concentração de sólidos presentes, já que a cor aparente está relacionada principalmente à presença de matéria orgânica dissolvida ou coloidal, além das partículas suspensas, enquanto a turbidez deve-se à presença de matéria particulada em suspensão na água.

Na Figura 19 são apresentadas as médias dos resultados obtidos para a eficiência de remoção do parâmetro compostos com absorção em UV<sub>254nm</sub>, considerando os métodos de preparo do coagulante *M. oleifera* nas formas  $Po_{int}$ ,  $S_{int-sal}$  e  $S_{des-sal}$  em função das dosagens de 10 mg.L<sup>-1</sup>, 25 mg.L<sup>-1</sup>, 50 mg.L<sup>-1</sup>, 100 mg.L<sup>-1</sup>, 150 mg.L<sup>-1</sup> e 200 mg.L<sup>-1</sup>.

Figura 19 – Eficiências de remoção do parâmetro compostos com absorção em UV<sub>254nm</sub> para os métodos de preparo do coagulante *M. oleifera* nas formas  $Po_{int}$ ,  $S_{int-sal}$  e  $S_{des-sal}$



\*Considerando cada método de preparo do coagulante *M. oleifera* individualmente, as médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si em relação à dosagem do coagulante, pelo teste de Tukey a 5% de nível de significância.

Por meio da Figura 19 verificou-se que as melhores remoções de compostos com absorção em UV<sub>254nm</sub> para o  $Po_{int}$  foram de 66,8%, 66,9% e 63,5% para as dosagens entre 50 mg.L<sup>-1</sup> e 150 mg.L<sup>-1</sup>. Para a  $S_{int-sal}$ , 66,2% de remoção foi obtido para a dosagem de 50 mg.L<sup>-1</sup>, e para a  $S_{des-sal}$ , remoções de 68,4% e 65,1% foram obtidas para as dosagens de 100 mg.L<sup>-1</sup> e 200 mg.L<sup>-1</sup>, sendo consideradas estatisticamente iguais.

Em relação à absorção em UV<sub>254nm</sub>, acredita-se que a menor eficiência nas dosagens de 200 mg.L<sup>-1</sup> para o coagulante *M. oleifera* em  $Po_{int}$ , e 150 mg.L<sup>-1</sup> e 200 mg.L<sup>-1</sup> para a  $S_{int-sal}$ , deve-se ao aumento da concentração da matéria orgânica na água, ocasionada pela presença de proteínas existentes na composição da *M. oleifera*. Abaliwano, Ghebremichael e Amy (2008) citam que a principal desvantagem do extrato de *M. oleifera* é a de que ele adiciona carga orgânica à água tratada, pois se trata de uma oleaginosa muito rica em substâncias orgânicas (RIBEIRO, 2010).

Para Ghebremichael et al. (2005) a existência de matéria orgânica em excesso pode ainda ser considerada como uma fonte de cor, sabor e odor à água, tornando-a não apreciada pelos consumidores.

De acordo com a análise estatística realizada entre estes três métodos de preparo das sementes de *M. oleifera* ( $Po_{int}$ ,  $S_{int-sal}$  e  $S_{des-sal}$ ), verificou-se que a dosagem de 50 mg.L<sup>-1</sup> não difere estatisticamente para os parâmetros: cor aparente, turbidez e compostos

com absorção em  $UV_{254nm}$ . Segundo Borba (2001) a dosagem ideal é aquela economicamente mais viável, ou seja, com a menor quantidade de coagulante dosado, consegue-se obter a maior redução em termos de cor e turbidez da água de estudo, no menor espaço de tempo possível. Assim, pode-se dizer que a dosagem de  $50 \text{ mg.L}^{-1}$  é a mais vantajosa a fim de obter remoções satisfatórias desses parâmetros de qualidade para a água de estudo com turbidez inicial próxima a 70 UNT.

Em suma, o método de preparo das sementes de *M. oleifera* em pó integral ( $Po_{int}$ ) foi definido como o padrão para ser utilizado nas próximas etapas desse trabalho, principalmente pela facilidade no preparo. Além disso, esse coagulante pode ser empregado pela população de áreas rurais ou de países em desenvolvimento, sendo uma técnica alternativa natural, onde não há estrutura disponível para a realização do tratamento de água de abastecimento para o consumo humano.

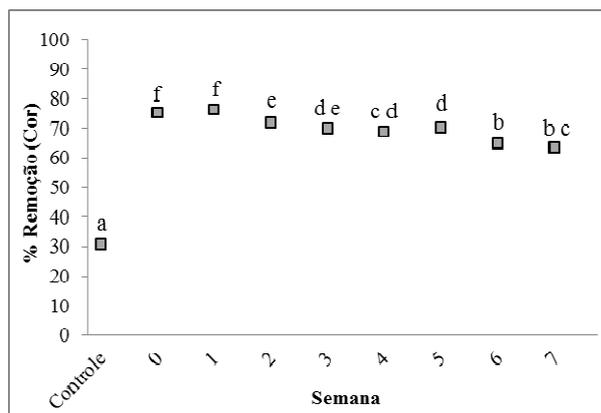
### **5.3 ESTUDO DO TEMPO DE DEGRADAÇÃO DO COAGULANTE *M. oleifera* EM PÓ INTEGRAL**

A partir do delineamento experimental proposto (seção 4.11) realizou-se a análise de variância (ANOVA), com 95% de nível de confiança, onde os resultados apresentaram um p-valor  $< 0,001$ , demonstrando haver diferenças significativas em relação ao tempo de armazenamento do coagulante *M. oleifera* em pó integral.

A água utilizada nessa etapa da pesquisa corresponde à água de estudo 4, conforme a Tabela 8 (seção 5.1).

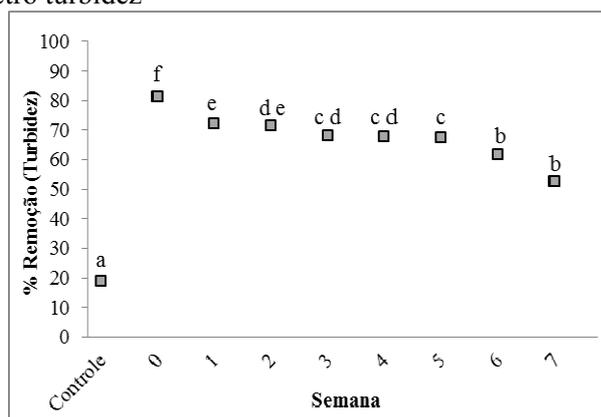
Nas Figuras 20, 21 e 22 são apresentadas as eficiências de remoção dos parâmetros de qualidade: cor aparente, turbidez e compostos com absorção em  $UV_{254nm}$ , para o controle, que se refere ao processo de coagulação/floculação e sedimentação realizado sem adição da *M. oleifera* em pó integral, e para as demais amostras avaliadas durante o período de 7 semanas de armazenamento desse coagulante.

Figura 20 – Avaliação do tempo de degradação do coagulante *M. oleifera* em pó integral para o parâmetro cor aparente



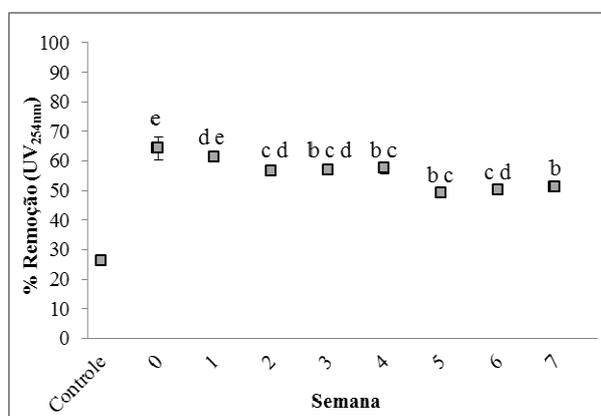
\*As médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de nível de significância.

Figura 21 – Avaliação do tempo de degradação do coagulante *M. oleifera* em pó integral para o parâmetro turbidez



\*As médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de nível de significância.

Figura 22 – Avaliação do tempo de degradação do coagulante *M. oleifera* em pó integral para o parâmetro compostos com absorção em UV<sub>254nm</sub>



\*As médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de nível de significância.

Verificou-se por meio da análise estatística realizada que o controle apresenta eficiências de remoção bastante inferiores em relação às amostras de *M. oleifera* em pó integral, que variam de 63,4% a 76,3% para cor aparente, 52,6% a 81,2% para turbidez e 51,1% a 64,3% para compostos com absorção em  $UV_{254nm}$ , comprovando então que esse coagulante é efetivo na redução dos parâmetros de qualidade.

Conforme os resultados apresentados nas Figuras 20, 21 e 22, constatou-se que as melhores eficiências de remoção de cor aparente e compostos com absorção em  $UV_{254nm}$  foram verificadas no período de armazenamento da *M. oleifera* em pó integral anterior a 2 semanas, não havendo diferença estatisticamente significativa. Para o parâmetro turbidez, o coagulante deve ser utilizado já nos primeiros dias. De acordo com Madrona (2010) o extrato aquoso e salino das semente de *M. oleifera* perde seu poder coagulante com o tempo, devendo ser utilizado em até 3 dias. Katayon et al. (2006) destacam que o aumento do tempo de armazenamento da *M. oleifera* tende a aumentar a turbidez residual obtida.

Apesar de se detectar a degradação do coagulante *M. oleifera* ao longo do tempo, o pó integral mantém o seu poder coagulante, sendo observada uma redução na eficiência de remoção próxima a 15% para cor aparente e compostos com absorção em  $UV_{254nm}$ , e 30% para turbidez no período total de 7 semanas de armazenamento. Contudo, durante o período de 5 semanas, a turbidez perde aproximadamente 15% da sua eficiência de remoção.

Desta forma, para obter resultados promissores durante a pesquisa é recomendado utilizar o pó integral de sementes de *M. oleifera* durante o período máximo de 1 semana, pois as propriedades coagulantes/floculantes das mesmas tendem a diminuir com o tempo de armazenamento.

#### **5.4 ENSAIOS DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO E SEDIMENTAÇÃO REALIZADOS NA ETAPA DE OTIMIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DOS PARÂMETROS DE MISTURA E SEDIMENTAÇÃO**

A água utilizada nessa etapa da pesquisa corresponde à água de estudo 2, conforme a Tabela 8 (seção 5.1).

As Tabelas e as Figuras com as médias das eficiências de remoção dos parâmetros: cor aparente, turbidez e compostos com absorção em  $UV_{254nm}$ , assim como os valores residuais obtidos considerando todos os ensaios de otimização das condições de operação, na etapa de coagulação/floculação e sedimentação, para cada associação dos

coagulantes: *M. oleifera* e cloreto férrico, *M. oleifera* e PAC, e *M. oleifera* e sulfato de alumínio, estão demonstrados nos Apêndices G a O.

Deve-se notar que os parâmetros de mistura rápida e lenta, incluindo o tempo e intensidade da mistura, podem afetar a eficiência de remoção de turbidez no processo de coagulação (BAGHVAND et al., 2010), fato esse observado nos resultados obtidos nessa etapa do trabalho.

A seguir, serão apresentados somente os melhores resultados em termos de eficiência de remoção, considerando os três parâmetros de qualidade: cor aparente, turbidez e compostos com absorção em  $UV_{254nm}$ , para cada uma das associações dos coagulantes estudadas.

#### 5.4.1 Otimização das Condições de Operação para a Associação dos Coagulantes *M. oleifera* e Cloreto Férrico

Avaliando os resultados obtidos em relação às eficiências de remoção dos parâmetros: cor aparente, turbidez e compostos com absorção em  $UV_{254nm}$  (Apêndice G), observa-se que não houve diferença significativa para as condições de operação apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 – Valores das eficiências de remoção para as melhores condições de operação na associação dos coagulantes *M. oleifera* e cloreto férrico

Parâmetros					Eficiências de remoção (%)		
V <sub>MR</sub> (rpm)	T <sub>MR</sub> (min)	V <sub>ML</sub> (rpm)	T <sub>ML</sub> (min)	T <sub>S</sub> (min)	Cor aparente	Turbidez	UV <sub>254nm</sub>
100	3	30	15	15 – 60	89,7 – 91,3	90,8 – 92,4	73,5 – 76,4
110	3	30	15	45	90,7	91,3	73,3
105	2	45	15	15 – 45	89,9 – 90,9	91,7 – 92,1	69,8 – 71,9
105	3	45	15	15 / 45 – 60	92,7 – 93,9	91,7 – 92,5	72,5 – 75,0
110	3	45	15	30 – 60	93,8 – 94,7	92,7 – 93,2	74,2 – 74,6

Madrona et al. (2011) e Valverde et al. (2013) obtiveram bons resultados de remoção de cor aparente e turbidez com tempo de sedimentação (T<sub>S</sub>) de 60 min e 120 min, utilizando extrato de *M. oleifera* salina e aquosa, respectivamente. Para diminuir esse tempo de sedimentação, Bratby (2006) sugere adicionar um polímero orgânico como auxiliar de coagulação, a fim de melhorar o desempenho de floculação no que diz respeito à remoção

orgânica, densidade e sedimentação dos flocos. Segundo Nwaiwu e Bello (2011) e Ravikumar e Sheeja (2012), o  $T_S$  para o pó das sementes de *M. oleifera* é mais longo quando comparado à utilização da associação dos coagulantes *M. oleifera* e sulfato de alumínio.

Em vista dos resultados obtidos, o  $T_S$  de 15 min foi escolhido como o parâmetro para os próximos ensaios de coagulação/floculação e sedimentação, pois é o  $T_S$  padrão usado nas ETAs (BONGIOVANI et al., 2014). Nesse caso, as seguintes condições de operação poderiam ser utilizadas: 100 rpm durante 3 min e 30 rpm durante 15 min; ou 105 rpm durante 2 ou 3 min e 45 rpm durante 15 min.

Em relação às velocidades de mistura, 100 rpm ( $V_{MR}$ ) e 30 rpm ( $V_{ML}$ ) foram consideradas mais vantajosas, por se tratarem das menores intensidades de agitação aplicadas ao processo de coagulação/floculação, o que está diretamente relacionado com a diminuição de gastos com energia. Para Julio, Fioravante e Oroski (2008) quanto maior o gradiente de velocidade, maiores serão os custos de implantação e operação em uma ETA.

Assim, as condições de operação ótimas para a associação dos coagulantes *M. oleifera* e cloreto férrico são: 100 rpm ( $V_{MR}$ ), 3 min ( $T_{MR}$ ), 30 rpm ( $V_{ML}$ ), 15 min ( $T_{ML}$  e  $T_S$ ).

#### **5.4.2 Otimização das Condições de Operação para a Associação dos Coagulantes *M. oleifera* e PAC**

Avaliando os resultados obtidos em relação às eficiências de remoção dos parâmetros: cor aparente, turbidez e compostos com absorção em  $UV_{254nm}$  (Apêndice J), observa-se que não houve diferença significativa para as condições de operação apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Valores das eficiências de remoção para as melhores condições de operação na associação dos coagulantes *M. oleifera* e PAC

Parâmetros					Eficiências de remoção (%)		
V <sub>MR</sub> (rpm)	T <sub>MR</sub> (min)	V <sub>ML</sub> (rpm)	T <sub>ML</sub> (min)	T <sub>S</sub> (min)	Cor aparente	Turbidez	UV <sub>254nm</sub>
105	2	30	15	45 – 60	94,1 – 94,5	94,8	81,0 – 81,2
110	2	30	15	45 – 60	95,0 – 95,1	93,7 – 93,8	81,9 – 82,1
100	3	30	15	45	95,4	93,6	81,3
110	3	30	15	60	95,8	93,6	82,8
100	1	45	15	15 – 60	95,9 – 97,4	95,7 – 96,0	84,8 – 85,6
105	1	45	15	15 – 30 / 60	96,3 – 97,3	95,7 – 96,1	83,8 – 85,1
110	1	45	15	15 – 60	95,4 – 96,0	95,3 – 96,0	82,8 – 84,6
100	2	45	15	30 – 60	95,1 – 95,5	95,2 – 95,5	82,1 – 83,1
100	3	45	15	45 – 60	95,2 – 96,2	95,0 – 95,6	83,1 – 84,2
105	3	45	15	15 – 45	95,4 – 96,2	95,8 – 96,4	82,3 – 84,4
110	3	45	15	15 – 60	95,0 – 95,7	96,0 – 96,4	81,5 – 82,9

Avaliando os resultados obtidos, o T<sub>S</sub> de 15 min é considerado adequado por diminuir o tempo total do tratamento de água.

Considerando os resultados obtidos com a aplicação de 30 rpm (V<sub>ML</sub>) ao processo de coagulação/floculação, observou-se que o T<sub>S</sub> está na faixa de 45 min ou 60 min. De acordo com Ndabigengesere e Narasiah (1996) baixas V<sub>ML</sub> não produzem energia suficiente para manter a formação dos flocos e promover oportunidade de colisão suficientes.

Deste modo, as seguintes condições de operação poderiam ser utilizadas sem diminuição da eficiência do processo: 100 rpm, 105 rpm, 110 rpm durante 1 min; ou 105 rpm, 110 rpm durante 3 min para propiciar a mistura rápida; 45 rpm durante 15 min para propiciar a mistura lenta; e 15 min para a etapa de sedimentação, em todos os casos citados.

Baghvand et al. (2010) destacam que o tempo de mistura é um fator importante que deve ser investigado para obter uma melhor visão sobre o seu papel para a otimização do processo. Avaliando os resultados obtidos em relação aos T<sub>MR</sub>, 1 min é mais viável por ser o menor tempo de mistura estudado.

Assim, as condições de operação ótimas para a associação da *M. oleifera* e PAC são: 100 rpm (V<sub>MR</sub>), 1 min (T<sub>MR</sub>), 45 rpm (V<sub>ML</sub>), 15 min (T<sub>ML</sub> e T<sub>S</sub>), considerando que 100 rpm se trata da velocidade de mistura mais baixa aplicada ao processo.

### 5.4.3 Otimização das Condições de Operação para a Associação dos Coagulantes *M. oleifera* e Sulfato de Alumínio

Avaliando os resultados obtidos em relação às eficiências de remoção dos parâmetros: cor aparente, turbidez e compostos com absorção em UV<sub>254nm</sub> (Apêndice M), observa-se que não houve diferença estatisticamente significativa para as condições de operação apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Valores das eficiências de remoção para as melhores condições de operação na associação dos coagulantes *M. oleifera* e sulfato de alumínio

Parâmetros					Eficiências de remoção (%)		
V <sub>MR</sub> (rpm)	T <sub>MR</sub> (min)	V <sub>ML</sub> (rpm)	T <sub>ML</sub> (min)	T <sub>S</sub> (min)	Cor aparente	Turbidez	UV <sub>254nm</sub>
105	1	30	15	15 – 45	92,3 – 93,6	91,0 – 92,0	75,5 – 76,3
110	1	30	15	45	90,9	90,0	72,4
100	2	30	15	30 – 45	91,2 – 92,5	92,2 – 92,9	74,3 – 75,2
105	3	30	15	45 – 60	93,8 – 95,4	92,8 – 94,1	77,2
110	3	30	15	60	92,9	92,6	79,0
110	1	45	15	60	92,8	91,2	76,1
105	2	45	15	45 – 60	93,1 – 93,3	92,9 – 93,3	75,3 – 75,8
100	3	45	15	45	91,0	91,0	74,0
105	3	45	15	45 – 60	92,9 – 93,2	92,9 – 93,0	78,6

Como o T<sub>S</sub> de 15 min é o tempo padrão previamente definido, as condições de operação ótimas para a associação dos coagulantes *M. oleifera* e sulfato de alumínio são: 105 rpm (V<sub>MR</sub>), 1 min (T<sub>MR</sub>), 30 rpm (V<sub>ML</sub>), 15 min (T<sub>ML</sub> e T<sub>S</sub>).

### 5.4.4 Condições de Operação Ótimas para a Associação dos Coagulantes

Na Tabela 13 são apresentados os resultados referentes às condições de operação ótimas para a associação dos coagulantes *M. oleifera* e cloreto férrico, *M. oleifera* e PAC, e *M. oleifera* e sulfato de alumínio, obtidos nos ensaios de coagulação/floculação e sedimentação, no qual os parâmetros do processo foram utilizados nas etapas subsequentes do trabalho.

Tabela 13 – Valores das eficiências de remoção e residuais obtidos para as condições de operação ótimas na associação dos coagulantes

Associação dos coagulantes ( <i>M. oleifera</i> )	Parâmetros do processo				Eficiências de remoção (%) / Valores residuais		
	V <sub>MR</sub> (rpm)	T <sub>MR</sub> (min)	V <sub>ML</sub> (rpm)	T <sub>ML</sub> e T <sub>S</sub> (min)	Cor aparente	Turbidez	UV <sub>254nm</sub>
<b>Cloreto férrico</b>	100	3	30	15	89,7 / 40 uH	90,8 / 6,7 UNT	73,5 / 0,077 cm <sup>-1</sup>
<b>PAC</b>	100	1	45	15	97,1 / 12 uH	95,8 / 3,2 UNT	85,6 / 0,042 cm <sup>-1</sup>
<b>Sulfato de alumínio</b>	105	1	30	15	92,3 / 30 uH	91,0 / 6,5 UNT	76,3 / 0,065 cm <sup>-1</sup>

## 5.5 ENSAIOS DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO E SEDIMENTAÇÃO REALIZADOS PARA A CONSTRUÇÃO DOS DIAGRAMAS DE COAGULAÇÃO

O diagrama de coagulação foi utilizado como forma de definir as regiões otimizadas de remoções de cor aparente, turbidez e compostos com absorção em UV<sub>254nm</sub>, em função da variação do pH de coagulação e da dosagem dos coagulantes na associação em questão.

Com os diversos pontos obtidos, torna-se possível definir o traçado de curvas com a mesma remoção dos parâmetros de qualidade avaliados. Assim, obtêm-se nos diagramas de coagulação regiões cujos valores poderão ser estudados, visando o melhor desempenho na aplicação do coagulante para determinada qualidade de água.

Vale destacar que os melhores resultados obtidos para cada diagrama de coagulação são identificados pelas regiões de coloração mais escuras. Esses valores estão representados na forma de eficiências de remoção do parâmetro de qualidade avaliado, ou seja, percentagem (%) de remoção.

A água utilizada nessa etapa da pesquisa corresponde à água de estudo 3, conforme a Tabela 8 (seção 5.1).

### 5.5.1 Associação dos Coagulantes *M. oleifera* e Cloreto Férrico

Os resultados dos ensaios da associação dos coagulantes *M. oleifera* e cloreto férrico realizados para a construção dos diagramas de coagulação são apresentados no Apêndice P.

Vale lembrar que as condições de operação ótimas para essa associação dos coagulantes são:  $V_{MR}$ : 100 rpm,  $T_{MR}$ : 3 min,  $V_{ML}$ : 30 rpm,  $T_{ML}$ : 15 min,  $T_S$ : 15 min, de acordo com os resultados apresentados na Tabela 13 (seção 5.4.4).

Nas Figuras 23, 24 e 25 constam os diagramas de coagulação resultantes da associação dos coagulantes *M. oleifera* e cloreto férrico, avaliando a eficiência de remoção de cor aparente, turbidez e compostos com absorção em  $UV_{254nm}$ , respectivamente.

Figura 23 – Diagrama de coagulação para a associação dos coagulantes *M. oleifera* e cloreto férrico contendo curvas de remoção de cor aparente

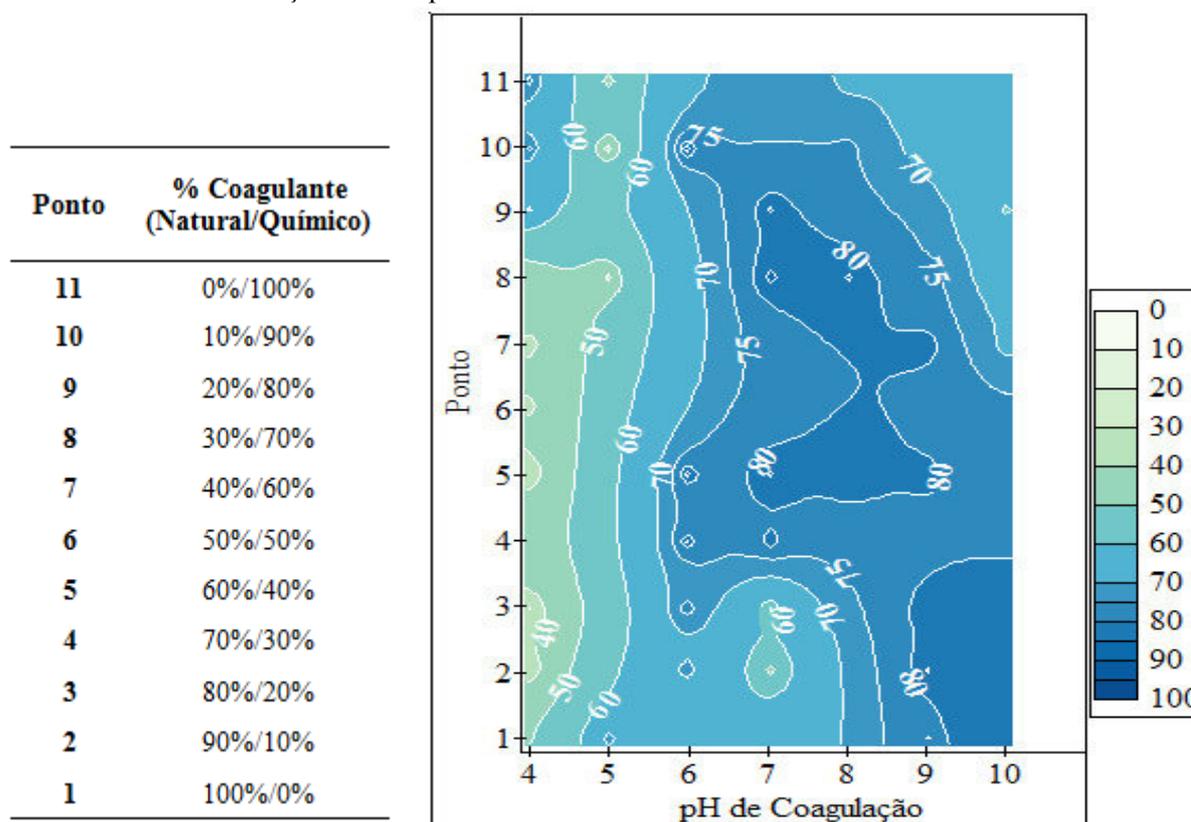


Figura 24 – Diagrama de coagulação para a associação dos coagulantes *M. oleifera* e cloreto férrico contendo curvas de remoção de turbidez

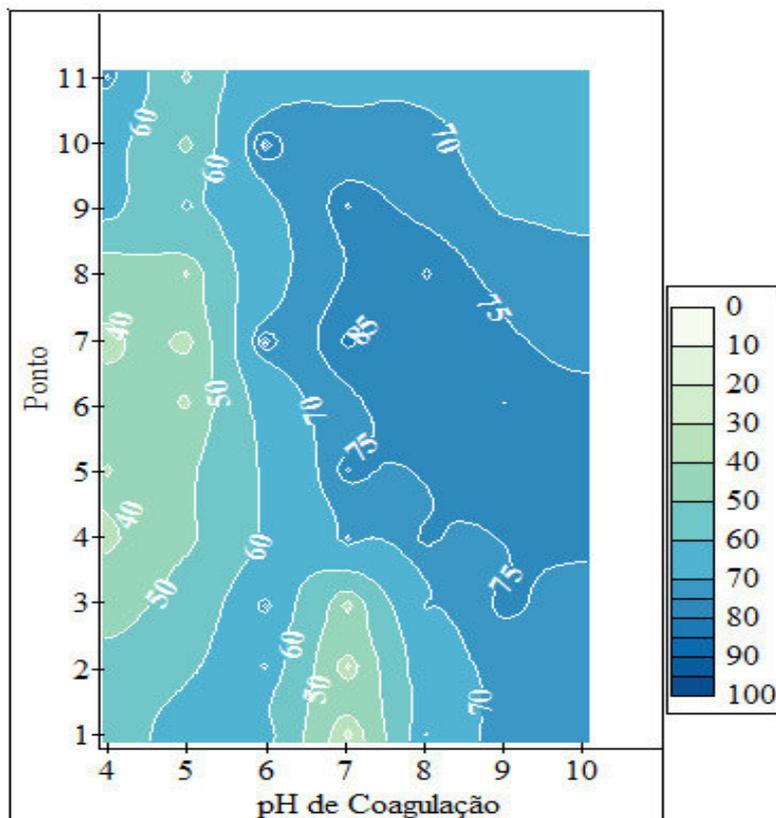
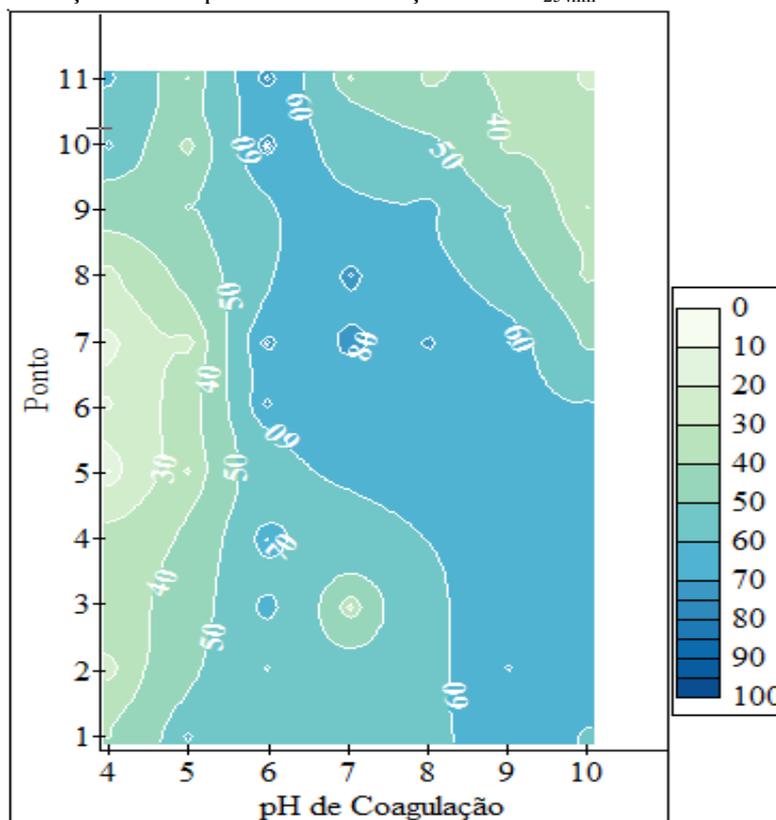


Figura 25 – Diagrama de coagulação para a associação dos coagulantes *M. oleifera* e cloreto férrico contendo curvas de remoção de compostos com absorção em UV<sub>254nm</sub>



De um modo geral, baseado nos três diagramas de coagulação (Figuras 23, 24 e 25) percebeu-se que a faixa de pH compreendida entre 4 e 5 apresenta remoções inferiores aos demais pHs de coagulação. O intervalo de pH entre 6 e 10 apresentou remoções mais eficientes. Spinelli (2001) afirma que o cloreto férrico tende a produzir maiores flocos em pH superior a 5.

A avaliação dos três parâmetros de qualidade nos pHs de coagulação 6 e 7, por meio da análise estatística (delineamento inteiramente casualizado (DIC)) demonstram que não há diferença estatística nas remoções obtidas quando se utilizam as dosagens de 30 mg.L<sup>-1</sup> *M. oleifera*/4 mg.L<sup>-1</sup> cloreto férrico (ponto 5) até 5 mg.L<sup>-1</sup> *M. oleifera*/ 9 mg.L<sup>-1</sup> cloreto férrico (ponto 10). Assim, foi possível obter uma redução de até 50% no consumo do cloreto férrico com o aumento da dosagem de *M. oleifera* sem afetar a eficiência do processo, o que corrobora com a afirmação de Abaliwano, Ghebremichael e Amy (2008) que destacam que o uso de *M. oleifera* poderia conduzir a uma redução de 50% na utilização de agentes químicos inorgânicos.

Para o pH de coagulação 8, pode-se observar que as dosagens de 35 mg.L<sup>-1</sup> *M. oleifera*/3 mg.L<sup>-1</sup> cloreto férrico (ponto 4) até 15 mg.L<sup>-1</sup> *M. oleifera*/7 mg.L<sup>-1</sup> cloreto férrico (ponto 8) são consideradas estatisticamente iguais, o que resulta na diminuição de até 40% na utilização do coagulante químico.

No intervalo de pH entre 9 e 10 não houve variações expressivas nas eficiências de remoção dos parâmetros de qualidade até o ponto 7, que utiliza 20 mg.L<sup>-1</sup> *M. oleifera*/6 mg.L<sup>-1</sup> cloreto férrico.

### 5.5.2 Associação dos Coagulantes *M. oleifera* e PAC

Os resultados dos ensaios da associação dos coagulantes *M. oleifera* e PAC realizados para a construção dos diagramas de coagulação são apresentados no Apêndice Q.

Vale lembrar que as condições de operação ótimas para essa associação dos coagulantes são: V<sub>MR</sub>: 100 rpm, T<sub>MR</sub>: 1 min, V<sub>ML</sub>: 45 rpm, T<sub>ML</sub>: 15 min, T<sub>S</sub>: 15 min, de acordo com os resultados apresentados na Tabela 13 (seção 5.4.4).

Nas Figuras 26, 27 e 28 constam os diagramas de coagulação resultantes da associação dos coagulantes *M. oleifera* e PAC, avaliando a eficiência de remoção de cor aparente, turbidez e compostos com absorção em UV<sub>254nm</sub>, respectivamente.

Figura 26 – Diagrama de coagulação para a associação dos coagulantes *M. oleifera* e PAC contendo curvas de remoção de cor aparente

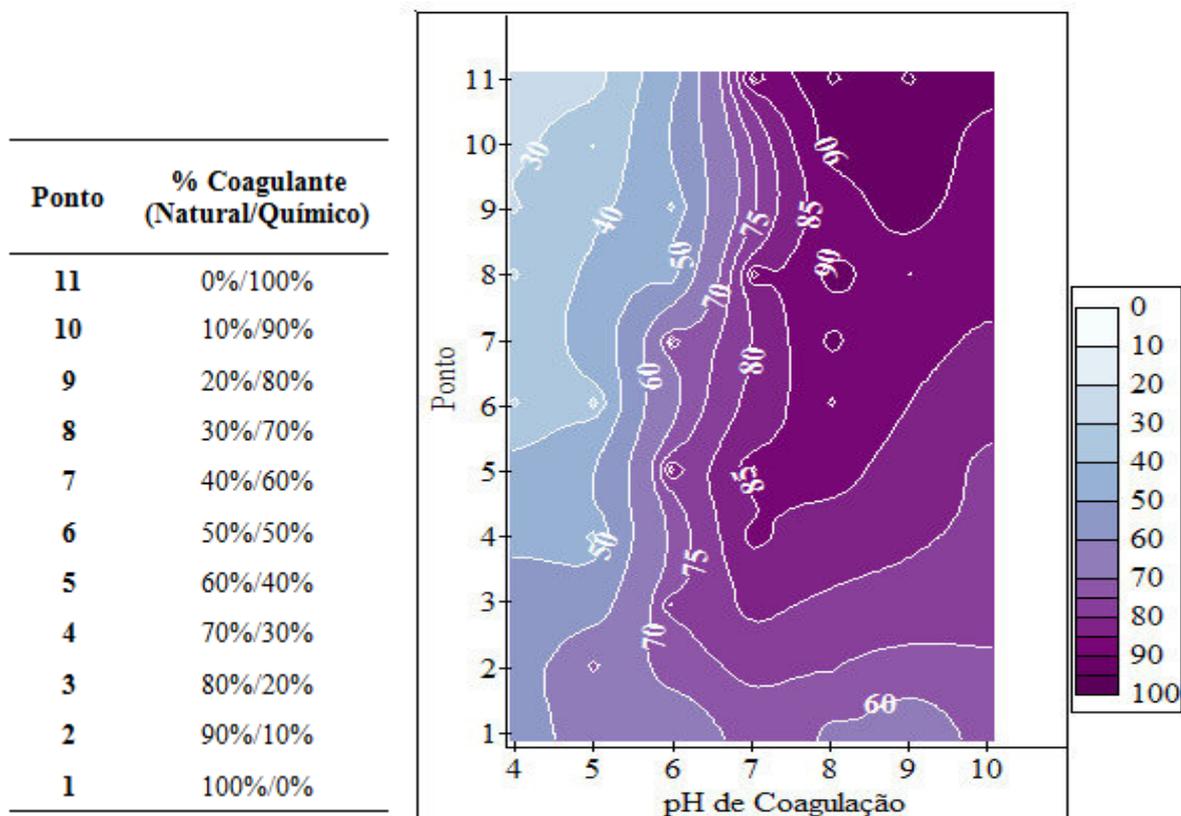


Figura 27 – Diagrama de coagulação para a associação dos coagulantes *M. oleifera* e PAC contendo curvas de remoção de turbidez

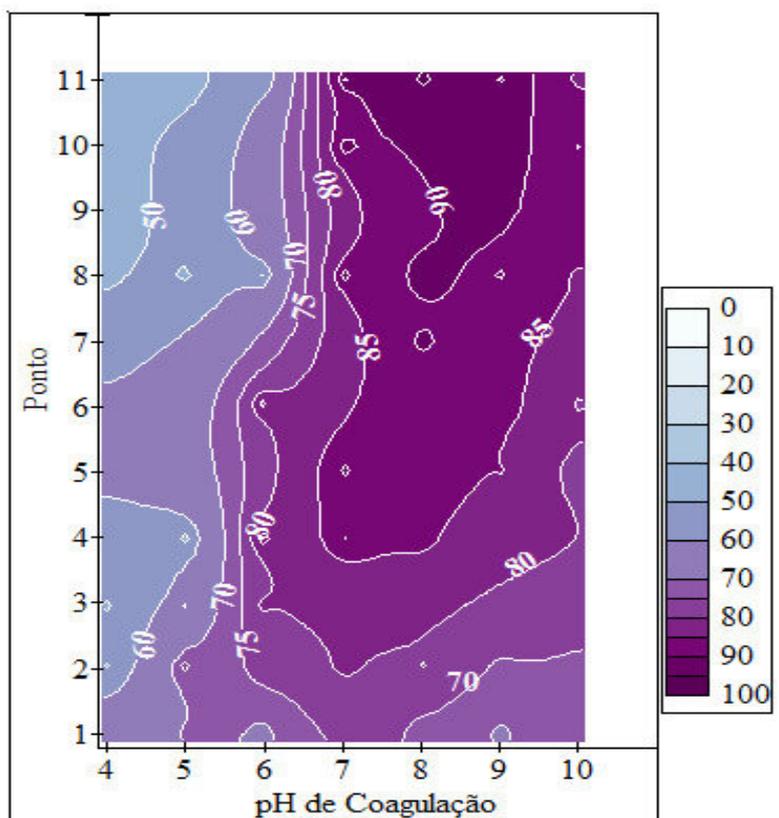
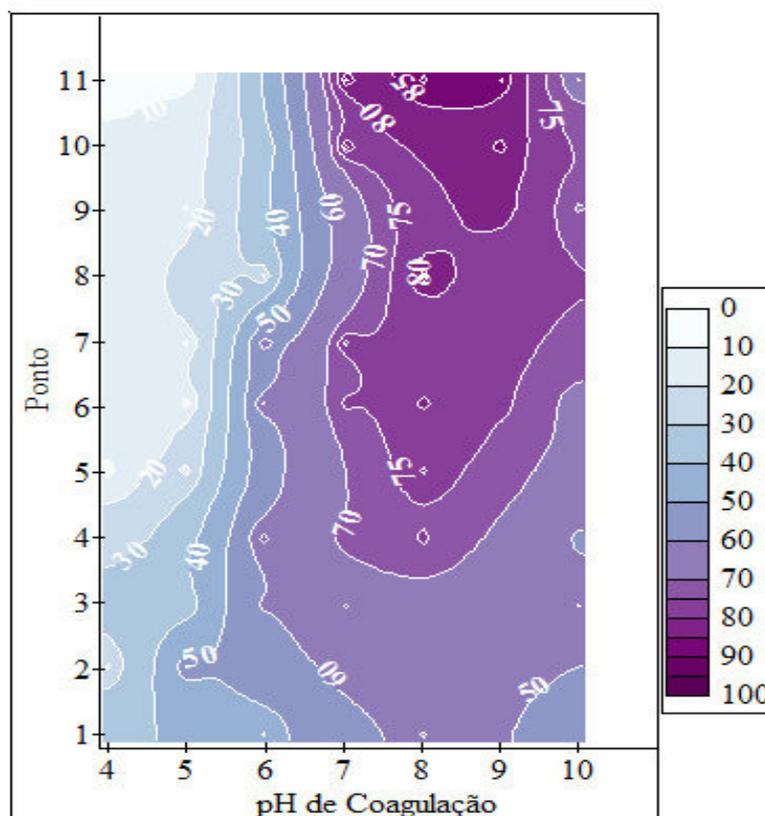


Figura 28 – Diagrama de coagulação para a associação dos coagulantes *M. oleifera* e PAC contendo curvas de remoção de compostos com absorção em  $UV_{254nm}$



Avaliando os três diagramas de coagulação (Figuras 26, 27 e 28) nota-se que o PAC isoladamente (ponto 11) apresenta melhores eficiências de remoção do que *M. oleifera* (ponto 1) na faixa de pH compreendida entre 7 e 10 para os parâmetros de qualidade: cor aparente, turbidez e compostos com absorção em  $UV_{254nm}$ . Isso pode ser explicado pelo fato de que esse coagulante químico é geralmente eficaz em uma faixa de pH entre 6 e 9, podendo atuar também em pH 10 (CONSTANTINO; YAMAMURA, 2009).

Por meio da análise dos resultados obtidos para a associação dos coagulantes *M. oleifera* (a partir do ponto 2) na faixa de pH entre 4 e 6, verifica-se que remoções mais baixas foram encontradas quando em comparação com os demais pHs de coagulação estudados. Isso sugere que o PAC atua melhor em pH neutro ou básico.

De uma forma geral, para pH de coagulação entre 7 e 9, eficiências de remoção superiores a 80% foram obtidas para cor aparente e turbidez, e 70% para compostos com absorção em  $UV_{254nm}$  a partir do ponto 4 ( $35 \text{ mg.L}^{-1} M. oleifera/3,75 \text{ mg.L}^{-1} \text{ PAC}$ ).

A análise estatística (DIC) para o pH de coagulação 7 demonstrou que não existe diferença significativa entre as eficiências de remoção para a adição de  $20 \text{ mg.L}^{-1} M. oleifera/7,5 \text{ mg.L}^{-1} \text{ PAC}$  (ponto 7) até a utilização de  $12,5 \text{ mg.L}^{-1} \text{ PAC}$  (ponto 11),

considerando cada parâmetro de qualidade individualmente. Neste caso, o uso desse coagulante natural poderia conduzir a uma redução de até 40% na utilização do coagulante químico sem comprometer a qualidade da água produzida.

Em pH 8, a adição de 15 mg.L<sup>-1</sup> *M. oleifera*/8,75 mg.L<sup>-1</sup> PAC (ponto 8) ao processo de coagulação/floculação e sedimentação ou 12,5 mg.L<sup>-1</sup> PAC (ponto 11) não apresentam diferença estatisticamente significativa. Isso ocasiona uma redução de até 30% na utilização do PAC quando se utiliza a associação dos coagulantes natural e químico, visando obter eficiências de remoção superiores a 90% para cor aparente e turbidez, e 80% para compostos com absorção em UV<sub>254nm</sub>.

Na faixa de pH entre 9 e 10, de um modo geral, o aumento da dosagem da solução padrão de PAC resultou na obtenção de melhores resultados de remoção. Entretanto, a utilização de *M. oleifera* pode desempenhar um papel-chave na redução da quantidade requerida do coagulante químico PAC.

### 5.5.3 Associação dos Coagulantes *M. oleifera* e Sulfato de Alumínio

Os resultados dos ensaios da associação dos coagulantes *M. oleifera* e sulfato de alumínio realizados para a construção dos diagramas de coagulação são apresentados no Apêndice R.

Vale lembrar que as condições de operação ótimas para essa associação dos coagulantes são: V<sub>MR</sub>: 105 rpm, T<sub>MR</sub>: 1 min, V<sub>ML</sub>: 30 rpm, T<sub>ML</sub>: 15 min, T<sub>S</sub>: 15 min, de acordo com os resultados apresentados na Tabela 13 (seção 5.4.4).

Nas Figuras 29, 30 e 31 constam os diagramas de coagulação resultantes da associação dos coagulantes *M. oleifera* e sulfato de alumínio, avaliando a eficiência de remoção de cor aparente, turbidez e compostos com absorção em UV<sub>254nm</sub>, respectivamente.

Figura 29 – Diagrama de coagulação para a associação dos coagulantes *M. oleifera* e sulfato de alumínio contendo curvas de remoção de cor aparente

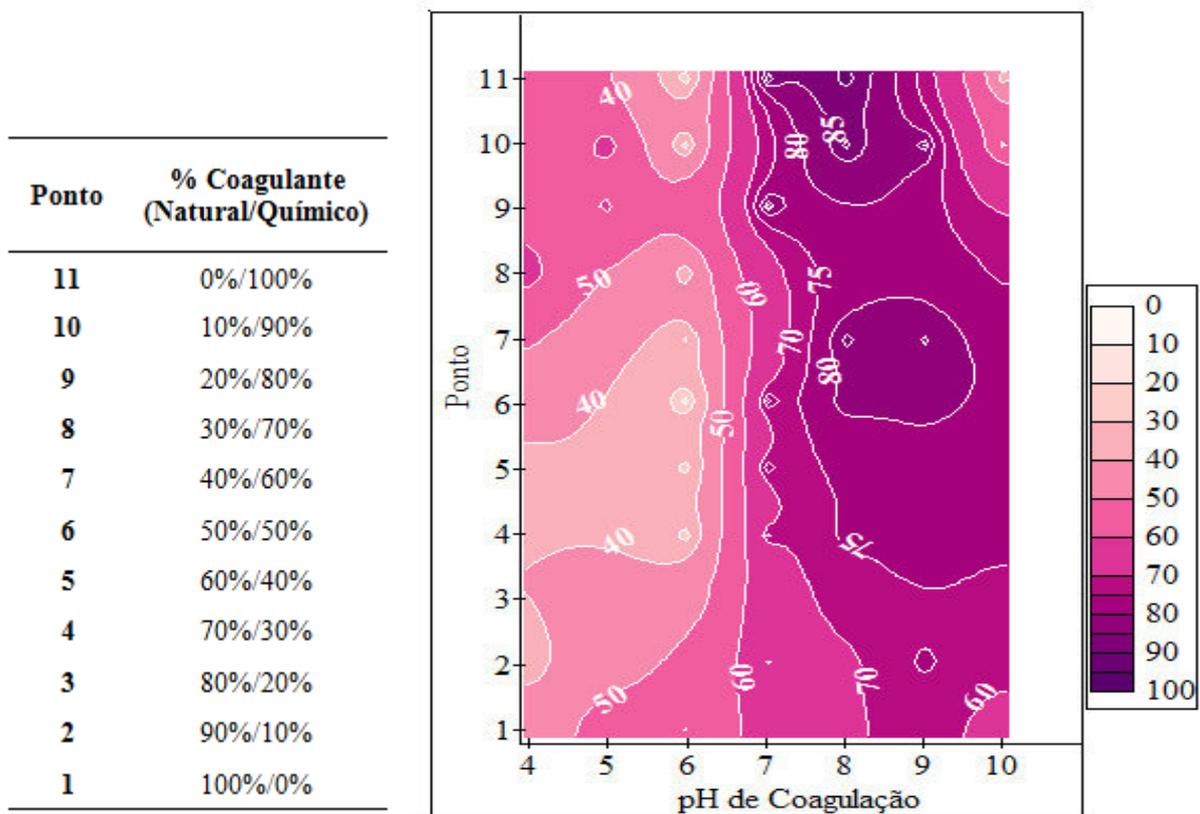


Figura 30 – Diagrama de coagulação para a associação dos coagulantes *M. oleifera* e sulfato de alumínio contendo curvas de remoção de turbidez

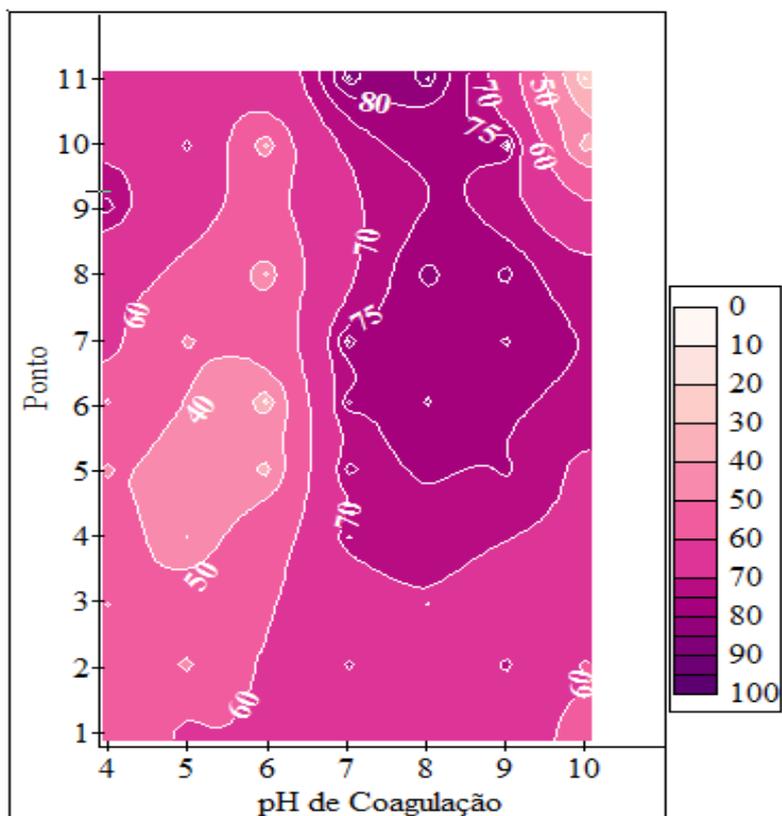
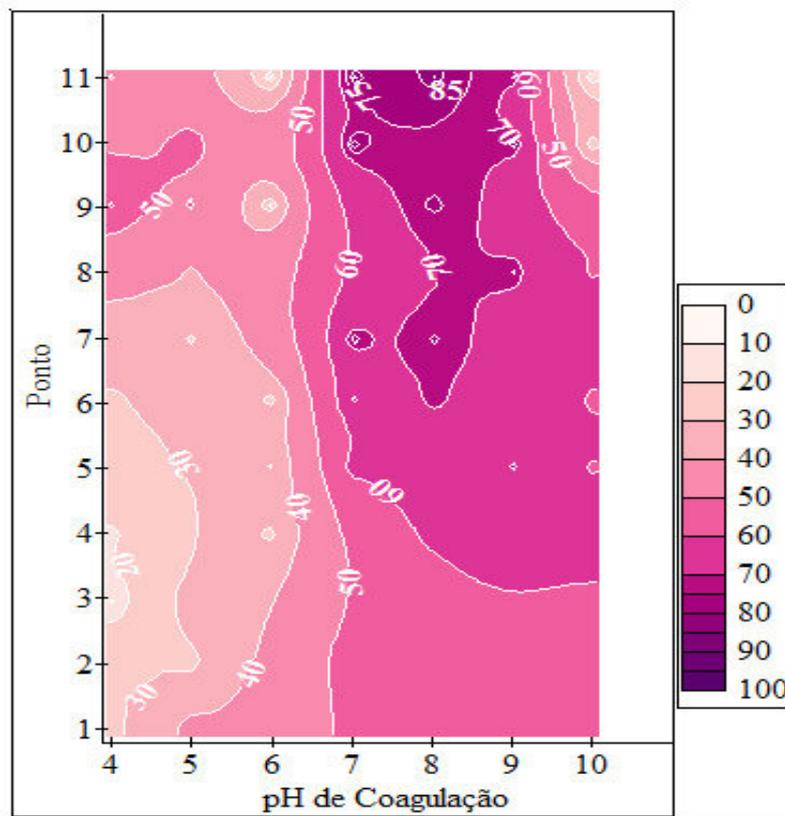


Figura 31 – Diagrama de coagulação para a associação dos coagulantes *M. oleifera* e sulfato de alumínio contendo curvas de remoção de compostos com absorção em  $UV_{254nm}$



Pode-se observar em função dos diagramas construídos (Figuras 29, 30 e 31) que a medida que a dosagem do coagulante químico sulfato de alumínio e o pH aumentam, o efeito de coagulação é mais pronunciado. Segundo Franco (2009) o sulfato de alumínio é mais eficaz em pH da água bruta entre 5,5 e 8. Os melhores resultados obtidos quando da utilização apenas do sulfato de alumínio (ponto 11) foram verificados no intervalo de pH de coagulação entre 7 e 9. Cardoso (2007) observou o mesmo comportamento em estudos anteriores.

Em relação à associação dos coagulantes, Valverde et al. (2013) constataram que a combinação do coagulante natural e químico proporciona um aumento na eficiência de remoção de cor aparente e turbidez da água de estudo. Dalen et al. (2009) destacam que o sulfato de alumínio e a *M. oleifera* em pó integral apresentam características sinérgicas no tratamento de água superiores à utilização da *M. oleifera* como único coagulante. Esse fato também foi observado nos diagramas de coagulação construídos (Figuras 29, 30 e 31).

Considerando a faixa de pH compreendida entre 7 e 9 pode-se dizer que a adição de coagulantes superiores às dosagens de  $15 \text{ mg.L}^{-1}$  *M. oleifera*/ $17,5 \text{ mg.L}^{-1}$  sulfato de

alumínio (ponto 8) seria interessante para a obtenção de eficiências de remoção na faixa de 75% para cor e turbidez e 70% para compostos com absorção em  $UV_{254nm}$ , ocasionando a redução de 30% na demanda do coagulante químico.

## 5.6 DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES ÓTIMAS DO PROCESSO DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO E SEDIMENTAÇÃO

Todos os diagramas de coagulação obtidos por meio dos experimentos (Figuras 23 a 31) foram examinados e, então, alguns pontos de estudo foram escolhidos, baseado nos resultados de eficiência de remoção dos três parâmetros de qualidade avaliados. Esses pontos de estudo se referem às condições ótimas do processo de coagulação/floculação e sedimentação para água de estudo com turbidez inicial próxima a 75 UNT (água de estudo 3, conforme a Tabela 8 da seção 5.1).

Vale ressaltar que optou-se por trabalhar com o intervalo de pH de coagulação entre 6 e 9,5, visto que a Portaria n.º 2914 do Ministério da Saúde recomenda que no sistema de distribuição o pH da água seja mantido nesta faixa (BRASIL, 2011). Além disso, de um modo geral, os melhores resultados obtidos se referem a pH de coagulação superior a 6, e caso o processo fosse implementado em uma ETA possivelmente não seria necessário corrigir o pH da água de estudo, tornando o procedimento mais simples e econômico.

Na Tabela 14 são apresentados os pontos de estudo escolhidos conforme a avaliação dos diagramas de coagulação para cor aparente, turbidez e compostos com absorção em  $UV_{254nm}$  (Figuras 23, 24 e 25), para a associação dos coagulantes *M. oleifera* e cloreto férrico nas condições de operação: 100 rpm ( $V_{MR}$ ), 3 min ( $T_{MR}$ ), 30 rpm ( $V_{ML}$ ), 15 min ( $T_{ML}$  e  $T_S$ ).

Tabela 14 – Pontos de estudo definidos para a associação dos coagulantes *M. oleifera* e cloreto férrico

Faixas de pH de coagulação	Dosagem dos coagulantes (mg.L <sup>-1</sup> )		% Coagulantes	
	<i>M. oleifera</i>	Cloreto férrico	<i>M. oleifera</i>	Cloreto férrico
8,5 – 9,5	40	2	80%	20%
8,0 – 9,5	35	3	70%	30%
7,0 – 9,0	30	4	60%	40%
6,5 – 9,5	25	5	50%	50%
7,0 – 9,0	20	6	40%	60%

Na Tabela 15 são apresentados os pontos de estudo escolhidos conforme a avaliação dos diagramas de coagulação para cor aparente, turbidez e compostos com absorção em UV<sub>254nm</sub> (Figuras 26, 27 e 28), para a associação dos coagulantes *M. oleifera* e PAC nas condições de operação: 100 rpm (V<sub>MR</sub>), 1 min (T<sub>MR</sub>), 45 rpm (V<sub>ML</sub>), 15 min (T<sub>ML</sub> e T<sub>S</sub>).

Tabela 15 – Pontos de estudo definidos para a associação dos coagulantes *M. oleifera* e PAC

Faixas de pH de coagulação	Dosagem dos coagulantes (mg.L <sup>-1</sup> )		% Coagulantes	
	<i>M. oleifera</i>	PAC	<i>M. oleifera</i>	PAC
7,0 – 7,5	40	2,5	80%	20%
7,0 – 8,0	35	3,75	70%	30%
7,5 – 8,5	30	5	60%	40%
7,5 – 9,0	25	6,25	50%	50%
7,5 – 9,5	20	7,5	40%	60%

Na Tabela 16 são apresentados os pontos de estudo escolhidos conforme a avaliação dos diagramas de coagulação para cor aparente, turbidez e compostos com absorção em UV<sub>254nm</sub> (Figuras 29, 30 e 31), para a associação dos coagulantes *M. oleifera* e sulfato de alumínio nas condições de operação: 105 rpm (V<sub>MR</sub>), 1 min (T<sub>MR</sub>), 30 rpm (V<sub>ML</sub>), 15 min (T<sub>ML</sub> e T<sub>S</sub>).

Tabela 16 – Pontos de estudo definidos para a associação dos coagulantes *M. oleifera* e sulfato de alumínio

Faixas de pH de coagulação	Dosagem dos coagulantes (mg.L <sup>-1</sup> )		% Coagulantes	
	<i>M. oleifera</i>	Sulfato de alumínio	<i>M. oleifera</i>	Sulfato de alumínio
7,5 – 9,5	40	5	80%	20%
8,0 – 9,0	35	7,5	70%	30%
8,0 – 9,0	30	10	60%	40%
8,0 – 9,5	25	12,5	50%	50%
8,0 – 8,5	20	15	40%	60%

Contudo, a associação dos coagulantes natural e químicos utilizada no processo de coagulação/floculação e sedimentação ainda não produz água potável. Sendo assim, é necessário acrescentar a etapa de filtração para melhorar a qualidade da água tratada.

## 5.7 ENSAIOS DE FILTRAÇÃO

A água utilizada nessa etapa da pesquisa corresponde à água de estudo 4, conforme a Tabela 8 (seção 5.1).

Nas Tabelas 17, 18 e 19 são apresentadas a caracterização da água tratada obtida após a realização dos ensaios de coagulação/floculação, sedimentação e filtração, considerando os pontos de estudo previamente definidos (Tabelas 14, 15 e 16, seção 5.6) para cada associação dos coagulantes estudada. Optou-se por realizar os ensaios com 80%/20% e 60%/40% de dosagem de *M. oleifera*/coagulante químico. Os valores residuais referem-se à coleta de amostra realizada após 15 min decorridos do tempo total de filtração, conforme citado na metodologia (seção 4.9).

Nos Apêndice S, T e U são apresentados os valores residuais e as eficiências de remoção obtidas para os parâmetros de qualidade: cor aparente e turbidez, considerando o tempo de filtração total de 21 min, com coletas de amostra realizadas em intervalos de 3 min, para a associação dos coagulantes *M. oleifera* e cloreto férrico, *M. oleifera* e PAC, e *M. oleifera* e sulfato de alumínio, respectivamente.

Vale lembrar que as condições de operação no processo de coagulação/floculação e sedimentação para a associação dos coagulantes são: *M. oleifera* e cloreto férrico: 100 rpm ( $V_{MR}$ ), 3 min ( $T_{MR}$ ), 30 rpm ( $V_{ML}$ ), 15 min ( $T_{ML}$  e  $T_S$ ); *M. oleifera* e

PAC: 100 rpm ( $V_{MR}$ ), 1 min ( $T_{MR}$ ), 45 rpm ( $V_{ML}$ ), 15 min ( $T_{ML}$  e  $T_S$ ); e *M. oleifera* e sulfato de alumínio: 105 rpm ( $V_{MR}$ ), 1 min ( $T_{MR}$ ), 30 rpm ( $V_{ML}$ ), 15 min ( $T_{ML}$  e  $T_S$ ).

Tabela 17 – Caracterização da água tratada, por meio da associação dos coagulantes *M. oleifera* e cloreto férrico, após a etapa de filtração

Parâmetros de qualidade (unidade)	Água de estudo	Controle (1)	% Coagulantes ( <i>M. oleifera</i> /Cloreto)		Valores permitidos (Legislação)	
			80%/20%	60%/40%	Brasil (2)	USA (3)
Valores residuais						
Faixa de pH de coagulação	-	-	8,5 – 9,5	7,0 – 9,0	-	-
pH ajustado (4)	-	-	8,956	7,664	-	-
Cor aparente (uH)	417	19	6	5	15	15
Turbidez (UNT)	79,9	6,0	3,3	3,2	5	1
UV <sub>254nm</sub> (cm <sup>-1</sup> )	0,263	0,049	0,037	0,027	-	-
Temperatura (°C)	20	25	28	27	-	-
pH (5)	7,537	7,562	7,865	7,481	6,0 – 9,5	6,5 – 8,5
COD (mg.L <sup>-1</sup> )	4,160	2,742	7,566	6,635	-	-
THMT (µg.L <sup>-1</sup> )	20,8	13,5	64,6	43,3	100	80
Alcalinidade (mg.L <sup>-1</sup> )	26,0	27,0	32,0	25,0	-	-
Acidez volátil (mg.L <sup>-1</sup> )	42	24	30	18	-	-
Dureza total (mg.L <sup>-1</sup> )	27,50	25,75	23,00	25,00	500	-
SDT (mg.L <sup>-1</sup> )	171,00	115,00	55,00	45,00	1000	500
Coliformes totais (UFC) (6)	1200	500	Ausência	100	Ausência	0
<i>E. coli</i> (UFC) (6)	200	200	Ausência	Ausência	Ausência	0

(1) Processo de coagulação/floculação, sedimentação e filtração realizado sem a adição do coagulante.

(2) Portaria nº. 2914 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011).

(3) United States Environmental Protection Agency (EPA, 2009).

(4) pH ajustado com solução de NaOH 0,1N e 1N; e HCl 0,1N e 1N para a realização dos ensaios, se necessário.

(5) pH medido após a realização dos ensaios de coagulação/floculação, sedimentação e filtração, exceto para a água de estudo.

(6) UFC: Unidade formadoras de colônias em 100 mL.

Tabela 18 – Caracterização da água tratada, por meio da associação dos coagulantes *M. oleifera* e PAC, após a etapa de filtração

Parâmetros de qualidade (unidade)	Água de estudo	Controle <sup>(1)</sup>	% Coagulantes ( <i>M. oleifera</i> /PAC)		Valores permitidos (Legislação)	
			80%/20%	60%/40%	Brasil <sup>(2)</sup>	USA <sup>(3)</sup>
Valores residuais						
Faixa de pH de coagulação	-	-	7,0 – 7,5	7,5 – 8,5	-	-
pH ajustado <sup>(4)</sup>	-	-	7,402	7,551	-	-
Cor aparente (uH)	417	19	1	1	15	15
Turbidez (UNT)	79,9	6,0	2,6	2,0	5	1
UV <sub>254nm</sub> (cm <sup>-1</sup> )	0,263	0,049	0,020	0,025	-	-
Temperatura (°C)	20	25	28	27	-	-
pH <sup>(5)</sup>	7,537	7,562	7,322	7,466	6,0 – 9,5	6,5 – 8,5
COD (mg.L <sup>-1</sup> )	4,160	2,742	5,975	4,565	-	-
THMT (µg.L <sup>-1</sup> )	20,8	13,5	33,4	32,2	100	80
Alcalinidade (mg.L <sup>-1</sup> )	26,0	27,0	26,0	30,0	-	-
Acidez volátil (mg.L <sup>-1</sup> )	42	24	30	18	-	-
Dureza total (mg.L <sup>-1</sup> )	27,50	25,75	25,00	23,50	500	-
SDT (mg.L <sup>-1</sup> )	171,00	115,00	50,00	43,00	1000	500
Coliformes totais (UFC) <sup>(6)</sup>	1200	500	Ausência	100	Ausência	0
<i>E. coli</i> (UFC) <sup>(6)</sup>	200	200	Ausência	Ausência	Ausência	0

(1) Processo de coagulação/floculação, sedimentação e filtração realizado sem a adição do coagulante.

(2) Portaria n°. 2914 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011).

(3) United States Environmental Protection Agency (EPA, 2009).

(4) pH ajustado com solução de NaOH 0,1N e 1N; e HCl 0,1N e 1N para a realização dos ensaios, se necessário.

(5) pH medido após a realização dos ensaios de coagulação/floculação, sedimentação e filtração, exceto para a água de estudo.

(6) UFC: Unidade formadoras de colônias em 100 mL.

Tabela 19 – Caracterização da água tratada, por meio da associação dos coagulantes *M. oleifera* e sulfato de alumínio, após a etapa de filtração

Parâmetros de qualidade (unidade)	Água de estudo	Controle (1)	% Coagulante ( <i>M. oleifera</i> /Sulfato)		Valores permitidos (Legislação)	
			80%/20%	60%/40%	Brasil (2)	USA (3)
Valores residuais						
Faixa de pH de coagulação	-	-	7,5 – 9,5	8,0 – 9,0	-	-
pH ajustado (4)	-	-	7,601	8,354	-	-
Cor aparente (uH)	417	19	5	6	15	15
Turbidez (UNT)	79,9	6,0	3,8	3,6	5	1
UV <sub>254nm</sub> (cm <sup>-1</sup> )	0,263	0,049	0,031	0,035	-	-
Temperatura (°C)	20	25	26	24	-	-
pH (5)	7,537	7,562	7,351	7,369	6,0 – 9,5	6,5 – 8,5
COD (mg.L <sup>-1</sup> )	4,160	2,742	11,700	7,519	-	-
THMT (µg.L <sup>-1</sup> )	20,8	13,5	73,8	54,3	100	80
Alcalinidade (mg.L <sup>-1</sup> )	26,0	27,0	24,0	22,0	-	-
Acidez volátil (mg.L <sup>-1</sup> )	42	24	24	24	-	-
Dureza total (mg.L <sup>-1</sup> )	27,50	25,75	22,75	22,00	500	-
SDT (mg.L <sup>-1</sup> )	171,00	115,00	54,00	48,00	1000	500
Coliformes totais (UFC) (6)	1200	500	Ausência	100	Ausência	0
<i>E. coli</i> (UFC) (6)	200	200	Ausência	Ausência	Ausência	0

(1) Processo de coagulação/floculação, sedimentação e filtração realizado sem a adição do coagulante.

(2) Portaria n°. 2914 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011).

(3) United States Environmental Protection Agency (EPA, 2009).

(4) pH ajustado com solução de NaOH 0,1N e 1N; e HCl 0,1N e 1N para a realização dos ensaios, se necessário.

(5) pH medido após a realização dos ensaios de coagulação/floculação, sedimentação e filtração, exceto para a água de estudo.

(6) UFC: Unidade formadoras de colônias em 100 mL.

As Tabelas 17, 18 e 19 serão discutidas em conjunto pois foi verificada uma tendência semelhante em relação aos resultados obtidos para cada parâmetro de qualidade avaliado, considerando a associação dos coagulantes *M. oleifera* e cloreto férrico, *M. oleifera* e PAC, e *M. oleifera* e sulfato de alumínio.

Analisando os resultados para o controle, apesar de haver uma redução significativa nos valores residuais da maioria dos parâmetros de qualidade, nota-se que a cor aparente, a turbidez, os coliformes totais e a *E. coli* ficaram acima dos valores máximos

permitidos pelas legislações brasileira e americana (BRASIL, 2011; EPA, 2009). Assim, é de fundamental importância a utilização de coagulantes no tratamento de água proposto, por meio das etapas de coagulação/floculação, sedimentação e filtração, a fim de obter uma água com o devido padrão de potabilidade.

Em relação ao parâmetro cor aparente, a associação dos coagulantes *M. oleifera* e PAC apresentou as melhores eficiências de remoção, com valores residuais de 1 uH, enquanto as demais associações apresentaram valores de cor aparente no intervalo de 5 uH a 6 uH, o que corrobora com Pavanelli (2001) que destaca que o PAC se mostra superior ao sulfato de alumínio em relação à eliminação de substâncias coloidais.

Considerando a legislação brasileira (BRASIL, 2011), os valores residuais de turbidez na associação dos coagulantes estão dentro do intervalo de valores máximos permitidos. Em relação à legislação americana (EPA, 2009) esses demonstraram não ter a qualidade exigida à água destinada ao consumo humano. Porém, considerando que as percentagens de remoção de turbidez foram superiores a 95%, não se deve inviabilizar a utilização da *M. oleifera* no tratamento de águas, mas sim prosseguir com pesquisas e tentar solucionar as desvantagens no processo (RIBEIRO, 2010).

A análise dos compostos com absorção em  $UV_{254nm}$  é utilizada como uma alternativa para representação da matéria orgânica natural, como por exemplo, as substâncias húmicas. Como essas substâncias podem ser removidas da água pelo processo de coagulação/floculação, sedimentação e filtração, acredita-se que os valores obtidos estão relacionados à redução das substâncias húmicas presentes na água de estudo, assim como à redução de compostos orgânicos alifáticos, aromáticos e complexos multi aromáticos (CARDOSO, 2007). Verificou-se eficiências de remoção destes compostos entre 86% e 92%.

Durante a execução dos ensaios, a temperatura inicial da água de estudo foi mantida sempre no intervalo de  $25 \pm 3^{\circ}C$ , pois ensaios com a mesma água a temperaturas diversas podem conduzir a resultados desiguais, uma vez que a temperatura influi significativamente na viscosidade da água, fazendo com que a deposição das partículas seja diferente (RIBEIRO, 2010). Após o processo de coagulação/floculação, sedimentação e filtração, verificou-se que os valores máximos encontrados foram de  $28^{\circ}C$ .

Segundo Pavanelli (2001) e Constantino e Yamamura (2009), o PAC libera durante a hidrólise uma quantidade de ácido menor do que a liberada pelo uso do sulfato de alumínio e do cloreto férrico. Isso provoca uma menor variação do pH do meio, o que pode ser observado nos resultados obtidos (Tabelas 17, 18 e 19).

Verificou-se que o parâmetro COD aumentou em relação à água de estudo de maneira proporcional à dosagem do coagulante natural *M. oleifera* adicionada ao processo de coagulação/floculação, sedimentação e filtração, o que corrobora com o estudo de Fatombi et al. (2012), sendo essa uma das desvantagens da utilização do coagulante natural. Esse fato se deve provavelmente a presença de substâncias orgânicas, tais como proteínas, lipídeos e vitaminas presentes no pó integral das sementes de *M. oleifera*, que acrescentam matéria orgânica ao meio (BORBA, 2001). Assim, o valor medido após os ensaios se refere ao residual de COD presente na água tratada mais a matéria orgânica adicionada pela utilização do coagulante natural. No controle, observou-se uma eficiência de remoção de 34% desse parâmetro de qualidade, já que a amostra se refere ao processo realizado sem a adição do coagulante *M. oleifera*.

Bongiovani (2014) cita que os THM são resultantes da reação entre o cloro aplicado na etapa de desinfecção e a MON presente na água. Verificou-se claramente que os valores obtidos na análise de THMT são diretamente proporcionais aos valores de COD. Houve uma redução nos valores residuais da água de estudo para o controle, o que corrobora com os resultados obtidos por Lantagne et al. (2008), comprovando que o processo de coagulação, floculação, sedimentação e filtração é capaz de remover parte dos sólidos presentes na água. Por meio dos resultados obtidos, sugere-se que a utilização da *M. oleifera* como coagulante associada aos agentes químicos: cloreto férrico, PAC ou sulfato de alumínio, nas condições ótimas do processo de coagulação/floculação, sedimentação e filtração aparentam ser precursores da formação de THM, porém, os valores observados estão dentro da faixa permitida pela legislação brasileira (BRASIL, 2011) e americana (EPA, 2009).

Em relação aos parâmetros alcalinidade e acidez volátil não há padrão nas legislações (BRASIL, 2011; EPA, 2009) para base de comparação.

A dureza total apresentou valores inferiores aos permitidos pela legislação brasileira (BRASIL, 2011) e não apresentou variações significativas em relação às associações dos coagulantes. Segundo Muyibi e Evison (1995), a *M. oleifera* auxilia na redução da dureza da água, o que foi observado nos resultados em comparação com a água de estudo.

Pode-se observar que os valores residuais obtidos para SDT são semelhantes, com eficiências de remoção no intervalo entre 68% a 74%, e ainda que todos se enquadraram na legislação brasileira (BRASIL, 2011) e americana (EPA, 2009), que é mais rigorosa em relação à esse parâmetro de qualidade.

Observou-se a ausência de coliformes totais para as dosagens de 80% de *M. oleifera* com 20% do coagulante químico (cloreto férrico, PAC ou sulfato de alumínio). Apesar de ter ocorrido uma diminuição significativa da carga microbiológica, há ainda a presença de coliformes totais para as dosagens de 60% de *M. oleifera* com 40% do coagulante químico. Segundo Nwaiwu e Lingmu (2011) e Mangale Sapana, Chonde e Raut (2012) os efeitos antimicrobianos das sementes de *M. oleifera* são atribuídos à floculação e à ação bactericida. Desse modo, constata-se que a dosagem do coagulante natural interfere na remoção de coliformes totais, sendo imprescindível adicionar a etapa de desinfecção, a fim de destruir ou inativar os microrganismos e garantir a produção de água potável.

Foi identificada ausência de *E. coli* em todas as amostras de água tratada analisadas, fato já observado por Cardoso (2007) e Fatombi et al. (2012), em estudos com extrato aquoso de *M. oleifera*. Abaliwano, Ghebremichael e Amy (2008) sugerem que isso pode ser uma indicação da atividade bactericida da *M. oleifera*, embora mais estudos sejam necessários a fim de verificar o mecanismo de ação.

Dessa forma, nas condições de operação estudadas com a associação dos coagulantes, os resultados encontrados na caracterização físico, química e microbiológica da água foram expressivos e estão, na maioria dos casos, de acordo com o limite requerido pela legislação brasileira (BRASIL, 2011) e americana (EPA, 2009).

### 5.7.1 Tamanho das Partículas

Na Tabela 20 são apresentados os valores médios do tamanho das partículas obtidos após o processo de coagulação/floculação e sedimentação.

Tabela 20 – Tamanho das partículas

<b>Amostras</b>	<b>% Coagulantes (<i>M. oleifera</i>/Químico)</b>	<b>Tamanho das partículas (nm)</b>
Água de estudo	-	3589,5
<i>M. oleifera</i> / cloreto férrico	80%/20%	11620,5
	60%/40%	20016,6
<i>M. oleifera</i> /PAC	80%/20%	31924,6
	60%/40%	47803,1
<i>M. oleifera</i> / sulfato de alumínio	80%/20%	9891,1
	60%/40%	11206,8

A formação dos flocos indica atividade de coagulação da *M. oleifera* (ABALIWANO; GHEBREMICHAEL; AMY, 2008) com os coagulantes químicos. Para Bongiovani et al. (2014) o tamanho de partículas é um parâmetro crucial em processos de tratamento de água.

Segundo Borba (2001) a formação dos flocos ocorre por meio de reações entre o coagulante e a água bruta, que por atração eletrostática formam os flocos que tendem a precipitar quando há uma diminuição da velocidade de fluxo da água. Isso explica a diferença expressiva entre o tamanho das partículas da água de estudo para as associações dos coagulantes *M. oleifera* e cloreto férrico, *M. oleifera* e PAC, e *M. oleifera* e sulfato de alumínio.

Observou-se pelos resultados obtidos para cada associação dos coagulantes em separado que, quanto menor a dosagem de *M. oleifera*, e conseqüentemente maior a dosagem do coagulante químico utilizada, maior o tamanho das partículas obtidos, o que corrobora com o estudo de Dalen et al. (2009). Rodríguez-Nuñez et al. (2012) garantem que os flocos formados com extrato aquoso de *M. oleifera* são pequenos, frágeis e o processo de sedimentação é mais lento em comparação com o sulfato de alumínio, porém a qualidade do lodo é maior.

A associação dos coagulantes *M. oleifera* e PAC apresentou melhores resultados em comparação com as demais associações estudadas, já que os menores valores de turbidez foram obtidos nesse caso (Tabelas 17, 18 e 19). Constantino e Yamamura (2009) destacam que a velocidade de formação dos flocos com a utilização do PAC é superior aos coagulantes tradicionais, garantindo aos flocos maior massa e, conseqüentemente, precipitação mais rápida e eficiente. Silva (2011) afirma que o PAC remove eficientemente a carga orgânica e inorgânica da água a ser tratada pela formação dos flocos grandes, rígidos e pesados.

### 5.7.2 Potencial Zeta

Na Tabela 21 são apresentados os valores médios do potencial zeta, assim como os valores de turbidez residual obtidos após o processo de coagulação/floculação e sedimentação.

Tabela 21 – Potencial zeta

Amostras	% Coagulantes ( <i>M. oleifera</i> /Químico)	Potencial zeta (mV) <sup>(1)</sup>	Turbidez (UNT) <sup>(2)</sup>
Água de estudo	-	-21,00 ± 0,38	-
<i>M. oleifera</i> / cloreto férrico	80%/20%	-13,84 ± 0,16	9,4
	60%/40%	-14,35 ± 0,36	9,2
<i>M. oleifera</i> /PAC	80%/20%	-11,56 ± 0,57	8,0
	60%/40%	-12,80 ± 0,44	7,8
<i>M. oleifera</i> / sulfato de alumínio	80%/20%	-14,78 ± 0,15	8,9
	60%/40%	-13,99 ± 0,38	8,4

(1) Resultados expressos em valores médios ± desvio padrão.

(2) Valores de turbidez residual obtidos após o processo de coagulação/floculação e sedimentação.

Verificou-se por meio dos resultados apresentados na Tabela 21 que o potencial zeta da água de estudo foi de -21,00 mV. Após o processo de coagulação/floculação e sedimentação, os resultados obtidos estão no intervalo de -14,35 mV a -11,56 mV. Lédo (2008) destaca que a adição de produtos químicos a uma dispersão coloidal provoca a desestabilização das partículas por meio da redução do potencial zeta, fato esse observado para a associação dos coagulantes *M. oleifera* e cloreto férrico, *M. oleifera* e PAC, e *M. oleifera* e sulfato de alumínio.

Bongiovani (2014) afirma que há poucos trabalhos na literatura com a medida do potencial zeta da água tratada com o coagulante *M. oleifera*, apesar desse parâmetro ser interessante para quantificar as cargas elétricas das partículas com o intuito de entender melhor o desempenho do processo de coagulação/floculação.

Segundo Santos (2004), quando se obtêm valores de potencial zeta entre +5 mV e -5 mV há uma forte desestabilização das partículas, o que é indicado para o mecanismo de adsorção e neutralização de cargas, pois, pela teoria da dupla camada elétrica, a coagulação inicia-se a partir do instante em que o potencial zeta das partículas se aproxima de zero, momento em que a repulsão entre as partículas de mesma carga superficial não é grande o suficiente para impedir a agregação destas. Contudo, os valores encontrados para a associação dos coagulantes estão em um intervalo de instabilidade incipiente, que varia entre -30 mV e -10 mV, sugerindo que essa instabilidade baste para que esse mecanismo atue, já que os valores obtidos para a turbidez após a realização dos ensaios de filtração (Tabelas 17, 18 e 19) estão de acordo com a legislação vigente (BRASIL, 2011). Novamente, a associação dos

coagulantes *M. oleifera* e PAC apresentou melhores resultados em comparação com as demais associações estudadas, baseados nos valores do potencial zeta e residual de turbidez.

## 5.8 CONDIÇÕES OTIMIZADAS DO TRATAMENTO DE ÁGUA COM A ASSOCIAÇÃO DOS COAGULANTES

A Tabela 22 apresenta os valores obtidos para as eficiências de remoção após a realização do processo de coagulação/floculação, sedimentação e filtração para os parâmetros de qualidade: cor aparente, turbidez, compostos com absorção em UV<sub>254nm</sub>, COD, THMT, alcalinidade, acidez volátil, dureza total, SDT, coliformes totais e *E. coli*, para a associação dos coagulantes *M. oleifera* e cloreto férrico, *M. oleifera* e PAC e *M. oleifera* e sulfato de alumínio. Esses valores foram calculados baseados nos resultados previamente apresentados nas Tabelas 17, 18 e 19.

Tabela 22 – Eficiências de remoção após o processo de coagulação/floculação, sedimentação e filtração

Parâmetros de qualidade	% Coagulantes ( <i>M. oleifera</i> /Químico)					
	Cloreto férrico		PAC		Sulfato de alumínio	
	80%/20%	60%/40%	80%/20%	60%/40%	80%/20%	60%/40%
Eficiências de remoção (%)						
Cor aparente	98,5	98,9	99,9	99,7	98,9	98,7
Turbidez	95,8	96,0	96,6	97,6	95,2	95,5
UV <sub>254nm</sub>	85,9	89,7	92,4	90,5	88,2	86,7
COD (*)	-81,9	-59,5	-43,6	-9,7	-181,3	-80,7
THMT (*)	-211,0	-108,6	-60,8	-55,3	-255,7	-161,4
Alcalinidade (*)	-23,1	3,8	0,0	-15,4	7,7	15,4
Acidez volátil	28,6	57,1	28,6	57,1	42,9	42,9
Dureza total	16,4	9,1	9,1	14,5	17,3	20,0
SDT	67,8	73,7	70,8	74,9	68,4	71,9
Coliformes totais	100,0	91,7	100,0	91,7	100,0	91,7
<i>E. coli</i>	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

(\*) Os valores negativos se referem ao aumento do parâmetro de qualidade em relação à água de estudo.

Após a realização dos ensaios no decorrer desta pesquisa, foram definidas as condições otimizadas para cada associação dos coagulantes *M. oleifera* e cloreto férrico, *M. oleifera* e PAC, e *M. oleifera* e sulfato de alumínio, conforme apresentado na Tabela 23. Optou-se pela condição de operação que utiliza 80% de coagulante natural no processo de coagulação/floculação, sedimentação e filtração, já que os valores obtidos se enquadram nos solicitados pela legislação vigente (BRASIL, 2011) e a dosagem requerida de coagulante químico é de 20%.

Tabela 23 – Condições otimizadas do processo de coagulação/floculação, sedimentação e filtração

Associação dos coagulantes: <i>M. oleifera</i> /Químico	Faixas de pH de coagulação	Eficiências de remoção (%)		
		Cor aparente	Turbidez	UV <sub>254nm</sub>
Cloreto férrico	8,5 – 9,5	98,5	95,8	85,9
PAC	7,0 – 7,5	99,9	96,6	92,4
Sulfato de alumínio	7,5 – 9,5	98,9	95,2	88,2

Segundo Di Bernardo (2003) não há uma regra geral que afirme qual coagulante é mais eficaz. Deve-se avaliar a eficácia dos distintos produtos por meio da dosagem mais eficiente e econômica do coagulante para uma determinada intensidade e duração de mistura, podendo-se ainda considerar o tempo de sedimentação, a qualidade do líquido clarificado e a quantidade de lodo que será gerado.

Considerando os resultados obtidos e apresentados na Tabela 23, pode-se mencionar que a associação dos coagulantes *M. oleifera* e PAC apresentou as melhores eficiências de remoção para os parâmetros de qualidade avaliados, apesar das demais associações também demonstrarem resultados que estão de acordo com os previstos na legislação (BRASIL, 2011; EPA, 2009).

Assim, pode-se afirmar que o processo de tratamento proposto por meio da associação dos coagulantes *M. oleifera* e cloreto férrico, *M. oleifera* e PAC, e *M. oleifera* e sulfato de alumínio é adequado para a obtenção de água potável, nas condições de operação estudadas, sendo sem dúvida, processos promissores sob o ponto de vista ambiental. Porém, é importante realizar a etapa de desinfecção, a fim de garantir a potabilidade da água.

## 5.9 ENSAIOS COMPLEMENTARES

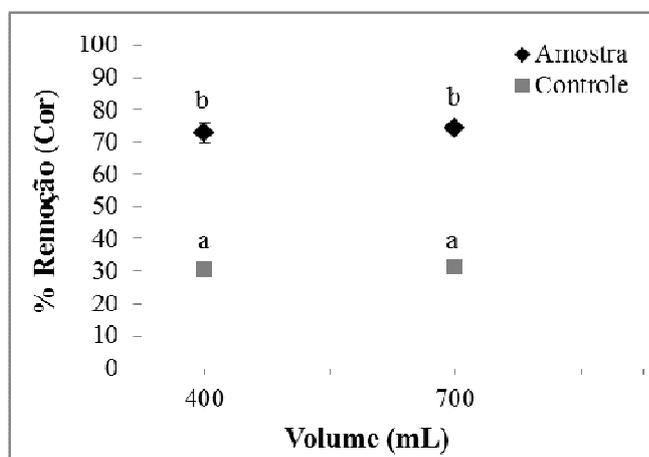
Vale citar que estes ensaios foram realizados para verificar se o volume da água de estudo utilizado nos ensaios de coagulação/floculação e sedimentação poderiam interferir na eficiência de remoção dos parâmetros de qualidade. A partir do delineamento experimental proposto (seção 4.11), realizou-se a análise de variância (ANOVA), com 95% de nível de confiança.

A água utilizada nessa etapa da pesquisa corresponde à água de estudo 4, conforme a Tabela 8 (seção 5.1).

A dosagem do coagulante *M. oleifera* em pó integral utilizada nos ensaios de coagulação/floculação e sedimentação foi de  $50 \text{ mg.L}^{-1}$ . O controle se refere ao processo realizado sem a adição do coagulante.

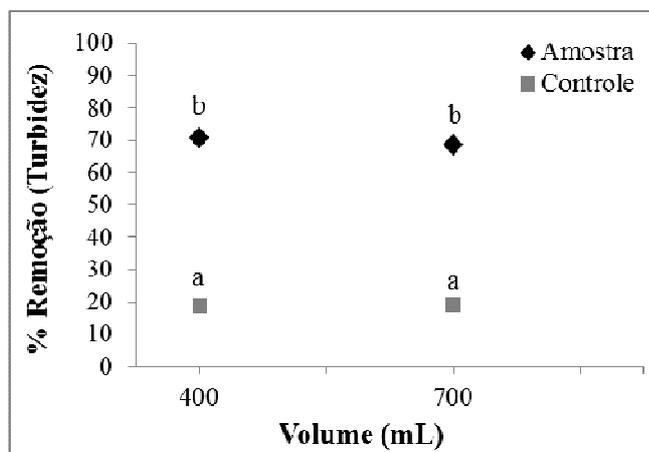
Nas Figuras 32, 33 e 34 são apresentados os resultados obtidos para a eficiência de remoção de cor aparente, turbidez e compostos com absorção em  $\text{UV}_{254\text{nm}}$  para os volumes da água de estudo de 400 mL e 700 mL.

Figura 32 – Ensaio complementares de eficiência de remoção de cor aparente para os volumes da água de estudo de 400 mL e 700 mL



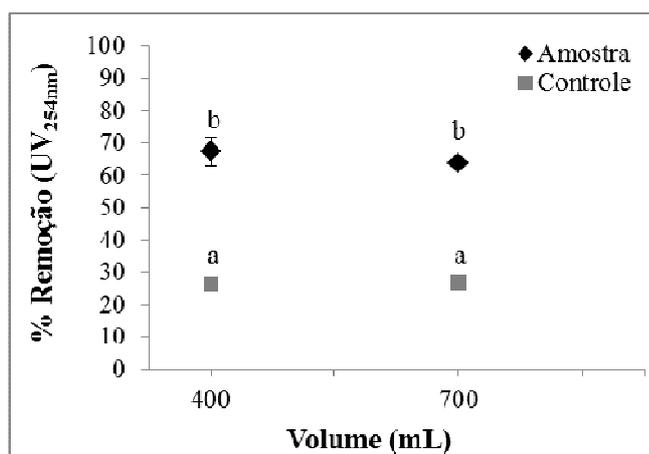
\*As médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de nível de significância.

Figura 33 – Ensaio complementares de eficiência de remoção de turbidez para os volumes da água de estudo de 400 mL e 700 mL



\*As médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de nível de significância.

Figura 34 – Ensaio complementares de eficiência de remoção de compostos com absorção em UV<sub>254nm</sub> para os volumes da água de estudo de 400 mL e 700 mL



\*As médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de nível de significância.

Avaliando as Figuras 32, 33 e 34 verificou-se que houve diferença estatística entre a amostra e o controle, fato que comprova que o tratamento realizado com a adição da *M. oleifera* em pó integral melhora a eficiência de remoção dos parâmetros de qualidade avaliados em até 50%.

Pode-se afirmar que o volume utilizado de água de estudo (400 mL ou 700 mL) nos ensaios de coagulação/floculação e sedimentação não interfere significativamente na eficiência de remoção de cor aparente, turbidez e compostos com absorção em UV<sub>254nm</sub>. Sendo assim, o volume da água de estudo utilizado para os ensaios realizados no decorrer desse trabalho não influenciou os resultados obtidos.

## 6 CONCLUSÕES

Essa seção apresenta as conclusões finais obtidas a partir dos resultados dos experimentos realizados.

Analisando a etapa de avaliação dos diferentes métodos de preparo do coagulante *M. oleifera*, pode-se afirmar que:

- O pó integral ( $Po_{int}$ ) e a solução integral e desengordurada (salinas) ( $S_{int-sal}$  e  $S_{des-sal}$ ) são coagulantes indicados para a remoção dos parâmetros de qualidade avaliados nas condições de operação de 100 rpm durante 3 min, 15 rpm durante 15 min e 60 min de sedimentação.

- Para a água de estudo com turbidez inicial próxima a 70 UNT, a melhor dosagem do coagulante *M. oleifera* foi de 50 mg.L<sup>-1</sup>, independente do método de preparo ( $Po_{int}$ ,  $S_{int-sal}$  e  $S_{des-sal}$ ), a fim de obter eficiências de remoção na faixa de 80% para cor aparente, 85% para turbidez e 65% para compostos com absorção em UV<sub>254nm</sub>.

- Os três métodos de preparo propostos,  $Po_{int}$ ,  $S_{int-sal}$  e  $S_{des-sal}$ , apresentam-se como formas propícias de coagulante natural biodegradável, com potencialidade para o tratamento e clarificação da água. Contudo, a forma  $Po_{int}$  destacou-se pela facilidade no preparo e aplicação nos ensaios de coagulação/floculação e sedimentação, tendo sido esse coagulante definido como o padrão para as demais etapas do trabalho.

Analisando a etapa do estudo do tempo de degradação do coagulante *M. oleifera* em pó integral, pode-se afirmar que:

- Foi detectada a degradação da atividade do coagulante em torno de 15% para os parâmetros de qualidade: cor aparente, turbidez e compostos com absorção em UV<sub>254nm</sub>, ao longo de 5 semanas.

- Para obter resultados promissores é interessante utilizar o coagulante *M. oleifera* em pó integral durante o período máximo de 1 semana, pois as propriedades coagulantes/floculantes do mesmo tendem a diminuir com o tempo de armazenamento do produto.

Analisando a etapa de otimização das condições de operação na etapa de coagulação/floculação e sedimentação, pode-se afirmar que:

- A associação dos coagulantes natural e químicos contribui para a diminuição do tempo de sedimentação, sendo 15 min suficientes para a remoção dos parâmetros de qualidade avaliados.

Analisando a etapa de construção dos diagramas de coagulação, pode-se afirmar que:

- A utilização de um coagulante natural eficaz, renovável e biodegradável, como a *M. oleifera* contribuiu significativamente para a redução da quantidade de coagulantes químicos aplicado ao processo e é mais compatível com as questões ambientais atuais.

- Para a associação dos coagulantes, observou-se que é possível reduzir a demanda requerida do coagulante químico em até 50%, quando se trata do cloreto férrico, 40% do PAC, e 30% do sulfato de alumínio, sem afetar a eficiência do processo de coagulação/floculação e sedimentação, considerando o pH da água de estudo na faixa de 6 a 8.

Analisando a etapa de filtração, pode-se afirmar que:

- Nas condições de operação estudadas com a associação dos coagulantes *M. oleifera* e cloreto férrico, *M. oleifera* e PAC, e *M. oleifera* e sulfato de alumínio, os resultados obtidos para a caracterização físico, química e microbiológica da água tratada foram expressivos e estão de acordo com o limite requerido pela legislação brasileira.

- Devido ao aumento significativo do carbono orgânico dissolvido observado nos resultados, sugere-se que a associação dos coagulantes nas condições ótimas do processo de coagulação/floculação, sedimentação e filtração aparentam ser precursores da formação de trihalometanos, principalmente pelo fato de se utilizar o coagulante natural *M. oleifera*. Contudo, é pertinente destacar que os valores obtidos estão dentro da faixa permitida pela legislação.

- A associação dos coagulantes *M. oleifera* e PAC apresentou melhores resultados em termos de residual de cor aparente, turbidez, compostos com absorção em UV<sub>254nm</sub> e carbono orgânico dissolvido, em comparação com as demais associações estudadas (*M. oleifera* e cloreto férrico, e *M. oleifera* e sulfato de alumínio), o que está relacionado ao tamanho das partículas formadas e ao potencial zeta.

Em relação às condições otimizadas do tratamento de água com a associação dos coagulantes, pode-se afirmar que:

- A utilização de 80% de *M. oleifera* com 20% de coagulante químico (cloreto férrico, PAC ou sulfato de alumínio) são indicadas para a obtenção de água potável, nas condições de operação estudadas. Contudo, a etapa de desinfecção deve ser acrescentada ao processo a fim de garantir a ausência de microrganismos.

De modo geral, pode-se considerar que o pó integral das sementes de *M. oleifera* é um propício coagulante natural com grande potencial para o tratamento de água superficial. Esse coagulante pode ser utilizado pela população de áreas rurais ou de países em desenvolvimento como uma técnica alternativa de tratamento doméstico, onde não há estrutura disponível para a realização do tratamento convencional de água. Assim, a *M. oleifera* destaca-se como um produto sustentável bastante atrativo para a purificação da água, sendo uma alternativa ambientalmente correta.

Conclui-se que a utilização da *M. oleifera* como coagulante associada aos coagulantes químicos: cloreto férrico, PAC ou sulfato de alumínio, nas condições ótimas do processo de coagulação/floculação, sedimentação e filtração, garantem a eficiência de remoção dos parâmetros de qualidade da água, assim como a possibilidade de produção de água com o devido padrão de potabilidade exigido pela legislação.

## 7 SUGESTÕES

Essa seção apresenta algumas sugestões para trabalhos futuros.

Como continuidade do trabalho, pode-se explorar:

- A eficiência do processo de coagulação/floculação, sedimentação e filtração na associação de outros coagulantes químicos com a *M. oleifera*, visando determinar as condições ótimas do processo para a obtenção de água potável.
- A biodegradabilidade do lodo gerado na associação dos coagulantes *M. oleifera* e cloreto férrico, *M. oleifera* e PAC, e *M. oleifera* e sulfato de alumínio.
- A análise de outros parâmetros de qualidade, mais específicos, identificados na legislação vigente.
- O estudo de diferentes faixas de turbidez inicial da água bruta (inferior e superior a 70 UNT) a fim de definir as condições ótimas do processo de coagulação/floculação, sedimentação e filtração.
- O armazenamento das sementes de *M. oleifera*, pois se sabe que após algum tempo de estocagem essas sementes perdem suas propriedades coagulantes.
- A viabilidade econômica do uso das sementes de *M. oleifera* para o tratamento de água.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABALIWANO, J. K.; GHEBREMICHAEL, K. A.; AMY, G. L. Application of the purified *Moringa oleifera* coagulant for surface water treatment. **WaterMill Working Paper Series**, n. 5, p. 1-19, 2008.

ABDULSALAM, S.; GITAL, A. A.; MISAU, I. M.; SULEIMAN, M. S. Water clarification using *Moringa oleifera* seed coagulant: Maiduguri raw water as a case study. **Journal of Food, Agriculture & Environment**, v. 5, n.1, p. 302-306, 2007.

ABREU, Sergio Brasil. **Comportamento de filtros rápidos de camada profunda no tratamento de águas de abastecimento mediante o emprego de polímeros como auxiliaries de filtração**. 2009, 317 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

ALI, E. N.; MUYIBI, S. A.; SALLEH, H. M.; ALAM, M. Z.; SALLEH, M. R. Production of natural coagulant from *Moringa oleifera* seed for application in treatment of low turbidity water. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 2, n. 3, p. 259-266, 2010. doi:10.4236/jwarp.2010.23030.

ALO, M. N.; ANYIM, C.; ELOM, M. Coagulation and antimicrobial activities of *Moringa oleifera* seed storage at 3°C temperature in turbid water. **Advances in Applied Science Research**, v. 3, n. 2, p. 887-894, 2012.

AMAGLOH, F. K.; BENANG, A. Effectiveness of *Moringa oleifera* seed as coagulant for water purification. **African Journal of Agricultural Research**, v. 4, n. 1, p. 119-123, 2009.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Panorama da qualidade das águas superficiais do Brasil: 2012**. Brasília, 2012.

APHA. American Public Health Association. **Standard Methods for the Examination for Water and Wastewater**. 19<sup>th</sup> ed. Washington, 1995.

ARANTES, C. C.; RIBEIRO, T. A. P.; PATERNIANI, J. E. S. Processamento de sementes de *Moringa oleifera* utilizando-se diferentes equipamentos para obtenção de solução coagulante.

**Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 6, p. 661-666, 2012. doi:10.1590/S1415-43662012000600011.

ASRAFUZZAMAN, M.; FAKHRUDDIN, A. N. M.; HOSSAIN, M. A. Reduction of turbidity of water using locally available natural coagulants. **International Scholarly Research Network – ISRN Microbiology**, v. 2011, article ID 632189, 6 pages, 2011. doi:10.5402/2011/632189.

ASSIS, Renata Sâmia Sobral de. **Remoção de *Microcystis aeruginosa* e microcistinas por flotação por ar dissolvido** – Estudo em escala de bancada utilizando sulfato de alumínio e cloreto férrico como coagulantes. 2006. 119 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

AWAD, M.; WANG, H.; LI, F. Preliminary study on combined use of *Moringa* seeds extract and PAC for water treatment. **Research Journal of Recent Sciences**, v. 2, n. 8, p. 52-55, 2013.

BAGHVAND, A.; ZAND, A. D.; MEHRDADI, N.; KARBASSI, A. Optimizing coagulation process for low to high turbidity waters using aluminum and iron salts. **American Journal of Environmental Sciences**, v. 6, n. 5, p. 442-448, 2010.

BEAUDRY, Jean-Paul **Traitement des Eaux**. Quebec, Sainte-Foy: Éditions Le Griffon D'Argile, 1984.

BEZERRA, A. M. E.; MOMENTÉ, V. G.; MEDEIROS FILHO, S. Germinação de sementes e desenvolvimento de plântulas de *Moringa* (*Moringa oleifera* Lam) em função do peso da semente e do tipo de substrato. **Horticultura Brasileira**, v. 22, n. 2, p. 295-299, 2004. doi:10.1590/S0102-05362004000200026.

BICHI, M. H.; AGUNWAMBA, J. C.; MUYIBI, S. A. Optimization of operating conditions for the application of *Moringa oleifera* (*Zogale*) seeds extract in water disinfection using response surface methodology. **African Journal of Biotechnology**, v. 11, n. 92, p. 15875-15887, 2012. doi:10.5897/AJB12.1341

BINA, B.; MEHDINEJAD, M. H.; DALHAMMER, G.; RAJARAO, G.; NIKAEEN, M.; ATTAR, H. M. Effectiveness of *Moringa oleifera* coagulant protein as natural coagulant aid in removal of turbidity and bacteria from turbid waters. **World Academy of Science, Engineering and Technology**, v. 43, p. 618-620, 2010.

BODLUND, Ida. **Coagulant protein from plant materials**: Potential water treatment agent. 2013. 37 p. School of Biotechnology, Royal Institute of Technology (KTH), Albanova University Center, Stockholm, Sweden, 2013.

BONGIOVANI, Milene Carvalho. **Estudo da minimização da formação de trihalometanos em presença de matéria orgânica natural (MON) utilizando processos alternativos de tratamento**. 2014. 175 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2013.

BONGIOVANI, M. C.; CAMACHO, F. P.; NISHI, L.; COLDEBELLA, P. F.; VALVERDE, K. C.; VIEIRA, A. M. S.; BERGAMASCO, R. Improvement of the coagulation/flocculation process using a combination of *Moringa oleifera* Lam with anionic polymer in water treatment. **Environmental Technology**, v. 35, n. 17, p. 2227-2236, 2014. doi:10.1080/09593330.2014.899398.

BONGIOVANI, M. C.; VALVERDE, K. C.; BERGAMASCO, R. Utilização do processo combinado coagulação/floculação/UF como processo alternativo ao tratamento convencional utilizando como coagulante a *Moringa oleifera* Lam. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 9, n. 11, p. 65-76, 2013.

BORBA, Luís Ramos. **Viabilidade do uso da *Moringa oleifera* Lam no tratamento simplificado de água para pequenas comunidades**. 2001. 84 p. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2001.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria n°. 2914, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Diário Oficial**, Brasília, DF, 14 dez. 2011. p. 39.

\_\_\_\_\_. Secretaria de Vigilância em Saúde. **Boas práticas no abastecimento de água: Procedimentos para a minimização de riscos à saúde**. Série A. Normas e Manuais Técnicos. Brasília: MS, 2006.

BRATBY, Jonh. **Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment**. 2<sup>th</sup> ed. London, UK: IWA Publishing, 2006.

BRINCK, Nádia Cristina Pires. **Avaliação do tipo de material filtrante no comportamento hidráulico de filtros rápidos de camada profunda no tratamento de águas de abastecimento**. 2009. 393 p. Tese (Doutorado em Engenharia), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

CAMPOS, José Roberto; POVINELLI, Jurandyr. Coagulação e floculação. In: AZEVEDO NETO, José Martiniano et al., **Técnicas de abastecimento e tratamento de água**. 2<sup>a</sup> ed., v. 2, cap. 19, São Paulo: CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 1976, p. 91-97.

CARDOSO, Karina Cordeiro. **Estudo do processo de coagulação/floculação por meio da *Moringa oleifera* Lam para obtenção de água potável**. 2007. 101 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2007.

CARDOSO, K. C.; BERGAMASCO, R.; COSSICH, E. S.; MORAES, L. C. K. Otimização dos tempos de mistura e decantação no processo de coagulação/floculação da água bruta por meio da *Moringa oleifera* Lam. **Acta Scientiarum Technology**, v. 3, n. 2, p. 193-198, 2008. doi:10.4025/actascitechnol.v30i2.5493.

CARVALHO, Maria José Herkenhoff. **Uso de coagulantes naturais no processo de obtenção de água potável**. 2008. 154 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2008.

CENTURIONE FILHO, P. L.; DI BERNARDO, L. Procedimento para execução de ensaios de flotação/filtração em equipamento de bancada. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 8, n. 1/2, p. 39-44, 2003.

CESCO, Décio Dias. **Avaliação em escala real da formação de THMs em águas de abastecimento**. 2007. 82 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2007.

CLAYTON, B. E. Report of the lowermoor incident advisory group. **Journal of Industrial Medicine**, v. 40, n. 3, p. 301-304, 1989.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Ministério da Saúde. Resolução nº. 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial**, Brasília, DF, 18 mar. 2005. p. 58.

CONSTANTINO, A. F.; YAMAMURA, V. C. Redução do gasto operacional em estação de tratamento de água utilizando o PAC. In: SIMPGEU – Simpósio de Pós-graduação em Engenharia Urbana, ago. 2009, Maringá.

DALEN, M. B.; PAM, J. S.; IZANG, A.; EKELE, R. Synergy between *Moringa oleifera* seed powder and alum in the purification of domestic water. **Science World Journal**, v. 4, n. 4, p. 6-11, 2009.

DI BERNARDO, Luiz (Coordenador). **Tratamento de água para abastecimento por filtração direta**. São Carlos: RiMa, Projeto Prosab, 2003.

DI BERNARDO, Luiz; DANTAS, Angela Di Bernardo. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2ª ed., v. 1. São Carlos: RiMa, 2005.

DI BERNARDO, Luiz; PAZ, Lyda Patricia Sabogal. **Seleção de tecnologias de tratamento de água**. v. 1. São Carlos: Editora LDIBE LTDA, 2008.

DUBEY, D. K.; JYOTSNA, D.; KUMAR, A.; GULSAN, R. K. A multipurpose tree - *Moringa oleifera*. **International Journal of Pharmaceutical and Chemical Sciences**, v. 2, n. 1, p. 415-423, 2013.

EGBUIKWEM, P. N.; SANGODOYIN, A. Y. Coagulation efficacy of *Moringa oleifera* seed extract compared to alum for removal of turbidity and *E. coli* in three different water sources. **European International Journal of Science and Technology**, v. 2, n. 7, p. 13-20, 2013.

EPA. United States Environmental Protection Agency. National Primary Drinking Water Regulations. USA, 2009.

FATOMBI, K. J.; AHOYO, T. A.; NONFODJI, O.; AMINOU, T. Physico-chemical and bacterial characteristics of groundwater and surface water quality in the lagbe town: Treatment essays with *Moringa oleifera* seeds. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 4, n. 12, p. 1001-1008, 2012. doi:10.4236/jwarp.2012.412116.

FERRARRI, T. N.; JULIO, M. de; JULIO, T. S. de. Emprego do sulfato de alumínio e do cloreto de polialumínio em estudos de tratabilidade da água que abastece o município de São José dos Campos – SP. **Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia**, v. 8, n. 4, p. 118-137, 2011.

FERREIRA, D. F. Sisvar: A computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011. doi:10.1590/S1413-70542011000600001.

FRANCO, Elton Santos. **Avaliação da influência dos coagulantes sulfato de alumínio e cloreto férrico na remoção de turbidez e cor da água bruta e sua relação com sólidos na geração de lodo em estações de tratamento de água**. 2009. 187 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Instituto de Ciências Exatas e Biológicas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

GALLÃO, I. M.; DAMASCENO, L. F.; BRITO, E. S. Avaliação química e estrutural da semente de *Moringa*. **Revista Ciência Agronômica**, v. 37, n. 1, p. 106-109, 2006.

GASSENSCHMIDT, U.; JANY, K. D.; TAUSCHER, B.; NIEBERGALL, H. Isolation and characterization of a flocculating protein from *Moringa oleifera* Lam. **Biochimica et Biophysica Acta**, v. 1243, n. 3, p. 477-481, 1995. doi:10.1016/0304-4165(94)00176-X.

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**, v. 39, n. 11, p. 2338-2344, 2005.

GIDDE, M. R.; BHALERAO, A. R. Optimisation of physical parameters of coagulation-flocculation process in water treatment. **Journal of Environmental Research and Development**, v. 6, n. 1, p. 99-110, 2011.

GIDDE, M. R.; BHALERAO, A. R.; MALUSARE, C. N. Comparative study of different forms of *Moringa oleifera* extracts for turbidity removal. **International Journal of Engineering Research and Development**, v. 2, n.1, p. 14-21, 2012.

GUEYRARD, D.; BARILLARI, J.; IORI, R.; PALIERI, S.; ROLLIN, P. First synthesis of an o-glycosylated glucosinolate isolated from *Moringa oleifera*. **Tetrahedron Letters**, v. 41, n. 43, p. 8307-8309, 2000. doi:10.1016/S0040-4039(00)01466-0.

HELLER, Léo; PÁDUA, Valter Lúcio de. **Abastecimento de água para o consumo humano**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2006.

IAL. Instituto Adolfo Lutz. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. Coordenadores: Odair Zenebon, Neus Sadocco Pascuet e Paulo Tiglea. 4ª ed., 1ª ed. digital, cap. 4, São Paulo: IAL, 2008, p. 117-118.

JAHN, S. A. A. Monitored water coagulation with *Moringa* seeds in village households. **GTZ: Gate**, v. 1, n. 89, p. 40-41, 1989.

\_\_\_\_\_. **Traditional water purification in tropical developing countries: Existing methods and potential application**. GTZ: Gate, Germany, 1981.

JOSHUA, R.; VASU, V. Characteristics of stored rain water and its treatment technology using *Moringa* seeds. **International Journal of Life Sciences Biotechnology and Pharma Research**, v. 2, n. 1, p. 154-175, 2013.

JULIO, M. de; FIORAVANTE, D. A.; OROSKI, F. I. Avaliação da influência dos parâmetros de mistura rápida, floculação e decantação no tratamento de água empregando o sulfato de alumínio e o PAC. **Ciências Exatas e da Terra, Agrárias e Engenharias**, v. 14, n. 2, p. 109-120, ago. 2008. doi:10.5212/Publ.Exatas.v.14i2.109120.

JULIO, M. de; VOLSKI, I.; FIORAVANTE, D. A.; SELHORST FILHO, O.; OROSKI, F. I. Avaliação da viabilidade técnica do emprego da tecnologia de filtração direta no tratamento

da água bruta afluyente à ETA do município de Ponta Grossa, PR. **Ciência & Engenharia**, v. 18, n. 1/2, p. 21-30, 2009.

KALIBBALA, Herbert Mpagi. **Removal of natural organic matter and control of trihalomethanes formation in water treatment**. 2012. 42 p. PhD Thesis – Water and Sewage Technology, Department of Land and Water Resources Engineering, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, 2012.

KATAYON, S.; NOOR, M. J. M. M.; ASMA, M.; GHANI, L. A. A.; THAMER, A. M.; AZNI, I.; AHMAD, J.; KHOR, B. C.; SULEYMAN, A. M. Effects of storage conditions of *Moringa oleifera* seeds on its performance in coagulation. **Bioresource Technology**, v. 97, n. 13, p. 1455-1460, sep. 2006.

KAWAMURA, S. Effectiveness of natural polyelectrolytes in water treatment. **Journal of the American Water Works Association**, v. 83, n. 10, p. 88-91, 1991.

KIM, S. H.; MOON, B. H.; LEE, H. I. Effects of pH and dosage on pollutant removal and flocculation during coagulation. **Microchemical Journal**, v. 68, n. 2, p. 197-203, 2001. doi:10.1016/S0026-265X(00)00146-6.

KONRADT-MORAES, Leila Cristina. **Estudo da coagulação-ultrafiltração para produção de água potável**. 2004. 138 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2004.

LANTAGNE, D. S.; QUICK, R.; BLOUNT, B. C.; CARDINALLI, F. Disinfection by-product formation and mitigation strategies in point-of-use chlorination of turbid and non-turbid waters in western Kenya. **Journal of Water and Health**, v. 6, n. 1, p. 67-82, 2008 doi:10.2166/wh.2007.013.

LEA, M. Bioremediation of turbid surface water using seed extract from *Moringa oleifera* Lam. (drumstick) tree. *Current Protocols in Microbiology*. **Wiley Interscience**, p. 1-14, 2010. doi:10.1002/9780471729259.mc01g02s16.

LÉDO, Patrícia Guilhermina da Silva. **Flotação por ar dissolvido na clarificação de águas com baixa turbidez utilizando sulfato de alumínio e sementes de *Moringa oleifera* como**

**coagulantes**. 2008, 123 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

LIBÂNIO, Marcelo. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. Campinas: Editora Átomo, 2005.

LO MONACO, P. A. V.; MATOS, A. T.; RIBEIRO, I. C. A.; NASCIMENTO, F. S.; SARMENTO, A. P. Utilização de extrato de sementes de *Moringa* como agente coagulante no tratamento de água para abastecimento e águas residuárias. **Ambi-Agua**, v. 5, n. 3, p. 222-231, 2010. doi:10.4136/ambi-agua.164.

MADRONA, Grasielle Scaramal. **Extração/purificação do composto ativo da semente da *Moringa oleifera* Lam e sua utilização no tratamento de água para consumo humano**. 2010. 176 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2010.

MADRONA, G. S.; BERGAMASCO, R.; SEOLIN, V. J.; FAGUNDES-KLEN, M. R. The potential of different saline solution on the extraction on the *Moringa oleifera* seed's active component for water treatment. **International Journal of Chemical Reactor Engineering**, v. 9, n. A31, p. 1-10, 2011.

MADRONA, G. S.; BRANCO, I. G.; SEOLIN, V. J.; ALVES FILHO, B. de A.; FAGUNDES-KLEN, M. R.; BERGAMASCO, R. Evaluation of extracts of *Moringa oleifera* Lam seeds obtained with NaCl and their effects on water treatment. **Acta Scientiarum Technology**, v. 34, n. 3, p. 289-293, 2012. doi:10.4025/actascitechnol.v34i3.9605.

MADRONA, G. S.; SERPELLONI, G. B.; SALCEDO, A. M.; NISHI, L.; CARDOSO, K. C.; BERGAMASCO, R. Study of the effect of saline solution on the extraction of the *Moringa oleifera* seeds active component for water treatment. **Water, Air & Soil Pollution**, v. 211, n. 1-4, p. 409-415, 2010. doi:10.1007/s11270-009-0309-0.

MAKKI, H. F.; AL-ALAWY, A. F.; ADBUL-RAZAQ, N. N.; MOHAMMED, M. A. Using aluminum refuse as a coagulant in the coagulation and flocculation processes. **Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering**, v. 11, n. 3, p. 15-22, 2010.

MANGALE, S. M.; CHONDE, S. G.; JADHAV, A. S.; RAUT, P. D. Study of *Moringa oleifera* (drumstick) seed as natural absorbent and antimicrobial agent for river water treatment. **Journal of Natural Product and Plant Resource**, v. 2, n. 1, p. 89-100, 2012.

MANGALE SAPANA, M.; CHONDE, S. G.; RAUT, P. D. Use of *Moringa oleifera* (drumstick) seed as natural absorbent and an antimicrobial agent for ground water treatment. **Research Journal of Recent Sciences**, v. 1, n. 3, p. 31-40, 2012.

MARACAJÁ, P. B.; LEITE, D. T.; FREIRE, M. dos S.; SILVEIRA, D. C. da; CAVALCANTI, M. T.; COELHO, D. C. Efeito tóxico do extrato de flores de *Moringa oleifera* L. para abelhas *Apis mellifera* africanizadas. **Agropecuária Científica no Semi-Árido**, v. 6, n. 3, p. 33-37, 2010.

MUTHURAMAN, G.; SASIKALA, S.; PRAKASH, N. Proteins from natural coagulant for potential application of turbidity removal in water. **International Journal of Engineering and Innovative Technology**, v. 2, n. 1, p. 278-283, 2013.

MUYIBI, S. A.; ABBAS, S. A.; NOOR, M. J. M. M.; AHMADUN, F. R. Enhanced coagulation efficiency of *Moringa oleifera* seeds through selective oil extraction. **IJUM Engineering Journal**, v. 4, n. 1, p. 1-11, 2003.

MUYIBI, S. A.; EVISON, L. M. *Moringa oleifera* seeds for softening hardwater. **Water Research**, v. 29, n. 4, p. 1099-1105, 1995.

NDABIGENGESERE, A.; NARASIAH, K. S. Influence of operating parameters on turbidity removal by coagulation with *Moringa oleifera* seeds. **Environmental Technology**, v. 17, n. 10, p. 1103-1112, 1996. doi:10.1080/09593331708616479.

\_\_\_\_\_. Quality of water treated by coagulation using *Moringa oleifera* seeds. **Water Research**, v. 32, n. 3, p. 781-791, 1998. doi:10.1016/S0043-1354(97)00295-9.

NDABIGENGESERE, A.; NARASIAH, K. S.; TALBOT, B. G. Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using *Moringa oleifera*. **Water Research**, v. 29, n. 2, p. 703-710, 1995. doi:10.1016/0043-1354(94)00161-Y.

NWAIWU, N. E.; BELLO, A. A. Effect of *Moringa oleifera*-alum Ratios on Surface Water Treatment in North East Nigeria. **Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology**, v. 3, n. 6, p. 505-512, 2011.

NWAIWU, N. E.; LINGMU, B. Studies on the effect of settling time on coliform reduction using *Moringa oleifera* seed powder. **Journal of Applied Sciences in Environmental Sanitation**, v. 6, n. 3, p. 279-286, 2011.

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**, v. 1, n. 1, p. 1-9, 2012.

OKUDA, T.; BAES, A. U.; NISHIJIMA, W.; OKADA, M. Coagulation mechanism of salt solution-extracted active component in *Moringa oleifera* seeds. **Water Research**, v. 35, n. 3, p. 830-834, 2001a. doi:10.1016/S0043-1354(00)00296-7.

\_\_\_\_\_. Improvement of extraction method of coagulation active components from *Moringa oleifera* seed. **Water Research**, v. 33, n. 15, p. 3373-3378, 1999. doi:10.1016/S00431354(99)00046-9.

\_\_\_\_\_. Isolation and characterization of coagulant extracted from *Moringa oleifera* seed by salt solution. **Water Research**, v. 35, n. 2, p. 405-410, 2001b. doi:10.1016/S0043-1354(00)00290-6.

PATERNIANI, J. E. S.; MANTOVANI, M. C.; SANT'ANNA, M. R. Uso de sementes de *Moringa oleifera* para tratamento de águas superficiais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 6, p. 765-771, 2009. doi:10.1590/S1415-43662009000600015.

PAVANELLI, Gerson. **Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada**. 2001. 216 p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

PAVANELLI, G.; DI BERNARDO, L. Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com turbidez elevada e cor verdadeira baixa.

In: VI SIBESA – VI Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, set. 2002, Vitória.

PEREIRA, D. F.; ARAÚJO, N. A.; SANTOS, T. M.; SANTANA, S, R.; SILVA, G. F. da. Aproveitamento da torta da *Moringa oleifera* Lam para tratamento de água produzida. **E-xacta**, v. 9, n. 3, p. 323-331, 2011.

PISE, C. P.; HALKUDE, D. S. A. Blend of natural and chemical coagulant for removal of turbidity in water. **International Journal of Civil Engineering and Technology**, v. 3, n. 2, p. 188-197, 2012.

POUMAYE, N.; MABINGUI, J.; LUTGEN, P.; BIGAN, M. Contribution to the clarification of surface water from the *Moringa oleifera*: Case M’Poko river to Bangui, Central African Republic. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 90, p. 2346-2352, 2012. doi:10.1016/j.cherd.2012.05.017.

PRITCHARD, M.; CRAVEN, T.; MKANDAWIRE, T.; EDMONDSON, A. S.; O’NEILL, J. G. A comparison between *Moringa oleifera* and chemical coagulants in the purification of drinking water – An alternative sustainable solution for developing countries. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 35, n. 13-14, p. 798-805, 2010a. doi:10.1016/j.pce.2010.07.014.

\_\_\_\_\_. A study of the parameters affecting the effectiveness of *Moringa oleifera* drinking water purification. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 35, n. 13-14, p. 791-797, 2010b. doi:10.1016/j.pce.2010.07.020.

RAVIKUMAR, K.; SHEEJA, A. K. Water clarification using *Moringa oleifera* seed coagulant. In: International Conference on Green Technology, p. 64-70, 2012, Trivandrum, India. doi:10.1109/ICGT.2012.6477949.

RIBEIRO, Ana Teresa Alves. **Aplicação da *Moringa oleifera* no tratamento de água para consumo humano**: Remoção de poluentes por coagulação-floculação. 2010. 98 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal, Europa, 2010.

RICHTER, Carlos A. Filtros rápidos modificados. In: **Manual del curso sobre tecnología de tratamiento de agua para países em desarrollo**, 1977, Lima.

\_\_\_\_\_. **Água: Métodos e tecnologias de tratamento**. São Paulo: Blucher, 2009.

RODRÍGUEZ-NÚÑEZ, J. R.; SÁNCHEZ-MACHADO, D. I.; LÓPEZ-CERVANTES, J.; NÚÑEZ-GASTÉLUM, J. A.; SÁNCHEZ-DUARTE, R. G.; CORREA-MURRIETA, M. A. *Moringa oleifera* seed extract in the clarification of surface waters. **International Journal of Environmental Protection**, v. 2, n. 11, p. 17-21, 2012.

ROLIM, L. A. D. M. M.; MACEDO, M. F. S.; SISENANDO, H. A.; NAPOLEÃO, T. H.; FELZENSALB, I.; AIUB, C. A. F.; COELHO, L. C. B. B.; MEDEIROS, S. R. B.; PAIVA, P. M. G. Genotoxicity evaluation of *Moringa oleifera* seed extract and lectin. **Journal of Food Science**, v. 76, n. 2, p. T53-T58, 2011. doi:10.1111/j.1750-3841.2010.01990.x.

SÁNCHEZ-MARTÍN, J.; BELTRÁN-HEREDIA, J.; PERES, J. A. Improvement of the flocculation process in water treatment by using *Moringa oleifera* seeds extract. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 29, n. 3, p. 495-502, 2012. doi:10.1590/S0104-66322012000300006.

SANTANA, C. R.; PEREIRA, D. F.; ARAÚJO, N. A.; CAVALCANTI, E. B.; SILVA, G. F. da. Caracterização físico-química da *Moringa (Moringa oleifera Lam)*. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 12, n. 1, p. 55-60, 2010.

SANTOS, Eliane Prado Cunha Costa dos. **Coagulação da água da represa vargem das flores visando tratamento por filtração direta**. 2004. 146 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

SANTOS, T. R. T. dos; VALVERDE, K. C.; NISHI, L.; BERGAMASCO, R.; VIEIRA, M. F. Estudo da formação de trihalometanos no processo de coagulação/floculação/adsorção em carvão ativado vegetal com o coagulante natural *Moringa oleifera* Lam para tratamento de água de abastecimento. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 5, n. 3, edição especial, p. 64-72, 2013.

SANTOS, W. R. dos; MATOS, D. B. de; OLIVEIRA, B. M.; SANTANA, T. M.; SANTANA, M. M. de; SILVA, G. F. da. Estudo do tratamento e clarificação de água com torta de sementes de *Moringa oleifera* Lam. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 13, n. 3, p. 293-297, 2011.

SCHWARZ, D. Water clarification using *Moringa oleifera*. **Gate Information Service**, Germany, p. 1-7, 2000.

SILVA, Cleuza Aparecida da. **Estudos aplicados ao uso da *Moringa oleifera* como coagulante natural para melhoria da qualidade de águas**. 2005. 84 p. Dissertação (Mestrado em Química) – Instituto de Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005.

SILVA, Cynthia Algayer da. **Biodegradabilidade do lodo de água para consumo humano formado durante o processo de coagulação/floculação com os coagulantes policloreto de alumínio e *Moringa oleifera***. 2011. 78 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2011.

SILVA, F. J. A. da; MATOS, J. E. X. de. Sobre dispersões de *Moringa oleifera* para tratamento de água. **Revista Tecnologia**, v. 29, n. 2, p.157-163, 2008.

SILVA, Mariana Oliveira. **Caracterização física e química da semente de *Moringa oleifera* e estudo do processo de obtenção do óleo**. 2013. 49 p. Dissertação (Mestrado em Ciências de Alimentos) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Estadual de Maringá, 2013.

SPINELLI, Viviane Aparecida. **Quitosana: Polieletrólito Natural para o Tratamento de Água Potável**. 2001. 134 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, 2001.

SUTHERLAND, J. P.; FOLKARD, G. K.; GRANT, W. D. Natural coagulants for appropriate water treatment: A novel approach. **Waterlines**, v. 8, n. 4, p. 30-32, 1990.

UNICEF/WHO. United Nations Children's Fund/World Health Organization. **Progress on drinking water and sanitation: 2012 update**. New York, USA, 2012.

VALVERDE, K. C.; MORAES, L. C. K.; BONGIOVANI, M. C.; CAMACHO, F. P.; BERGAMASCO, R. Coagulation diagram using the *Moringa oleifera* Lam and the aluminium sulphate, aiming the removal of color and turbidity of water. **Acta Scientiarum Technology**, v. 5, n. 3, p. 485-489, 2013. doi:10.4025/actascitechnol.v35i3.12268.

VIJAY KUMAR, K.; RUBHA, M. N.; MANIVASAGAN, M.; RAMESH BABU, N. G.; BALAJI, P. *Moringa oleifera* – The nature's gift. **Universal Journal of Environmental Research and Technology**, v. 2, n. 4, p. 203-209, 2012.

VIJAYARAGHAVAN, G.; SIVAKUMAR, T.; VIMAL KUMAR, A. Application of plant based coagulants for waste water treatment. **International Journal of Advanced Engineering Research and Studies**, v. 1, n. 1, p. 88-92, 2011.

WHO. World Health Organization. **Water quality and health strategy: 2013-2020**. 2013. Disponível em: <[http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/publications/2013/water\\_quality\\_strategy.pdf](http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/2013/water_quality_strategy.pdf)>. Acesso em 21/11/2013.

YARAHMADI, M.; HOSSIENI, M.; BINA, B.; MAHMOUDIAN, M. H., NAIMABADIE, A.; SHAHSAVANI, A. Application of *Moringa oleifera* seed extract and polyaluminum chloride in water treatment. **World Applied Sciences Journal**, v. 7, n. 8, p. 962-967, 2009.

YONGABI, K. A. Biocoagulants for water and waste water purification: A review. **International Review of Chemical Engineering**, v. 2, n. 3, p. 444-458, 2010.

ZHAO, Y. X.; GAO, B. Y.; SHON, H. K.; WANG, Y.; KIM, J. H.; YUE, Q. Y.; BO, X. W. Anionic polymer compound bioflocculant as a coagulant aid with aluminum sulfate and titanium tetrachloride. **Bioresource Technology**, v. 108, p. 45-54, 2012. doi:10.1016/j.biortech.2012.01.012.

## **APÊNDICES**

### APÊNDICE A – Gradientes de velocidade

Esse apêndice demonstra os gradientes de velocidade utilizados no trabalho.

Volumes da água de estudo (mL)	V <sub>MR</sub> (rpm)	G <sub>MR</sub> (s <sup>-1</sup> )	V <sub>ML</sub> (rpm)	G <sub>ML</sub> (s <sup>-1</sup> )
400	100	129,8	15	7,5
	105	139,6	30	21,3
	110	149,7	45	39,2
700	100	98,1	15	5,7
	105	105,6	30	16,1
	110	113,2	45	29,6

As equações utilizadas nos cálculos de obtenção do gradiente de velocidade foram (BEAUDRY, 1984; KONRADT-MORAES, 2004):

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu \times V}} \quad P = \frac{(1,5 \times \pi \times N)^3 \times Ct \times \rho \times Z \times R^4}{4}$$

Onde:

G – gradiente de velocidade (s<sup>-1</sup>)

P – potência dissipada (W);

μ – viscosidade da água (0,00095 Pa.s)

V – volume da água de estudo (m<sup>3</sup>)

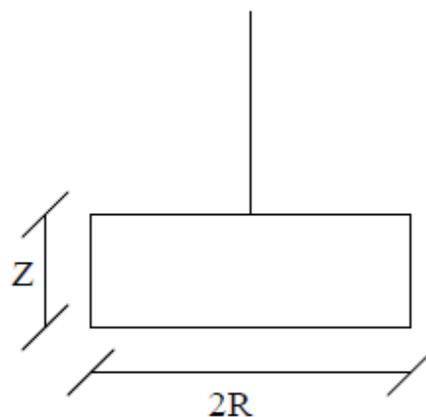
N – rotação (rps: rotações por segundo);

Ct – coeficiente de Trainé (1,18)

ρ - densidade da água (997,044 kg.m<sup>-3</sup>);

Z – altura da pá (2,4 cm = 0,024 m)

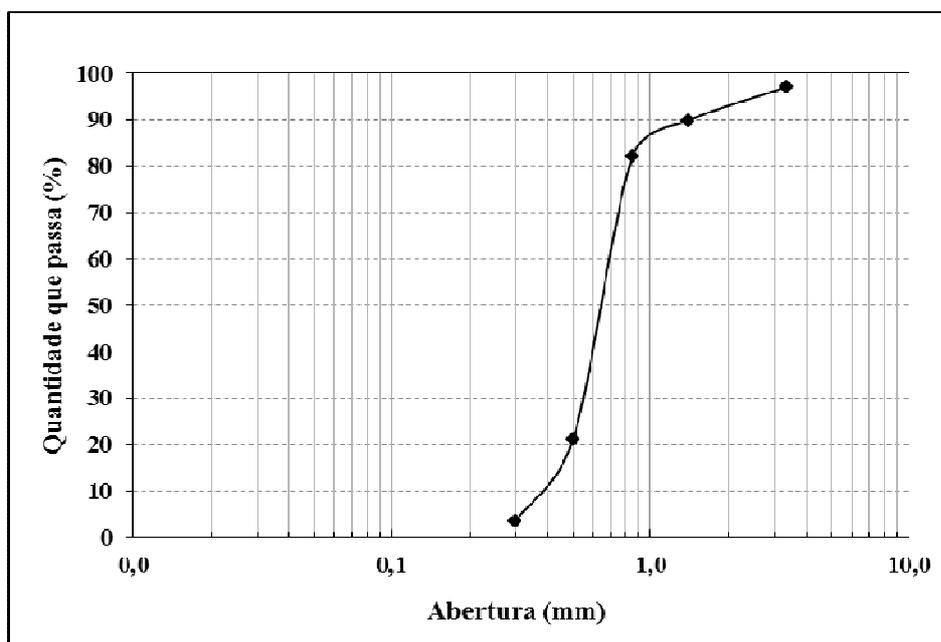
R – raio da pá (3,7 cm = 0,037 m)



**APÊNDICE B** – Distribuição granulométrica do coagulante *M. oleifera* em pó

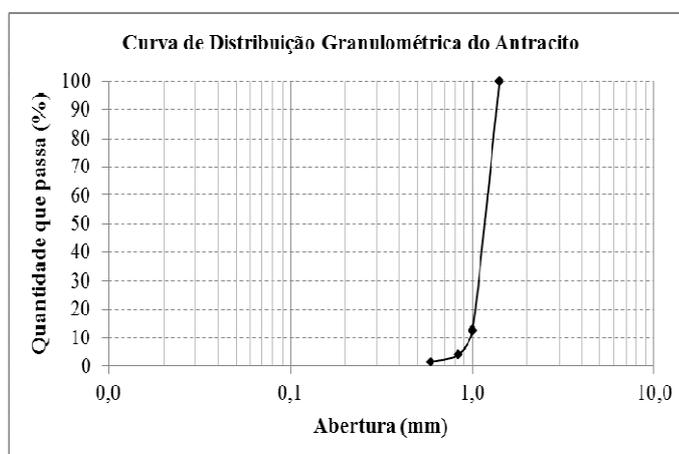
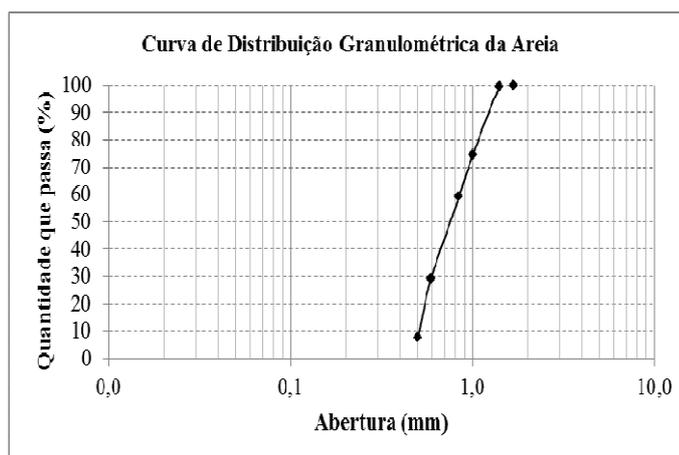
Esse apêndice demonstra a distribuição granulométrica considerando a etapa de preparo do coagulante natural obtido a partir das sementes de *M. oleifera* com granulometria específica.

Tyler	Aberturas (mm)	Massas retidas (g)	Massas que passam (g)	Frações que passam (%)	Frações retidas
6	3,350	0,286	9,702	97,14	0,029
12	1,400	0,730	8,972	89,84	0,073
20	0,850	0,773	8,199	82,09	0,077
32	0,500	6,089	2,110	21,13	0,610
48	0,300	1,757	0,353	3,54	0,176
Fundo	0,000	0,353	0,000	0,00	0,035
TOTAL = 9,9874 g					



### APÊNDICE C – Distribuição granulométrica dos materiais filtrantes

Esse apêndice demonstra as curvas de distribuição granulométrica da areia e do antracito utilizados para a construção do filtro, assim como os cálculos para a determinação do tamanho efetivo e coeficiente de desuniformidade, que são parâmetros básicos dos meios filtrantes.



- *Tamanho Efetivo*: corresponde ao tamanho equivalente a 10% (em peso) do material que passa.

$$D_{10} = 0,51 \text{ mm para a areia}$$

$$D_{10} = 0,96 \text{ mm para o antracito}$$

- *Coefficiente de Desuniformidade*: É a relação entre os tamanhos dos grãos correspondentes às percentagens de 60% e 10% (em peso) do material que passa pelas peneiras.

$$CD = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

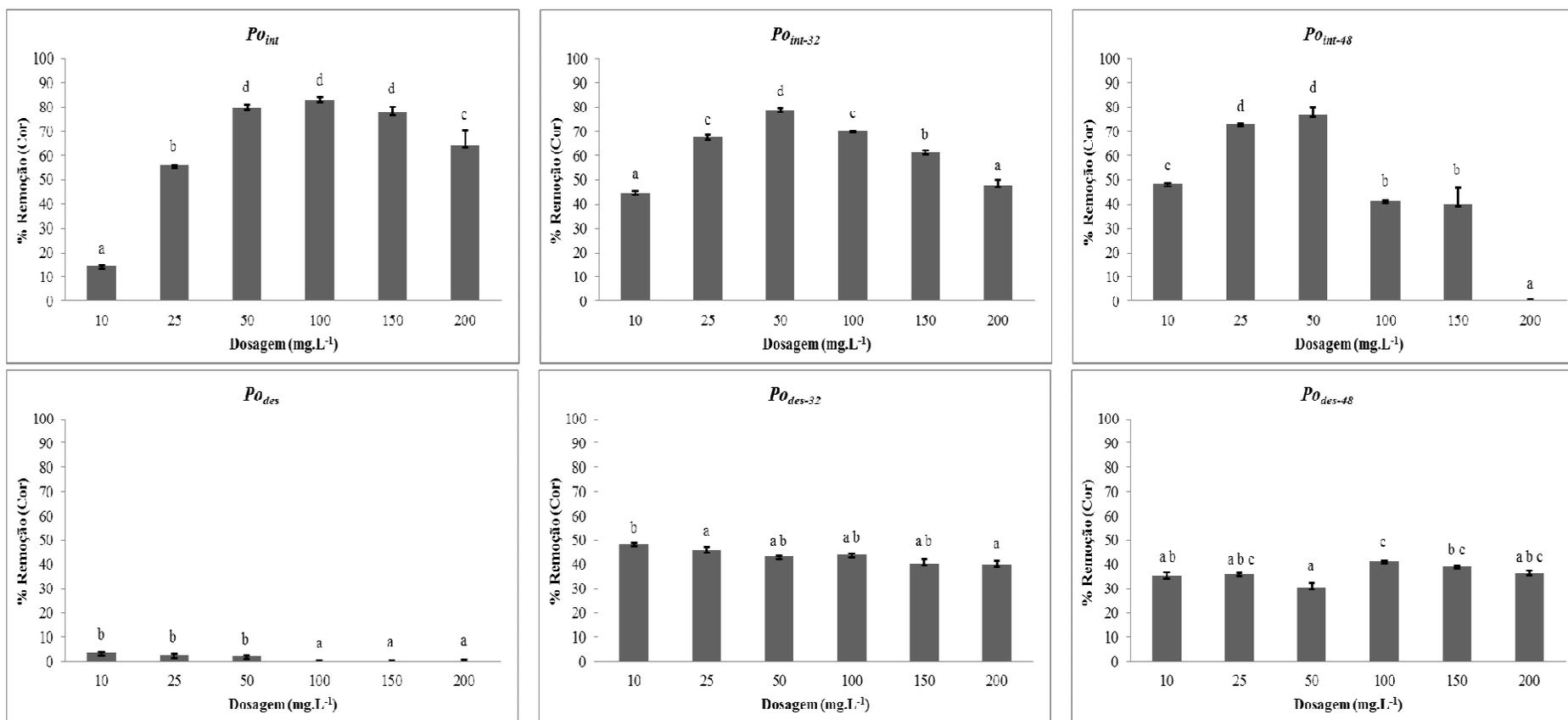
$$CD = 1,65 \text{ para a areia}$$

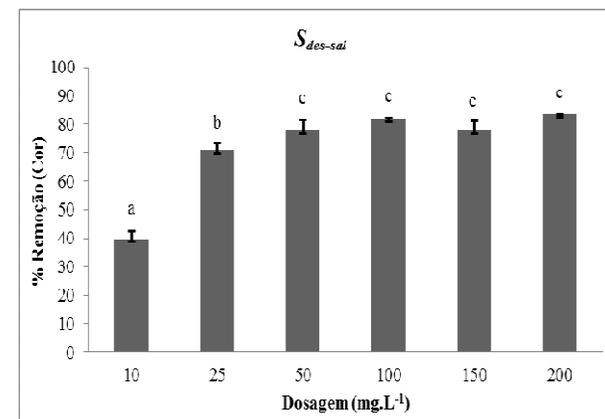
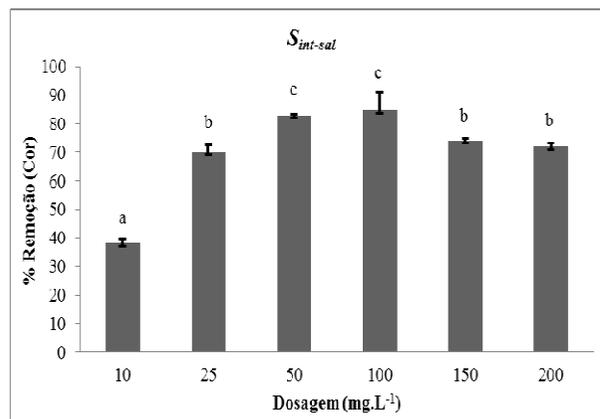
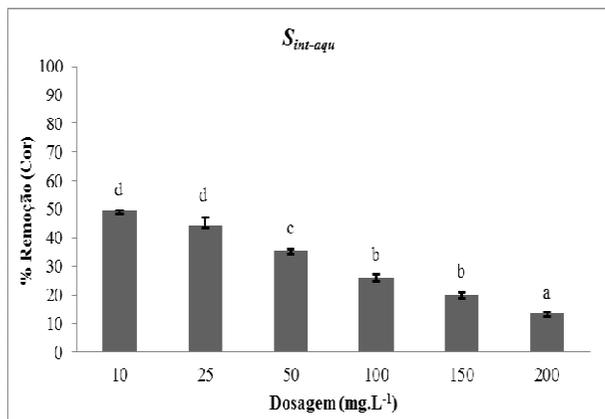
$$CD = 1,35 \text{ para o antracito}$$

**APÊNDICE D – Eficiências de remoção dos diferentes métodos de preparo do coagulante *M. oleifera* (Cor aparente)**

Esse apêndice demonstra as eficiências de remoção obtidas para o parâmetro cor aparente em relação aos diferentes métodos de preparo do coagulante natural obtido a partir das sementes de *M. oleifera*.

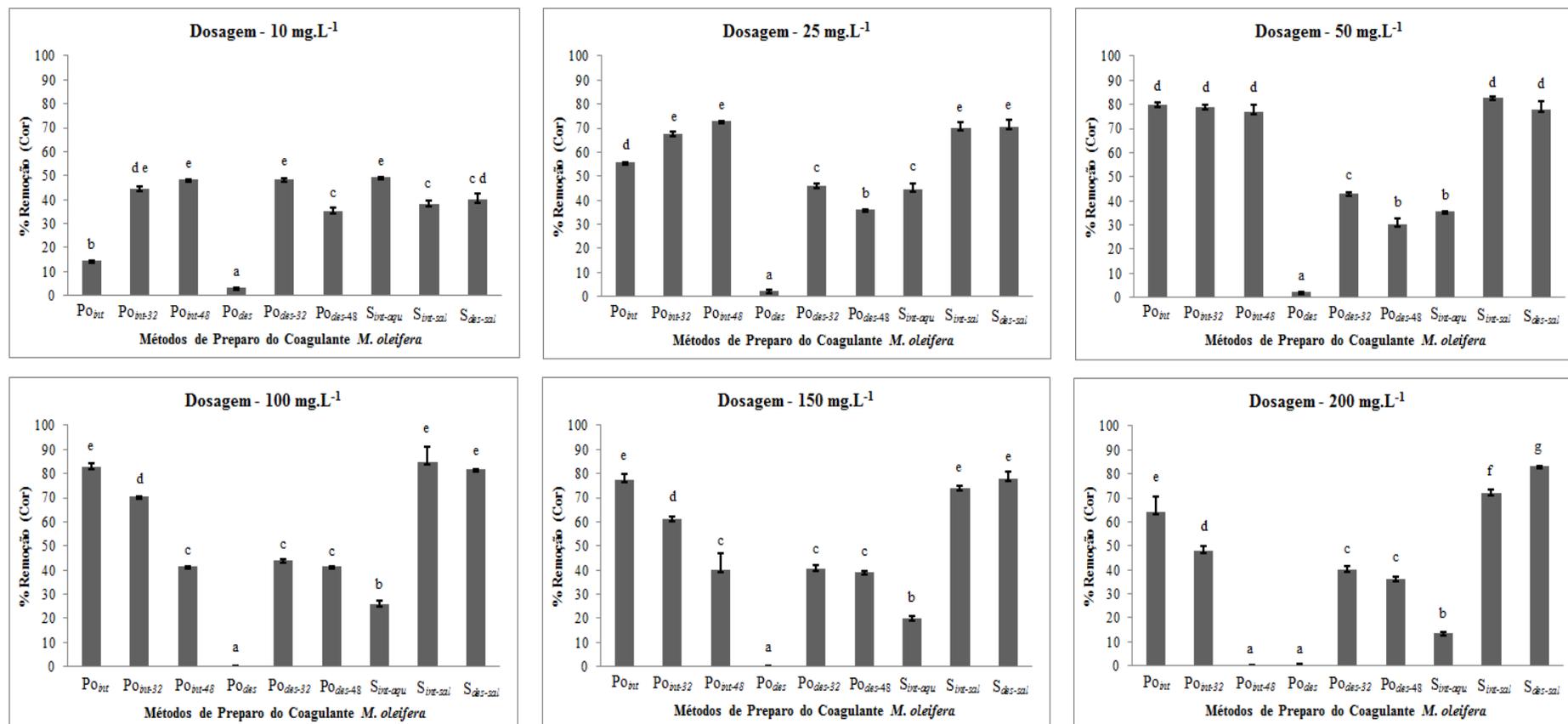
As Figuras abaixo se referem aos resultados da análise estatística realizada considerando cada método de preparo do coagulante individualmente, nas dosagens entre 10 mg.L<sup>-1</sup> e 200 mg.L<sup>-1</sup>.





\*Considerando cada método de preparo do coagulante, as médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de nível de significância.

As Figuras abaixo se referem aos resultados da análise estatística realizada considerando cada dosagem do coagulante individualmente, nos diferentes métodos de preparo do coagulante *M. oleifera*:  $Po_{int}$ ,  $Po_{int-32}$ ,  $Po_{int-48}$ ,  $Po_{des}$ ,  $Po_{des-32}$ ,  $Po_{des-48}$ ,  $S_{int-aqu}$ ,  $S_{int-sal}$ ,  $S_{des-sal}$ .

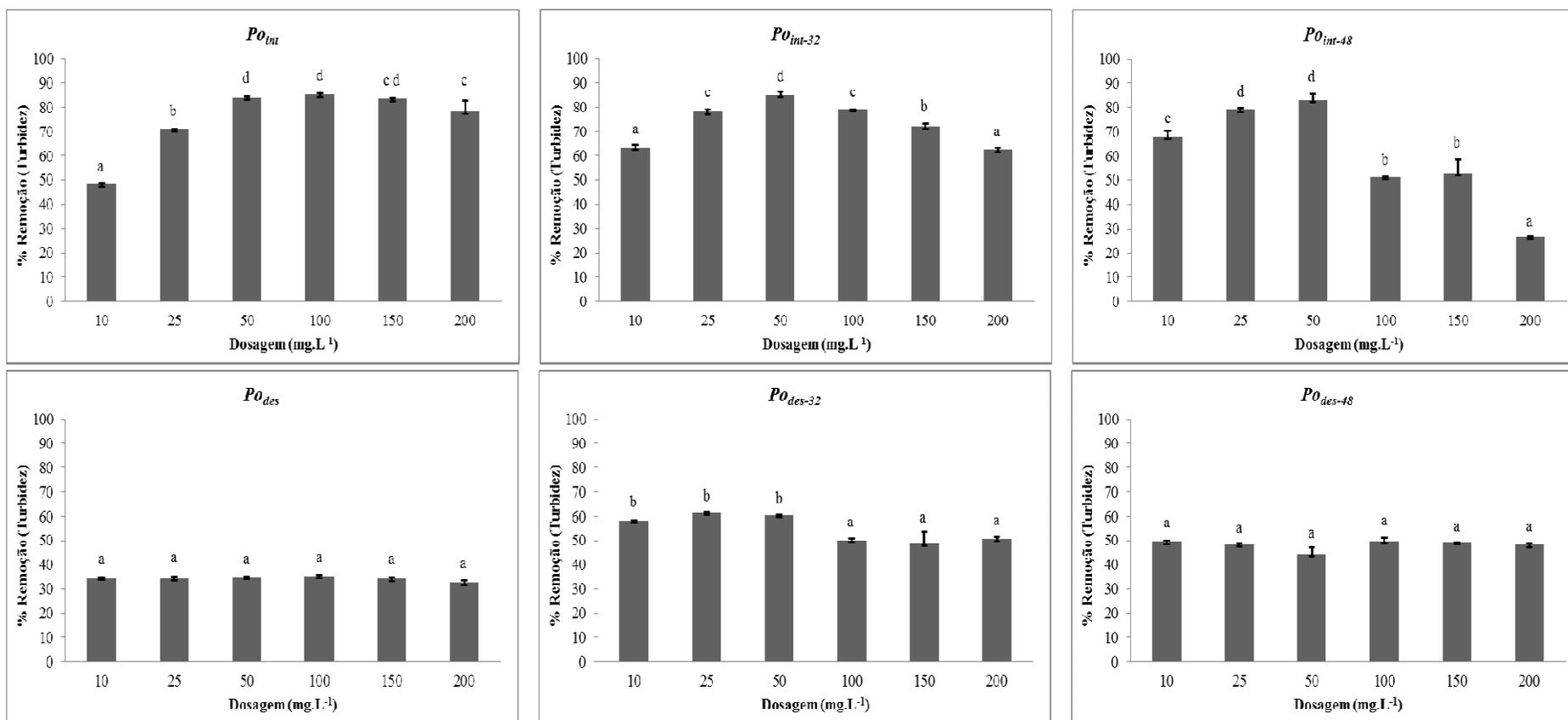


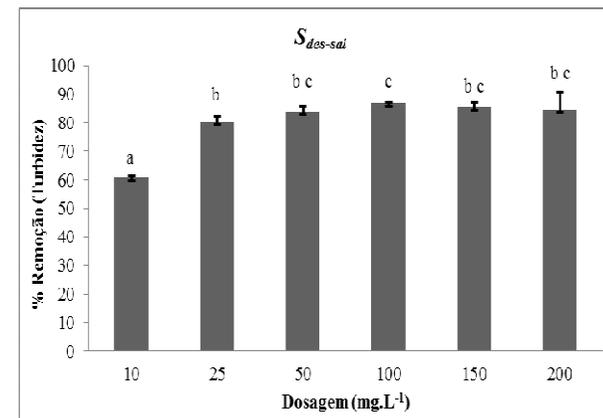
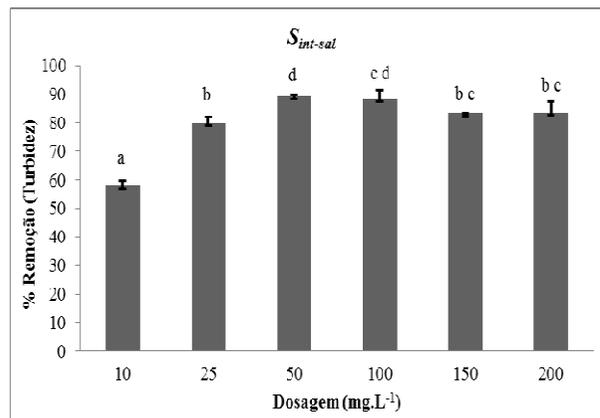
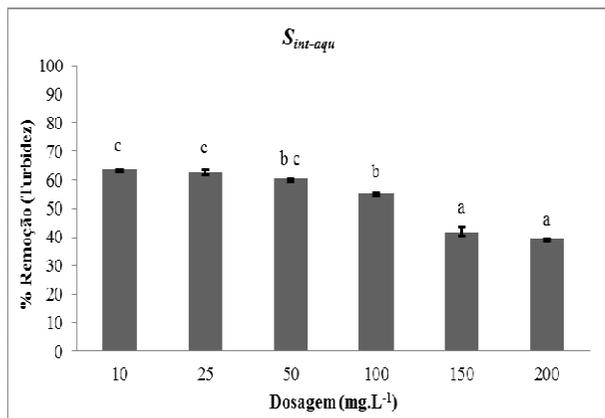
\*Considerando cada dosagem do coagulante, as médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de nível de significância.

**APÊNDICE E – Eficiências de remoção dos diferentes métodos de preparo do coagulante *M. oleifera* (Turbidez)**

Esse apêndice demonstra as eficiências de remoção obtidas para o parâmetro turbidez em relação aos diferentes métodos de preparo do coagulante natural obtido a partir das sementes de *M. oleifera*.

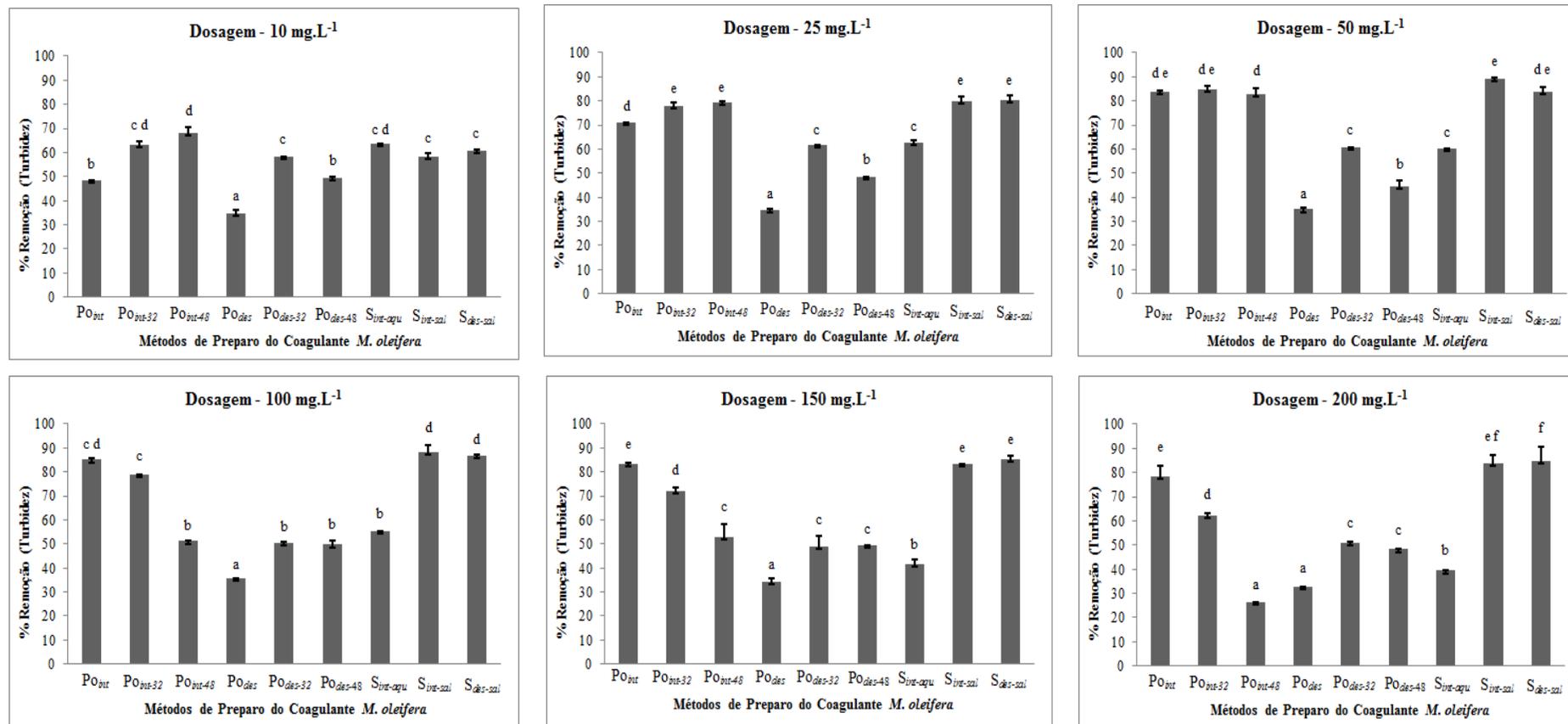
As Figuras abaixo se referem aos resultados da análise estatística realizada considerando cada método de preparo do coagulante individualmente, nas dosagens entre 10 mg.L<sup>-1</sup> e 200 mg.L<sup>-1</sup>.





\*Considerando cada método de preparo do coagulante, as médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de nível de significância.

As Figuras abaixo se referem aos resultados da análise estatística realizada considerando cada dosagem do coagulante individualmente, nos diferentes métodos de preparo do coagulante *M. oleifera*:  $Po_{int}$ ,  $Po_{int-32}$ ,  $Po_{int-48}$ ,  $Po_{des}$ ,  $Po_{des-32}$ ,  $Po_{des-48}$ ,  $S_{int-aqu}$ ,  $S_{int-sal}$ ,  $S_{des-sal}$ .

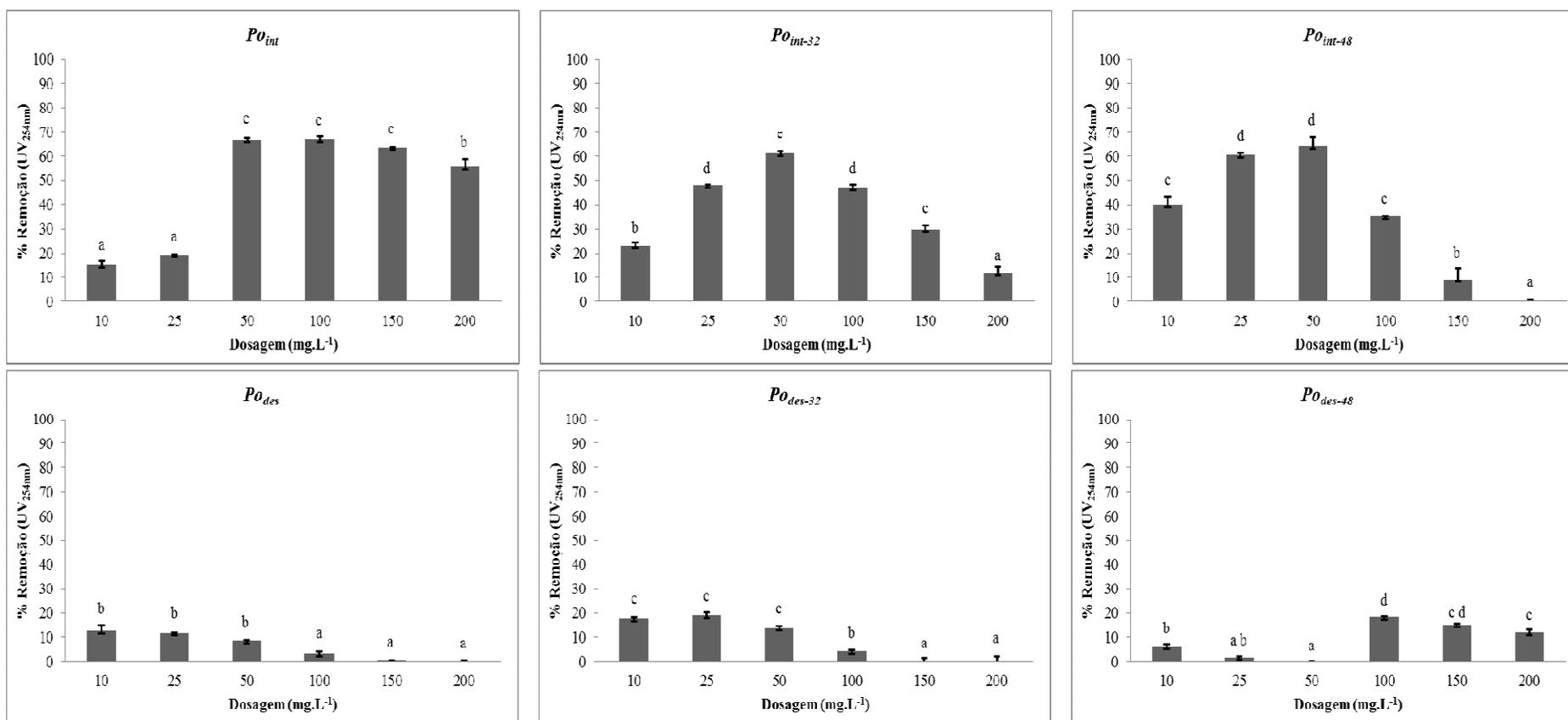


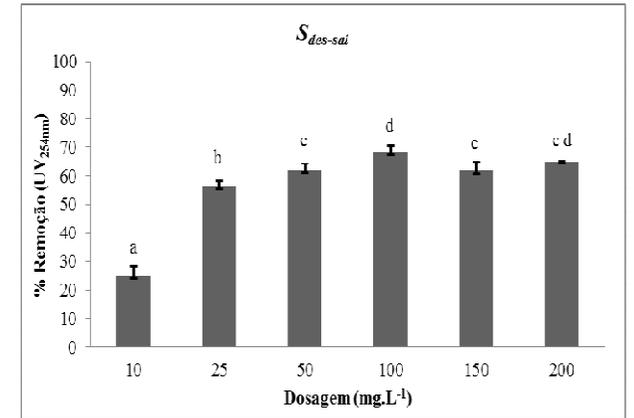
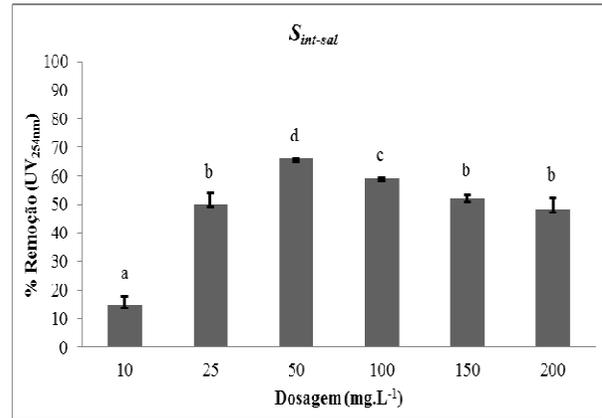
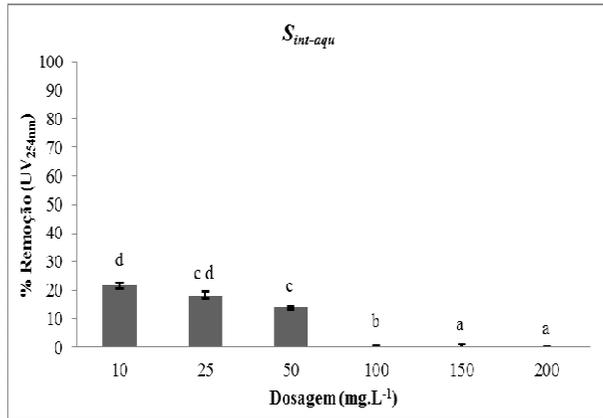
\*Considerando cada dosagem do coagulante, as médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de nível de significância.

**APÊNDICE F** – Eficiências de remoção dos diferentes métodos de preparo do coagulante *M. oleifera* (Compostos com absorção em UV<sub>254nm</sub>)

Esse apêndice demonstra as eficiências de remoção obtidas para o parâmetro compostos com absorção em UV<sub>254nm</sub> em relação aos diferentes métodos de preparo do coagulante natural obtido a partir das sementes de *M. oleifera*.

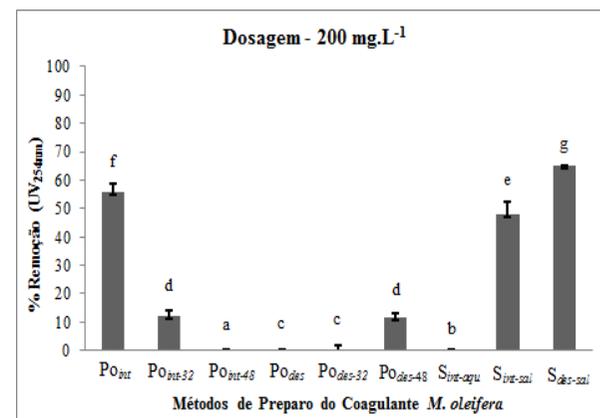
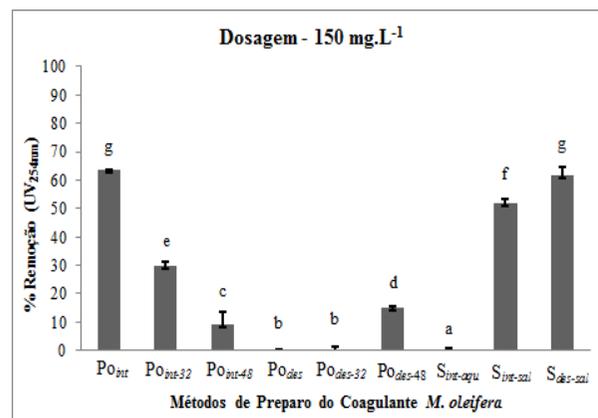
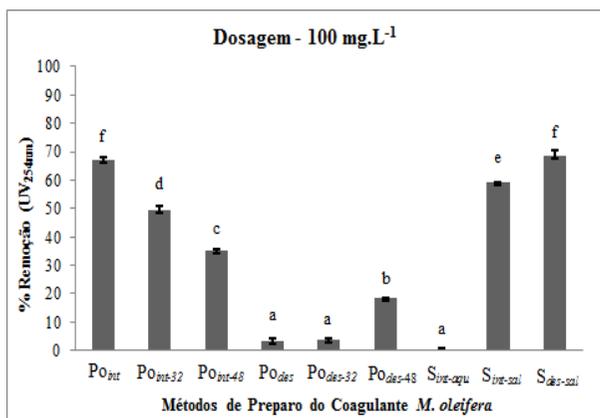
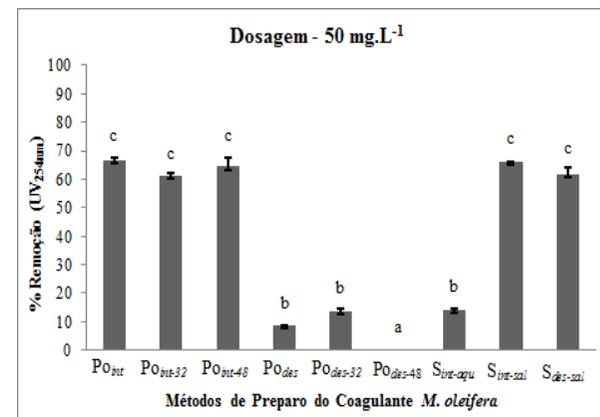
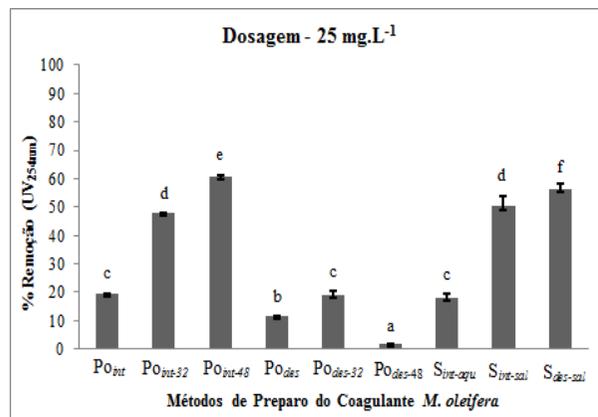
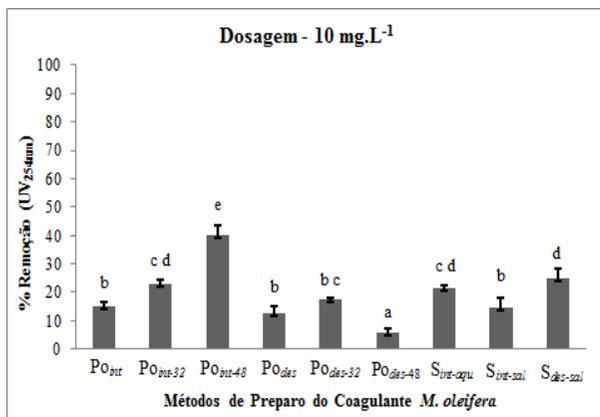
As Figuras abaixo se referem aos resultados da análise estatística realizada considerando cada método de preparo do coagulante individualmente, nas dosagens entre 10 mg.L<sup>-1</sup> e 200 mg.L<sup>-1</sup>.





\*Considerando cada método de preparo do coagulante, as médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de nível de significância.

As Figuras abaixo se referem aos resultados da análise estatística realizada considerando cada dosagem do coagulante individualmente, nos diferentes métodos de preparo do coagulante *M. oleifera*:  $Po_{int}$ ,  $Po_{int-32}$ ,  $Po_{int-48}$ ,  $Po_{des}$ ,  $Po_{des-32}$ ,  $Po_{des-48}$ ,  $S_{int-aqu}$ ,  $S_{int-sal}$ ,  $S_{des-sal}$ .



\*Considerando cada dosagem do coagulante, as médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de nível de significância.

**APÊNDICE G** – Eficiências de remoção de cor aparente, turbidez e compostos com absorção em UV<sub>254nm</sub> para as condições de operação estudadas na etapa de coagulação/floculação e sedimentação (*M. oleifera* e cloreto férrico)

Esse apêndice apresenta as médias dos valores das eficiências de remoção obtidos para os parâmetros de qualidade, assim como o resultado da análise estatística realizada para todas as condições de operação estudadas na etapa de coagulação/floculação e sedimentação com a associação dos coagulantes *M. oleifera* e cloreto férrico.

ENSAIOS ( <i>M. oleifera</i> e Cloreto férrico) – COR APARENTE															
V <sub>MR</sub> (rpm)	T <sub>MR</sub> (min)	V <sub>ML</sub> (rpm)	T <sub>ML</sub> (min)	TEMPOS DE SEDIMENTAÇÃO (T <sub>s</sub> )											
				15 min			30 min			45 min			60 min		
				% (*)	(1)	(2)	% (*)	(1)	(2)	% (*)	(1)	(2)	% (*)	(1)	(2)
100	1	15	15	71,6	a	A	72,4	a	AB	73,1	a	AB	74,7	a	B
105	1	15	15	72,0	a	A	73,9	a	AB	74,9	a	B	78,3	bc	C
110	1	15	15	73,8	a	A	74,4	a	A	75,5	a	AB	77,0	ab	B
<b>100</b>	<b>2</b>	<b>15</b>	<b>15</b>	89,9	hi	A	90,3	hij	A	<b>92,4</b>	jkl	AB	<b>93,3</b>	jkl	B
105	2	15	15	81,3	bc	A	83,7	bcd	AB	84,6	bcde	B	84,4	def	B
110	2	15	15	87,3	fgh	A	87,6	fghi	A	88,6	fghi	A	88,6	ghi	A
100	3	15	15	80,4	b	A	83,3	bc	B	81,5	b	AB	81,4	cd	AB
105	3	15	15	84,8	cdefg	A	85,4	bcdefg	A	85,5	cdef	A	85,7	efg	A
110	3	15	15	82,7	bcde	A	84,6	bcdef	AB	85,5	cdef	B	85,8	efg	B
100	1	30	15	85,4	defg	A	85,8	bcdefg	A	87,1	defg	A	85,9	efg	A
105	1	30	15	82,0	bcd	A	82,8	b	A	83,0	bc	A	83,2	de	A
110	1	30	15	81,6	bc	A	83,9	bcde	A	83,9	bcd	A	84,1	def	A
100	2	30	15	84,3	cdefg	A	86,4	cdefg	AB	87,7	efghi	B	86,6	efgh	AB
105	2	30	15	85,9	efg	A	88,0	fghi	A	88,3	fghi	A	88,3	ghi	A
110	2	30	15	83,8	bcdef	A	87,1	defgh	B	88,1	efghi	B	88,4	ghi	B
<b>100</b>	<b>3</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	<b>89,7</b>	hi	A	<b>90,9</b>	ijk	A	<b>91,3</b>	ijkl	A	<b>91,1</b>	ijkl	A
105	3	30	15	84,3	cdefg	A	85,4	bcdefg	AB	88,0	efghi	C	87,6	fghi	BC
<b>110</b>	<b>3</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	83,0	bcde	A	87,5	efghi	B	<b>90,7</b>	hijkl	C	90,1	hij	C
100	1	45	15	84,6	cdefg	A	86,8	cdefgh	A	89,9	ghijk	B	90,9	ijk	B
105	1	45	15	85,8	efg	A	85,5	bcdefg	A	87,1	defg	A	87,0	fgh	A
110	1	45	15	82,2	bcd	A	86,1	bcdefg	B	87,3	defgh	B	88,4	ghi	B
100	2	45	15	87,4	gh	A	90,3	hij	B	90,1	ghijk	B	90,8	ijk	B
<b>105</b>	<b>2</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	<b>89,9</b>	hi	A	<b>90,9</b>	ijk	A	<b>90,9</b>	ijkl	A	89,1	ghi	A
110	2	45	15	87,5	gh	A	88,3	ghi	AB	89,9	ghijk	AB	90,6	ijk	B
100	3	45	15	85,3	defg	A	88,1	fghi	B	89,4	ghij	B	89,0	ghi	B
<b>105</b>	<b>3</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	<b>92,7</b>	i	A	<b>93,2</b>	jk	A	<b>93,0</b>	kl	A	<b>93,9</b>	kl	A
<b>110</b>	<b>3</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	<b>92,1</b>	i	A	<b>93,9</b>	k	AB	<b>93,8</b>	l	AB	<b>94,7</b>	l	B

Os melhores resultados obtidos após a análise estatística estão destacados na Tabela.

(\*) Os valores apresentados se referem às médias das eficiências de remoção obtidas para o parâmetro cor aparente.

(1) Dentro de uma mesma coluna, as médias seguidas por mesma letra minúscula não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de nível de significância. A interpretação dos resultados deve ser realizada em relação aos valores dispostos na vertical (coluna).

(2) Dentro de uma mesma linha, as médias seguidas por mesma letra maiúscula não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de nível de significância. A interpretação dos resultados deve ser realizada em relação aos valores dispostos na horizontal (linha).

ENSAIOS ( <i>M. oleifera</i> e Cloreto férrico) – TURBIDEZ															
V <sub>MR</sub> (rpm)	T <sub>MR</sub> (min)	V <sub>ML</sub> (rpm)	T <sub>ML</sub> (min)	TEMPOS DE SEDIMENTAÇÃO (T <sub>s</sub> )											
				15 min			30 min			45 min			60 min		
				% (*)	(1)	(2)	% (*)	(1)	(2)	% (*)	(1)	(2)	% (*)	(1)	(2)
100	1	15	15	79,0	a	A	80,6	a	AB	80,7	a	AB	81,9	a	B
105	1	15	15	79,0	a	A	81,6	ab	B	82,9	ab	B	83,6	ab	B
110	1	15	15	79,9	ab	A	79,9	a	A	80,7	a	A	81,8	a	A
100	2	15	15	82,9	bc	A	84,1	bc	AB	85,1	bc	AB	86,0	bc	B
105	2	15	15	84,9	cde	A	86,7	cd	A	87,1	cdef	A	87,2	cde	A
110	2	15	15	84,7	cd	A	85,3	cdef	A	85,7	bcd	A	86,3	bcd	A
100	3	15	15	86,0	cdef	A	87,3	cdefgh	A	86,2	cd	A	87,8	cdef	A
105	3	15	15	87,4	defg	A	87,6	defgh	A	88,0	cdefgh	A	88,4	cdefg	A
110	3	15	15	86,9	def	A	87,9	defghi	A	87,8	cdefg	A	88,8	cdefg	A
<b>100</b>	<b>1</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	86,7	def	A	88,9	efghijk	AB	<b>89,8</b>	efghij	B	88,8	cdefg	AB
105	1	30	15	85,7	cdef	A	86,5	cde	A	86,9	cde	A	87,6	cdef	A
110	1	30	15	85,0	cde	A	87,1	cdefg	AB	87,2	cdef	AB	87,4	cdef	B
100	2	30	15	86,3	cdef	A	88,2	defghij	A	88,0	cdefgh	A	88,5	cdefg	A
<b>105</b>	<b>2</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	86,5	def	A	<b>90,2</b>	ghijklm	B	<b>90,4</b>	fghij	B	<b>90,2</b>	efghi	B
<b>110</b>	<b>2</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	86,5	def	A	89,3	efghijkl	B	<b>90,2</b>	efghij	B	<b>90,3</b>	efghi	B
<b>100</b>	<b>3</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	<b>90,8</b>	hi	A	<b>91,4</b>	ijklm	A	<b>92,4</b>	ij	A	<b>91,5</b>	ghi	A
<b>105</b>	<b>3</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	86,7	def	A	88,8	efghijk	AB	<b>90,8</b>	ghij	B	<b>90,3</b>	efghi	B
<b>110</b>	<b>3</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	88,0	defgh	A	<b>90,0</b>	fghijklm	AB	<b>91,3</b>	hij	B	<b>91,7</b>	ghi	B
<b>100</b>	<b>1</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	87,0	def	A	88,7	defghijk	A	<b>91,2</b>	ghij	B	<b>91,7</b>	ghi	B
105	1	45	15	87,0	def	A	88,3	defghij	AB	89,1	defghi	AB	89,5	defgh	B
<b>110</b>	<b>1</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	85,6	cdef	A	89,2	efghijkl	B	<b>90,2</b>	efghij	B	<b>90,7</b>	fghi	B
<b>100</b>	<b>2</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	<b>88,7</b>	fghi	A	<b>91,3</b>	ijklm	B	<b>91,6</b>	ij	B	<b>92,3</b>	hi	B
<b>105</b>	<b>2</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	<b>91,7</b>	i	A	<b>92,1</b>	klm	A	<b>92,0</b>	ij	A	<b>91,5</b>	ghi	A
<b>110</b>	<b>2</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	<b>90,5</b>	ghi	A	<b>91,2</b>	ijklm	A	<b>91,9</b>	ij	A	<b>92,7</b>	hi	A
<b>100</b>	<b>3</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	88,2	efgh	A	<b>90,7</b>	hijklm	B	<b>92,7</b>	j	B	<b>92,9</b>	hi	B
<b>105</b>	<b>3</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	<b>91,7</b>	i	A	<b>92,4</b>	lm	A	<b>91,8</b>	ij	A	<b>92,5</b>	hi	A
<b>110</b>	<b>3</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	<b>90,5</b>	ghi	A	<b>92,9</b>	m	B	<b>92,7</b>	j	AB	<b>93,2</b>	i	B

Os melhores resultados obtidos após a análise estatística estão destacados na Tabela.

(\*) Os valores apresentados se referem às médias das eficiências de remoção obtidas para o parâmetro turbidez.

(1) Dentro de uma mesma coluna, as médias seguidas por mesma letra minúscula não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de nível de significância. A interpretação dos resultados deve ser realizada em relação aos valores dispostos na vertical (coluna).

(2) Dentro de uma mesma linha, as médias seguidas por mesma letra maiúscula não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de nível de significância. A interpretação dos resultados deve ser realizada em relação aos valores dispostos na horizontal (linha).

ENSAIOS ( <i>M. oleifera</i> e Cloreto férrico) – COMPOSTOS COM ABSORÇÃO EM UV <sub>254nm</sub>															
V <sub>MR</sub> (rpm)	T <sub>MR</sub> (min)	V <sub>ML</sub> (rpm)	T <sub>ML</sub> (min)	TEMPOS DE SEDIMENTAÇÃO (T <sub>s</sub> )											
				15 min			30 min			45 min			60 min		
				% (*)	(1)	(2)	% (*)	(1)	(2)	% (*)	(1)	(2)	% (*)	(1)	(2)
100	1	15	15	44,6	a	A	47,7	a	AB	47,1	a	AB	48,9	ab	B
105	1	15	15	47,1	ab	A	50,0	a	AB	50,9	ab	BC	54,2	bc	C
110	1	15	15	43,7	a	A	45,8	a	AB	46,9	a	AB	48,6	a	B
100	2	15	15	51,4	bc	AB	50,4	a	A	54,2	bc	BC	56,1	c	C
<b>105</b>	<b>2</b>	<b>15</b>	<b>15</b>	60,6	de	A	62,5	c	A	<b>72,2</b>	hijk	B	<b>72,9</b>	hij	B
110	2	15	15	55,2	c	A	56,9	b	A	57,6	cd	A	58,1	cd	A
100	3	15	15	60,6	de	A	63,4	cd	A	62,1	de	A	63,4	de	A
105	3	15	15	65,9	efghi	A	64,6	cde	A	65,7	efg	A	66,8	ef	A
110	3	15	15	63,4	efgh	A	63,9	cd	A	65,7	efg	A	65,9	ef	A
100	1	30	15	67,0	fghi	A	68,4	defg	A	67,2	efgh	A	66,3	ef	A
105	1	30	15	63,0	efg	A	63,2	cd	A	62,5	def	A	67,4	efg	B
110	1	30	15	62,8	ef	A	64,9	cde	A	64,1	ef	A	65,5	ef	A
100	2	30	15	62,2	ef	A	67,4	cdefg	B	67,7	fghi	B	67,5	efg	B
105	2	30	15	65,1	efghi	A	69,3	efg	B	69,6	ghij	B	70,5	fghi	B
110	2	30	15	62,3	ef	A	67,7	cdefg	B	69,8	ghij	B	69,3	fgh	B
<b>100</b>	<b>3</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	<b>73,5</b>	k	A	<b>76,2</b>	i	A	<b>75,7</b>	k	A	<b>76,4</b>	j	A
<b>105</b>	<b>3</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	67,0	fghi	A	69,8	efgh	AB	<b>71,2</b>	hijk	B	70,5	fghi	AB
<b>110</b>	<b>3</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	64,8	efghi	A	<b>71,5</b>	ghi	B	<b>73,3</b>	jk	B	<b>73,6</b>	hij	B
<b>100</b>	<b>1</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	66,1	fghi	A	69,3	efg	AB	<b>72,7</b>	ijk	BC	<b>73,3</b>	hij	C
105	1	45	15	60,7	de	A	65,3	cdef	B	65,3	efg	B	65,3	ef	B
110	1	45	15	56,7	cd	A	63,4	cd	B	64,7	efg	B	66,2	ef	B
<b>100</b>	<b>2</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	<b>68,9</b>	ijk	A	69,8	efgh	A	<b>72,5</b>	ijk	A	<b>72,3</b>	ghij	A
<b>105</b>	<b>2</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	<b>69,8</b>	ijk	A	<b>71,0</b>	ghi	A	<b>71,9</b>	hijk	A	69,8	fghi	A
<b>110</b>	<b>2</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	<b>68,5</b>	hijk	A	70,2	fgh	AB	<b>71,4</b>	hijk	AB	<b>72,5</b>	ghij	B
<b>100</b>	<b>3</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	68,1	ghij	A	<b>72,1</b>	ghi	B	<b>72,3</b>	hijk	B	<b>74,0</b>	hij	B
<b>105</b>	<b>3</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	<b>73,3</b>	jk	AB	70,4	fgh	A	<b>72,5</b>	ijk	AB	<b>75,0</b>	ij	B
<b>110</b>	<b>3</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	<b>72,5</b>	jk	A	<b>74,6</b>	hi	A	<b>74,4</b>	jk	A	<b>74,2</b>	hij	A

Os melhores resultados obtidos após a análise estatística estão destacados na Tabela.

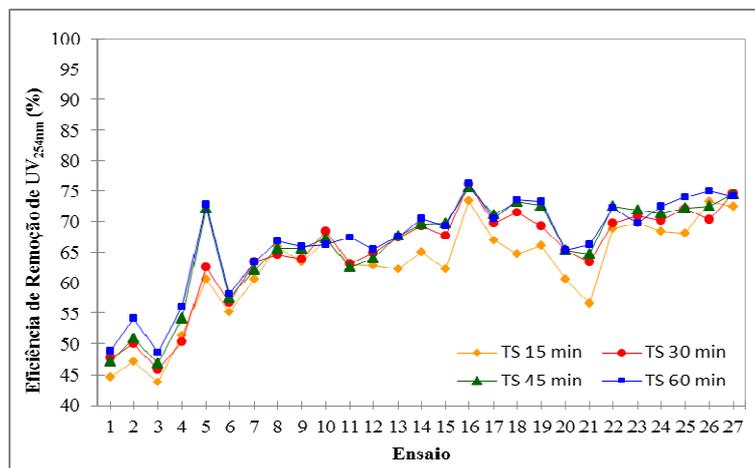
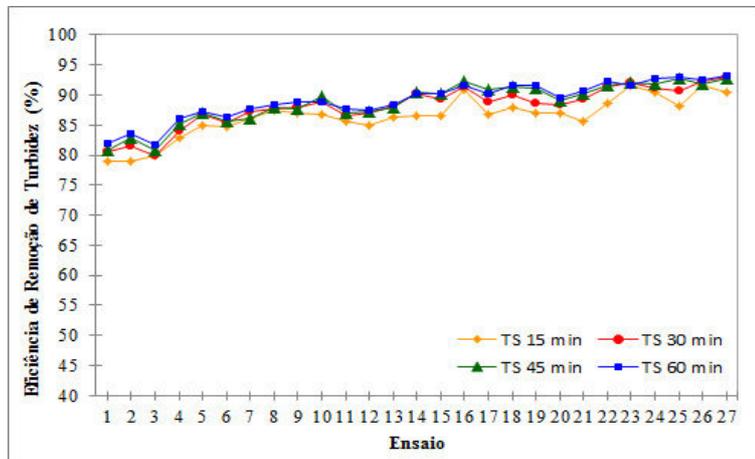
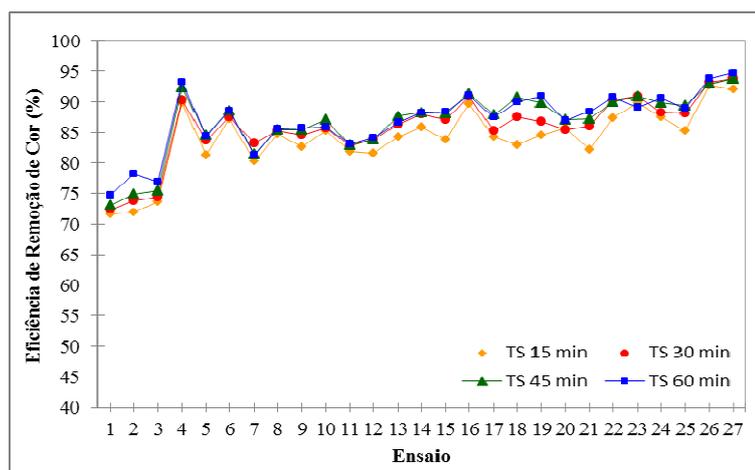
(\*) Os valores apresentados se referem às médias das eficiências de remoção obtidas para o parâmetro compostos com absorção em UV<sub>254nm</sub>.

(1) Dentro de uma mesma coluna, as médias seguidas por mesma letra minúscula não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de nível de significância. A interpretação dos resultados deve ser realizada em relação aos valores dispostos na vertical (coluna).

(2) Dentro de uma mesma linha, as médias seguidas por mesma letra maiúscula não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de nível de significância. A interpretação dos resultados deve ser realizada em relação aos valores dispostos na horizontal (linha).

**APÊNDICE H** – Figuras das eficiências de remoção para as condições de operação estudadas na etapa de coagulação/floculação e sedimentação (*M. oleifera* e cloreto férrico)

Esse apêndice apresenta as Figuras dos valores das eficiências de remoção obtidos para os parâmetros: cor aparente, turbidez e compostos com absorção em  $UV_{254nm}$ , para as condições de operação estudadas na etapa de coagulação/floculação e sedimentação com a associação dos coagulantes *M. oleifera* e cloreto férrico.



**APÊNDICE I – Valores residuais obtidos para as condições de operação estudadas (*M. oleifera* e cloreto férrico)**

V <sub>MR</sub> (rpm)	T <sub>MR</sub> (min)	V <sub>ML</sub> (rpm)	T <sub>ML</sub> (min)	TEMPOS DE SEDIMENTAÇÃO (T <sub>s</sub> )											
				15 min			30 min			45 min			60 min		
				VALORES RESIDUAIS			VALORES RESIDUAIS			VALORES RESIDUAIS			VALORES RESIDUAIS		
				COR	TURBIDEZ	UV <sub>254nm</sub>	COR	TURBIDEZ	UV <sub>254nm</sub>	COR	TURBIDEZ	UV <sub>254nm</sub>	COR	TURBIDEZ	UV <sub>254nm</sub>
100	1	15	15	110	15,6	0,154	107	14,4	0,145	104	14,4	0,147	98	13,5	0,142
105	1	15	15	109	15,6	0,147	101	13,7	0,139	97	13,1	0,136	84	12,2	0,127
110	1	15	15	102	14,9	0,156	99	14,9	0,150	95	14,4	0,147	89	13,6	0,143
100	2	15	15	39	12,7	0,135	38	11,9	0,138	30	11,1	0,127	26	10,4	0,122
105	2	15	15	73	11,3	0,109	63	9,9	0,104	60	9,6	0,077	61	9,5	0,075
110	2	15	15	49	11,4	0,124	48	10,9	0,120	44	10,6	0,118	44	10,2	0,116
100	3	15	15	76	10,4	0,109	65	9,4	0,102	72	10,3	0,105	72	9,1	0,102
105	3	15	15	59	9,4	0,095	57	9,2	0,098	56	8,9	0,095	56	8,6	0,092
110	3	15	15	67	9,7	0,102	60	9,0	0,100	56	9,1	0,095	55	8,4	0,095
100	1	30	15	56	9,7	0,095	55	8,1	0,091	50	7,4	0,095	54	8,1	0,097
105	1	30	15	69	10,4	0,107	66	9,9	0,106	65	9,6	0,108	65	9,0	0,094
110	1	30	15	71	11,0	0,107	62	9,4	0,101	62	9,3	0,104	61	9,2	0,100
100	2	30	15	60	10,0	0,109	52	8,6	0,094	47	8,7	0,093	52	8,4	0,094
105	2	30	15	54	9,8	0,101	46	7,1	0,089	45	7,0	0,088	45	7,2	0,085
110	2	30	15	62	9,9	0,109	50	7,8	0,093	46	7,1	0,087	45	7,1	0,089
100	3	30	15	40	6,7	0,077	35	6,3	0,069	34	5,6	0,070	34	6,2	0,068
105	3	30	15	60	9,7	0,095	56	8,1	0,087	46	6,7	0,083	48	7,1	0,085
110	3	30	15	65	8,8	0,102	48	7,3	0,082	36	6,3	0,077	38	6,1	0,076
100	1	45	15	59	9,5	0,098	51	8,2	0,089	39	6,4	0,079	35	6,0	0,077
105	1	45	15	55	9,5	0,103	56	8,5	0,091	50	7,9	0,091	40	7,6	0,091
110	1	45	15	69	10,5	0,114	54	7,8	0,096	49	7,1	0,093	45	6,7	0,089
100	2	45	15	49	8,2	0,082	38	6,4	0,079	38	6,1	0,072	36	5,6	0,073
105	2	45	15	39	6,0	0,079	35	5,7	0,076	35	5,8	0,074	42	6,1	0,079
110	2	45	15	48	6,9	0,083	45	6,4	0,078	39	5,9	0,075	36	5,3	0,072
100	3	45	15	57	8,6	0,084	46	6,7	0,073	41	5,3	0,073	43	5,2	0,068
105	3	45	15	28	6,1	0,070	26	5,5	0,078	27	6,0	0,072	24	5,5	0,066
110	3	45	15	31	6,9	0,072	24	5,1	0,063	24	5,3	0,067	21	4,9	0,068

Unidades: Cor aparente = uH; Turbidez = UNT; Compostos com absorção em UV<sub>254nm</sub> = cm<sup>-1</sup>

**APÊNDICE J** – Eficiências de remoção de cor aparente, turbidez e compostos com absorção em UV<sub>254nm</sub> para as condições de operação estudadas na etapa de coagulação/floculação e sedimentação (*M. oleifera* e PAC)

Esse apêndice apresenta as médias dos valores das eficiências de remoção obtidos para os parâmetros de qualidade, assim como o resultado da análise estatística realizada para todas as condições de operação estudadas na etapa de coagulação/floculação e sedimentação com a associação dos coagulantes *M. oleifera* e PAC.

ENSAIOS ( <i>M. oleifera</i> e PAC) – COR APARENTE															
V <sub>MR</sub> (rpm)	T <sub>MR</sub> (min)	V <sub>ML</sub> (rpm)	T <sub>ML</sub> (min)	TEMPOS DE SEDIMENTAÇÃO (T <sub>s</sub> )											
				15 min			30 min			45 min			60 min		
				% (*)	(1)	(2)	% (*)	(1)	(2)	% (*)	(1)	(2)	% (*)	(1)	(2)
100	1	15	15	84,2	d	A	84,2	b	A	84,0	a	A	83,4	b	A
105	1	15	15	80,9	c	BC	79,7	a	B	82,1	a	C	70,2	a	A
110	1	15	15	85,3	de	A	86,3	bc	AB	87,2	bc	B	85,7	bc	AB
100	2	15	15	87,6	ef	A	89,7	dc	B	89,3	cde	B	89,1	def	AB
105	2	15	15	87,4	ef	AB	86,0	b	A	87,4	bc	AB	87,7	cd	B
110	2	15	15	90,1	ghi	A	91,2	ef	AB	91,0	ef	A	92,7	ghij	B
100	3	15	15	87,7	f	A	88,5	cd	A	88,0	bcd	A	93,2	hijkl	B
105	3	15	15	76,0	b	A	79,6	a	B	86,4	b	C	88,5	de	D
110	3	15	15	73,1	a	A	89,7	de	B	90,9	ef	B	93,0	hijk	C
100	1	30	15	88,3	fg	A	91,0	ef	B	93,9	hij	C	93,9	ijklm	C
105	1	30	15	91,3	ijk	A	90,2	def	A	90,1	de	A	91,3	fgh	A
110	1	30	15	90,7	hij	A	92,4	fgh	B	91,5	efg	AB	90,6	efg	A
100	2	30	15	93,1	klmno	BC	91,5	ef	A	93,5	ghi	C	91,6	ghi	AB
<b>105</b>	<b>2</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	94,0	lmnop	A	93,9	ghi	A	<b>94,1</b>	hijk	A	<b>94,5</b>	jklmn	A
<b>110</b>	<b>2</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	92,6	jklmn	A	94,6	hij	B	<b>95,0</b>	ijk	B	<b>95,1</b>	klmn	B
<b>100</b>	<b>3</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	92,0	ijkl	A	95,0	ij	BC	<b>95,4</b>	ijk	C	93,6	ijklm	B
105	3	30	15	92,5	jklmn	A	92,5	fgh	A	92,5	fgh	A	93,0	hijk	A
<b>110</b>	<b>3</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	88,8	fgh	A	92,5	fgh	B	<b>95,3</b>	ijk	C	<b>95,8</b>	n	C
<b>100</b>	<b>1</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	<b>97,1</b>	q	A	<b>97,4</b>	k	A	<b>95,9</b>	jk	A	<b>96,5</b>	mn	A
<b>105</b>	<b>1</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	<b>97,3</b>	q	B	<b>96,3</b>	jk	AB	<b>95,5</b>	ijk	A	<b>96,3</b>	n	AB
<b>110</b>	<b>1</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	<b>95,4</b>	opq	A	<b>95,5</b>	ijk	A	<b>95,5</b>	ijk	A	<b>96,0</b>	mn	A
<b>100</b>	<b>2</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	94,8	nop	A	<b>95,4</b>	ijk	A	<b>95,1</b>	ijk	A	<b>95,5</b>	lmn	A
105	2	45	15	72,2	a	A	80,6	a	B	90,6	ef	C	91,7	ghi	C
110	2	45	15	92,3	jklm	B	91,9	efg	AB	90,5	ef	A	91,8	ghi	AB
<b>100</b>	<b>3</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	94,5	mnpq	A	94,4	hij	A	<b>96,2</b>	k	B	<b>95,2</b>	klmn	AB
<b>105</b>	<b>3</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	<b>96,2</b>	pq	A	<b>95,4</b>	ijk	A	<b>95,8</b>	jk	A	<b>95,4</b>	lmn	A
<b>110</b>	<b>3</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	<b>95,0</b>	opq	A	<b>95,7</b>	ijk	A	<b>95,7</b>	ijk	A	<b>95,7</b>	mn	A

Os melhores resultados obtidos após a análise estatística estão destacados na Tabela.

(\*) Os valores apresentados se referem às médias das eficiências de remoção obtidas para o parâmetro cor aparente.

(1) Dentro de uma mesma coluna, as médias seguidas por mesma letra minúscula não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de nível de significância. A interpretação dos resultados deve ser realizada em relação aos valores dispostos na vertical (coluna).

(2) Dentro de uma mesma linha, as médias seguidas por mesma letra maiúscula não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de nível de significância. A interpretação dos resultados deve ser realizada em relação aos valores dispostos na horizontal (linha).

ENSAIOS ( <i>M. oleifera</i> e PAC) – TURBIDEZ															
V <sub>MR</sub> (rpm)	T <sub>MR</sub> (min)	V <sub>ML</sub> (rpm)	T <sub>ML</sub> (min)	TEMPOS DE SEDIMENTAÇÃO (T <sub>s</sub> )											
				15 min			30 min			45 min			60 min		
				% (*)	(1)	(2)	% (*)	(1)	(2)	% (*)	(1)	(2)	% (*)	(1)	(2)
100	1	15	15	85,6	bc	A	85,9	b	A	86,5	b	A	87,3	b	A
105	1	15	15	84,2	b	C	81,9	a	B	81,2	a	B	72,0	a	A
110	1	15	15	86,8	bcde	A	88,2	bc	A	88,2	bc	A	88,3	bc	A
100	2	15	15	89,6	efghi	A	89,6	cde	A	90,6	cde	A	91,2	cdef	A
105	2	15	15	89,4	efgh	A	89,4	cd	A	89,5	bcd	A	89,0	bcd	A
110	2	15	15	90,9	ghij	A	91,7	defg	A	91,5	def	A	91,6	def	A
100	3	15	15	87,8	cdef	A	89,8	cdef	A	88,2	bc	A	92,7	efghi	B
105	3	15	15	76,2	a	A	81,7	a	B	89,3	bcd	C	90,4	cde	C
110	3	15	15	73,8	a	A	89,5	cde	B	91,6	def	C	91,7	def	C
100	1	30	15	89,0	defg	A	91,7	defg	B	93,0	efgh	B	92,1	efgh	B
105	1	30	15	92,6	ijklm	A	92,1	defgh	A	92,8	efgh	A	92,9	efghi	A
110	1	30	15	91,1	ghij	A	92,7	fghi	A	91,9	defg	A	91,5	def	A
100	2	30	15	93,1	ijklmno	A	93,0	ghijk	A	93,1	efghi	A	91,8	defg	A
<b>105</b>	<b>2</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	<b>94,7</b>	lmnop	A	<b>94,7</b>	ghijkl	A	<b>94,8</b>	ghij	A	<b>94,8</b>	ghij	A
<b>110</b>	<b>2</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	92,7	ijklm	A	<b>93,6</b>	ghijkl	A	<b>93,7</b>	fghij	A	<b>93,8</b>	fghij	A
<b>100</b>	<b>3</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	91,3	ghijk	A	92,4	efgh	AB	<b>93,6</b>	fghij	B	91,3	cdef	A
<b>105</b>	<b>3</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	92,4	hijkl	A	92,7	fghi	A	92,7	efgh	A	<b>93,6</b>	fghij	A
<b>110</b>	<b>3</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	90,2	fghij	A	92,9	ghij	B	93,1	efghi	B	<b>93,6</b>	fghij	B
<b>100</b>	<b>1</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	<b>95,8</b>	op	A	<b>96,0</b>	kl	A	<b>95,7</b>	hij	A	<b>95,9</b>	j	A
<b>105</b>	<b>1</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	<b>95,7</b>	nop	A	<b>95,9</b>	jkl	A	<b>95,5</b>	hij	A	<b>96,1</b>	j	A
<b>110</b>	<b>1</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	<b>95,5</b>	mnop	A	<b>95,6</b>	ijkl	A	<b>95,3</b>	ij	A	<b>96,0</b>	j	A
<b>100</b>	<b>2</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	<b>94,9</b>	lmnop	A	<b>95,5</b>	ijkl	A	<b>95,2</b>	hij	A	<b>95,3</b>	ij	A
<b>105</b>	<b>2</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	86,1	bcd	A	89,5	cde	B	<b>93,7</b>	fghij	C	<b>94,1</b>	fghij	C
<b>110</b>	<b>2</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	<b>94,2</b>	klmnop	A	<b>94,5</b>	ghijkl	A	<b>93,5</b>	efghij	A	<b>94,0</b>	fghij	A
<b>100</b>	<b>3</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	<b>95,0</b>	lmnop	A	<b>94,9</b>	hijkl	A	<b>95,6</b>	hij	A	<b>95,0</b>	hij	A
<b>105</b>	<b>3</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	<b>96,2</b>	p	A	<b>95,8</b>	jkl	A	<b>96,4</b>	j	A	<b>96,1</b>	j	A
<b>110</b>	<b>3</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	<b>96,0</b>	op	A	<b>96,3</b>	l	A	<b>96,0</b>	ij	A	<b>96,4</b>	j	A

Os melhores resultados obtidos após a análise estatística estão destacados na Tabela.

(\*) Os valores apresentados se referem às médias das eficiências de remoção obtidas para o parâmetro turbidez.

(1) Dentro de uma mesma coluna, as médias seguidas por mesma letra minúscula não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de nível de significância. A interpretação dos resultados deve ser realizada em relação aos valores dispostos na vertical (coluna).

(2) Dentro de uma mesma linha, as médias seguidas por mesma letra maiúscula não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de nível de significância. A interpretação dos resultados deve ser realizada em relação aos valores dispostos na horizontal (linha).

ENSAIOS ( <i>M. oleifera</i> e PAC) – COMPOSTOS COM ABSORÇÃO EM UV <sub>254nm</sub>															
V <sub>MR</sub> (rpm)	T <sub>MR</sub> (min)	V <sub>ML</sub> (rpm)	T <sub>ML</sub> (min)	TEMPOS DE SEDIMENTAÇÃO (T <sub>S</sub> )											
				15 min			30 min			45 min			60 min		
				% (*)	(1)	(2)	% (*)	(1)	(2)	% (*)	(1)	(2)	% (*)	(1)	(2)
100	1	15	15	70,3	bcd	A	69,4	ab	A	70,1	b	A	69,4	b	A
105	1	15	15	68,2	bc	C	65,5	a	B	64,9	a	B	55,0	a	A
110	1	15	15	72,2	cde	A	73,6	cd	A	72,9	bcd	A	72,9	bcd	A
100	2	15	15	73,6	defg	A	75,5	cde	A	75,0	cdef	A	74,5	cde	A
105	2	15	15	73,3	def	A	71,7	bc	A	71,2	bc	A	72,4	bc	A
110	2	15	15	76,4	fghi	A	77,6	defg	A	78,1	fghij	A	78,0	efghi	A
100	3	15	15	74,6	efgh	A	76,3	def	A	73,8	bcde	A	77,4	efgh	B
105	3	15	15	66,8	b	A	68,1	ab	AB	74,7	cdef	B	76,3	cdef	B
110	3	15	15	62,0	a	A	75,3	cde	A	76,0	defg	B	76,5	defg	B
100	1	30	15	73,3	def	A	75,3	cde	B	77,4	efghi	B	75,3	cdef	AB
105	1	30	15	78,5	hijkl	B	75,6	cde	AB	76,3	defgh	AB	78,5	fghij	B
110	1	30	15	77,2	ghijk	A	78,3	efgh	A	77,2	efghi	A	76,5	defg	A
100	2	30	15	79,4	ijklm	A	78,9	efgh	A	79,0	ghijk	A	77,1	efgh	A
<b>105</b>	<b>2</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	<b>81,9</b>	lmnop	A	<b>81,2</b>	ghijk	A	<b>81,2</b>	ijklmn	A	<b>81,0</b>	hijklmn	A
<b>110</b>	<b>2</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	81,3	klmno	A	<b>82,3</b>	hijk	A	<b>82,1</b>	klmn	A	<b>81,9</b>	jklmn	A
<b>100</b>	<b>3</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	80,1	ijklm	AB	<b>81,8</b>	hijk	B	<b>81,3</b>	ijklmn	AB	78,9	fghijk	A
105	3	30	15	80,7	jklmn	A	78,7	efgh	A	79,6	ghijkl	A	80,4	ghijkl	A
<b>110</b>	<b>3</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	77,0	fghij	A	79,9	fghij	B	<b>81,6</b>	jklmn	BC	<b>82,8</b>	klmn	C
<b>100</b>	<b>1</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	<b>85,6</b>	p	A	<b>85,1</b>	k	A	<b>85,0</b>	n	A	<b>84,8</b>	n	A
<b>105</b>	<b>1</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	<b>85,1</b>	op	A	<b>84,1</b>	k	A	<b>83,3</b>	lmn	A	<b>83,8</b>	lmn	A
<b>110</b>	<b>1</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	<b>83,3</b>	mnop	A	<b>83,1</b>	ijk	A	<b>82,8</b>	jklmn	A	<b>84,6</b>	mn	A
<b>100</b>	<b>2</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	<b>82,3</b>	lmnop	A	<b>83,1</b>	jk	A	<b>81,6</b>	jklmn	A	<b>82,1</b>	jklmn	A
<b>105</b>	<b>2</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	76,9	fghij	A	<b>81,9</b>	hijk	B	80,0	hijklm	B	80,8	hijklm	B
110	2	45	15	79,8	ijklm	A	79,2	efghi	A	77,3	efghi	A	79,0	fghijk	A
<b>100</b>	<b>3</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	<b>82,7</b>	mnop	B	78,8	efgh	A	<b>84,2</b>	n	B	<b>83,1</b>	klmn	B
<b>105</b>	<b>3</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	<b>84,4</b>	nop	B	<b>82,3</b>	hijk	AB	<b>83,5</b>	mn	AB	<b>81,5</b>	ijklmn	A
<b>110</b>	<b>3</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	<b>82,9</b>	mnop	A	<b>82,3</b>	hijk	A	<b>81,5</b>	jklmn	A	<b>81,7</b>	ijklmn	A

Os melhores resultados obtidos após a análise estatística estão destacados na Tabela.

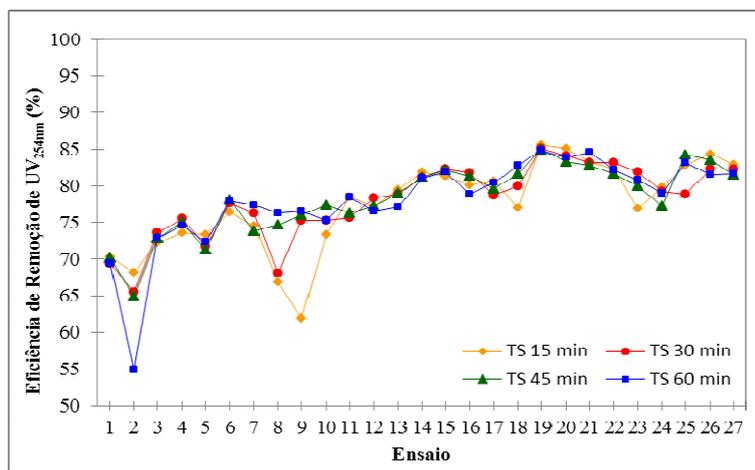
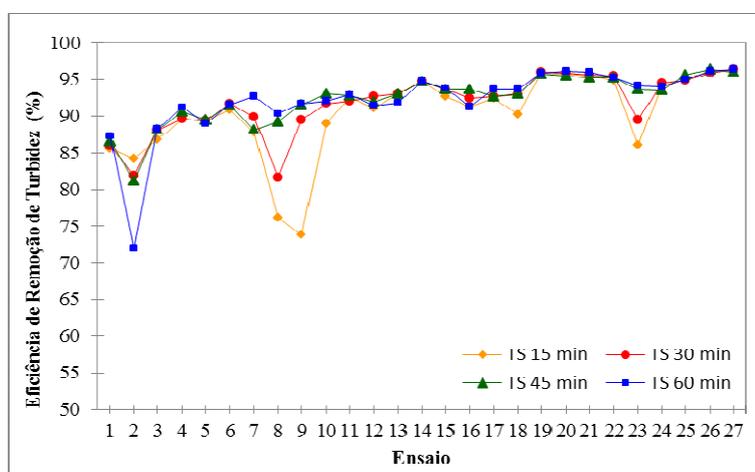
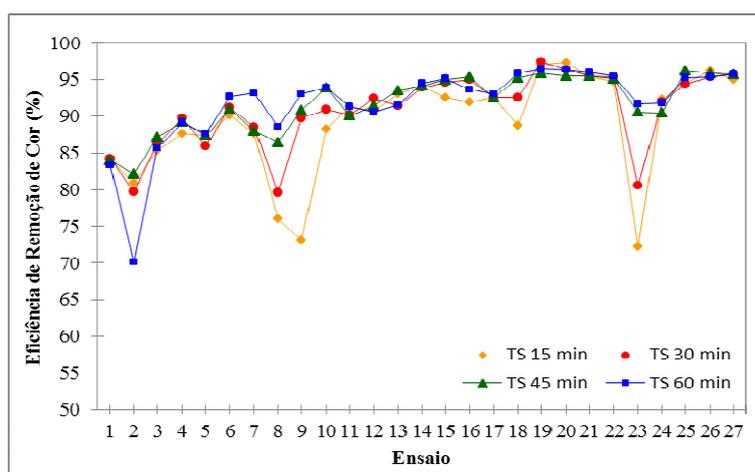
(\*) Os valores apresentados se referem às médias das eficiências de remoção obtidas para o parâmetro compostos com absorção em UV<sub>254nm</sub>.

(1) Dentro de uma mesma coluna, as médias seguidas por mesma letra minúscula não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de nível de significância. A interpretação dos resultados deve ser realizada em relação aos valores dispostos na vertical (coluna).

(2) Dentro de uma mesma linha, as médias seguidas por mesma letra maiúscula não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de nível de significância. A interpretação dos resultados deve ser realizada em relação aos valores dispostos na horizontal (linha).

**APÊNDICE K** – Figuras das eficiências de remoção para as condições de operação estudadas na etapa de coagulação/floculação e sedimentação (*M. oleifera* e PAC)

Esse apêndice apresenta as Figuras dos valores das eficiências de remoção obtidos para os parâmetros: cor aparente, turbidez e compostos com absorção em UV<sub>254nm</sub>, para as condições de operação estudadas na etapa de coagulação/floculação e sedimentação com a associação dos coagulantes *M. oleifera* e PAC.



APÊNDICE L – Valores residuais obtidos para as condições de operação estudadas (*M. oleifera* e PAC)

V <sub>MR</sub> (rpm)	T <sub>MR</sub> (min)	V <sub>ML</sub> (rpm)	T <sub>ML</sub> (min)	TEMPOS DE SEDIMENTAÇÃO (T <sub>s</sub> )											
				15 min			30 min			45 min			60 min		
				VALORES RESIDUAIS			VALORES RESIDUAIS			VALORES RESIDUAIS			VALORES RESIDUAIS		
				COR	TURBIDEZ	UV <sub>254nm</sub>	COR	TURBIDEZ	UV <sub>254nm</sub>	COR	TURBIDEZ	UV <sub>254nm</sub>	COR	TURBIDEZ	UV <sub>254nm</sub>
100	1	15	15	61	10,4	0,086	61	10,2	0,088	61	9,8	0,086	64	9,2	0,088
105	1	15	15	73	11,4	0,092	78	13,1	0,100	69	13,6	0,101	114	20,3	0,130
110	1	15	15	56	9,5	0,080	53	8,5	0,076	49	8,5	0,078	55	8,5	0,078
100	2	15	15	48	7,5	0,076	40	7,5	0,071	41	6,8	0,072	42	6,4	0,074
105	2	15	15	48	7,6	0,077	54	7,7	0,082	48	7,6	0,083	47	7,9	0,080
110	2	15	15	38	6,6	0,068	34	6,0	0,065	35	6,2	0,063	28	6,1	0,064
100	3	15	15	47	8,8	0,071	44	7,3	0,066	46	8,4	0,073	26	5,2	0,063
105	3	15	15	92	17,1	0,093	78	13,1	0,089	52	7,6	0,071	44	6,8	0,066
110	3	15	15	103	18,7	0,106	40	7,5	0,069	35	6,0	0,067	27	5,9	0,066
100	1	30	15	45	7,9	0,075	35	5,9	0,069	24	5,0	0,063	24	5,7	0,069
105	1	30	15	34	5,3	0,060	38	5,7	0,068	38	5,1	0,066	34	5,1	0,060
110	1	30	15	36	6,4	0,064	29	5,2	0,061	33	5,8	0,064	36	6,1	0,066
100	2	30	15	27	4,9	0,058	33	5,0	0,059	25	4,9	0,059	32	5,9	0,064
105	2	30	15	23	3,8	0,051	24	3,8	0,053	23	3,7	0,053	21	3,7	0,053
110	2	30	15	30	5,6	0,056	22	4,8	0,053	20	4,8	0,053	20	4,7	0,054
100	3	30	15	32	6,6	0,059	20	5,8	0,054	19	4,8	0,056	26	6,6	0,063
105	3	30	15	30	5,8	0,057	30	5,5	0,063	30	5,5	0,061	28	4,9	0,058
110	3	30	15	45	7,5	0,068	30	5,4	0,060	19	5,3	0,055	17	4,9	0,051
100	1	45	15	12	3,2	0,043	11	3,1	0,044	17	3,3	0,045	14	3,1	0,045
105	1	45	15	11	3,3	0,044	15	3,1	0,047	18	3,4	0,050	15	3,0	0,048
110	1	45	15	19	3,4	0,050	18	3,4	0,050	18	3,6	0,051	16	3,1	0,046
100	2	45	15	21	3,9	0,053	19	3,5	0,050	20	3,6	0,060	18	3,6	0,053
105	2	45	15	104	10,1	0,056	72	7,6	0,044	35	4,6	0,048	31	4,2	0,046
110	2	45	15	29	4,2	0,049	30	4,0	0,050	36	4,7	0,055	31	4,4	0,051
100	3	45	15	21	3,6	0,042	21	3,7	0,051	14	3,2	0,038	18	3,6	0,041
105	3	45	15	14	2,8	0,038	17	3,0	0,043	16	2,6	0,040	17	2,9	0,045
110	3	45	15	19	2,9	0,041	16	2,7	0,043	16	2,9	0,045	16	2,6	0,044

Unidades: Cor aparente = uH; Turbidez = UNT; Compostos com absorção em UV<sub>254nm</sub> = cm<sup>-1</sup>

**APÊNDICE M** – Eficiências de remoção de cor aparente, turbidez e compostos com absorção em UV<sub>254nm</sub> para as condições de operação estudadas na etapa de coagulação/floculação e sedimentação

(*M. oleifera* e sulfato de alumínio)

Esse apêndice apresenta as médias dos valores das eficiências de remoção obtidos para os parâmetros de qualidade, assim como o resultado da análise estatística realizada para todas as condições de operação estudadas na etapa de coagulação/floculação e sedimentação com a associação dos coagulantes *M. oleifera* e sulfato de alumínio.

ENSAIOS ( <i>M. oleifera</i> e sulfato de alumínio) – COR APARENTE															
V <sub>MR</sub> (rpm)	T <sub>MR</sub> (min)	V <sub>ML</sub> (rpm)	T <sub>ML</sub> (min)	TEMPOS DE SEDIMENTAÇÃO (T <sub>s</sub> )											
				15 min			30 min			45 min			60 min		
				% (*)	(1)	(2)	% (*)	(1)	(2)	% (*)	(1)	(2)	% (*)	(1)	(2)
100	1	15	15	76,0	ab	A	77,9	a	AB	79,4	a	B	82,3	a	C
105	1	15	15	75,5	a	A	77,9	a	B	80,5	a	C	80,2	a	C
110	1	15	15	76,4	ab	A	79,4	a	B	80,1	a	B	79,4	a	B
100	2	15	15	83,3	def	A	84,8	b	AB	86,2	b	BC	87,0	bc	C
105	2	15	15	83,7	efgh	A	85,7	bcd	AB	85,9	b	B	86,6	bc	B
110	2	15	15	85,0	fghij	A	85,2	b	A	86,1	b	A	85,9	b	A
100	3	15	15	86,6	hijklm	A	89,2	efg	B	89,8	cd	B	89,3	cdef	B
105	3	15	15	87,5	klmno	A	87,2	bcde	A	88,5	bc	A	87,2	bc	A
110	3	15	15	89,1	mno	A	88,7	defg	A	90,1	cdef	A	88,5	bcd	A
100	1	30	15	87,5	klmno	A	87,4	bcde	A	88,3	bc	A	88,9	cde	A
<b>105</b>	<b>1</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	<b>92,3</b>	p	A	<b>93,6</b>	i	A	<b>93,3</b>	gh	A	<b>93,3</b>	hi	A
<b>110</b>	<b>1</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	88,0	klmno	A	88,8	efg	AB	<b>90,9</b>	cdefgh	C	90,7	defgh	BC
<b>100</b>	<b>2</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	<b>90,2</b>	nop	A	<b>91,2</b>	ghi	AB	<b>92,5</b>	defgh	B	92,3	gh	B
105	2	30	15	88,9	mno	A	89,4	efg	AB	89,9	cd	AB	91,0	defgh	B
110	2	30	15	87,0	ijklm	A	90,1	efg	BC	88,7	bc	AB	92,0	defgh	C
<b>100</b>	<b>3</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	87,4	klmno	A	88,1	cdef	A	<b>91,0</b>	cdefgh	B	91,9	efgh	B
<b>105</b>	<b>3</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	<b>90,7</b>	op	A	<b>93,3</b>	hi	B	<b>93,8</b>	h	BC	<b>95,4</b>	i	C
<b>110</b>	<b>3</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	85,2	fghijk	A	90,5	fgh	B	90,2	cdef	B	<b>92,9</b>	ghi	C
<b>100</b>	<b>1</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	85,8	ghijkl	A	85,2	bc	A	<b>92,5</b>	defgh	B	<b>92,8</b>	ghi	B
105	1	45	15	78,5	bc	A	88,9	efg	B	89,9	cd	B	90,6	defgh	B
110	1	45	15	81,2	cde	A	88,2	def	B	88,9	bc	B	89,3	cdef	B
100	2	45	15	84,1	efghi	A	89,7	efg	B	90,0	cde	B	90,7	defgh	B
<b>105</b>	<b>2</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	88,2	lmno	A	<b>90,9</b>	fghi	B	<b>93,1</b>	fgh	C	<b>93,3</b>	hi	C
110	2	45	15	81,4	cde	A	88,9	efg	B	90,7	cdefg	BC	92,0	fgh	C
<b>100</b>	<b>3</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	82,6	def	A	88,6	defg	B	<b>91,0</b>	cdefgh	C	90,7	defgh	C
<b>105</b>	<b>3</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	87,1	ijklm	A	<b>90,7</b>	fghi	B	<b>92,9</b>	efgh	C	<b>93,2</b>	hi	C
110	3	45	15	80,5	cd	A	87,4	bcde	B	89,8	cd	C	90,2	defg	C

Os melhores resultados obtidos após a análise estatística estão destacados na Tabela.

(\*) Os valores apresentados se referem às médias das eficiências de remoção obtidas para o parâmetro cor aparente.

(1) Dentro de uma mesma coluna, as médias seguidas por mesma letra minúscula não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de nível de significância. A interpretação dos resultados deve ser realizada em relação aos valores dispostos na vertical (coluna).

(2) Dentro de uma mesma linha, as médias seguidas por mesma letra maiúscula não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de nível de significância. A interpretação dos resultados deve ser realizada em relação aos valores dispostos na horizontal (linha).

ENSAIOS ( <i>M. oleifera</i> e sulfato de alumínio) – TURBIDEZ															
V <sub>MR</sub> (rpm)	T <sub>MR</sub> (min)	V <sub>ML</sub> (rpm)	T <sub>ML</sub> (min)	TEMPOS DE SEDIMENTAÇÃO (T <sub>s</sub> )											
				15 min			30 min			45 min			60 min		
				% (*)	(1)	(2)	% (*)	(1)	(2)	% (*)	(1)	(2)	% (*)	(1)	(2)
100	1	15	15	79,8	ab	A	81,6	a	AB	83,5	a	BC	85,5	ab	C
105	1	15	15	79,9	abc	A	81,4	a	AB	83,4	a	B	83,5	a	B
110	1	15	15	79,0	a	A	82,5	ab	B	83,1	a	B	82,8	a	B
100	2	15	15	84,0	defgh	A	85,5	bc	AB	86,7	b	BC	88,1	bcde	C
105	2	15	15	84,9	efghi	A	88,5	cdefg	B	87,5	bc	B	87,9	bcd	B
110	2	15	15	87,2	hijk	A	87,4	cde	A	87,7	bcd	A	87,6	bc	A
<b>100</b>	<b>3</b>	<b>15</b>	<b>15</b>	87,7	ijk	A	<b>89,6</b>	defgh	AB	<b>89,7</b>	bcdef	AB	90,5	cdefghi	B
<b>105</b>	<b>3</b>	<b>15</b>	<b>15</b>	<b>89,0</b>	klm	A	<b>89,1</b>	defgh	A	<b>89,8</b>	bcdef	A	88,4	bcdef	A
<b>110</b>	<b>3</b>	<b>15</b>	<b>15</b>	<b>88,4</b>	jklm	A	<b>89,3</b>	defgh	AB	<b>90,8</b>	def	B	89,4	cdefg	AB
<b>100</b>	<b>1</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	<b>88,8</b>	klm	A	<b>89,8</b>	defgh	A	89,5	bcde	A	89,9	cdefg	A
<b>105</b>	<b>1</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	<b>91,0</b>	lm	A	<b>92,0</b>	h	A	<b>91,9</b>	ef	A	<b>91,9</b>	ghij	A
110	1	30	15	87,1	hijk	A	88,3	cdef	AB	90,0	bcdef	B	90,1	cdefghi	B
<b>100</b>	<b>2</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	<b>91,4</b>	m	A	<b>92,2</b>	h	A	<b>92,9</b>	f	A	<b>93,3</b>	ij	A
<b>105</b>	<b>2</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	<b>88,8</b>	klm	A	<b>90,4</b>	efgh	A	<b>90,8</b>	def	A	90,8	defghi	A
110	2	30	15	85,8	fghijk	A	<b>89,8</b>	defgh	B	<b>90,0</b>	cdef	B	<b>90,9</b>	defghij	B
<b>100</b>	<b>3</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	85,8	fghijk	A	87,0	cd	A	<b>90,0</b>	cdef	B	<b>91,1</b>	defghij	B
<b>105</b>	<b>3</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	<b>91,2</b>	lm	A	<b>91,7</b>	gh	A	<b>92,8</b>	f	AB	<b>94,1</b>	j	B
110	3	30	15	85,3	efghij	A	<b>90,6</b>	efgh	B	<b>91,0</b>	ef	B	<b>92,6</b>	ghij	B
<b>100</b>	<b>1</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	86,2	ghijk	A	85,3	bc	A	<b>91,0</b>	ef	B	<b>91,2</b>	efghij	B
<b>105</b>	<b>1</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	82,9	bcdef	A	<b>89,9</b>	defgh	B	<b>89,8</b>	bcdef	B	<b>91,9</b>	ghij	B
110	1	45	15	85,8	fghijk	A	88,5	cdefg	B	<b>90,2</b>	cdef	BC	90,8	defghi	C
<b>100</b>	<b>2</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	83,1	cdefg	A	<b>90,6</b>	efgh	B	<b>92,1</b>	ef	B	<b>92,6</b>	hij	B
<b>105</b>	<b>2</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	88,0	ijkl	A	<b>91,1</b>	fgh	B	<b>92,9</b>	f	B	<b>93,3</b>	ij	B
110	2	45	15	83,3	defg	A	<b>89,9</b>	defgh	B	<b>91,0</b>	ef	BC	<b>92,2</b>	ghij	C
<b>100</b>	<b>3</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	81,5	abcd	A	88,3	cdef	B	<b>91,0</b>	ef	C	<b>91,3</b>	fghij	C
<b>105</b>	<b>3</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	85,4	efghij	A	<b>90,4</b>	efgh	B	<b>92,9</b>	f	C	<b>93,0</b>	hij	C
110	3	45	15	82,3	bcde	A	<b>89,4</b>	defgh	B	<b>91,2</b>	ef	B	<b>91,5</b>	fghij	B

Os melhores resultados obtidos após a análise estatística estão destacados na Tabela.

(\*) Os valores apresentados se referem às médias das eficiências de remoção obtidas para o parâmetro turbidez.

(1) Dentro de uma mesma coluna, as médias seguidas por mesma letra minúscula não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de nível de significância. A interpretação dos resultados deve ser realizada em relação aos valores dispostos na vertical (coluna).

(2) Dentro de uma mesma linha, as médias seguidas por mesma letra maiúscula não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de nível de significância. A interpretação dos resultados deve ser realizada em relação aos valores dispostos na horizontal (linha).

ENSAIOS ( <i>M. oleifera</i> e sulfato de alumínio) – COMPOSTOS COM ABSORÇÃO EM UV <sub>254nm</sub>															
V <sub>MR</sub> (rpm)	T <sub>MR</sub> (min)	V <sub>ML</sub> (rpm)	T <sub>ML</sub> (min)	TEMPOS DE SEDIMENTAÇÃO (T <sub>s</sub> )											
				15 min			30 min			45 min			60 min		
				% (*)	(1)	(2)	% (*)	(1)	(2)	% (*)	(1)	(2)	% (*)	(1)	(2)
100	1	15	15	62,5	a	A	62,5	ab	A	63,2	ab	A	65,7	abc	A
105	1	15	15	58,6	a	A	62,0	a	A	62,0	a	A	61,4	a	A
110	1	15	15	61,4	abcde	A	62,5	ab	A	63,0	ab	A	63,0	ab	A
<b>100</b>	<b>2</b>	<b>15</b>	<b>15</b>	67,0	bcdefg	A	68,6	abc	A	<b>70,9</b>	cd	A	69,5	bcd	A
<b>105</b>	<b>2</b>	<b>15</b>	<b>15</b>	67,1	bcdefg	A	<b>70,4</b>	cdef	AB	69,8	bc	AB	<b>72,9</b>	cdef	B
<b>110</b>	<b>2</b>	<b>15</b>	<b>15</b>	<b>70,2</b>	efghi	A	69,8	bcde	A	<b>71,8</b>	cd	A	71,3	cde	A
<b>100</b>	<b>3</b>	<b>15</b>	<b>15</b>	<b>72,1</b>	ghi	A	<b>75,7</b>	cdef	A	<b>75,4</b>	cd	A	<b>75,4</b>	def	A
<b>105</b>	<b>3</b>	<b>15</b>	<b>15</b>	<b>75,7</b>	hi	A	<b>73,8</b>	cdef	A	<b>73,9</b>	cd	A	<b>72,1</b>	cdef	A
<b>110</b>	<b>3</b>	<b>15</b>	<b>15</b>	<b>74,8</b>	hi	A	<b>74,1</b>	ef	A	<b>75,5</b>	cd	A	<b>76,3</b>	def	A
<b>100</b>	<b>1</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	<b>75,5</b>	hi	A	<b>75,5</b>	cdef	A	<b>75,0</b>	cd	A	<b>75,5</b>	def	A
<b>105</b>	<b>1</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	<b>76,3</b>	i	A	<b>76,3</b>	def	A	<b>75,5</b>	cd	A	<b>76,3</b>	def	A
<b>110</b>	<b>1</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	<b>70,8</b>	fgghi	A	<b>71,4</b>	cdef	A	<b>72,4</b>	cd	A	<b>72,1</b>	cdef	A
<b>100</b>	<b>2</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	<b>72,3</b>	ghi	A	<b>74,3</b>	cdef	A	<b>75,2</b>	cd	A	<b>75,2</b>	def	A
<b>105</b>	<b>2</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	<b>69,9</b>	defghi	A	<b>73,0</b>	cdef	AB	<b>73,0</b>	cd	AB	<b>75,7</b>	def	B
<b>110</b>	<b>2</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	<b>72,6</b>	ghi	A	<b>75,7</b>	cdef	A	<b>74,6</b>	cd	A	<b>75,0</b>	def	A
<b>100</b>	<b>3</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	<b>71,0</b>	fgghi	AB	68,2	abc	A	<b>72,4</b>	cd	A	<b>73,7</b>	def	B
<b>105</b>	<b>3</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	<b>75,2</b>	hi	A	<b>77,6</b>	f	A	<b>77,2</b>	cd	A	<b>77,2</b>	ef	A
<b>110</b>	<b>3</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	<b>69,2</b>	cdefghi	A	<b>76,8</b>	ef	B	<b>74,5</b>	cd	B	<b>79,0</b>	f	B
<b>100</b>	<b>1</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	68,4	bcdefgh	A	69,5	abcde	A	<b>75,7</b>	cd	A	<b>76,1</b>	def	B
<b>105</b>	<b>1</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	67,0	bcdefg	A	<b>74,5</b>	cdef	B	<b>74,8</b>	cd	B	<b>75,7</b>	def	B
<b>110</b>	<b>1</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	65,9	abcdefg	A	69,2	abcde	AB	<b>72,2</b>	cd	AB	<b>75,1</b>	def	C
<b>100</b>	<b>2</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	64,3	abcdef	A	68,9	abcd	AB	<b>72,2</b>	cd	AB	<b>73,1</b>	cdef	B
<b>105</b>	<b>2</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	68,1	bcdefgh	A	<b>72,7</b>	cdef	AB	<b>75,3</b>	cd	AB	<b>75,8</b>	def	B
<b>110</b>	<b>2</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	61,9	abc	A	68,5	abc	B	<b>72,0</b>	cd	B	<b>74,0</b>	def	C
<b>100</b>	<b>3</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	65,6	abcdefg	A	<b>70,3</b>	cdef	AB	<b>74,0</b>	cd	AB	<b>73,4</b>	def	B
<b>105</b>	<b>3</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	68,1	bcdefgh	A	<b>74,5</b>	cdef	B	<b>78,6</b>	d	B	<b>78,6</b>	ef	B
<b>110</b>	<b>3</b>	<b>45</b>	<b>15</b>	62,5	abcd	A	<b>70,0</b>	bcdef	B	<b>72,2</b>	cd	B	<b>72,3</b>	cdef	B

Os melhores resultados obtidos após a análise estatística estão destacados na Tabela.

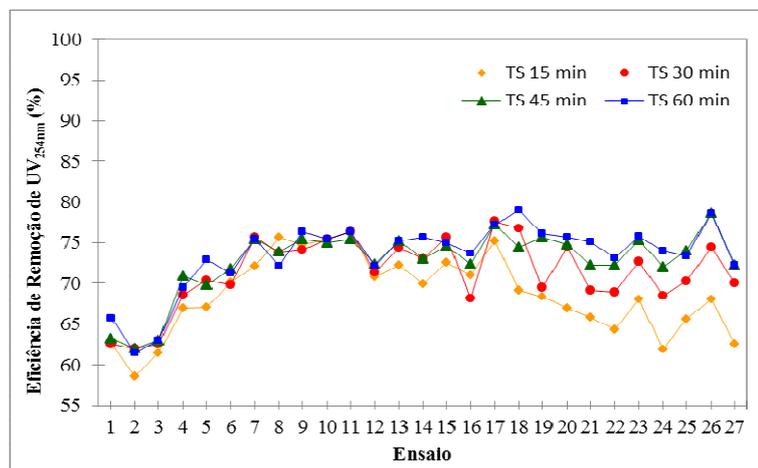
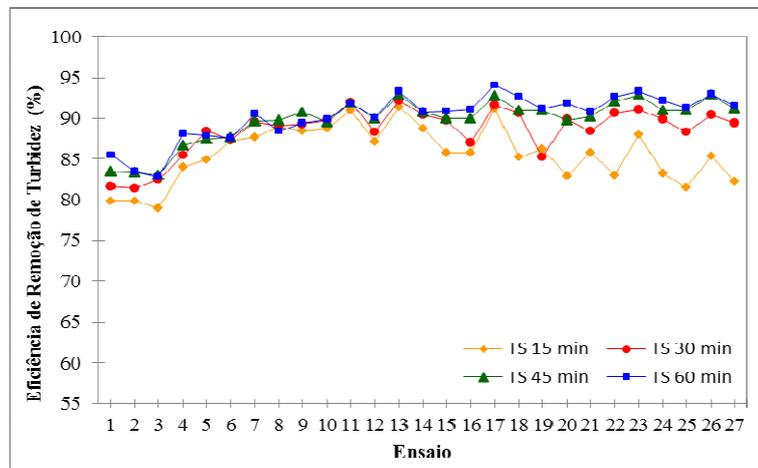
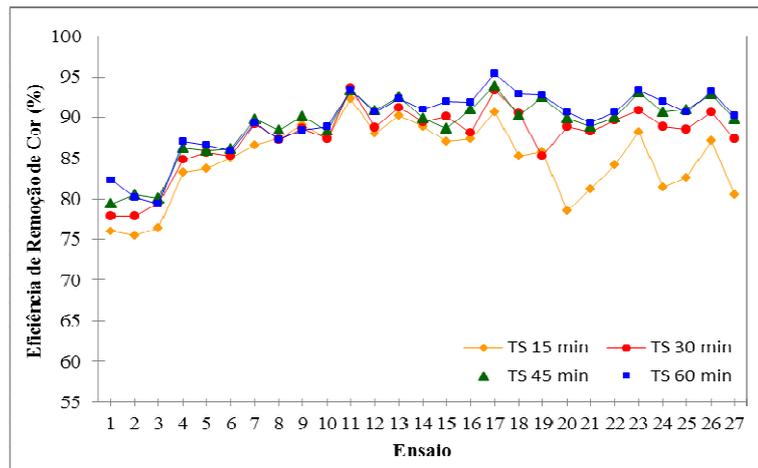
(\*) Os valores apresentados se referem às médias das eficiências de remoção obtidas para o parâmetro compostos com absorção em UV<sub>254nm</sub>.

(1) Dentro de uma mesma coluna, as médias seguidas por mesma letra minúscula não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de nível de significância. A interpretação dos resultados deve ser realizada em relação aos valores dispostos na vertical (coluna).

(2) Dentro de uma mesma linha, as médias seguidas por mesma letra maiúscula não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de nível de significância. A interpretação dos resultados deve ser realizada em relação aos valores dispostos na horizontal (linha).

**APÊNDICE N – Figuras das eficiências de remoção para as condições de operação estudadas na etapa de coagulação/floculação e sedimentação (*M. oleifera* e sulfato de alumínio)**

Esse apêndice apresenta as Figuras dos valores das eficiências de remoção obtidos para os parâmetros: cor aparente, turbidez e compostos com absorção em UV<sub>254nm</sub>, para as condições de operação estudadas na etapa de coagulação/floculação e sedimentação com a associação dos coagulantes *M. oleifera* e sulfato de alumínio.



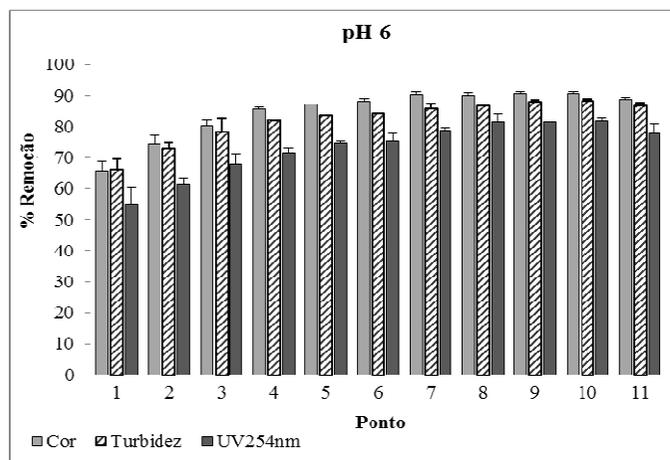
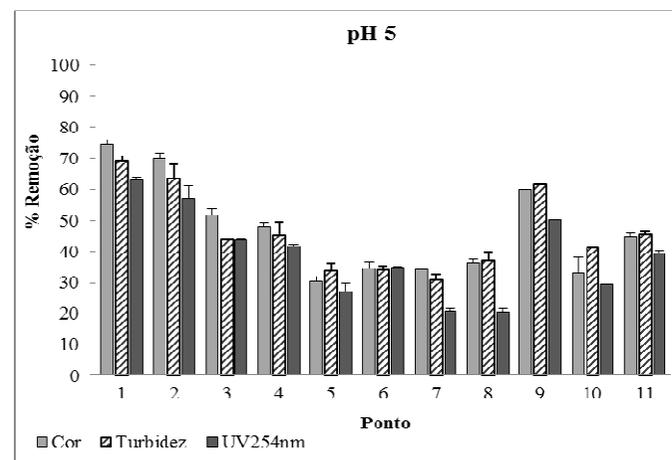
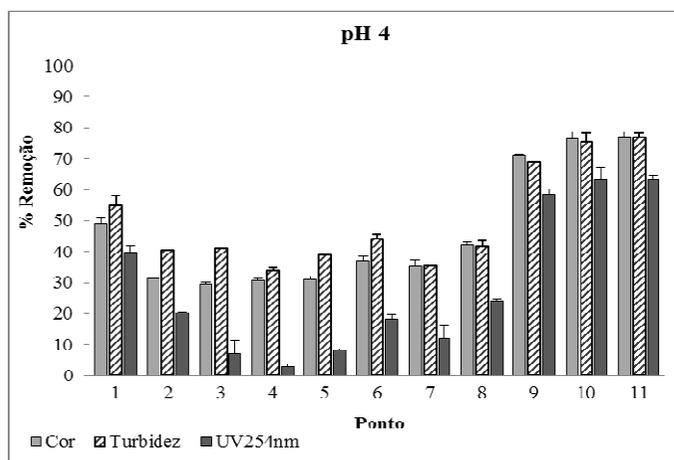
**APÊNDICE O** – Valores residuais obtidos para as condições de operação estudadas (*M. oleifera* e sulfato de alumínio)

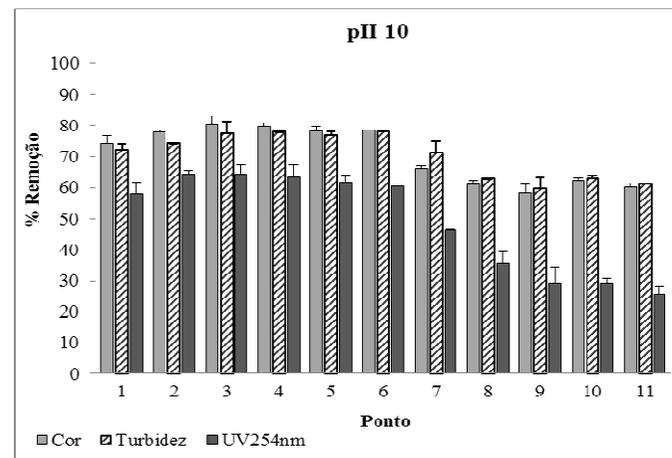
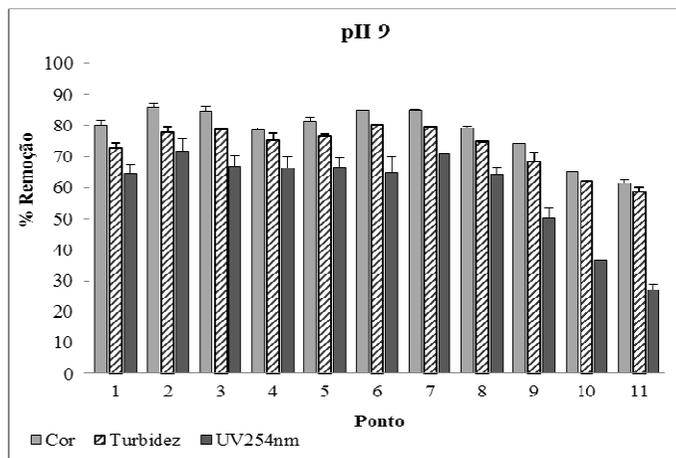
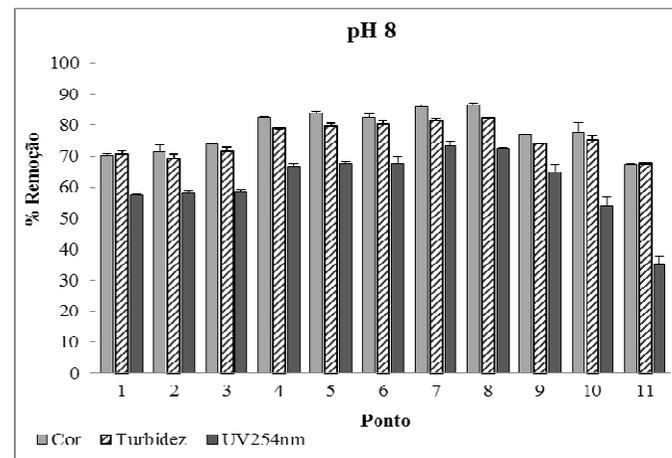
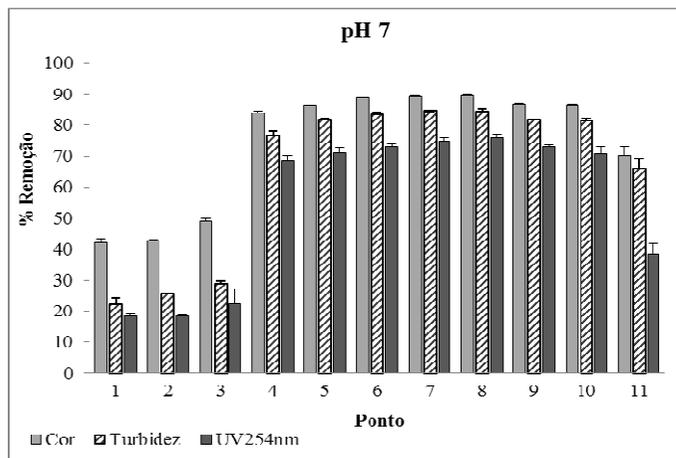
V <sub>MR</sub> (rpm)	T <sub>MR</sub> (min)	V <sub>ML</sub> (rpm)	T <sub>ML</sub> (min)	TEMPOS DE SEDIMENTAÇÃO (T <sub>s</sub> )											
				15 min			30 min			45 min			60 min		
				VALORES RESIDUAIS			VALORES RESIDUAIS			VALORES RESIDUAIS			VALORES RESIDUAIS		
				COR	TURBIDEZ	UV <sub>254nm</sub>	COR	TURBIDEZ	UV <sub>254nm</sub>	COR	TURBIDEZ	UV <sub>254nm</sub>	COR	TURBIDEZ	UV <sub>254nm</sub>
100	1	15	15	92	14,6	0,105	85	13,3	0,105	79	11,9	0,103	68	10,5	0,096
105	1	15	15	94	14,5	0,116	85	13,5	0,107	75	12,0	0,107	76	11,9	0,108
110	1	15	15	91	15,2	0,108	79	12,7	0,105	77	12,3	0,104	79	12,5	0,104
100	2	15	15	64	11,6	0,093	59	10,5	0,088	53	9,6	0,082	50	8,6	0,086
105	2	15	15	63	10,9	0,092	55	8,3	0,083	54	9,0	0,085	52	8,8	0,076
110	2	15	15	58	9,3	0,084	57	9,1	0,085	54	8,9	0,079	54	9,0	0,081
100	3	15	15	52	8,9	0,078	42	7,5	0,068	39	7,5	0,069	41	6,9	0,069
105	3	15	15	48	8,0	0,068	49	7,9	0,074	44	7,4	0,073	49	8,4	0,078
110	3	15	15	42	8,4	0,071	44	7,7	0,073	38	6,6	0,069	44	7,7	0,067
100	1	30	15	48	8,1	0,069	49	7,4	0,069	45	7,6	0,070	43	7,3	0,069
105	1	30	15	30	6,5	0,065	25	5,8	0,065	26	5,9	0,067	26	5,9	0,065
110	1	30	15	47	9,3	0,080	44	8,4	0,079	36	7,3	0,076	36	7,2	0,077
100	2	30	15	38	6,2	0,076	34	5,6	0,071	29	5,1	0,068	30	4,9	0,068
105	2	30	15	43	8,1	0,083	41	7,0	0,074	39	6,6	0,074	35	6,6	0,067
110	2	30	15	51	10,3	0,075	39	7,4	0,067	44	7,2	0,070	35	6,6	0,069
100	3	30	15	49	10,3	0,080	46	9,4	0,087	35	7,2	0,076	32	6,4	0,072
105	3	30	15	36	6,4	0,068	26	6,0	0,062	24	5,2	0,063	18	4,3	0,063
110	3	30	15	58	10,7	0,085	37	6,8	0,064	38	6,5	0,070	28	5,4	0,058
100	1	45	15	55	10,0	0,087	58	10,6	0,084	29	6,5	0,067	28	6,4	0,066
105	1	45	15	84	12,4	0,091	43	7,3	0,070	39	7,4	0,069	37	5,9	0,067
110	1	45	15	73	10,4	0,093	46	8,4	0,084	43	7,2	0,076	42	6,7	0,068
100	2	45	15	62	12,4	0,098	40	6,9	0,085	39	5,8	0,076	36	5,4	0,074
105	2	45	15	46	8,8	0,087	36	6,5	0,075	27	5,2	0,068	26	4,9	0,066
110	2	45	15	73	12,2	0,104	43	7,4	0,086	36	6,6	0,077	31	5,7	0,071
100	3	45	15	68	13,6	0,094	45	8,5	0,081	35	6,6	0,071	36	6,4	0,073
105	3	45	15	50	10,7	0,087	36	7,0	0,070	28	5,2	0,059	27	5,1	0,059
110	3	45	15	76	13,0	0,103	49	7,8	0,082	40	6,4	0,076	38	6,2	0,076

Unidades: Cor aparente = uH; Turbidez = UNT; Compostos com absorção em UV<sub>254nm</sub> = cm<sup>-1</sup>

**APÊNDICE P** – Eficiências de remoção obtidas para a construção dos diagramas de coagulação da associação dos coagulantes *M. oleifera* e cloreto férrico

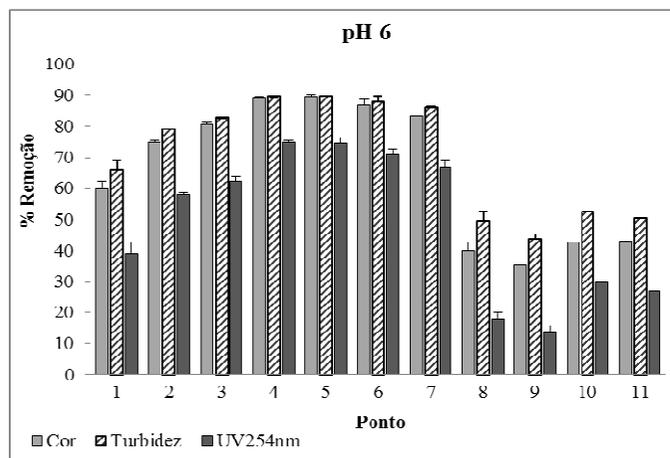
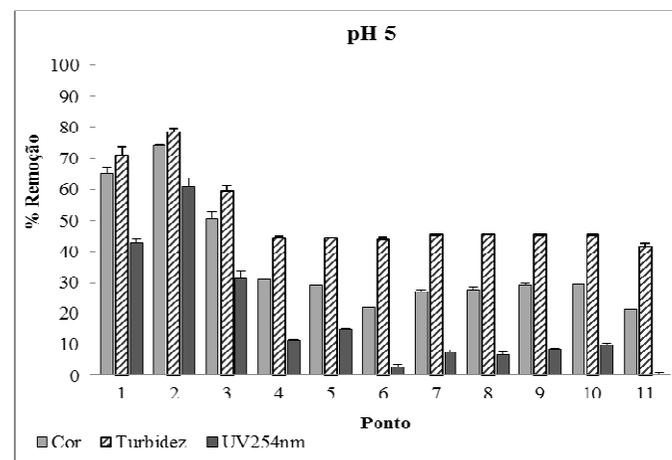
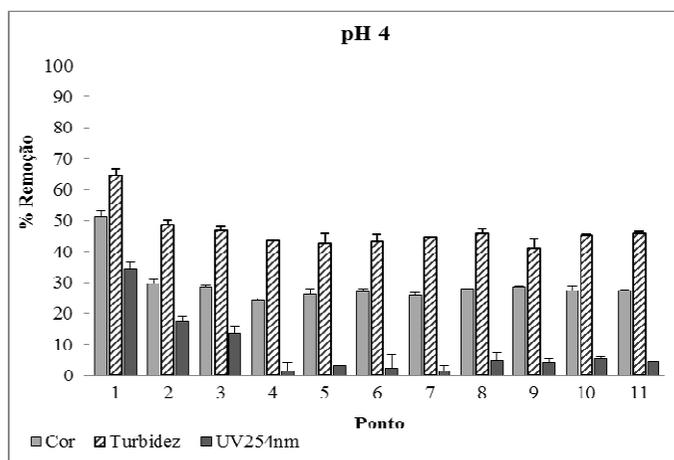
Esse apêndice demonstra as eficiências de remoção obtidas na associação dos coagulantes considerando variações nos pHs de coagulação e dosagens dos coagulantes *M. oleifera* e cloreto férrico.

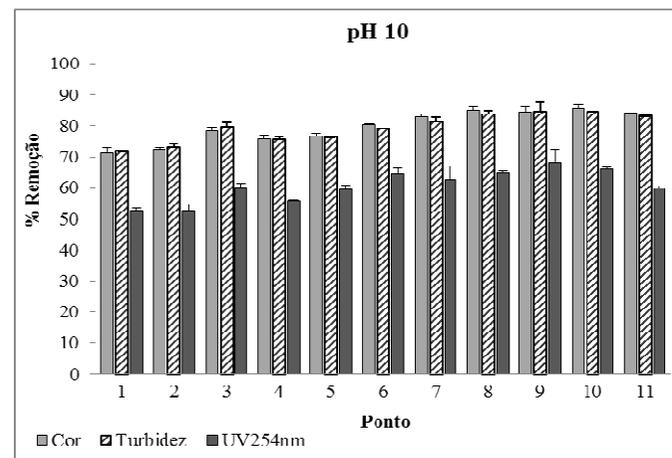
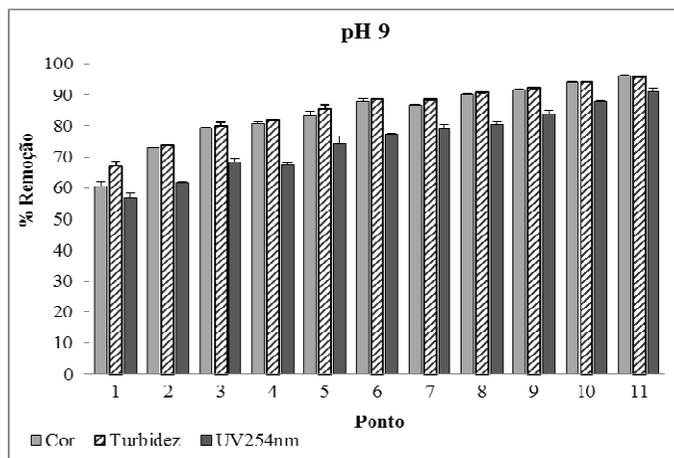
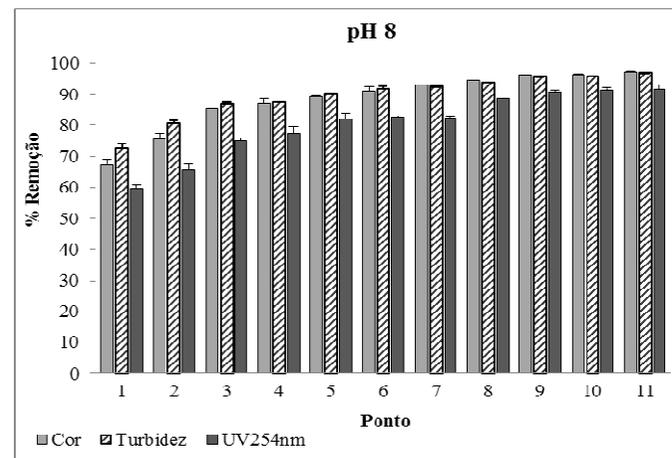
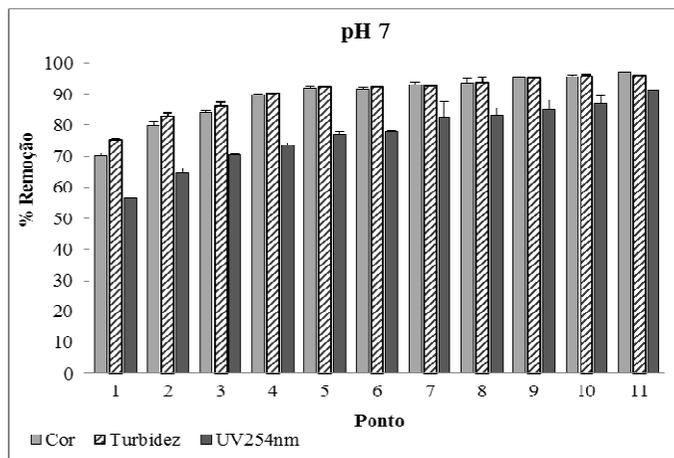




**APÊNDICE Q –** Eficiências de remoção obtidas para a construção dos diagramas de coagulação da associação dos coagulantes *M. oleifera* e PAC

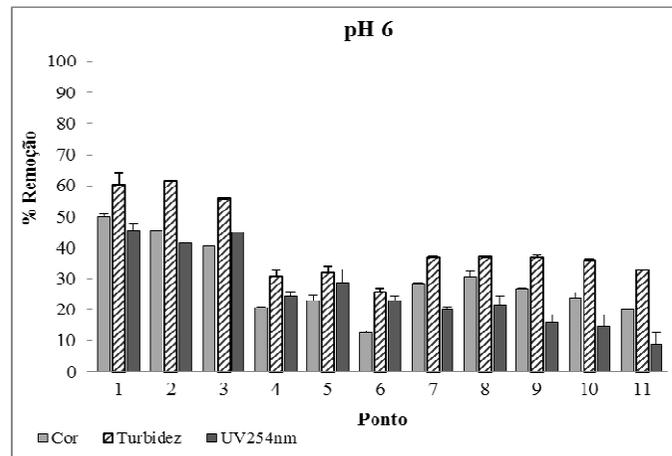
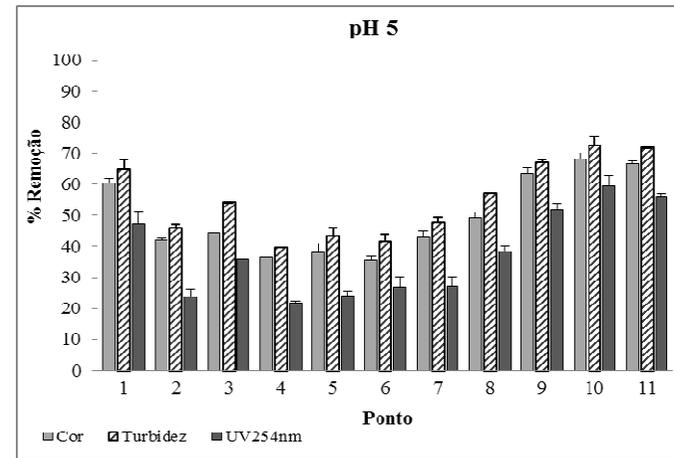
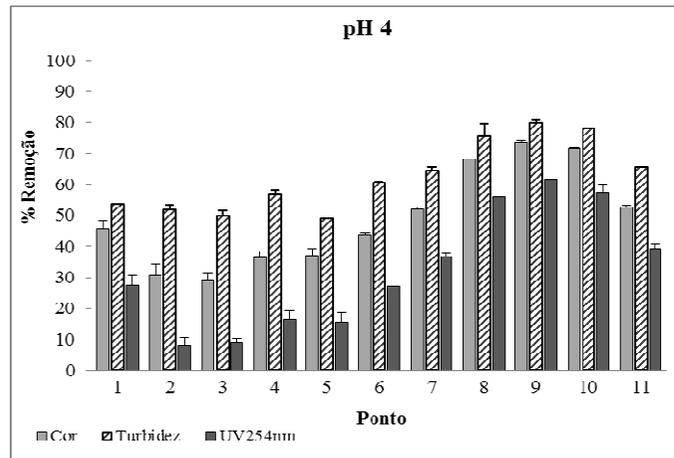
Esse apêndice demonstra as eficiências de remoção obtidas na associação dos coagulantes considerando variações nos pHs de coagulação e dosagens dos coagulantes *M. oleifera* e PAC.

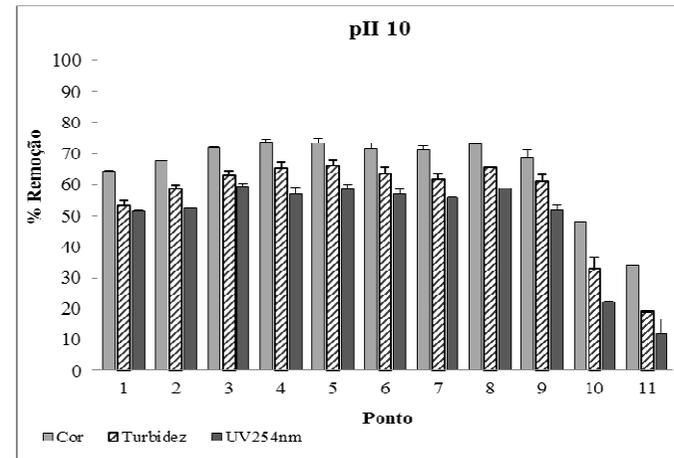
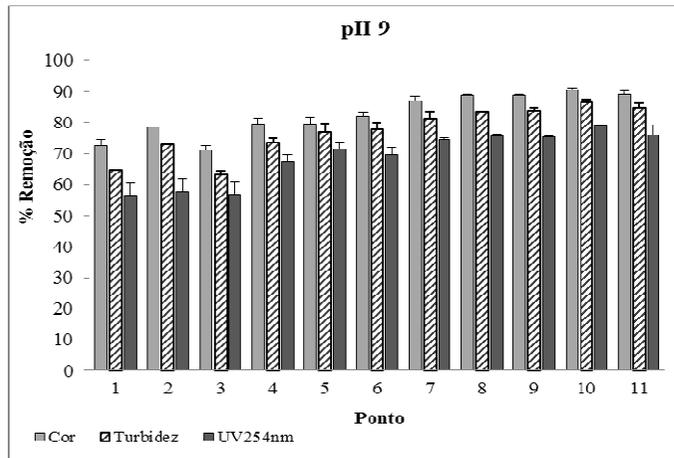
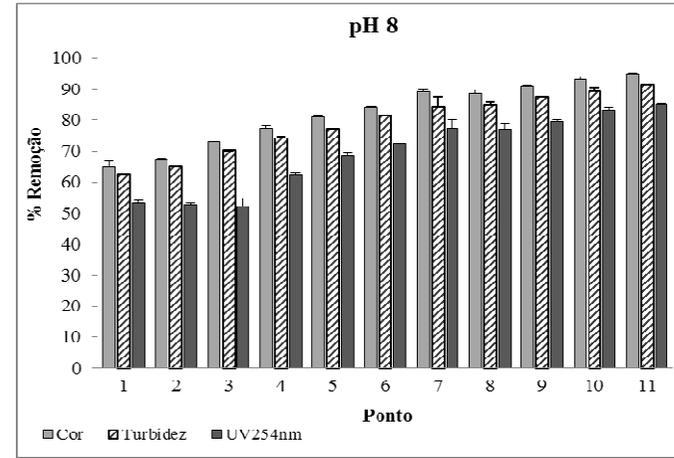
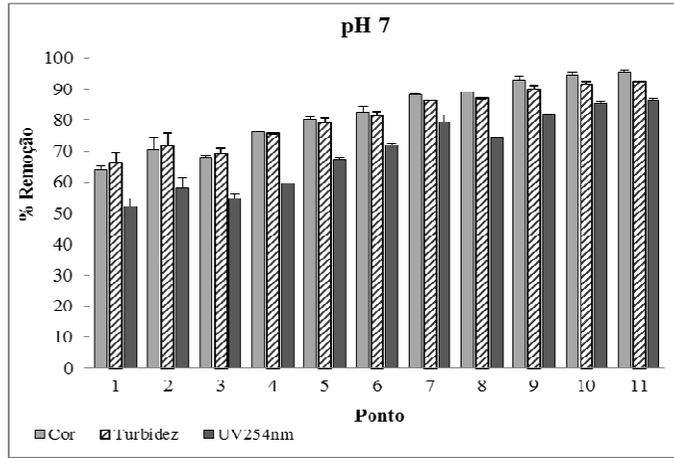




**APÊNDICE R** – Eficiências de remoção obtidas para a construção dos diagramas de coagulação da associação dos coagulantes *M. oleifera* e sulfato de alumínio

Esse apêndice demonstra as eficiências de remoção obtidas na associação dos coagulantes considerando variações nos pHs de coagulação e dosagens dos coagulantes *M. oleifera* e sulfato de alumínio.





**APÊNDICE S** – Valores residuais e eficiências de remoção obtidos após a etapa de filtração para a associação dos coagulantes *M. oleifera* e cloreto férrico

Esse apêndice apresenta os valores residuais para os parâmetros: cor aparente e turbidez, assim como as eficiências de remoção obtidos considerando o tempo de filtração de 21 min, com a associação dos coagulantes: 80% *M. oleifera* e 20% cloreto férrico, e 60% *M. oleifera* e 40% cloreto férrico, respectivamente.

Associação dos coagulantes: 80% <i>M. oleifera</i> e 20% cloreto férrico											
TEMPOS (min)	VAZÕES (mL.min <sup>-1</sup> )	COR APARENTE					TURBIDEZ				
		Residual		% Remoção		Desvio	Residual		% Remoção		Desvio
0	530	4	4	99,0	99,1	0,17	3,07	3,11	96,2	96,2	0,06
		3		99,3			3,14		96,1		
3	520	5	6	98,8	98,5	0,35	3,09	3,12	96,2	96,1	0,05
		7		98,3			3,15		96,1		
6	535	5	8	98,8	98,2	0,87	3,42	3,51	95,8	95,7	0,15
		10		97,5			3,59		95,6		
9	535	8	8	98,0	98,0	0,00	3,28	3,38	95,9	95,8	0,18
		8		98,0			3,48		95,7		
12	530	5	6	98,8	98,5	0,35	3,28	3,35	95,9	95,9	0,12
		7		98,3			3,42		95,8		
15	530	7	7	98,3	98,3	0,00	3,48	3,47	95,7	95,7	0,03
		7		98,3			3,45		95,7		
18	535	5	6	98,8	98,5	0,35	3,32	3,42	95,9	95,8	0,17
		7		98,3			3,51		95,7		
21	535	5	5	98,8	98,8	0,00	3,41	3,50	95,8	95,7	0,15
		5		98,8			3,58		95,6		

Associação dos coagulantes: 60% <i>M. oleifera</i> e 40% cloreto férrico											
TEMPOS (min)	VAZÕES (mL.min <sup>-1</sup> )	COR APARENTE					TURBIDEZ				
		Residual		% Remoção		Desvio	Residual		% Remoção		Desvio
<b>0</b>	540	4	<b>5</b>	99,0	<b>98,9</b>	0,17	3,15	<b>3,14</b>	96,1	<b>96,1</b>	0,03
		5		98,8			3,12		96,1		
<b>3</b>	525	5	<b>4</b>	98,8	<b>99,0</b>	0,35	2,85	<b>2,81</b>	96,5	<b>96,5</b>	0,08
		3		99,3			2,76		96,6		
<b>6</b>	530	4	<b>4</b>	99,0	<b>99,0</b>	0,00	2,92	<b>3,02</b>	96,4	<b>96,3</b>	0,18
		4		99,0			3,12		96,1		
<b>9</b>	525	5	<b>5</b>	98,8	<b>98,9</b>	0,17	3,17	<b>3,18</b>	96,1	<b>96,1</b>	0,02
		4		99,0			3,19		96,1		
<b>12</b>	525	5	<b>6</b>	98,8	<b>98,7</b>	0,17	2,98	<b>3,04</b>	96,3	<b>96,2</b>	0,11
		6		98,5			3,10		96,2		
<b>15</b>	535	5	<b>5</b>	98,8	<b>98,8</b>	0,00	3,13	<b>3,27</b>	96,1	<b>96,0</b>	0,24
		5		98,8			3,40		95,8		
<b>18</b>	540	5	<b>5</b>	98,8	<b>98,8</b>	0,00	3,47	<b>3,47</b>	95,7	<b>95,7</b>	0,01
		5		98,8			3,46		95,7		
<b>21</b>	540	5	<b>5</b>	98,8	<b>98,8</b>	0,00	3,78	<b>3,81</b>	95,3	<b>95,3</b>	0,04
		5		98,8			3,83		95,3		

**APÊNDICE T** – Valores residuais e eficiências de remoção obtidos após a etapa de filtração para a associação dos coagulantes *M. oleifera* e PAC

Esse apêndice apresenta os valores residuais para os parâmetros: cor aparente e turbidez, assim como as eficiências de remoção obtidos considerando o tempo de filtração de 21 min, com a associação dos coagulantes: 80% *M. oleifera* e 20% PAC, e 60% *M. oleifera* e 40% PAC, respectivamente.

Associação dos coagulantes: 80% <i>M. oleifera</i> e 20% PAC											
TEMPOS (min)	VAZÕES (mL.min <sup>-1</sup> )	COR APARENTE					TURBIDEZ				
		Residual		% Remoção		Desvio	Residual		% Remoção		Desvio
<b>0</b>	540	0	<b>1</b>	100,0	<b>99,9</b>	0,18	2,49	<b>2,54</b>	96,7	<b>96,7</b>	0,08
		1		99,7			2,58		96,6		
<b>3</b>	540	0	<b>1</b>	100,0	<b>99,9</b>	0,18	2,53	<b>2,57</b>	96,7	<b>96,6</b>	0,07
		1		99,7			2,61		96,6		
<b>6</b>	540	0	<b>1</b>	100,0	<b>99,9</b>	0,18	2,71	<b>2,67</b>	96,5	<b>96,5</b>	0,07
		1		99,7			2,63		96,6		
<b>9</b>	535	1	<b>1</b>	99,7	<b>99,9</b>	0,18	2,46	<b>2,42</b>	96,8	<b>96,8</b>	0,07
		0		100,0			2,38		96,9		
<b>12</b>	535	0	<b>0</b>	100,0	<b>100,0</b>	0,00	2,48	<b>2,51</b>	96,8	<b>96,7</b>	0,06
		0		100,0			2,54		96,7		
<b>15</b>	530	0	<b>1</b>	100,0	<b>99,9</b>	0,18	2,52	<b>2,58</b>	96,7	<b>96,6</b>	0,10
		1		99,7			2,63		96,6		
<b>18</b>	535	0	<b>1</b>	100,0	<b>99,7</b>	0,36	2,75	<b>2,78</b>	96,4	<b>96,4</b>	0,06
		2		99,5			2,81		96,3		
<b>21</b>	530	1	<b>1</b>	99,7	<b>99,7</b>	0,00	2,89	<b>2,85</b>	96,2	<b>96,3</b>	0,07
		1		99,7			2,81		96,3		

Associação dos coagulantes: 60% <i>M. oleifera</i> e 40% PAC											
TEMPOS (min)	VAZÕES (mL.min <sup>-1</sup> )	COR APARENTE					TURBIDEZ				
		Residual		% Remoção		Desvio	Residual		% Remoção		Desvio
<b>0</b>	535	3	<b>3</b>	99,2	<b>99,3</b>	0,20	1,80	<b>1,76</b>	97,8	<b>97,8</b>	0,07
		2		99,4			1,72		97,9		
<b>3</b>	540	0	<b>1</b>	100,0	<b>99,7</b>	0,39	1,78	<b>1,78</b>	97,8	<b>97,8</b>	0,00
		2		99,4			1,78		97,8		
<b>6</b>	535	0	<b>0</b>	100,0	<b>100,0</b>	0,00	1,85	<b>1,88</b>	97,7	<b>97,7</b>	0,05
		0		100,0			1,91		97,7		
<b>9</b>	525	0	<b>1</b>	100,0	<b>99,9</b>	0,20	1,91	<b>1,90</b>	97,7	<b>97,7</b>	0,02
		1		99,7			1,89		97,7		
<b>12</b>	530	3	<b>3</b>	99,2	<b>99,3</b>	0,20	2,09	<b>2,05</b>	97,4	<b>97,5</b>	0,08
		2		99,4			2,00		97,5		
<b>15</b>	535	0	<b>1</b>	100,0	<b>99,7</b>	0,39	2,11	<b>2,11</b>	97,4	<b>97,4</b>	0,01
		2		99,4			2,10		97,4		
<b>18</b>	535	1	<b>1</b>	99,7	<b>99,9</b>	0,20	2,13	<b>2,13</b>	97,4	<b>97,4</b>	0,01
		0		100,0			2,12		97,4		
<b>21</b>	530	1	<b>1</b>	99,7	<b>99,7</b>	0,00	2,23	<b>2,23</b>	97,3	<b>97,3</b>	0,01
		1		99,7			2,22		97,3		

**APÊNDICE U** – Valores residuais e eficiências de remoção obtidos após a etapa de filtração para a associação dos coagulantes *M. oleifera* e sulfato de alumínio

Esse apêndice apresenta os valores residuais para os parâmetros: cor aparente e turbidez, assim como as eficiências de remoção obtidos considerando o tempo de filtração de 21 min, com a associação dos coagulantes: 80% *M. oleifera* e 20% sulfato de alumínio, e 60% *M. oleifera* e 40% sulfato de alumínio, respectivamente.

Associação dos coagulantes: 80% <i>M. oleifera</i> e 20% sulfato de alumínio											
TEMPOS (min)	VAZÕES (mL.min <sup>-1</sup> )	COR APARENTE					TURBIDEZ				
		Residual		% Remoção		Desvio	Residual		% Remoção		Desvio
<b>0</b>	540	5	<b>4</b>	98,9	<b>99,1</b>	0,32	3,82	<b>3,85</b>	95,2	<b>95,2</b>	0,04
		3		99,3			3,87		95,1		
<b>3</b>	525	2	<b>3</b>	99,5	<b>99,4</b>	0,16	3,57	<b>3,56</b>	95,5	<b>95,5</b>	0,03
		3		99,3			3,54		95,6		
<b>6</b>	530	5	<b>6</b>	98,9	<b>98,6</b>	0,32	3,96	<b>3,97</b>	95,0	<b>95,0</b>	0,02
		7		98,4			3,98		95,0		
<b>9</b>	525	6	<b>5</b>	98,6	<b>98,9</b>	0,32	3,82	<b>3,79</b>	95,2	<b>95,3</b>	0,06
		4		99,1			3,75		95,3		
<b>12</b>	525	4	<b>5</b>	99,1	<b>99,0</b>	0,16	3,88	<b>3,94</b>	95,1	<b>95,1</b>	0,10
		5		98,9			3,99		95,0		
<b>15</b>	535	7	<b>7</b>	98,4	<b>98,5</b>	0,16	4,03	<b>4,03</b>	94,9	<b>94,9</b>	0,00
		6		98,6			4,03		94,9		
<b>18</b>	540	5	<b>6</b>	98,9	<b>98,8</b>	0,16	3,79	<b>3,81</b>	95,2	<b>95,2</b>	0,03
		6		98,6			3,82		95,2		
<b>21</b>	540	4	<b>4</b>	99,1	<b>99,1</b>	0,00	3,79	<b>3,84</b>	95,2	<b>95,2</b>	0,09
		4		99,1			3,89		95,1		

Associação dos coagulantes: 60% <i>M. oleifera</i> e 40% sulfato de alumínio											
TEMPOS (min)	VAZÕES (mL.min <sup>-1</sup> )	COR APARENTE					TURBIDEZ				
		Residual		% Remoção		Desvio	Residual		% Remoção		Desvio
<b>0</b>	535	3	<b>4</b>	99,3	<b>99,0</b>	0,34	3,28	<b>3,33</b>	96,0	<b>95,9</b>	0,09
		5		98,8			3,38		95,8		
<b>3</b>	535	5	<b>5</b>	98,8	<b>98,9</b>	0,17	3,43	<b>3,39</b>	95,8	<b>95,8</b>	0,07
		4		99,0			3,35		95,9		
<b>6</b>	535	5	<b>5</b>	98,8	<b>98,8</b>	0,00	3,74	<b>3,73</b>	95,4	<b>95,4</b>	0,03
		5		98,8			3,71		95,4		
<b>9</b>	525	6	<b>5</b>	98,6	<b>98,8</b>	0,34	3,43	<b>3,53</b>	95,8	<b>95,7</b>	0,17
		4		99,0			3,62		95,6		
<b>12</b>	540	6	<b>6</b>	98,6	<b>98,7</b>	0,17	3,78	<b>3,77</b>	95,4	<b>95,4</b>	0,02
		5		98,8			3,76		95,4		
<b>15</b>	540	7	<b>8</b>	98,3	<b>98,2</b>	0,17	4,03	<b>4,01</b>	95,0	<b>95,1</b>	0,03
		8		98,1			3,99		95,1		
<b>18</b>	540	9	<b>8</b>	97,9	<b>98,1</b>	0,34	3,67	<b>3,73</b>	95,5	<b>95,4</b>	0,10
		7		98,3			3,78		95,4		
<b>21</b>	540	5	<b>5</b>	98,8	<b>98,9</b>	0,17	3,68	<b>3,69</b>	95,5	<b>95,5</b>	0,01
		4		99,0			3,69		95,5		

## **ANEXOS**

### ANEXO A – Caracterização das sementes de *M. oleifera*

Esse anexo demonstra a caracterização das sementes de *M. oleifera* provenientes da Universidade Federal do Sergipe (UFS), Aracaju, SE.

<b>Composição</b>	<b>Valores (%) <sup>(1)</sup></b>
Umidade	10,85 ± 1,09
Cinzas	3,59 ± 0,06
Proteínas	40,72 ± 0,42
Lipídeos	37,00 ± 0,18
Carboidratos <sup>(2)</sup>	7,84 ± 0,78

(1) Resultados expressos em valores médios (triplicata) ± desvio padrão.

(2) Carboidratos obtidos por diferença.

Fonte: (SILVA, 2013)

<b>Composição em minerais</b>	<b>Valores <sup>(1)</sup> (mg/100 g de sementes secas)</b>
Potássio (K)	536,24 ± 2,50
Cálcio (Ca)	276,06 ± 4,00
Magnésio (Mg)	289,95 ± 1,40
Ferro (Fe)	86,49 ± 1,80
Manganês (Mn)	3,28 ± 0,08
Cobre (Cu)	2,90 ± 0,20
Zinco (Zn)	8,29 ± 0,20

(1) Resultados expressos em valores médios (triplicata) ± desvio padrão.

Fonte: (SILVA, 2013)

**ANEXO B – Alcalinidade e acidez volátil**

Utilize um volume da amostra definido (preferencialmente 100 mL), meça o pH da amostra e titule com H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,02N ou 0,01N até pH 4.

O volume gasto na titulação é utilizado para calcular a alcalinidade total em CaCO<sub>3</sub>, com a seguinte equação.

$$\text{Alcalinidade (mg CaCO}_3\text{.L}^{-1}\text{ ou kg)} = \frac{V_a \times N \times 50.000}{\text{amostra}}$$

V<sub>a</sub> = Volume do H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> gasto na titulação (mL);

N = Normalidade do H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>;

Amostra = Quantidade de amostra utilizada (mL ou g).

Adicione H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,02N até o pH 3,5 a 3,3.

Coloque o béquer sobre uma tela de amianto e aqueça levemente (para eliminar o CO<sub>2</sub> formado na reação) em ebulição por exatamente 3 min. Esfrie em um banho de água até a temperatura ambiente.

Com NaOH 0,1N ou 0,05N eleve o pH da solução para 4 (V<sub>1</sub>). Anote a leitura da bureta.

Complete a titulação até pH 7 (V<sub>2</sub>).

A acidez volátil será calculada com a fórmula abaixo.

$$\text{Acidez volátil (mg CH}_3\text{COOH. L}^{-1}\text{ ou kg)} = \frac{V_b \times N \times 60.000}{\text{amostra}}$$

V<sub>b</sub> = Volume do NaOH gasto na titulação para o aumento do pH de 4 a 7 (mL) = V<sub>2</sub> – V<sub>1</sub>;

N = Normalidade do NaOH;

Amostra = Quantidade de amostra utilizada (mL ou g).

**ANEXO C – Dureza total***Soluções:*

- Solução de EDTA 0,0025M: Dissolver 0,930 g do sal dissódico de EDTA em 1 L de água deionizada.
- Solução Tampão para Dureza Total: Dissolver 67,5 g de NH<sub>4</sub>Cl em 570 mL de NH<sub>4</sub>OH. Adicionar 10 g de cloridrato de hidroxilamina e avolumar a 1 L com água deionizada.
- Solução de Negro de Eriocromo T: Misturar 100 mL de etilenoglicol, 1 g de negro de ericromo T, e 100 mL de dietabolamina.

*Procedimento Experimental:*

Em uma cápsula de porcelana, adicionar 50 mL de amostra.

Adicionar 2 mL de solução tampão para dureza total.

Adicionar 2 gotas da solução de negro de eriocromo T.

Titular com EDTA 0,0025M, até que a coloração mude completamente de vermelha violeta para azul.

O valor da dureza é obtido pela seguinte equação:

$$Dureza \left( mg \text{ CaCO}_3 \cdot L^{-1} \right) = \frac{A \times N \times 50000}{V_{amostra}}$$

$V_{amostra}$  = volume da amostra

A = Volume da solução padrão de EDTA gasto na titulação (mL)

N = Normalidade da solução de EDTA

**ANEXO D – Sólidos suspensos totais, fixos e voláteis**

Colocar um disco de papel de fibra de vidro no aparelho de sucção com a bomba de vácuo ligada, lavando o filtro com 3 sucessivos volumes de 20 mL de água destilada. Remover toda a água com a aplicação de vácuo.

Retirar o papel de filtro de fibra de vidro do aparelho e levar à estufa por 1 h e após, à mufla a 550°C por 30 min. Deixar no dessecador até resfriamento total.

*Análise de Sólidos Suspensos Totais:*

Pesar o papel de fibra de vidro preparado acima, obtendo-se  $P_1$  (g). Agitar a amostra e tomar, preferencialmente 150 mL em uma proveta graduada e filtrar. Remover cuidadosamente o papel com o resíduo retido. Levar à estufa a 105-110°C durante 12 h, ou até peso constante. Esfriar no dessecador e pesar, obtendo  $P_2$  (g).

Para calcular os sólidos suspensos totais utiliza-se a fórmula:

$$SST \text{ (mg.L}^{-1}\text{)} = \frac{(P_2 - P_1) \times 1000000}{V_A}$$

$V_A$  = volume da amostra (mL)

*Análise de Sólidos Suspensos Fixos e Voláteis:*

Levar o papel com o resíduo à mufla a 550°C por 1 h. Deixar em seguida no dessecador até esfriamento total, pesar, obtendo-se  $P_3$  (g).

As equações para determinar os sólidos suspensos fixos e voláteis são, respectivamente:

$$SSF \text{ (mg.L}^{-1}\text{)} = \frac{(P_3 - P_1) \times 1000000}{V_A}$$

$$SSV \text{ (mg.L}^{-1}\text{)} = \frac{(P_2 - P_3) \times 1000000}{V_A}$$

**ANEXO E – Sólidos totais, fixos e voláteis; Sólidos dissolvidos totais (APHA, 1995)***Sólidos totais, fixos e voláteis*

Tarar uma cápsula de porcelana limpa e seca, colocando-a na mufla (550°C) por 30 min, esfriar em dessecador e pesar ( $P_1$ ).

Adicionar à cápsula um volume conhecido de amostra (preferencialmente 50 mL) previamente homogeneizada. Levar a cápsula à estufa a 100°C, até secagem completa (cerca de 12 h). Esfriar em dessecador e pesar ( $P_2$ ).

Levar a cápsula à mufla (550°C) por 2 h. Esfriar em dessecador e pesar ( $P_3$ ).

*Cálculos:*

$$ST \text{ (mg.L}^{-1}\text{)} = \frac{(P_2 - P_1) \times 1000000}{V_A}$$

$$SF \text{ (mg.L}^{-1}\text{)} = \frac{(P_3 - P_1) \times 1000000}{V_A}$$

$$SV \text{ (mg.L}^{-1}\text{)} = \frac{(P_2 - P_3) \times 1000000}{V_A}$$

$V_A$  = volume da amostra (mL)

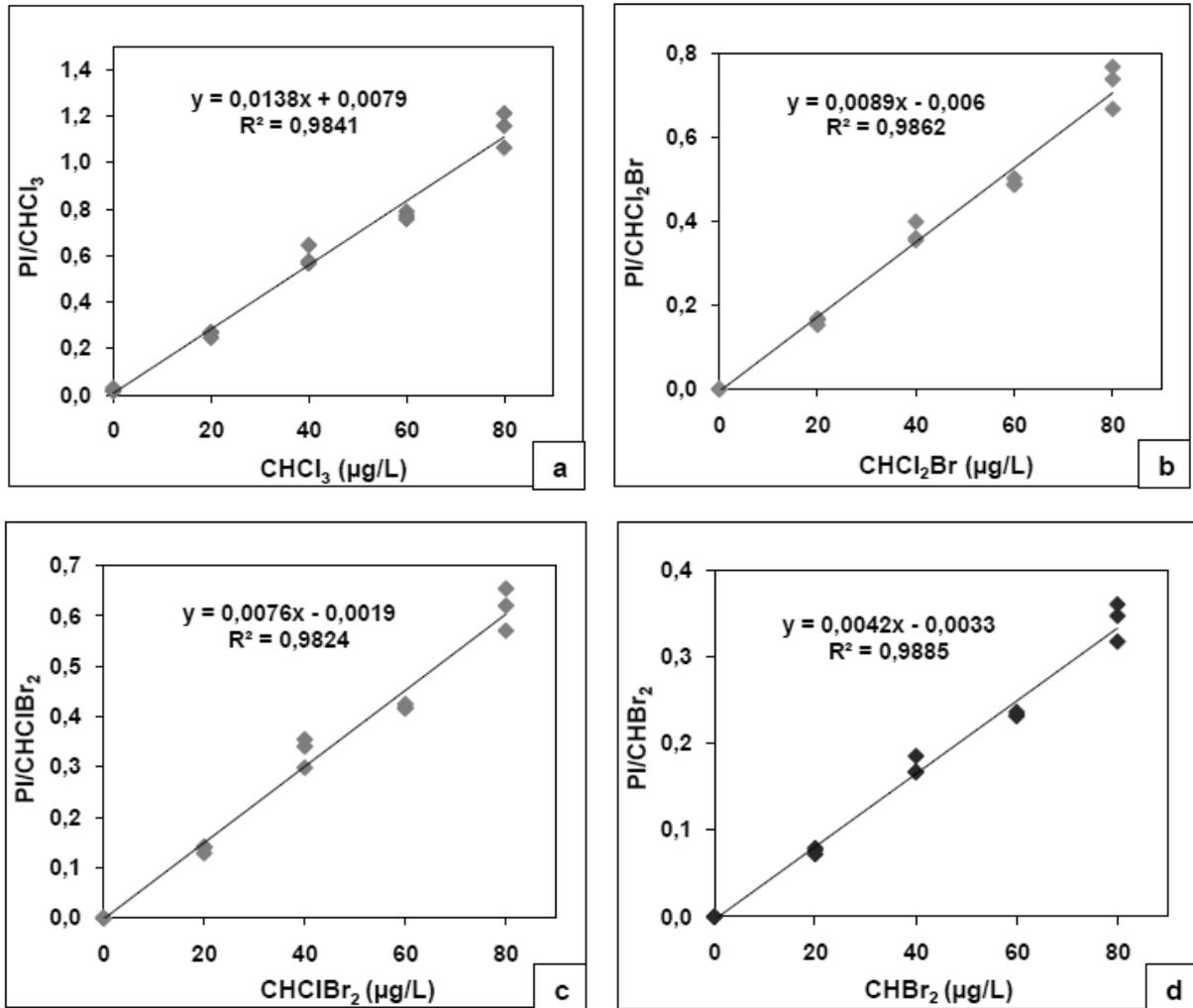
*Sólidos dissolvidos totais*

A metodologia para determinação dos sólidos dissolvidos é análoga a metodologia para a determinação dos sólidos suspensos, sendo que os sólidos dissolvidos são determinados pela amostra filtrada que passou pelo papel de filtro para a determinação dos sólidos suspensos. Os sólidos dissolvidos totais podem ser determinados pela equação:

$$SDT = ST - SST$$

## ANEXO F – Curvas de calibração para trihalometanos

Esse anexo apresenta as curvas de calibração de cada THM: clorofórmio (a), bromodiclorometano (b), dibromoclorometano (c) e bromofórmio (d).



Fonte: (BONGIOVANI, 2013)