

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

**EXTRAÇÃO/PURIFICAÇÃO DO COMPOSTO ATIVO DA SEMENTE DA
MORINGA OLEIFERA LAM E SUA UTILIZAÇÃO NO TRATAMENTO DE
ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO**

Grasiele Scaramal Madrona

Mestre em Engenharia Química, UEM, 2007.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Rosângela Bergamasco

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.

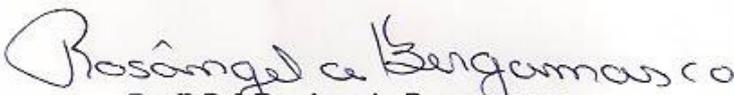
Maringá – PR – Brasil

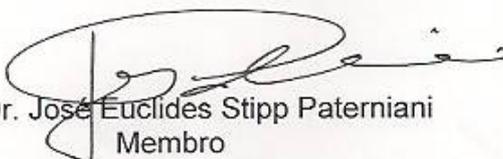
Dezembro de 2010

CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

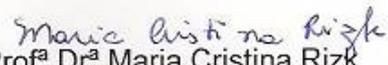
Esta é a versão final da Tese de Doutorado apresentada por Grasielle Scaramal Madrona perante a Comissão Julgadora do Curso de Doutorado em Engenharia Química em 03 de dezembro de 2010.

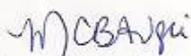
COMISSÃO JULGADORA


Prof^a Dr^a Rosângela Bergamasco
Orientadora


Prof. Dr. José Euclides Stipp Paterniani
Membro


Prof^a Dr^a Miria Hespanhol Miranda Reis
Membro


Prof^a Dr^a Maria Cristina Rizk
Membro


Prof^a Dr^a Miriam Carla Bonicontro Ambrosio Ugri
Membro

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

Madrona, Grasielle Scaramal
C182e Extração / Purificação do composto ativo da semente da
Moringa Oleifera Lam e sua utilização no tratamento de
água para consumo humano / Grasielle Scaramal Madrona. --
Maringá, 2011.
176 f. tabs., figs.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Rosângela Bergamasco.

Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Estadual
de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de
Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Química, 2010.

1. Água Potável. 2. *Moringa Oleifera* Lam. 3. Coagulação -
Floculação 4. Filtração com membranas. I. Bergamasco,
Rosângela, orient. II. Universidade Estadual de
Maringá... III. Título.

CDD 21.ed.:628.1

AGRADECIMENTOS:

Agradeço primeiramente a **Deus**, por tudo.

Ao **meu esposo** pela amizade, pela compreensão nos momentos de ausência, pela paciência e pela dedicação tão intensa.

Aos meus pais, **Gilberto e Angela** e as minhas irmãs, **Fernanda e Bianca**, minha família que eu tanto amo.

A professora **Rosângela Bergamasco**, pela amizade e orientação na realização deste trabalho, pela ajuda, paciência e entendimento em alguns momentos difíceis.

Às amigas **Miria, Silvana, Katita e Tatiana** que mesmo longe dividiram comigo as horas de alegria e tristeza. Hoje sei que tenho grandes amigas, algo tão difícil nos dias atuais.

À **Sanepar** – Maringá, em especial ao **Arcione**, o qual forneceu as amostras de água utilizadas na pesquisa, à **Universidade Federal de Sergipe** por ceder as amostras de Moringa Oleifera e à **Lucila** pelas análises de COD.

A algumas pessoas muito especiais, as quais tornaram possível a realização dos ensaios desta tese, com todo o trabalho e dedicação: **Vanessa, Geovanna, Bruno, Alessa, Renata e Rafaela**.

Às minhas queridas amigas e companheiras do laboratório **Leila**, por todos os ensinamentos; **Gisele e Flávia**, pelas conversas e “desafabos” e **Leticia** por tudo, principalmente pela ajuda no planejamento de experimentos; enfim a todos do LGCPA.

Aos funcionários do DEQ pelo apoio no decorrer do trabalho, principalmente ao Luisinho.

Ao Departamento de Engenharia Química pela oportunidade do curso de doutorado.

A todos que de alguma maneira colaboraram para a realização desta tese.

EXTRAÇÃO/PURIFICAÇÃO DO COMPOSTO ATIVO DA SEMENTE DA *MORINGA OLEIFERA* LAM E SUA UTILIZAÇÃO NO TRATAMENTO DE ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO

AUTOR: GRASIELE SCARAMAL MADRONA

ORIENTADORA: PROF.^a DR.^a ROSÂNGELA BERGAMASCO

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 03 de dezembro de 2010. 176 p.

RESUMO

Para um controle da qualidade da água é necessário o monitoramento de diversos indicadores. A preocupação com a contaminação de ambientes aquáticos aumenta, principalmente, quando a água é usada para o consumo humano. Sendo assim observa-se a grande importância no desenvolvimento de novas técnicas no tratamento para obtenção de água potável. Neste sentido, tem-se estudado a utilização de coagulantes naturais neste processo de tratamento, ao invés de coagulantes químicos, em função de vantagens, principalmente em relação à biodegradabilidade, baixa toxicidade e baixo índice de produção de lodos residuais. Dentre os diversos coagulantes naturais, destaca-se a polpa da semente do polímero natural conhecido como *Moringa oleifera* Lam, a qual atua como agente clarificante de águas devido à presença de uma proteína catiônica de alto peso molecular, que desestabiliza as partículas contidas na água. Ainda, há que se apontar que em decorrência da grande demanda por águas de melhor qualidade, o processo de filtração com membranas surge como uma alternativa de tecnologia eficiente. Aliado a este fato, a utilização de processos combinados como, por exemplo, a coagulação/floculação/sedimentação/filtração com membranas, tem sido objeto de estudo, tendo em vista significativa melhora na qualidade da água tratada, bem como diminuição do entupimento da membrana. Neste contexto, o presente trabalho avaliou a eficiência do coagulante natural *Moringa oleifera* Lam no processo de coagulação/floculação/sedimentação, seguido de filtração com membranas, para a obtenção de água potável. Realizou-se diferentes tipos de extração na obtenção do composto ativo da semente de *Moringa oleifera*, otimizando a etapa de coagulação/floculação/sedimentação, e posterior aplicação das condições ideais no processo de microfiltração com membranas 0,1 e 0,2 μm , para as pressões de 1 e 2 bar. Avaliou-se a filtração com membranas da água bruta, isenta de coagulantes. Por fim, foi realizado um estudo cinético no processo de coagulação/floculação, uma análise da estabilidade da semente e do extrato de *Moringa oleifera* em relação ao tempo de armazenamento em temperatura de refrigeração e ainda avaliação matemática dos dados experimentais encontrados no processo de filtração com membranas. Os resultados encontrados demonstram que apenas o processo de coagulação/floculação/sedimentação, sem filtração, é ineficiente para se obter água com o devido padrão de potabilidade. Revelaram que as eficiências de remoção dos parâmetros de cor, turbidez e UV- 254 nm, em geral foram melhores para a extração realizada com o sal KCl para águas de baixa cor e

turbidez e para extração realizada com água e com o mesmo sal para águas de alta cor e turbidez. Os menores entupimentos aconteceram no processo combinado, utilizando-se a extração com solução salina. Por meio do estudo cinético, observou-se que os maiores tempos de meia vida foram encontrados na remoção de compostos com absorção em UV-254 nm. Analisando a estabilidade da semente em relação ao tempo de armazenamento nota-se que após um ano há uma redução no poder de coagulação. Já o extrato obtido com água possui atividade coagulante em até cinco dias de armazenamento e o extrato obtido com solução salina (KCl) apresenta-se eficiente em até cinco meses de armazenamento. Constatou-se que, em geral, o tipo de entupimento predominante é o de formação de torta. Portanto, a conclusão deste estudo é de que a associação dos processos e a aplicação da *Moringa oleifera* é uma alternativa viável na obtenção de água potável.

EXTRACTION/PURIFICATION OF THE MORINGA OLEIFERA SEED'S ACTIVE COMPOUND AND THEIR USE IN TREATMENT OF WATER FOR HUMAN CONSUMPTION

AUTHOR: GRASIELE SCARAMAL MADRONA

SUPERVISOR: PROF.^a ROSÂNGELA BERGAMASCO, D.Sc.

Doctorate Thesis; Chemical Engineering Graduate Program, State University of Maringá;
Av. Colombo, 5790, BL E46 – 09; CEP: 87020-900 – Maringá – PR, Brazil, presented on
03th December 2010. 176 p.

ABSTRACT

The careful monitoring of many indicators is necessary to guarantee good quality control in the process of obtaining drinking water, in particular for human consumption. The contamination of aquatic environments makes that process even more complex and important, motivating the development of innovative techniques. In that sense, the utilization of natural coagulants, in lieu of chemical coagulants, has advantages related to biodegradability properties, lower toxicity, and lower rates of residual sewage sludge. The extract of the *Moringa oleífera* Lam's seeds is a great option among the many natural coagulants since it contains a cationic protein with high molecular weight which destabilize the particles found in the water, allowing for its purification. Considering the high demand for quality water, the process of filtration employing membranes is also attractive because it is very efficient. Moreover, the utilization of combined processes such as coagulation/flocculation/sedimentation/filtration with membranes has been actively studied given its significant improvements in the quality of drinking water and reduction of the membrane clogging. In this context, this work aimed to evaluate the efficiency of the *Moringa oleífera* Lam's coagulant in the process of coagulation/flocculation/sedimentation followed by filtration with membranes in order to obtain drinking water. Different types of extraction were analyzed to get the active compound of the *Moringa oleífera* Lam's seeds, optimizing the step of coagulation/flocculation/sedimentation. After that, the ideal conditions found were used in the process of microfiltration utilizing 0.1 and 0.2 μm membranes with pressures of 1 and 2 bar. Filtration of raw water with membrane and no coagulant was also investigated. Finally, three analyses took place: a kinetic study in the process of coagulation/flocculation, an evaluation regarding the stability of the *Moringa oleífera*'s seeds and extract in relation to the storage time on refrigeration temperature, and a mathematical examination of the experimental data obtained during the process of filtration with membranes. The obtained results produced show several interesting aspects as follow. The coagulation/flocculation/sedimentation process alone, without filtration, is inefficient as far as obtaining proper quality water. In general, a higher efficiency level of color, turbidity, and UV- 254 nm removal was associated with the extraction carried out using only the salt KCl in the cases of low color and turbidity water while waters containing high color and turbidity, the highest efficiency occurred with extraction

utilizing water and KCl salt. The lowest rates of clogging happened in combined processes employing the extraction with saline solution. By means of the kinetic study, it was possible to observe that the longest half-lives were found when removing composites with absorption under UV-254 nm. Analyzing the seed stability in relation to the storage time, a reduction in coagulation power was noticed after one year. On the other hand, the extract got with water showed coagulating activity up to five days of storage, while the one obtained with saline (KCl) remained efficient for five month. In general, the predominant clogging type detected was the cake formation. Hence, this study concludes that the association of processes and application of the *Moringa oleífera* is a viable alternative for obtaining potable water.

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 01 |
| 2. OBJETIVOS | 03 |
| 2.1 Objetivo geral | 03 |
| 2.2 Objetivos específicos | 03 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 04 |
| 3.1 Água | 04 |
| 3.2 Qualidade da água | 08 |
| 3.2.1 Parâmetros físicos | 08 |
| 3.2.2 Parâmetros sensoriais | 09 |
| 3.2.3 Parâmetros químicos | 12 |
| 3.2.4 Parâmetros microbiológicos | 13 |
| 3.2.5 Padrão de potabilidade da água | 13 |
| 3.3 Princípios do tratamento para obtenção de água potável | 15 |
| 3.3.1 Operações Unitárias No Tratamento De Água | 15 |
| 3.3.1.1 Coagulação e Floculação | 16 |
| 3.3.1.1.1 Mecanismos de coagulação | 20 |
| 3.3.1.2 Sedimentação e Filtração | 22 |
| 3.3.1.2.1 Filtração por membranas | 22 |
| 3.3.1.2.2 Fenômenos que Influenciam o Fluxo de Permeado | 27 |
| 3.3.1.3 Processo combinado coagulação/floculação e filtração por membranas | 31 |
| 3.4 Coagulantes | 33 |
| 3.4.1 Coagulantes químicos | 34 |
| 3.4.2 COAGULANTES NATURAIS – <i>Moringa Oleifera</i> Lam | 36 |
| 4. METODOLOGIA | 43 |
| 4.1 Extração, purificação e caracterização do composto ativo da semente de <i>Moringa oleifera</i> Lam | 43 |
| 4.1.1 Extração e purificação do composto ativo da semente de <i>Moringa oleifera</i> | 44 |
| 4.1.1.1 Extração e purificação do composto ativo com água (SCA) | 45 |
| 4.1.1.2 Extração e purificação do composto ativo com solução tampão (SCpH) | 46 |

| | |
|---|----|
| 4.1.1.3 Extração e purificação do composto ativo com solução salina (SC) ... | 46 |
| 4.1.2 Caracterização do composto ativo das sementes de <i>Moringa oleifera</i> | 47 |
| 4.1.2.1 Dosagem de proteínas dos extratos obtidos das sementes de <i>Moringa oleifera</i> | 47 |
| 4.1.2.2 Eletroforese dos extratos obtidos das sementes de <i>Moringa oleifera</i> .. | 48 |
| 4.1.2.3 Caracterização físico-química das sementes de <i>Moringa oleifera</i> | 48 |
| 4.2 Aplicação do composto ativo no processo de coagulação/floculação/filtração com membranas | 48 |
| 4.2.1 Caracterização da água Bruta Superficial | 48 |
| 4.2.2 Ensaio de coagulação/floculação | 49 |
| 4.2.3 Planejamento experimental | 51 |
| 4.2.4 Processo combinado coagulação/floculação/filtração com membranas | 52 |
| 4.2.4.1 Processo de filtração com membranas | 53 |
| 4.2.4.2 Limpeza da Membrana | 55 |
| 4.3 Avaliação da estabilidade da semente e do composto ativo da <i>Moringa oleifera</i> | 56 |
| 4.3.1 Avaliação da Estabilidade de Armazenamento das Sementes de <i>Moringa oleifera</i> | 56 |
| 4.3.2 Avaliação da estabilidade dos extratos obtidos da semente de <i>Moringa oleifera</i> | 56 |
| 4.4 Avaliação da cinética do processo de coagulação/floculação | 57 |
| 4.5 Análise Matemática dos dados experimentais obtidos no Processo de Filtração por Membranas | 58 |
| 5. RESULTADOS | 60 |
| 5.1 Extração e Caracterização do composto ativo da Semente de <i>Moringa Oleifera</i> Lam | 60 |
| 5.1.1 Extração e caracterização do composto ativo com água | 60 |
| 5.1.1.1 Dosagem de proteína dos extratos obtidos das sementes de <i>Moringa oleifera</i> | 60 |
| 5.1.1.2 Análise de eletroforese dos extratos obtidos das sementes de <i>Moringa oleifera</i> | 61 |
| 5.1.1.3 Caracterização físico-química da semente | 62 |
| 5.1.2 Extração e caracterização do composto ativo com solução tampão | |

| | |
|---|----|
| (SCpH) | 63 |
| 5.1.2.1 Dosagem de proteína do extrato de <i>Moringa oleifera</i> obtido com solução tampão | 63 |
| 5.1.3 Extração e caracterização do composto ativo com solução salina (SC) | 63 |
| 5.1.3.1 Dosagem de proteína dos extratos obtidos com os sais NaCl, KCl, MgCl ₂ e CaCl ₂ | 64 |
| 5.2 Aplicação do composto ativo no processo de Coagulação/Floculação/Filtração com Membranas | 65 |
| 5.2.1 Caracterização da Água Bruta Superficial | 66 |
| 5.2.2 Resultados do processo de Coagulação/floculação/sedimentação utilizando a solução coagulante extraída com água (SCA) | 67 |
| 5.2.3 Resultados para extração do composto ativo com solução tampão (SCpH) | 70 |
| 5.2.3.1 Resultados para extração do composto ativo com solução tampão (SCpH4) | 70 |
| 5.2.3.2 Resultados para extração do composto ativo com solução tampão (SCpH10) | 75 |
| 5.2.4 Resultados para extração do composto ativo com solução salina (SC) | 78 |
| 5.2.4.1 Resultados da avaliação da melhor molaridade extração para o sal NaCl | 78 |
| 5.2.4.2 Resultado do estudo dos diferentes sais utilizados na extração | 81 |
| 5.2.4.2.1 Resultados para aplicação do extrato de <i>Moringa oleifera</i> com NaCl | 81 |
| 5.2.4.2.2 Resultados para aplicação do extrato de <i>Moringa oleifera</i> com KCl | 85 |
| 5.2.4.2.3 Resultados para aplicação do extrato de <i>Moringa oleifera</i> com CaCl ₂ | 88 |
| 5.2.4.2.4 Resultados para aplicação do extrato de <i>Moringa oleifera</i> com MgCl ₂ | 91 |
| 5.2.5 Comparação entre as eficiências de remoção com as soluções coagulantes (extraída com água, com solução tampão e com sais) | 94 |
| 5.3 Processo de filtração com membranas e processo combinado coagulação/floculação/filtração com membranas | 99 |

| | |
|--|-----|
| 5.3.1 Avaliação dos resultados das análises físico-químicas e microbiológicas para membranas 0,1µm e 0,2µm – monocanal nas pressões de 1 e 2 bar | 100 |
| 5.3.1.1 Membrana 0,1µm - Água com Cor e Turbidez Relativamente Baixas nas pressões de 1 bar e 2 bar | 100 |
| 5.3.1.2 Membrana 0,1µm - Água com Cor e Turbidez Relativamente Altas na pressão de 1 bar e 2 bar | 103 |
| 5.3.1.3 Membrana 0,2µm - Água com Cor e Turbidez Relativamente Baixas nas pressões de 1 bar e 2 bar | 106 |
| 5.3.1.4 Membrana 0,2µm - Água com Cor e Turbidez Relativamente Altas na pressão de 1 bar e 2 bar | 108 |
| 5.3.2 Avaliação dos resultados do fluxo permeado para membranas 0,1µm e 0,2µm – monocanal nas pressões de 1 e 2 bar | 111 |
| 5.3.2.1 Membrana 0,1µm - Água com Cor e Turbidez Relativamente Baixas e Altas para pressão de 1 e 2 bar | 111 |
| 5.3.2.2 Resumo dos dados de “fouling” para membrana 0,1µm – monocanal | 114 |
| 5.3.2.3 Membrana 0,2µm - Água com Cor e Turbidez Relativamente Baixas e Altas para pressão de 1 e 2 bar | 115 |
| 5.3.2.4 Avaliação do “fouling” para membrana 0,2µm – monocanal | 117 |
| 5.4 Avaliação da estabilidade em relação ao tempo de armazenamento da semente e do composto ativo | 119 |
| 5.4.1 Dosagem de proteína e composição centesimal da Semente de <i>Moringa Oleifera</i> | 119 |
| 5.4.1.1 Dosagem de proteína no extrato de <i>Moringa oleifera</i> nos diferentes tempos de armazenamento | 119 |
| 5.4.1.2 Composição centesimal das sementes de <i>Moringa oleifera</i> sob armazenamento | 120 |
| 5.4.1.3 Aplicação do extrato obtido com água e semente de <i>Moringa oleifera</i> armazenada no processo de coagulação/floculação/sedimentação | 121 |
| 5.4.2 Avaliação da Estabilidade dos Extratos de <i>Moringa oleifera</i> obtidos com água e KCl e armazenados sob refrigeração | 124 |
| 5.4.2.1 Dosagem de proteína no extrato de <i>Moringa Oleifera</i> com água nos diferentes tempos de armazenamento | 125 |
| 5.4.2.2 Aplicação no processo de coagulação/floculação/sedimentação do | |

| | |
|--|-----|
| extrato de <i>Moringa Oleifera</i> com água | 125 |
| 5.4.2.3 Dosagem de proteína no extrato de <i>Moringa oleifera</i> com KCl nos diferentes tempos de armazenamento | 128 |
| 5.4.2.4 Aplicação no processo de coagulação/floculação/sedimentação do extrato de <i>Moringa oleifera</i> com solução salina (KCl) | 129 |
| 5.5 Resultados do Estudo Cinético em processos de coagulação/floculação | 131 |
| 5.6 Análise Matemática dos dados experimentais obtidos no processo de filtração por membranas | 136 |
| 5.6.1 Modelagem para membrana 0,1 μm - Água de baixa cor e turbidez nas pressões de 1 e 2 bar | 137 |
| 5.6.2 Modelagem para membrana 0,1 μm – Água de alta cor e turbidez nas pressões de 1 e 2 bar | 140 |
| 5.6.3 Modelagem para membrana 0,2 μm – Água de baixa cor e turbidez nas pressões de 1 e 2 bar | 143 |
| 5.6.4 Modelagem para membrana 0,2 μm – Água de alta cor e turbidez nas pressões de 1 e 2 bar | 146 |
| 6. CONCLUSÕES | 150 |
| 7. SUGESTÕES | 152 |
| 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 153 |
| ANEXOS | 169 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 3.1. Funções multi-objetivos envolvidas no projeto e operação de ETA's | 07 |
| Figura 3.2. Representação esquemática da água adsorvida ao redor de uma partícula de argila | 17 |
| Figura 3.3. Modelos estruturais básicos: representação esquemática da orientação de partículas | 18 |
| Figura 3.4. Representação Esquemática de Duas Fases Separadas por uma Membrana | 23 |
| Figura 3.5. Faixas das dimensões separadas por processos com membranas que utilizam o gradiente de pressão como força motriz | 25 |
| Figura 3.6. Redução do fluxo permeado em função dos fenômenos de polarização por concentração e <i>fouling</i> | 28 |
| Figura 3.7. Mecanismos de <i>fouling</i> para membrana: (a) bloqueio completo de poro; (b) bloqueio parcial de poro; (c) formação de torta; (d) bloqueio interno de poro | 29 |
| Figura 3.8. Árvore de <i>Moringa oleifera</i> lam | 38 |
| Figura 3.9. Vagens de <i>Moringa oleifera</i> Lam | 38 |
| Figura 3.10. Semente de <i>Moringa oleifera</i> lam com casca e sem casca, respectivamente | 39 |
| Figura 3.11. Equivalência da Ingestão de 1 grama de Folhas de <i>Moringa oleifera</i> Lam Comparada com Outros Alimentos | 40 |
| Figura 4.1. Obtenção dos diferentes extratos de <i>Moringa Oleífera</i> Lam | 45 |
| Figura 4.2. Esquema da Preparação da Solução Padrão de <i>Moringa oleifera</i> Lam ... | 46 |
| Figura 4.3. Vista Aérea do Ponto de Captação de Água de Maringá – PR | 48 |
| Figura 4.4. Equipamento Jar Test | 50 |
| Figura 4.5. Unidade experimental de micro-ultrafiltração | 54 |
| Figura 5.1. Eletroforese em gel de poliacrilamida (12%) de SSMoL (100 µg), tratada com β-mercaptoetanol | 61 |
| Figura 5.2. Porcentagem de remoção de cor para os diferentes valores de turbidez inicial e solução extraída com água (SCA) | 67 |
| Figura 5.3. Porcentagem de remoção de turbidez para os diferentes valores de turbidez inicial e solução extraída com água (SCA) | 67 |
| Figura 5.4. Porcentagem de remoção de compostos com absorção em UV-254 nm | |

| | |
|--|----|
| para os diferentes valores de turbidez inicial e solução extraída com água (SCA) | 68 |
| Figura 5.5. Porcentagem de remoção de cor para solução coagulante SCpH4 para os diferentes valores de turbidez inicial | 71 |
| Figura 5.6. Porcentagem de remoção de turbidez para solução coagulante SCpH4 para os diferentes valores de turbidez inicial | 71 |
| Figura 5.7. Porcentagem de remoção de compostos com absorção em UV-254 nm para solução coagulante SCpH4 para os diferentes valores de turbidez inicial | 72 |
| Figura 5.8. Porcentagem de remoção de cor para solução coagulante SCpH10 para os diferentes valores de turbidez inicial | 75 |
| Figura 5.9. Porcentagem de remoção de turbidez para solução coagulante SCpH10 para os diferentes valores de turbidez inicial | 75 |
| Figura 5.10 Porcentagem de remoção de compostos com absorção em UV-254 nm para solução coagulante SCpH10 para os diferentes valores de turbidez inicial | 76 |
| Figura 5.11. Porcentagem de remoção de cor para as diferentes molaridades de sal avaliadas | 79 |
| Figura 5.12. Porcentagem de remoção de turbidez para as diferentes molaridades de sal avaliadas | 79 |
| Figura 5.13. Porcentagem de remoção de compostos com absorção em UV-254 nm para as diferentes molaridades de sal avaliadas | 80 |
| Figura 5.14. Porcentagem de remoção de cor para as diferentes concentrações de solução coagulante, utilizando extração com NaCl 1 Molar para os diferentes valores de turbidez inicial avaliados | 82 |
| Figura 5.15. Porcentagem de remoção de turbidez para as diferentes concentrações de solução coagulante, utilizando extração com NaCl 1 Molar para os diferentes valores de turbidez inicial avaliados | 82 |
| Figura 5.16. Porcentagem de remoção de compostos com absorção em UV-254 nm para as diferentes concentrações de solução coagulante, utilizando extração com NaCl 1 Molar para os diferentes valores de turbidez inicial avaliados | 83 |
| Figura 5.17. Porcentagem de remoção de cor para as diferentes concentrações de solução coagulante, utilizando extração com KCl 1 Molar para os diferentes valores de turbidez inicial avaliados | 85 |
| Figura 5.18. Porcentagem de remoção de turbidez para as diferentes concentrações de solução coagulante, utilizando extração com KCl 1 Molar para os diferentes | |

| | |
|--|-----|
| valores de turbidez inicial avaliados | 85 |
| Figura 5.19. Porcentagem de remoção de compostos com absorção em UV-254 nm para as diferentes concentrações de solução coagulante, utilizando extração com KCl 1 Molar para os diferentes valores de turbidez inicial avaliados | 86 |
| Figura 5.20. Porcentagem de remoção de cor para as diferentes concentrações de solução coagulante, utilizando extração com CaCl ₂ 1 Molar para os diferentes valores de turbidez inicial avaliados | 88 |
| Figura 5.21. Porcentagem de remoção de turbidez para as diferentes concentrações de solução coagulante, utilizando extração com CaCl ₂ 1 Molar para os diferentes valores de turbidez inicial avaliados | 89 |
| Figura 5.22. Porcentagem de remoção de compostos com absorção em UV-254 nm para as diferentes concentrações de solução coagulante, utilizando extração com CaCl ₂ 1 Molar para os diferentes valores de turbidez inicial avaliados | 89 |
| Figura 5.23. Porcentagem de remoção de cor para as diferentes concentrações de solução coagulante, utilizando extração com MgCl ₂ 1 Molar para os diferentes valores de turbidez inicial avaliados | 91 |
| Figura 5.24. Porcentagem de remoção de turbidez para as diferentes concentrações de solução coagulante, utilizando extração com MgCl ₂ 1 Molar para os diferentes valores de turbidez inicial avaliados | 92 |
| Figura 5.25. Porcentagem de remoção de compostos com absorção em UV-254 nm para as diferentes concentrações de solução coagulante, utilizando extração com MgCl ₂ 1 Molar para os diferentes valores de turbidez inicial avaliados | 92 |
| Figura 5.26. Fluxo de permeado em função do tempo de operação para a membrana de 0,1µm – monocanal: (a) Água de baixa e pressão de 1 bar; (b) Água de baixa e pressão 2 bar; (c) Água de alta e pressão de 1 bar e (d) Água de alta e pressão de 2 bar | 112 |
| Figura 5.27. Fluxo de permeado em função do tempo de operação para a membrana de 0,2µm – monocanal: (a) Água de baixa e pressão de 1 bar; (b) Água de baixa e pressão 2 bar; (c) Água de alta e pressão de 1 bar e (d) Água de alta e pressão de 2 bar | 116 |
| Figura 5.28. Porcentagem de remoção de cor nos diferentes tempos de armazenamento da semente de Moringa oleifera | 122 |
| Figura 5.29. Porcentagem de remoção de turbidez nos diferentes tempos de | |

| | |
|---|-----|
| armazenamento da semente de Moringa oleifera | 122 |
| Figura 5.30. Porcentagem de remoção de compostos com absorção em UV-254nm nos diferentes tempos de armazenamento da semente de Moringa oleifera | 123 |
| Figura 5.31. Porcentagem de remoção de cor nos diferentes tempos avaliados para o extrato obtido com água | 126 |
| Figura 5.32. Porcentagem de remoção de turbidez nos diferentes tempos avaliados para o extrato obtido com água | 126 |
| Figura 5.33. Porcentagem de remoção de compostos com absorção em UV-254 nm nos diferentes tempos avaliados para o extrato obtido com água | 127 |
| Figura 5.34. Porcentagem de remoção de cor nos diferentes tempos avaliados para extração com KCl 1 M | 129 |
| Figura 5.35. Porcentagem de remoção de turbidez nos diferentes tempos avaliados para extração com KCl 1 M | 129 |
| Figura 5.36. Porcentagem de remoção de UV-254 nm nos diferentes tempos avaliados para extração com KCl 1 M | 130 |
| Figura 5.37. Variação de $(-\ln C/C_0)$ em função do tempo para turbidez inicial 150 uT . | 132 |
| Figura 5.38. Variação de $(-\ln C/C_0)$ em função do tempo para turbidez inicial 250 uT ... | 133 |
| Figura 5.39. Variação de $(-\ln C/C_0)$ em função do tempo para turbidez inicial 350 uT | 134 |
| Figura 5.40. Variação de $(-\ln C/C_0)$ em função do tempo para turbidez inicial 450 uT | 134 |
| Figura 5.41. Variação de $(-\ln C/C_0)$ em função do tempo para turbidez inicial 550 uT | 135 |
| Figura 5.42. Ajuste dos dados experimentais a 1 bar para a membrana de 0,1 μ m – monocanal e água de baixa cor e turbidez: (a) Modelo de bloqueio completo dos poros; (b) Modelo de bloqueio padrão dos poros; (c) Modelo de bloqueio intermediário dos poros e (d) Modelo de formação de torta | 137 |
| Figura 5.43. Ajuste dos dados experimentais a 2 bar para a membrana de 0,1 μ m – monocanal e água de baixa cor e turbidez: (a) Modelo de bloqueio completo dos poros; (b) Modelo de bloqueio padrão dos poros; (c) Modelo de bloqueio intermediário dos poros e (d) Modelo de formação de torta | 139 |
| Figura 5.44. Ajuste dos dados experimentais a 1 bar para a membrana de 0,1 μ m – monocanal e água de alta cor e turbidez: (a) Modelo de bloqueio completo dos poros; (b) Modelo de bloqueio padrão dos poros; (c) Modelo de bloqueio intermediário dos poros e (d) Modelo de formação de torta | 141 |
| Figura 4.45. Ajuste dos dados experimentais a 2 bar para a membrana de 0,1 μ m – | |

| | |
|---|-----|
| monocanal e água de alta cor e turbidez: (a) Modelo de bloqueio completo dos poros; (b) Modelo de bloqueio padrão dos poros; (c) Modelo de bloqueio intermediário dos poros e (d) Modelo de formação de torta | 142 |
| Figura 4.46. Ajuste dos dados experimentais a 1 bar para a membrana de 0,2 μ m – monocanal e água de baixa cor e turbidez: (a) Modelo de bloqueio completo dos poros; (b) Modelo de bloqueio padrão dos poros; (c) Modelo de bloqueio intermediário dos poros e (d) Modelo de formação de torta | 144 |
| Figura 5.47. Ajuste dos dados experimentais a 2 bar para a membrana de 0,2 μ m – monocanal e água de baixa cor e turbidez: (a) Modelo de bloqueio completo dos poros; (b) Modelo de bloqueio padrão dos poros; (c) Modelo de bloqueio intermediário dos poros e (d) Modelo de formação de torta | 145 |
| Figura 5.48. Ajuste dos dados experimentais a 1 bar para a membrana de 0,2 μ m – monocanal e água de alta cor e turbidez: (a) Modelo de bloqueio completo dos poros; (b) Modelo de bloqueio padrão dos poros; (c) Modelo de bloqueio intermediário dos poros e (d) Modelo de formação de torta | 147 |
| Figura 5.49. Ajuste dos dados experimentais a 2 bar para a membrana de 0,2 μ m – monocanal e água de alta cor e turbidez: (a) Modelo de bloqueio completo dos poros; (b) Modelo de bloqueio padrão dos poros; (c) Modelo de bloqueio intermediário dos poros e (d) Modelo de formação de torta | 148 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 3.1. Concentração limiar de gosto e odor para alguns compostos orgânicos de origem biogênica | 11 |
| Tabela 3.2. Padrão de potabilidade de água para consumo humano | 14 |
| Tabela 3.3. Número de Espécies Vegetais com Capacidade Coagulante | 37 |
| Tabela 4.1. Parâmetros analíticos avaliados, seus respectivos métodos de análise e equipamentos | 49 |
| Tabela 4.2. Condições de processo utilizadas nos ensaios de coagulação/floculação..... | 50 |
| Tabela 4.3. Valores de turbidez inicial e concentração de coagulante utilizados no planejamento de experimentos | 51 |
| Tabela 4.4. Equações características para cada tipo de entupimento | 59 |
| Tabela 5.1. Caracterização físico-química da semente de Moringa Oleifera | 62 |
| Tabela 5.2. Quantidade de proteína para as diferentes molaridades de sais | 64 |
| Tabela 5.3. Quantidade de proteína para os diferentes tipos de sais | 64 |
| Tabela 5.4. Valores médios das características das águas superficiais utilizadas nos ensaios em “jar test”..... | 66 |
| Tabela 5.5. Concentrações ótimas de coagulante para solução extraída com água (SCA) | 70 |
| Tabela 5.6. Concentrações ótimas para solução extraída com tampão pH 4 (ScpH4) .. | 74 |
| Tabela 5.7. Concentrações ótimas para solução extraída com tampão pH 10 (ScpH10) | 78 |
| Tabela 5.8. Concentrações ótimas de solução coagulante para extração com NaCl | 84 |
| Tabela 5.9. Concentrações ótimas de solução coagulante para extração com KCl | 87 |
| Tabela 5.10. Concentrações ótimas de solução coagulante para extração com CaCl ₂ | 91 |
| Tabela 5.11. Concentrações ótimas de solução coagulante para extração com MgCl ₂ | 94 |
| Tabela 5.12. Resumo dos resultados obtidos para turbidez inicial de 150 uT e todos os coagulantes testados | 95 |
| Tabela 5.13. Resumo dos resultados obtidos para turbidez inicial de 250 uT e todos os coagulantes testados | 96 |
| Tabela 5.14. Resumo dos resultados obtidos para turbidez inicial de 350 uT e todos os coagulantes testados | 96 |
| Tabela 5.15. Resumo dos resultados obtidos para turbidez inicial de 450 uT e todos | |

| | |
|---|-----|
| os coagulantes testados | 97 |
| Tabela 5.16. Resumo dos resultados obtidos para turbidez inicial de 550 uT e todos os coagulantes testados | 98 |
| Tabela 5.17. Condições de coagulação/floculação aplicadas no processo combinado de coagulação/ floculação/filtração com membranas | 99 |
| Tabela 5.18. Eficiência do processo de ultrafiltração e do processo combinado (coagulação/floculação/ultrafiltração) para os diferentes coagulantes, para águas de baixa cor e turbidez na pressão de 1 bar – membrana 0,1 µm | 101 |
| Tabela 5.19. Eficiência do processo de ultrafiltração e do processo combinado (coagulação/floculação/ultrafiltração) para os diferentes coagulantes, para águas de baixa cor e turbidez na pressão de 2 bar – membrana 0,1 µm | 101 |
| Tabela 5.20 Eficiência do processo de ultrafiltração e do processo combinado (coagulação/floculação/ultrafiltração) para os diferentes coagulantes, para águas de alta cor e turbidez na pressão de 1 bar – membrana 0,1 µm | 104 |
| Tabela 5.21. Eficiência do processo de ultrafiltração e do processo combinado (coagulação/floculação/ultrafiltração) para os diferentes coagulantes, para águas de alta cor e turbidez na pressão de 2 bar | 104 |
| Tabela 5.22. Eficiência do processo de microfiltração e do processo combinado (coagulação/floculação/microfiltração) para os diferentes coagulantes, para águas de baixa cor e turbidez na pressão de 1 bar – membrana 0,2 µm | 107 |
| Tabela 5.23. Eficiência do processo de microfiltração e do processo combinado (coagulação/floculação/microfiltração) para os diferentes coagulantes, para águas de baixa cor e turbidez na pressão de 2 bar – membrana 0,2 µm | 107 |
| Tabela 5.24. Eficiência do processo de microfiltração e do processo combinado (coagulação/floculação/microfiltração) para os diferentes coagulantes, para águas de alta cor e turbidez na pressão de 1 bar – membrana 0,2 µm | 109 |
| Tabela 5.25. Eficiência do processo de microfiltração e do processo combinado (coagulação/floculação/microfiltração) para os diferentes coagulantes, para águas de alta cor e turbidez na pressão de 2 bar – membrana 0,2 µm | 109 |
| Tabela 5.26. Avaliação do “fouling” da membrana 0,1µm – monocanal, nas pressões 1 e 2 bar para águas de baixa e alta cor e turbidez | 115 |
| Tabela 5.27. Avaliação do “fouling” da membrana 0,2µm – monocanal, nas pressões 1 e 2 bar para águas de baixa e alta cor e turbidez | 118 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 5.28. Dosagem de proteína na solução coagulante nos diferentes anos avaliados | 120 |
| Tabela 5.29. Caracterização físico-química da semente de Moringa Oleifera nos diferentes tempo estudados | 120 |
| Tabela 5.30. Dosagem de proteína no extrato com água e Moringa Oleifera nos diferentes tempos avaliados | 125 |
| Tabela 5.31. Dosagem de proteína no extrato com KCl e Moringa oleifera nos diferentes tempos avaliados | 128 |
| Tabela 5.32. Valores da constante de velocidade cinética e do tempo de meia vida para cada valor de turbidez inicial avaliado | 136 |
| Tabela 5.33. Valores de R^2 para cada modelo e experimento a 1 bar, membrana 0,1 μm e água de baixa cor e turbidez | 138 |
| Tabela 5.34. Valores de R^2 para cada modelo e experimento a 2 bar, membrana 0,1 μm e água de baixa cor e turbidez | 139 |
| Tabela 5.35. Valores de R^2 para cada modelo e experimento a 1 bar, membrana 0,1 μm e água de alta cor e turbidez | 141 |
| Tabela 5.36. Valores de R^2 para cada modelo e experimento a 2 bar, membrana 0,1 μm e água de alta cor e turbidez | 143 |
| Tabela 5.37. Valores de R^2 para cada modelo e experimento a 1 bar, membrana 0,2 μm e água de baixa cor e turbidez | 144 |
| Tabela 5.38. Valores de R^2 para cada modelo e experimento a 2 bar, membrana 0,2 μm e água de baixa cor e turbidez | 146 |
| Tabela 5.39. Valores de R^2 para cada modelo e experimento a 1 bar, membrana 0,2 μm e água de alta cor e turbidez | 147 |
| Tabela 5.40. Valores de R^2 para cada modelo e experimento a 2 bar, membrana 0,2 μm e água de alta cor e turbidez | 149 |

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Atualmente, os principais recursos hídricos utilizados no abastecimento público são mananciais superficiais, cuja qualidade da água, na grande maioria das vezes, não apresenta as condições adequadas e recomendáveis para sua utilização no tratamento convencional.

Sendo assim, deve ser constante a busca por processos ou até de coagulantes mais eficientes para obtenção de água potável de boa qualidade. Neste sentido, a utilização de coagulantes/floculantes para a remoção de turbidez, cor e matéria orgânica tem sido ultimamente empregada com sucesso para o tratamento de águas superficiais na produção de água potável.

A utilização de agentes floculantes tradicionais a base de sais inorgânicos metálicos, como, por exemplo, sais de alumínio, requer um controle rígido sobre o residual de alumínio na água tratada destinada ao consumo humano, bem como no processo industrial de produção de alimentos, como por exemplo, na produção de proteínas de origem vegetal, nos quais não são admitidos sequer traços do elemento.

A possibilidade de contaminação de alimentos com traços de alumínio, bem como de danos indesejáveis ao organismo humano, em especial do sistema nervoso, são fatos cientificamente comprovados e alvo de constantes e inovadoras pesquisas médicas no mundo inteiro, o que exige cada vez mais um controle rígido da presença dos metais, tanto na água potável como na água dos mananciais.

Uma das alternativas que surge neste contexto é a utilização de coagulantes naturais que possam ser aplicados de forma individual ou juntamente com outros sais coagulantes tradicionais, agindo como auxiliar no tratamento de águas.

Os coagulantes naturais apresentam várias vantagens em relação aos coagulantes químicos, pois são biodegradáveis, menos tóxicos e ainda produzem lodo em menor quantidade e com menores teores de metais. Neste contexto, encontra-se a semente de *Moringa oleifera* Lam, a qual possui um composto ativo que atua em sistemas de partículas coloidais, neutralizando cargas e formando pontes entre estas partículas, sendo este processo responsável pela formação de flocos e conseqüente sedimentação.

A presente pesquisa pretende trazer uma contribuição relevante, pois observa-se a necessidade de um estudo mais detalhado sobre a extração e estabilidade do composto

ativo responsável pela coagulação, tendo em vista o exposto sobre problemas relacionados ao uso de sulfato de alumínio.

A descoberta do uso da polpa das sementes do polímero natural conhecido como *Moringa oleifera* Lam para purificação de água, a um custo menor que do tratamento químico convencional, constitui uma alternativa de maior importância (SILVA, 2005). Além de serem eficientes no tratamento de água potável, suas folhas, vagens e sementes podem ser utilizadas na alimentação humana, possuindo função farmacêutica.

Como normalmente não é possível obter água totalmente clarificada apenas por meio do uso da coagulação/floculação e decantação, deve-se fazer uso também da filtração, a fim de remover as partículas suspensas e coloidais que resistem a outros processos de tratamento.

Atualmente, tem-se a opção de utilizar diferentes meios filtrantes. Contudo, considerando que as leis encontram-se cada vez mais rígidas e que as pessoas estão mais atentas às necessidades da melhoria do padrão de saúde, os processos com membranas, particularmente a ultra e a microfiltração, são vistos, na maioria das circunstâncias, como alternativas economicamente viáveis para os tratamentos convencionais.

Portanto, a utilização de coagulantes naturais nos processos de coagulação e floculação e também o processo combinado de coagulação/floculação/filtração com membranas é uma opção para o tratamento convencional. A adição de coagulantes antes de unidades de ultra ou microfiltração, com ou sem sedimentação, pode aumentar a remoção de matéria orgânica natural e, conseqüentemente, produzir uma melhor redução dos produtos formados pela desinfecção, diminuindo a adição de produtos químicos no processo de tratamento da água a ser consumida pelos seres humanos.

CAPÍTULO 2

OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste estudo é avaliar a eficiência do coagulante natural *Moringa oleifera* Lam no processo de coagulação/floculação, seguido de filtração com membranas, para a obtenção de água potável.

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do presente trabalho são:

- Extrair e caracterizar o composto ativo da semente de *Moringa oleifera* responsável pela coagulação de compostos que conferem cor e turbidez às águas de abastecimento ao seres humanos;
- Aplicar o composto ativo no processo de coagulação/floculação e verificar as melhores condições para remoção de cor, turbidez e compostos com absorção em UV-254nm;
- Aplicar o composto ativo, obtido nas condições otimizadas, no processo combinado de coagulação/floculação/filtração com membranas;
- Identificar a estabilidade da semente e o poder coagulante do composto ativo com relação ao tempo de estocagem;
- Avaliar a cinética por meio do comportamento dos parâmetros de cor, turbidez e compostos com absorção em UV-254nm em função do tempo dos processos de coagulação/floculação;
- Analisar matematicamente os dados experimentais (fluxo x tempo) obtidos no processo de filtração por membranas.

CAPÍTULO 3

REVIÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo visa contextualizar a extração do composto ativo do coagulante natural *Moringa Oleifera* Lam, bem como sua aplicação no tratamento para obtenção de água potável, a fim de esclarecer os objetivos propostos.

3.1 ÁGUA

A água é essencial à vida de todos os seres humanos e à manutenção dos ecossistemas, além de possuir um valor econômico, estratégico e social. É um patrimônio do planeta e sem água não há a sobrevivência humana.

Assim, para controlar a qualidade da água é necessário o monitoramento de diversos indicadores, tendo em vista a preocupação com a contaminação de ambientes aquáticos que aumenta, principalmente, quando a água é usada para o consumo humano.

Neste contexto, registra-se a afirmação verificada de que as fontes hídricas são abundantes, porém, mal distribuídas na superfície do planeta. A água doce, normalmente utilizada para o abastecimento público, corresponde a menos de 5% do total de água disponível no planeta, sendo que grande parte desta se encontra concentrada em geleiras. Sendo assim, apenas 0,3% desse total é considerada de fácil acesso ao ser humano, disponível em rios, lagos e atmosfera (AZEVEDO NETTO *et al.*, 1973).

O Brasil é um país privilegiado em relação aos recursos hídricos, uma vez que possui cerca de 8% da água doce disponível no mundo. A Amazônia detém 80% desse total (CARDOSO, 2007).

É válido mencionar a grande capacidade de recuperação da natureza e que os seus recursos são suficientes para proporcionar ao homem uma satisfatória qualidade de vida. No entanto, essa capacidade não é ilimitada, e um recurso natural uma vez degradado não tem condições de voltar às suas características originais.

Há poucas regiões no mundo livres dos problemas de perda de fontes potenciais de água doce, de degradação da qualidade da água e de poluição das fontes de superfície e subterrâneas.

Os problemas mais graves que afetam a qualidade da água de rios e lagos são decorrentes, em ordem variável de importância, de diferentes situações, como por

exemplo, esgotos domésticos tratados de forma inadequada, controles inadequados de efluentes industriais, perda e destruição das bacias de captação, localização errônea de unidades industriais, desmatamento, agricultura migratória sem controle e de práticas agrícolas deficientes, culminando em ecossistemas aquáticos perturbados e fontes vivas de água doce ameaçadas.

Sendo assim, o crescimento populacional e a industrialização têm intensificado a poluição de mananciais de captação superficial, fazendo com que a água se torne cada vez mais escassa, ocasionando atualmente, a falta deste elemento natural em muitas regiões do Brasil e do mundo.

Neste contexto, a contaminação da água é definida segundo Mopu (1985), como a alteração de sua qualidade natural pela ação do homem, que faz com que seja, parcial ou totalmente imprópria para o uso a que se destina. Entende-se por qualidade natural da água o conjunto de características físicas, químicas e bacteriológicas que esta apresenta em seu estado natural nos rios, lagos, mananciais, subsolo ou no mar.

Dentro da ideia genérica de poluição, podem ser inseridos vários processos alteradores de qualidade, como contaminações bacteriológicas e químicas, eutrofização e assoreamento. As contaminações são originárias principalmente do lançamento de águas residuárias domésticas e industriais em rios e lagos. A poluição de um ambiente aquático envolve, portanto, processos de ordem física, química e biológica (KONRADT-MORAES, 2009).

A contaminação dos recursos hídricos e dos mananciais de abastecimento público por rejeitos oriundos das atividades humanas tem sido um dos maiores fatores de risco para a saúde das pessoas, especialmente em regiões com condições inadequadas de saneamento e suprimento de água, o que é observável tanto em regiões brasileiras de alta concentração urbana como em áreas rurais (FUNASA, 2003).

Quando se trata da contaminação bacteriana, sabe-se que as enfermidades as quais os microrganismos podem produzir nos seres vivos são diversas, como simples transtornos gastrointestinais e vômito. As bactérias, como as espécies do gênero *Shigella*, podem produzir diarreia e as *Salmonellas* produzem salmoneloses e ainda febre tifóide (*Salmonella typhi*). Apresentam-se ainda como possíveis fontes de contaminação o vibrião da cólera, a *Escherichia coli*. As toxinas geradas pelas cianobactérias, podem ocasionar diversos problemas à saúde como gastroenterites, alergias e ainda lesões hepáticas.

Os riscos à saúde da população, quando em contato com águas de esgoto, dependem da natureza e número de patógenos excretados, da capacidade dos mesmos

sobreviverem e se multiplicarem no ambiente, do tratamento aplicado às águas e lodos de esgoto, do tipo de resíduos industriais presentes e de vários fatores demográficos, geográficos e climatológicos (KONRADT-MORAES, 2009).

Os materiais em suspensão, presentes na água, servem de suporte e proteção para os microrganismos, dificultando sua eliminação pela desinfecção. A matéria orgânica é fonte de substrato para a proliferação da flora bacteriana, assim como as matérias nitrogenadas e fosfatadas responsáveis pelo crescimento das algas e pela eutrofização dos corpos d'água.

Segundo a Organização Mundial da Saúde – OMS, aproximadamente ¼ dos leitos existentes nos hospitais do mundo são ocupados por doentes cujas doenças são veiculadas pela água (NETTO *et al.*, 1987). Alguns estudos apontam as doenças transmitidas pela água como responsáveis por 65% das internações pediátricas na rede pública (FALCÃO e OLIVEIRA, 2004). Dessa forma, deve haver um controle desse bem natural, de forma a assegurar sua qualidade.

De acordo com a Portaria nº 518 de 25 de março de 2004 do Ministério da Saúde (MS), toda a água destinada ao consumo humano deve obedecer ao padrão de potabilidade, ou seja, os parâmetros físicos, químicos, microbiológicos e radioativos de qualidade devem ser atendidos.

Sendo assim, o tratamento de água deve seguir uma sequência de operações que melhorem suas características sensoriais, físicas, químicas e bacteriológicas, a fim de que a água se torne adequada ao consumo humano, eliminando qualquer impureza que possa ser prejudicial e nociva à saúde (MEDEIROS-FILHO, 2006).

Para o abastecimento público de água potável, o tratamento tem as seguintes finalidades básicas: eliminação ou redução de bactérias, algas, protozoários e outros microrganismos, substâncias venenosas, mineralização excessiva, teor de matéria orgânica em excesso, remoção de cor, turbidez, dureza, odor, sabor, ferro e manganês (MEDEIROS-FILHO, 2006).

Apesar das várias opções existentes para o tratamento da água, o desenvolvimento sócio-econômico do Brasil não é suficiente para abastecer toda população brasileira de água potável, mesmo utilizando sistemas simplificados e de baixo investimento (SILVA, 2005).

No Brasil, há dados afirmando que apenas 77% da água consumida pela população é tratada (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

Como a maioria dos sistemas produtores de água no Brasil foi concebida há 30 anos ou mais, é natural que as tecnologias implantadas enfrentem dificuldades para a inclusão de etapas adicionais, adequadas à remoção de contaminantes antes desconhecidos ou inquantificáveis (MENDES, 2006). Assim, Konradt-Moraes (2009) citando Ferreira Filho e Marchetto (2006) sugere que a produção de água potável a partir de mananciais eutrofizados potencializa os problemas e desafios a serem enfrentados pelos profissionais do setor, especialmente para Estação de Tratamento de Águas (ETAs) já existentes, que devem adequar-se a uma nova visão multi-objetivo, tanto no projeto, quanto na operação, conforme ilustrado na Figura 3.1.



Figura 3.1. Funções multi-objetivos envolvidas no projeto e operação de ETA's

Fonte: Konradt-Moraes (2009) citando Ferreira Filho e Marchetto (2006).

Processos de clarificação convencional (normalmente coagulação – floculação – filtração – desinfecção) são de confiança e eficiência limitadas, dependendo da qualidade da fonte de água e das condições de operação para a estação, isto é, concentração dos reagentes, pH, temperatura, tempo de contato e de parâmetros hidráulicos (KONRADT-MORAES, 2009).

Desta forma, principalmente as pequenas comunidades do interior do país, as zonas rurais e a periferia das grandes cidades sofrem com a falta de água potável em suas regiões, sendo necessário então, dispor de técnicas alternativas e também de uma visão multi-objetiva para o tratamento, visando a melhoria das condições de saúde e vida da população.

3.2 QUALIDADE DA ÁGUA

A água destinada ao consumo humano apresenta um risco potencial para a saúde da população devido à má qualidade dos mananciais superficiais ou subterrâneos (MEDRI e DA COSTA, 2001). Sabe-se que a água contém componentes intrínsecos e componentes introduzidos a partir das atividades humanas.

Para caracterizar uma água potável há diversos parâmetros conhecidos como indicadores de qualidade, que são levados em consideração, representando suas características físicas/sensoriais, químicas e biológicas (MOTA, 1997).

3.2.1 Parâmetros Físicos

Os principais parâmetros para caracterizar fisicamente as águas naturais são a cor, a turbidez, os níveis de sólidos em suas diversas frações, temperatura, sabor e odor. Embora as características físicas da água tenham importância relativamente pequena do ponto de vista sanitário, elas podem ser determinantes na escolha da tecnologia de tratamento (DI BERNARDO, 1993).

A turbidez refere-se à matéria suspensa, de qualquer natureza, presente na água, com tamanho que propicia a formação desde suspensões grosseiras a colóides. É causada principalmente por areia, argila e microrganismos em geral (DI BERNARDO e DANTAS, 2005). Pode ser considerada como o inverso da sua transparência.

A cor nas águas pode resultar dos processos de decomposição da matéria orgânica, da presença de íons metálicos naturais como o ferro e o manganês, bem como do lançamento de diversos tipos de despejos industriais. Em particular, a cor natural nas águas, principalmente a cor verdadeira, tem como origem, substâncias húmicas e fúlvicas, as quais apresentam-se sempre em estado coloidal (LEAL e LIBÂNIO, 2002). Estas substâncias, segundo Letterman, Amirtharajah, O'Melia (1999), podem derivar-se do solo ou ainda, por serem os principais componentes da matéria orgânica natural presente nas fontes de água, serem produzidas dentro do meio líquido, por reações químicas e biológicas de decomposição de sedimentos da matéria vegetal presente.

Acrescenta-se ainda que a presença de matéria orgânica em decomposição e o lançamento de despejos domésticos e industriais podem originar odor e sabor às águas, classificando este parâmetro de qualidade como causado, respectivamente, por fontes naturais ou artificiais (LEAL e LIBÂNIO, 2002).

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 são as que definem as diversas frações de sólidos presentes na água (sólidos totais, em suspensão, dissolvidos, fixos e voláteis).

A temperatura da água é importante, pois interfere na velocidade das reações químicas, na solubilidade dos gases e pode acentuar a sensação de sabor e odor (UFSC, 1999). Interferem ainda na eficiência da desinfecção e no desempenho das unidades de mistura rápida, floculação, decantação e filtração (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

3.2.2 Parâmetros sensoriais

Gosto e odor em água de abastecimento podem geralmente ser atribuídos a dois diferentes elementos, ou seja, podem estar interligados a ação humana sobre o ambiente aquático e forças naturais que ocorrem no próprio meio ambiente. Pode-se exemplificar, o odor produzido pela degradação biológica de algas reagindo com os produtos de despejos ricos em nutrientes, introduzidos ao corpo d'água pela ação do homem (MAUTONE e KAZUKI, 2008).

Muito embora uma água potável do ponto de vista microbiológico, isenta de cor verdadeira, turbidez e compostos orgânicos e inorgânicos, seja considerada segura do ponto de vista sanitário, a presença de gosto e odor causa transtornos consideráveis junto aos consumidores. Estes problemas têm natureza complexa e de solução tecnológica difícil e onerosa. De um modo geral, a presença de gosto e odor em águas de abastecimento pode ser ocasionada pelos seguintes motivos (ALVES, 2006):

- Presença de constituintes inorgânicos em concentrações elevadas tais como: ferro, cloreto, sulfato, gás sulfídrico, entre outros;
- Presença de compostos orgânicos originários de fontes antropogênicas (fenóis, nitrofenóis) e demais compostos aromáticos (tetracloro de carbono, tetracloroetileno e outros);
- Presença de elementos originados no processo de tratamento e, em geral, problemas desta natureza estão associados à ação do agente oxidante e/ou desinfetante e suas reações com compostos orgânicos, que podem ser de origem biogênica e ou antropogênica;

- Presença de elementos originados no sistema público de distribuição de água que, dadas as suas condições físicas de concepção e traçado, das características da água bruta e tratada, é comum que estas apresentem concentrações elevadas de ferro e manganês, que podem causar gosto metálico à água distribuída. O crescimento de microrganismos nas redes de distribuição também tem sido causa de inúmeros problemas de odor e sabor, bem como, a presença de altas concentrações do próprio agente desinfetante;
- Presença de compostos orgânicos originários de fontes biogênicas. É sabido que inúmeros microrganismos, notadamente certas algas, especialmente as cianofíceas (algas azuis), bem como os actinomicetos, são responsáveis pela produção de certos compostos orgânicos, resultantes do seu metabolismo, que, sob certas condições ainda não totalmente conhecidas, são liberados para o meio. Estes compostos orgânicos são responsáveis por inúmeros problemas de gosto e odor em águas de abastecimento sendo, indubitavelmente, os mais difíceis de serem removidos.

De acordo com Alves e Ferreira-Filho (2006), a grande evolução na identificação e tratamento de problemas de gosto e odor em águas de abastecimento ocorreu em 1965, quando os pesquisadores Gerber e LeChevalier isolaram e identificaram o composto Geosmina, produzido por culturas de actinomicetos, sendo estes causadores de gosto e odor de terra.

Em 1969, Gerber isolou um segundo composto denominado 2-metilisoborneol (MIB), também produzido por culturas de actinomicetos (ALVES e FERREIRA-FILHO, 2006).

Em mananciais superficiais utilizados para abastecimento público, a maior parte dos problemas de gosto e odor estão diretamente relacionados à presença do agente oxidante. Estes problemas são frequentemente descritos como sendo gosto e odor de terra, mofo e gramíneo. Os organismos mais diretamente relacionados aos problemas de gosto e odor são os actomicetos e certos tipos de algas. Estes odores classificados como gramíneo, terra e mofo, são os de mais difícil remoção no tratamento convencional de águas de abastecimento humano (ALVES e FERREIRA-FILHO, 2006).

Segundo Mautone e Kazuki (2008), a geosmina está associada ao odor de mofo em águas de abastecimento e o metilisoborneol está associado ao gosto e odor de terra. A Tabela 3.1 apresenta as concentrações limiares de odor de GEO (geosmina) e MIB (metilisoborneol).

Tabela 3.1. Concentração limiar de gosto e odor para alguns compostos orgânicos de origem biogênica.

| Composto químico | Descrição | Concentração limiar de odor (ng/L) |
|-------------------------|----------------------|---|
| Geosmina | Terra, mofo | 4 |
| 2-Metilisoborneol | Terra, mofo, cânfora | 9 |

Fonte: MAUTONE e KAZUKI (2008)

Com os avanços da química analítica, novos compostos foram identificados como sendo subprodutos metabólicos de microrganismos e causadores de gosto e odor em águas de abastecimento. No entanto, o emprego de técnicas analíticas sofisticadas para a identificação e quantificação dos compostos orgânicos causadores de gosto e odor em águas de abastecimento não têm sido comum entre a maioria das companhias de saneamento, uma vez que o investimento necessário em equipamentos e mão de obra altamente qualificada é significativamente elevado.

Deste modo, o desenvolvimento de técnicas alternativas para a identificação e quantificação de compostos orgânicos causadores de gosto e odor têm sido consideradas e dentre estas, pode-se citar a utilização do Painel Sensorial (Flavor Profile Analysis), largamente difundido na indústria alimentícia e de bebidas (RASHASH, DIETRICH, HOEHN, 1997), bem como o Número de Limiar de Odor (Threshold Odor Number), sendo que ambos encontram-se descritos em “Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water” (APHA, 1998).

Em face das potencialidades das técnicas sensoriais para a classificação e quantificação de gosto e odor em águas de abastecimento e, muito mais ainda, em função da enorme dificuldade no desenvolvimento de técnicas analíticas que permitam a identificação e quantificação dos compostos orgânicos específicos envolvidos, acredita-se que, futuramente, estas técnicas sensoriais possam ser largamente difundidas entre as companhias de saneamento, auxiliando nos processos de tomada de decisão com respeito às tecnologias de tratamento que possam vir a ser implementadas, objetivando o controle de gosto e odor em águas de abastecimento humano.

Segundo Mautone e Kazuko (2008), a manutenção da qualidade da água nos reservatórios e no sistema de distribuição da água é uma tarefa árdua, porque são locais onde os problemas de gosto e odor se apresentam intensificados. O surgimento destes

problemas em sistemas de distribuição têm pouca compreensão, pois como geralmente são passageiros, seus mecanismos são difíceis de serem identificados.

3.2.3 Parâmetros Químicos

Segundo Konradt-Moraes (2004), as características químicas da água são devidas à presença de substâncias dissolvidas e têm grande importância, tendo em vista as consequências sobre o organismo dos consumidores.

Pode-se citar como parâmetros químicos de qualidade: pH, alcalinidade e acidez, dureza, formas de nitrogênio, compostos orgânicos e inorgânicos.

As impurezas químicas presentes na água podem ser divididas em duas categorias: orgânicas e inorgânicas. Os constituintes orgânicos surgem nas águas de três fontes principais: quebra de moléculas de substâncias húmicas, microrganismos e seus metabólitos e hidrocarbonetos aromáticos. Embora tais substâncias não sejam normalmente prejudiciais ao ser humano, algumas podem agir como precursores de formação de trihalometanos e outros compostos organo-halogenados durante a desinfecção, se o cloro livre for utilizado (DI BERNARDO, 1993).

O termo impurezas orgânicas é aplicável a um número de constituintes de origem animal ou vegetal, que pode indicar uma poluição recente ou remota. Incluem-se neste item a matéria orgânica, em geral, o nitrogênio sob suas diversas formas (orgânico, amoniacal, albuminóide, nitroso e nítrico), o fósforo, dentre outros nutrientes (NETTO *et al.*, 1987).

As características inorgânicas das águas merecem atenção especial por interferirem no processo de tratamento. Alguns elementos químicos inorgânicos podem causar problemas de saúde pública, se presentes acima da concentração permitida, e outros são essenciais ao processo metabólico do ser humano (DI BERNARDO, 1993).

A alcalinidade é importante, pois influi consideravelmente na coagulação química, uma vez que os principais coagulantes primários, comumente utilizados no Brasil (sulfato de alumínio e cloreto férrico), são doadores de prótons em solução. Assim, se a alcalinidade da água for baixa, a coagulação eficiente poderá acontecer com a condição de um alcalinizante para ajuste do pH, mas se a alcalinidade e pH forem relativamente altos, é provável que o sulfato de alumínio não seja indicado.

3.2.4 Parâmetros Microbiológicos

Citando as impurezas presentes nas águas, podem ser encontrados microrganismos como as bactérias, vírus e protozoários, que podem ser patogênicos, e dessa forma, provocar doenças ou epidemias.

Segundo Di Bernardo e Dantas (2005), coliformes são considerados como indicadores de poluição fecal recente.

Os coliformes totais constituem um grupo de bactérias encontradas na água, solo e fezes, enquanto os coliformes fecais integram um grupo de bactérias originárias do trato intestinal, sendo a *Escherichia coli* uma das principais representantes (MOTA, 1997).

Segundo a Portaria nº 518 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2010), a qualidade microbiológica da água pode ser avaliada por meio do NMP – número mais provável ou UFC – unidade formadora de colônia de coliformes totais ou de *Escherichia coli*.

A presença de coliformes fecais indica a possibilidade de contaminação fecal, sendo então, um sinal de alerta no combate à contaminação da água. Contudo, não é regra que toda água que contenha coliformes possa veicular doenças hídricas. Por outro lado, concentrações elevadas desses microrganismos podem tornar impossível a utilização de um manancial, mesmo com tratamento (NETTO *et al.*, 1987).

3.2.5 Padrão de potabilidade da água

O Ministério da Saúde é o órgão responsável pela fiscalização e legislação, indicando os padrões de potabilidade de água. Segundo a Portaria Nº 518, de 25 de Março de 2004 (MS), “[...] água potável é a água para consumo humano cujos parâmetros microbiológicos, físicos, químicos e radioativos atendam ao padrão de potabilidade e que não ofereça riscos à saúde”.

No entanto, não basta que a água seja isenta de impurezas nocivas à saúde para ser considerada potável. De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), existem algumas exigências que devem ser seguidas, para que a água possa ser utilizada para consumo humano, tais como:

- Apresentar aspecto límpido e transparente;
- Não apresentar cheiro ou gosto objetáveis;
- Não conter nenhum tipo de microrganismo que possa causar doenças no ser humano;

- Não conter nenhuma substância em concentrações que possam causar qualquer tipo de dano à saúde do ser humano.

Com base nessa definição, são estabelecidos os padrões de potabilidade para as águas destinadas ao abastecimento público. No Brasil, a Portaria 518 MS, que estabelece os padrões de potabilidade para água de consumo humano, recomenda a análise de coliformes totais e *Escherichia Coli* na água, com o objetivo de atingir-se um padrão de ausência dos mesmos. São também determinados padrões de turbidez em complementação aos padrões de qualidade microbiológica da água.

O artigo 9, da norma a pouco mencionada, estabelece que cabe ao(s) responsável(is) pela operação de sistema, ou de solução alternativa de abastecimento, entre outros procedimentos, efetivar o controle das características dos mananciais de abastecimento e da bacia contribuinte.

O Artigo 16 determina o padrão de aceitação para consumo humano, conforme mostra a Tabela 3.2. Este dispositivo legal recomenda que, no sistema de distribuição, o pH da água seja mantido na faixa de 6,0 a 9,5.

Tabela 3.2. Padrão de potabilidade de água para consumo humano.

| Parâmetro | Unidade | VMP⁽¹⁾ |
|--------------------------------|-------------------|------------------------------|
| Alumínio | mg/L | 0,2 |
| Amônia (como NH ₃) | mg/L | 1,5 |
| Cloreto | mg/L | 250 |
| Cor Aparente | uH ⁽²⁾ | 15 |
| Dureza | mg/L | 500 |
| Etilbenzeno | mg/L | 0,2 |
| Ferro | mg/L | 0,3 |
| Manganês | mg/L | 0,1 |
| Monoclorobenzeno | mg/L | 0,12 |
| Odor | - | Não objetável ⁽³⁾ |
| Gosto | - | Não objetável ⁽³⁾ |
| Sódio | mg/L | 200 |
| Sólidos dissolvidos totais | mg/L | 1000 |
| Sulfato | mg/L | 250 |
| Sulfeto de Hidrogênio | mg/L | 0,05 |
| Surfactantes | mg/L | 0,5 |
| Tolueno | mg/L | 0,17 |
| Turbidez | uT ⁽⁴⁾ | 5 |
| Zinco | mg/L | 5 |
| Xileno | mg/L | 0,3 |

Notas: (1) Valor máximo permitido.

(2) Unidade Hazen (mg Pt-Co/L).

(3) critério de referência

(4) Unidade de turbidez.

Nos termos do Artigo 19, essas análises deverão contemplar os parâmetros exigidos na legislação vigente de classificação e enquadramento de águas superficiais (Resolução Nº 357 do Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA), avaliando a compatibilidade entre as características da água bruta e o tipo de tratamento.

O objetivo maior da portaria em questão é garantir segurança à saúde do consumidor, sendo que em seu Artigo 29 dispõe que:

“[...] sempre que forem identificadas situações de risco à saúde, o responsável pela operação do sistema ou solução alternativa de abastecimento de água e as autoridades de saúde pública devem estabelecer entendimentos para a elaboração de um plano de ação e tomada das medidas cabíveis, incluindo a eficaz comunicação à população, sem prejuízo das providências imediatas para a correção da anormalidade.”

A atividade de vigilância da qualidade da água para consumo humano envolve uma séria de cuidados, desde a avaliação do grau de risco que os sistemas representam à saúde pública em função da origem da água, do tratamento empregado e dos procedimentos adotados em todo o processo, até a verificação de queixas e denúncias realizadas por consumidores em relação à qualidade da água fornecida.

Os responsáveis pela vigilância da qualidade da água devem avaliar criteriosamente potencial de risco apresentado na água, a qual será consumida pela população e adotar medidas corretivas e preventivas para que o sistema recupere ou mantenha as condições de segurança.

3.3 PRINCÍPIOS DO TRATAMENTO PARA OBTENÇÃO DE ÁGUA POTÁVEL

O final da década de 60 e o início da década de 70 caracterizaram-se, no campo de tratamento de água, por grandes avanços tecnológicos. Alguns fatores permitiram e asseguraram essa grande evolução (NETTO *et al.*, 1987), como: melhores conhecimentos sobre os fenômenos de coagulação das águas, sobre a mecânica da mistura e floculação; maior domínio sobre a decantação, sobre o comportamento dos filtros rápidos, emprego de reagentes auxiliares e aperfeiçoamento das técnicas de laboratório, operação e controle.

3.3.1 Operações Unitárias No Tratamento De Água

As operações unitárias básicas no tratamento de água são a coagulação, floculação, sedimentação/flotação e filtração.

Contudo, com o desenvolvimento da indústria química mundial, novos quesitos de qualidade passaram a ser impostos para águas de abastecimento, necessitando de aprimoramento destas operações, bem como o controle das concentrações de compostos químicos orgânicos e inorgânicos adicionados e que pudessem causar danos à saúde humana. Sendo assim, novas operações unitárias passaram a ser incorporadas no tratamento de água, ressaltando-se os processos de oxidação química, adsorção, arraste com ar e, mais recentemente, processos de filtração com membrana (microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose reversa) (MONTGOMERY, 2005).

Embora a adoção destas tecnologias de tratamento tenha sido incorporada em função do estabelecimento de padrões de potabilidade cada vez mais restritivos, novos quesitos foram impostos com respeito aos padrões estéticos mínimos exigidos para uma água de abastecimento, dentre estes, a ausência de gosto e odor.

3.3.1.1 Coagulação e Floculação

As etapas de coagulação e floculação são consideradas a parte mais crítica do tratamento de água para abastecimento. Qualquer falha neste setor pode acarretar grandes prejuízos na qualidade e custo do produto distribuído à população.

Os termos coagulação e floculação são utilizados como sinônimos, uma vez que ambos significam o processo integral de aglomeração das partículas. No entanto, pode-se dizer que a coagulação é o processo pelo qual o agente coagulante é adicionado à água, reduzindo as forças que tendem a manter separadas as partículas em suspensão, e a floculação é a aglomeração dessas partículas por meio de transporte de fluido, de modo a formar partículas maiores que possam sedimentar (RITCHER e AZEVEDO NETTO, 2003).

Na floculação ocorre a agregação das partículas em suspensão, em função das forças de Van Der Waals. A formação dos flocos pode ocorrer de maneira espontânea, apenas pelos sucessivos choques entre as várias partículas presentes, desde que o sistema possua energia disponível para tal, decorrente da agitação dele. Assim, uma agitação muito intensa pode fazer com que os flocos formados se desagreguem espontaneamente (PAULA, 2004).

Na unidade de mistura rápida, ocorrem interações entre o coagulante e a água e formam-se espécies hidrolisadas, sendo geralmente necessária agitação intensa para que o processo de coagulação seja eficiente (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

De maneira geral, todas 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 de pH, o processo de coagulação/floculação se desenvolve baseado nas cargas negativas das impurezas da água (CAMPOS e POVINELLI, 1976).

As moléculas de água e a "atmosfera" iônica que se forma ao redor das partículas estarão sujeitas às forças eletrostáticas de atração e repulsão (que decaem com a distância da superfície da partícula) e, em virtude dessas forças, as camadas de água ao redor das partículas manifestam mobilidade decrescente conforme se aproxima da superfície das partículas. Dessa forma, as primeiras camadas de água praticamente tornam-se imóveis em relação à partícula, caminhando junto com a mesma e definindo o chamado "plano de cisalhamento", onde pode ser medido o Potencial Zeta da partícula (DI BERNADO, 1993; MENDES, 1989).

A Figura 3.2 ilustra que as forças atrativas entre a água e a partícula são devidas ao fato de que as moléculas de água funcionam como dipolos elétricos, os quais prendem-se diretamente às cargas negativas da argila, ou através de cátions adsorvidos e a espessura dessa camada de água varia com a natureza desses cátions e, portanto, com a salinidade da água (VARGAS, 1977).

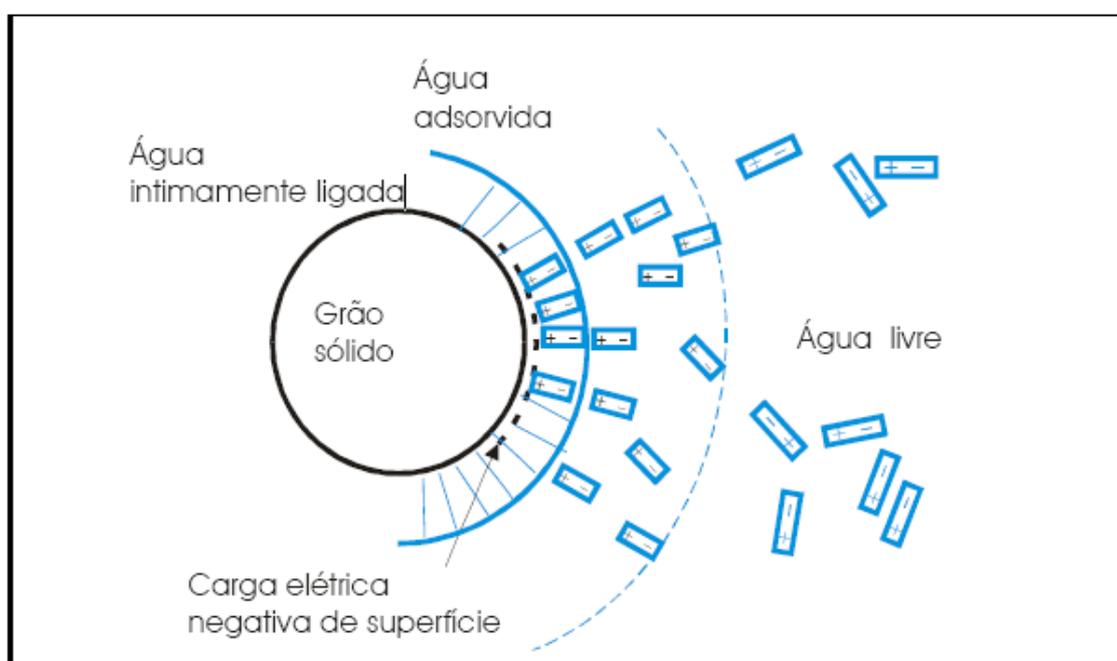


Figura 3.2. Representação esquemática da água adsorvida ao redor de uma partícula de argila.

Fonte: adaptado de VARGAS, 1977

O conceito de Potencial Zeta está associado à aplicação da diferença de potencial em uma amostra de água contendo colóides negativos, de tal forma que uma certa porção do meio, em torno da partícula, caminha junto com esta ao eletrodo positivo, caracterizando o Plano de Cisalhamento. A diferença de potencial entre o Plano de Cisalhamento e o meio envolvente é denominada Potencial Zeta (P.Z.) e para se conseguir uma boa formação de flocos é necessário efetuar sua diminuição, ainda que não se consiga anulá-lo, e também promover os encontros das partículas entre si (DI BERNARDO, 1993).

Assim, as principais metas para se obter a coagulação/floculação consistem em:

- reduzir o potencial Zeta a valores bastante baixos para que a repulsão entre as partículas não represente oposição ao encontro das mesmas (quando $PZ = 0$, diz-se que se atingiu o “ponto isoelétrico”);
- fornecer energia ao meio para que a agitação acarrete maior número de choques por unidade de tempo e de volume, sem, contudo, provocar ruptura dos flocos previamente formados. Produzir no meio, compostos floculentos, aglomerados de partículas (Figura 3.3).

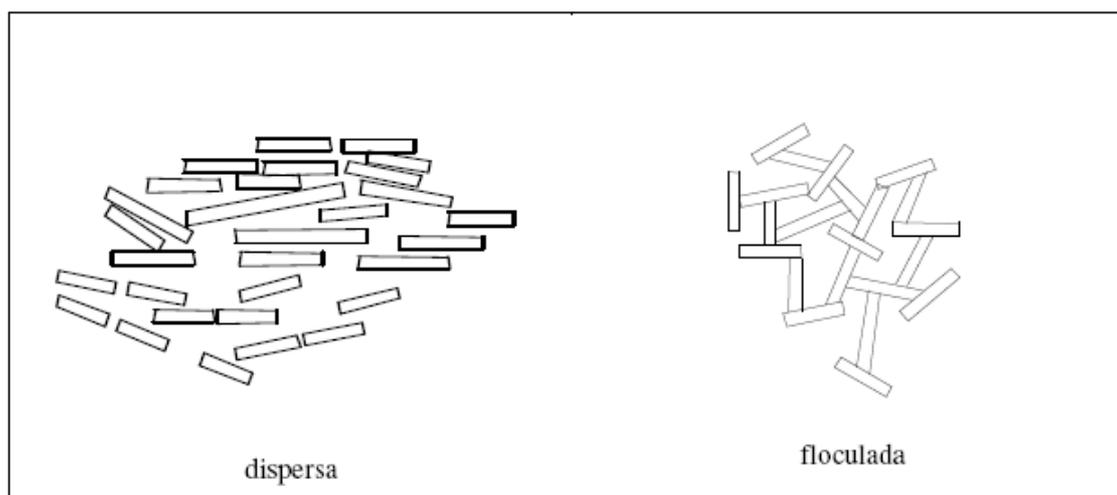


Figura 3.3. Modelos estruturais básicos: representação esquemática da orientação de partículas.

Fonte: adaptado de LEONARDS, 1962

Estas impurezas não se aproximam umas das outras com facilidade. Assim, é necessária a adição de substâncias denominadas coagulantes, para que ocorra aproximação e posterior remoção desses elementos.

A finalidade da coagulação e floculação é transformar as impurezas que se encontram em suspensão fina, em estado coloidal ou em solução, bactérias e protozoários

ou plâncton, em partículas maiores (flocos) para que possam ser removidas por sedimentação e/ou filtração ou, em alguns casos, por flotação.

Em estações de tratamento de água, convencionalmente, ocorre agitação da água, seguida pela adição de coagulantes para reduzir a força repulsiva entre as partículas, aumentando a colisão dessas e a formação de flocos (McCCONACHIE *et al.*, 1999). O coagulante tem um papel chave nesse processo.

A atividade floculante pode ser explicada por diferentes mecanismos. Proteínas catiônicas de alto peso molecular têm sua atividade floculante explicada pelo modelo de formação de pontes (GASSENSCHMIDT *et al.*, 1995). A floculação de partículas negativamente carregadas é resultante de ligações como forças de Coulomb entre macromoléculas carregadas positivamente e neutralização de parte das cargas.

Geralmente, uma pequena parte das macromoléculas liga-se à superfície das partículas enquanto que a maior parte fica livre para se ligar a outra e isso leva a aglomerações e formação de flocos. O mecanismo de ligação de cargas pode ser aplicado a proteínas pequenas e básicas. Devido à colisão das partículas, ocorre a saturação interpartículas de setores diferentemente carregados e formação de flocos no local (GASSENSCHMIDT *et al.*, 1995). Após a floculação, ocorre a remoção dos flocos através da sedimentação por gravidade e/ou filtração.

Muitos coagulantes são amplamente usados em processos convencionais de tratamento de água para produção de água potável. Esses podem ser tanto coagulantes inorgânicos (sulfato de alumínio e cloreto de polialumínio), polímero orgânico sintético (derivados de poliácridamida e polietileno imina) ou coagulantes naturais (quitosana e coagulantes microbianos). Contudo, estudos têm mostrado que o alumínio pode induzir a doença de Alzheimer e que monômeros de alguns polímeros orgânicos sintéticos, como a acrilamida possuem neurotoxicidade e fortes propriedades carcinogênicas (OKUDA *et al.*, 1999).

Polímeros orgânicos são comumente usados como coagulantes primários no tratamento de água (OZACAR e SENGIL, 2002). Possuem alto peso molecular e forte tendência a adsorver partículas na superfície da suspensão aquosa. Esses polímeros podem ser classificados em catiônicos, aniônicos ou não iônicos. Polímeros catiônicos são frequentemente usados como coagulantes primários, enquanto que, polímeros aniônicos ou não iônicos são referidos como floculantes. Polímeros orgânicos sintéticos vêm sendo usados como um coagulante efetivo nos sistemas de purificação de água, contudo possuem limitações. Suas formulações contêm contaminantes como monômeros residuais e reagem

com subprodutos que podem ter um potencial impacto negativo à saúde humana. Também foi observado que esses polímeros, quando usados como coagulantes, reagiram com cloro e formaram uma grande quantidade de compostos orgânicos voláteis carcinogênicos, como o clorofórmio e o benzeno sendo que a quantidade desses subprodutos aumenta com o aumento da turvação da água (OZACAR e SENGIL, 2002).

Coagulantes naturais de origem vegetal foram usados para o tratamento da água antes do advento dos sais químicos (NDABGENGESERE e NARASIAH, 1998). Recentemente, o interesse por esses coagulantes tem ressurgido por eles serem biodegradáveis e seguros para a saúde humana (OKUDA *et al.*, 2001). Ozacar e Sengil (2002) verificaram que os taninos, compostos aromáticos policíclicos de alto peso molecular, encontrados frequentemente em plantas, constituem um eficiente coagulante primário. Okuda *et al.* (2001) estudaram as propriedades coagulantes do cacto no tratamento da água e diversos estudos vêm sendo feitos para avaliar a atividade de compostos coagulantes presentes em sementes de *M. oleifera* (NDABIGENGESERE *et al.*, 1995; GHEBREMICHAEL *et al.*, 2005).

3.3.1.1.1 Mecanismos de coagulação

O tipo de coagulante utilizado define o mecanismo de coagulação/floculação das impurezas que estão contidas nas águas brutas e, conseqüentemente, depende de fatores econômicos relacionados à adequabilidade à água bruta, à tecnologia de tratamento, ao custo e à preservação dos tanques e dosadores.

De acordo com Di Bernardo e Dantas (2005), a coagulação é resultante da ação individual ou combinada de quatro mecanismos distintos: compressão da camada difusa, adsorção e neutralização, varredura e adsorção e formação de pontes.

A) Compressão da camada difusa

Um sistema coloidal pode ser desestabilizado pela adição de íons com carga contrária à das partículas coloidais. A desestabilização de um colóide por um eletrólito indiferente, como o cloreto de sódio, ocorre devido às interações eletrostáticas, ou seja, íons de mesma carga são repelidos e íons de carga contrária são atraídos pelos colóides (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

Quando sais simples são introduzidos em um sistema coloidal, ocorre o aumento da densidade de cargas na camada difusa e a diminuição da esfera de influência das partículas, ocasionando o que se chama de coagulação por compressão da camada difusa. O aumento de íons positivos e negativos na água acarreta o acréscimo do número de íons na camada difusa que, para manter-se eletricamente neutra, tem seu volume reduzido, de modo que as forças de Van Der Waals sejam dominantes, eliminando a estabilização eletrostática (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

B) Adsorção e Neutralização de Cargas

A desestabilização de uma dispersão coloidal consiste nas interações entre coagulante-colóide, coagulante-solvente e colóide-solvente. O mecanismo de adsorção-neutralização de carga é muito importante quando se aplicam tecnologias de filtração direta, pois não há necessidade da produção de flocos para posterior sedimentação, mas de partículas desestabilizadas que serão retidas no meio filtrante (DI BERNARDO, 1993).

C) Varredura

Dependendo da dosagem adicionada de coagulante, do pH da mistura e da concentração de alguns tipos de íons na água, poderá ocorrer a formação de precipitados do tipo $\text{Al}(\text{OH})_3$ ou $\text{Fe}(\text{OH})_3$. O mecanismo da varredura é muito utilizado nas estações de tratamento em que se tem a floculação e sedimentação antecedendo a filtração, pois os flocos resultantes são de maior tamanho e apresentam velocidades de sedimentação relativamente altas se comparados com os flocos obtidos com a coagulação realizada no mecanismo de adsorção-neutralização (DI BERNARDO, 1993).

D) Adsorção e Formação de Pontes

Atualmente encontram-se vários compostos sintéticos ou naturais de grandes cadeias moleculares, os quais servem de ponte entre a superfície à qual estão aderidos e outras partículas (DI BERNARDO e DANTAS, 2005). Estes polímeros apresentam sítios ionizáveis ao longo da cadeia e atuam como coagulante.

Para Mendes (1989), o comportamento dos polímeros como coagulantes pode ser explicado baseando-se na sua adsorção à superfície das partículas coloidais, seguida pela redução da carga ou pelo entrelaçamento das partículas na cadeia do polímero.

3.3.1.2 Sedimentação e Filtração

Segundo Di Bernardo (1993) a sedimentação corresponde à fase em que os flocos, com seu tamanho consideravelmente aumentado, tendem, pela ação da gravidade, a sedimentar. A ocorrência da sedimentação das partículas suspensas proporciona a clarificação da água pela separação das fases sólida e líquida e, quanto maior a velocidade de sedimentação, menor será o tempo de residência necessário para a clarificação da água. Muitas vezes, a utilização exclusiva de coagulantes (orgânicos ou inorgânicos) não permitem a formação de flocos suficientemente densos, determinantes para a obtenção de uma taxa de sedimentação satisfatória e. Nestes casos, a utilização de auxiliares de floculação conhecidos como polieletrólitos mostra-se necessária.

A filtração é uma operação de polimento para a qualidade da água, que consiste basicamente na passagem da água por um meio poroso filtrante (por exemplo: pedregulho, areia e antracito, membranas entre outros) que deve ser capaz de reter os flocos (ou pedaços daqueles que se quebram) que não sedimentaram e, eventualmente, alguns microrganismos.

3.3.1.2.1 Filtração por membranas

A partir da década de 60 verificou-se que uma nova classe de processos era introduzida junto às operações unitárias clássicas. Esta nova categoria surgia baseada no simples conceito de uma membrana semipermeável, com a função de separar componentes seletivamente, vindo a complementar ou substituir operações tradicionais como destilação, adsorção, extração e outros (SCOTT e HUGHES, 1996).

Os processos de separação por membranas vêm, cada vez mais, tornando-se importantes como alternativa aos processos de filtração convencionais e tem sido objeto de grande atenção em processos de tratamento para a obtenção de água potável. As razões para tal incluem as leis cada vez mais rígidas para a qualidade da água destinada ao consumo humano e o despertar das pessoas com relação à necessidade de melhoria do padrão de saúde (KONRADT-MORAES, 2004).

A definição exata de uma membrana é difícil de ser conceituada. De um modo geral, membrana é uma barreira entre duas fases que restringe o transporte das diversas espécies químicas de maneira específica e seletiva (STRATHMANN, 1981), como demonstrado na Figura 3.4.

As partículas são separadas com base em seu tamanho molecular e forma, geralmente com o uso da pressão como força motriz e através de membranas semipermeáveis, especialmente fabricadas (seletivas). A escala de separação estende-se desde a faixa iônica até ao mais clássico processo de filtração, de forma a remover material particulado.

Os sólidos dissolvidos são seletivamente separados (retentado) do fluido (permeado). Esta separação dependerá do valor da massa molecular de corte (“cut-off”) da membrana, representado teoricamente pela massa molar da menor molécula retida pela membrana. Normalmente, quando se trata de separação de macromoléculas, a unidade comumente usada para a massa molar é o Dalton. É importante ressaltar que membranas são sistemas de separação de materiais, ou seja, não ocorre transformação química ou biológica de componentes durante o processo de filtração.

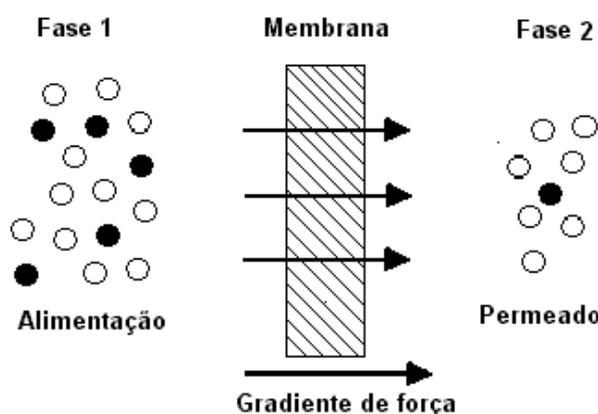


Figura 3.4. Representação Esquemática de Duas Fases Separadas por uma Membrana.

Fonte: MULDER, 1991

Na Fig 3.4, a Fase 1 é geralmente considerada como a alimentação, enquanto a Fase 2 é considerada o permeado. A separação ocorre devido à membrana ter a capacidade de transportar um componente, a partir da mistura de alimentação, mais facilmente que qualquer outro componente ou componentes. Contudo, deve-se lembrar que, em geral, uma membrana não é uma barreira semi-permeável perfeita (ou ideal) (MULDER, 1991).

A filtração por membranas pode ocorrer de forma perpendicular, chamada filtração convencional, “dead-end”, ou por filtração tangencial (“cross-flow”). Na filtração convencional, o fluido escoar perpendicularmente através da membrana filtrante, fazendo com que os solutos se depositem sobre a superfície, sendo necessária a interrupção do processo para limpeza ou substituição da membrana. Na filtração tangencial, a solução de alimentação flui paralelamente à membrana e ao fluxo permeado, o que permite o escoamento de grandes volumes de fluido, pois esse tipo de escoamento, a altas velocidades, tem o efeito de arrastar os sólidos que tendem a se acumular sobre a superfície da membrana. Como ocorre menor acúmulo de material retido sobre a superfície da membrana, a mesma tem menor tendência ao entupimento e a produção pode ser mantida em níveis acima dos que são possíveis na filtração perpendicular (LEMANSKI, 2004).

A ultrafiltração é feita convencionalmente em fluxo tangencial, com o fluxo principal paralelo ao meio filtrante (NOBLE e STERN, 1995).

Companhias de abastecimento de água de alguns países como Holanda, Inglaterra, Estados Unidos, Austrália, Japão, estão construindo várias instalações de filtração por membranas com a finalidade de obtenção de água potável, uma vez que, desde os anos 60, com o maior desenvolvimento de vários tipos de membranas, descobriu-se o seu grande potencial no tratamento de água como a remoção de matéria orgânica natural (MON), pesticidas, micropoluentes orgânicos e metálicos e ainda, nitratos.

Processos com membranas são economicamente atrativos em grandes instalações que utilizam águas superficiais de boa qualidade. Atualmente, os objetivos são estender os processos de tecnologia com membranas para águas de qualidade inferior a fim de se remover cor, sabor, matéria orgânica dissolvida e produtos de desinfecção (GUIGUI *et al.*, 2002).

Há quatro categorias básicas de separação por membranas que apresentam potenciais aplicações: osmose reversa, nanofiltração, microfiltração e ultrafiltração.

Os processos de separação por membranas, cuja força motriz é o gradiente de pressão, tem uma forte analogia com a filtração convencional, em que a retenção por tamanho é o princípio básico de fracionamento das diferentes espécies químicas presentes.

A Figura 3.5 demonstra alguns compostos, suas dimensões e pesos moleculares aproximados, e o processo de separação por membranas utilizado para realizar a segregação destes compostos.

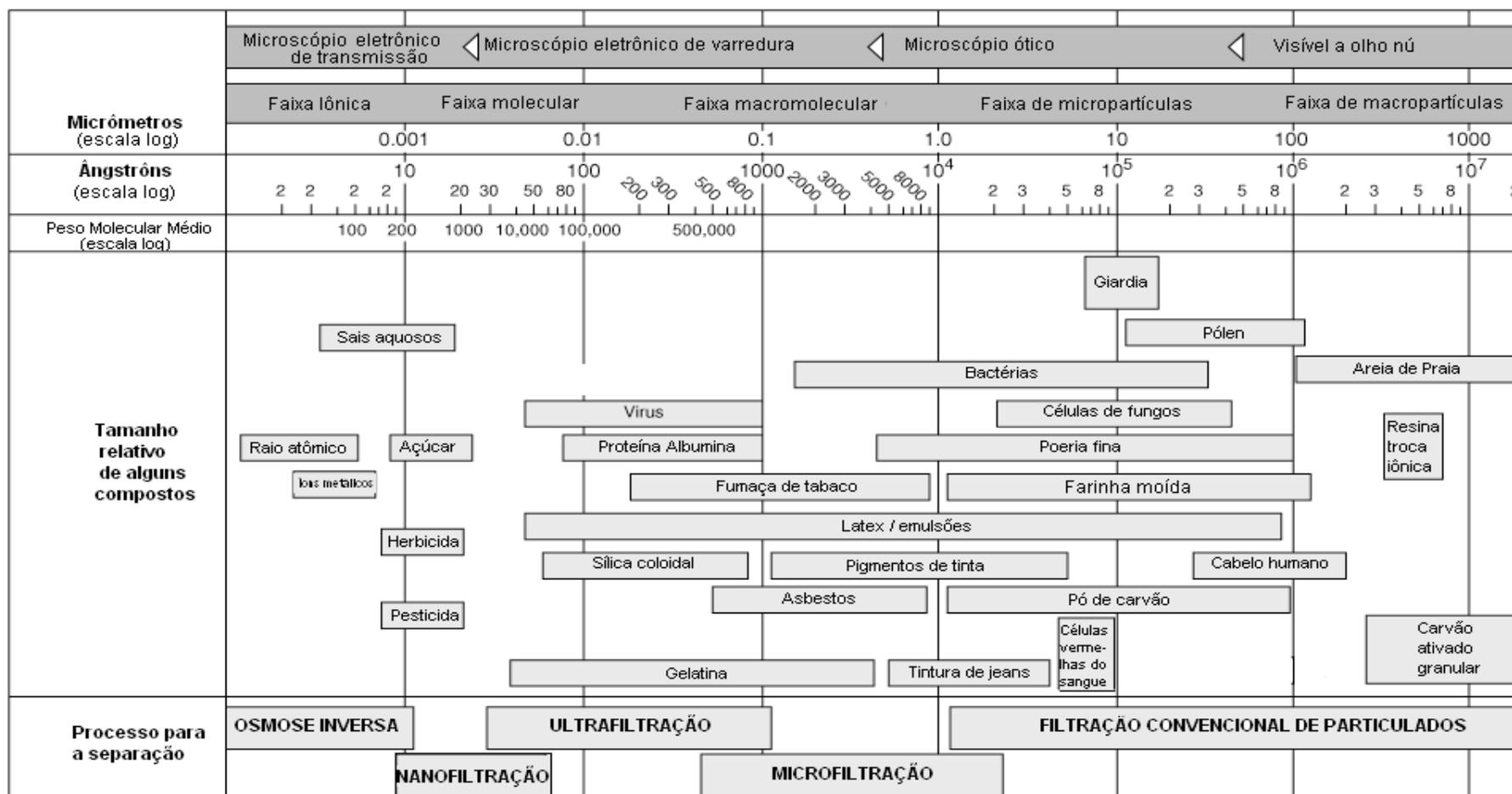


Figura 3.5. Faixas das dimensões separadas por processos com membranas que utilizam o gradiente de pressão como força motriz.

Fonte: GIRARD E FUKUMOTO, 2000

De acordo com Ferguson (1989), a osmose inversa (OI) retém íons metálicos, sais, açúcares, e outros solutos com peso molecular maior que 150 Daltons, sendo uma técnica de concentração e de purificação de água. Este tipo de processo requer pressões maiores que 100 atm para vencer a pressão osmótica através da membrana, permitindo, assim, o escoamento em direção contrária ao que ocorreria no processo de osmose.

A microfiltração (MF) rejeita bactérias e fungos, mas não exclui completamente a faixa de tamanho em que se encontram os vírus, pois abrange somente até um certo limite da porção macromolecular. É o processo que mais se aproxima da filtração convencional. O tamanho dos poros das membranas de microfiltração está na faixa de 0,05 μm a 10 μm , separando compostos na faixa de 0,1 μm a 10 μm . Os diferenciais de pressão aplicados variam de 10 kPa a 200 kPa (0,1 bar a 2,0 bar) (MULDER, 1991; STRATHMANN, 1981).

A ultrafiltração (UF) é um processo de separação por membranas, utilizado quando se deseja purificar e fracionar soluções contendo macromoléculas. As membranas de ultrafiltração apresentam poros na faixa entre 1 a 100 nm (0,001 a 0,1 μm), portanto mais fechadas do que as membranas de microfiltração. Como os poros das membranas de ultrafiltração são menores, é necessária uma maior força motriz para se obter fluxos permeados elevados o suficiente para que o processo possa ser utilizado industrialmente.

As membranas de ultrafiltração constituem-se numa barreira absoluta, detendo todos os sólidos suspensos, incluindo aqueles que conferem turbidez e microrganismos (protozoários, bactérias e vírus). Ao contrário dos processos convencionais, a remoção é total sem ter que se adicionar reagentes e independentemente das variações na qualidade da fonte de abastecimento. A eficiência total da ultrafiltração para desinfecção tem sido amplamente pesquisada e demonstrada (JACANGELO *et al.*, 1995).

A ultrafiltração tem se tornado uma eficiente alternativa nos processos de tratamento de água convencional, principalmente para remoção de turbidez e microrganismos.

Atualmente a razão para a grande utilização dos sistemas de filtração com membranas, como a micro e a ultrafiltração, para a obtenção de água potável está principalmente ligada à sua habilidade em remover microrganismos patogênicos, assim como o controle dos produtos precursores na desinfecção. Estudos foram realizados por Bottino *et al.* (2001), com membrana cerâmica 0,2 μm , nos quais foram avaliados a remoção de partículas, microrganismos, algas e precursores dos produtos de

desinfecção. A remoção de turbidez foi de 99,6 %, 64% de COT (Carbono Orgânico Total), coliformes totais e fecais 100 % e para a maioria das algas estudadas a remoção foi total. Foram obtidos como resultados deste mesmo experimento, a remoção de 100 % de clorofórmio, 56 % de diclorobromo-metano e 100 % de tricloroetileno.

De acordo com Guigui *et al.* (2002), a utilização de membranas de ultrafiltração, está se tornando rapidamente uma alternativa eficiente para o tratamento convencional de produção de água potável, principalmente quando usadas para remoção de turbidez e microrganismos. Hoje os objetivos são estender a tecnologia de membranas para águas de qualidade inferior a fim de remover cor, sabor, matéria orgânica dissolvida e produtos de desinfecção. A tecnologia de ultrafiltração requerida deve ser integrada em uma linha de tratamentos. A adição de coagulantes antes das unidades de ultra e microfiltração, com ou sem sedimentação, pode aumentar a remoção de matéria orgânica natural para uma melhor redução dos produtos de desinfecção.

3.3.1.2.2 Fenômenos que Influenciam o Fluxo de Permeado

O fluxo de permeado é uma variável crítica na determinação da eficiência do processo de separação por membranas, sendo desejável a máxima taxa de permeação com mínimo consumo de energia.

Quando se processa uma solução utilizando-se um processo de separação cross-flow, haverá um aumento da concentração de soluto na interface membrana/solução. Imediatamente, inicia-se a retrodifusão deste soluto em direção ao seio da solução, estabelecendo-se, rapidamente, um perfil de concentração deste soluto nesta região próxima à interface membrana/solução. Este fenômeno é conhecido como “polarização de concentração” (HABERT, BORGES e NOBREGA, 1997).

Além da polarização de concentração, existe uma série de outros fatores que reduzem o fluxo de permeado. A esse conjunto de fatores denomina-se *fouling* (HABERT, BORGES e NÓBREGA, 1997). Ao contrário da polarização por concentração, o *fouling* é caracterizado como um declínio de fluxo irreversível, devido à ocorrência de interações entre a membrana e o soluto, e uma possível deposição de material no interior dos poros na membrana, podendo bloqueá-la parcial ou totalmente. Na Figura 3.6 ilustra-se o efeito da polarização por concentração e do *fouling* da membrana em relação ao fluxo permeado com o tempo de filtração. Como pode ser

observado, tem-se inicialmente uma redução acentuada no fluxo permeado com uma subsequente estabilidade.

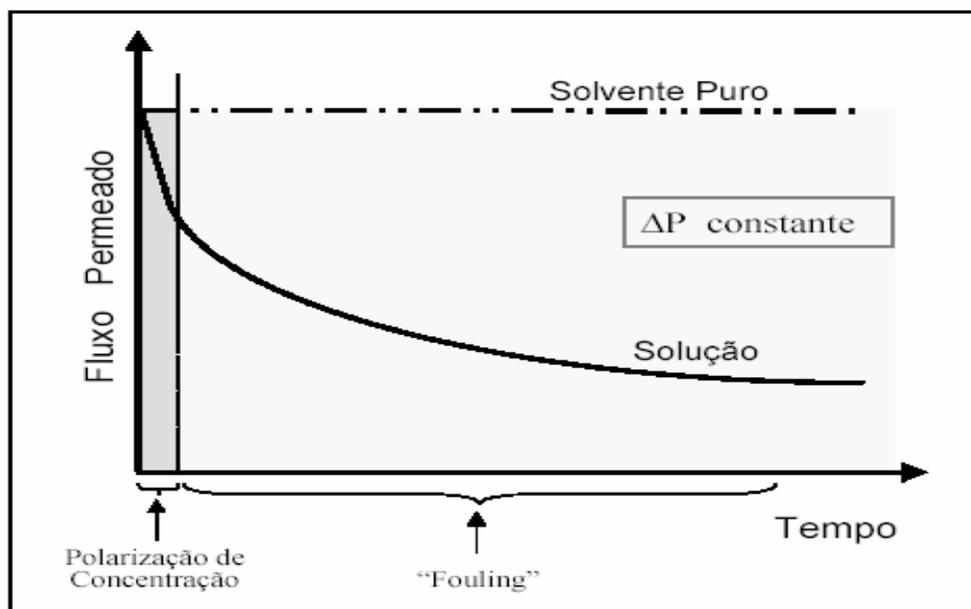


Figura 3.6. Redução do fluxo permeado em função dos fenômenos de polarização por concentração e *fouling*. - Fonte: HABERT, A. C.; BORGES, C. P.; NOBREGA, 2006.

O *fouling* é verificado principalmente na Ultrafiltração e Microfiltração, estando praticamente ausente em processos que utilizam membranas densas. É um fenômeno que resulta na redução do desempenho da membrana, ou seja, uma queda no fluxo do permeado devido ao depósito de substâncias suspensas ou dissolvidas na superfície da mesma. Basicamente há três tipos de agentes que causam o *fouling*:

- Precipitados orgânicos, como macromoléculas e substâncias biológicas;
- Precipitados inorgânicos (óxidos metálicos, sais de cálcio, etc.);
- Material particulado e em suspensão (MULDER, 1991).

O fenômeno de *fouling* pode ocorrer devido à formação de uma torta sobre a superfície da membrana e/ou por bloqueio parcial, total ou interno dos poros da membrana (HERMIA, 1982), como mostra a Figura 3.7.

- bloqueio completo de poro - a entrada do poro é selada;
- bloqueio parcial de poro - ocorre a obstrução parcial da entrada;
- bloqueio interno de poro - o material não rejeitado pela entrada do poro é adsorvido ou aprisionado na parede do poro ou no suporte da membrana.

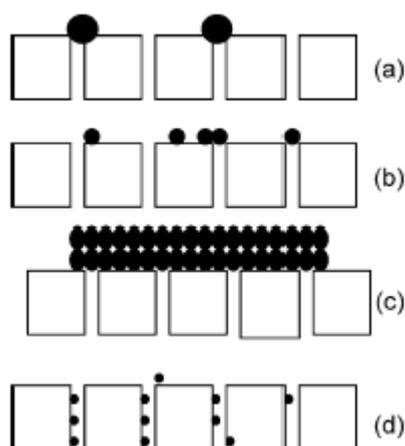


Figura 3.7. Mecanismos de *fouling* para membrana: (a) bloqueio completo de poro; (b) bloqueio parcial de poro; (c) formação de torta; (d) bloqueio interno de poro.

Os mecanismos de *fouling* para membranas podem ser explicados por:

- *Formação de torta*: partículas ou macromoléculas que não entram nos poros formam uma torta na superfície da membrana. A resistência global está composta de uma resistência da torta e pela resistência da membrana (TODISCO *et al.* 1996). A formação de torta pode ocorrer quando o tamanho médio do soluto é muito maior que o diâmetro médio dos poros que já tenham sido bloqueados por moléculas de tamanho menor ou semelhante.
- *Bloqueio parcial dos poros*: Quando partículas sólidas, ou macromoléculas, encontram um poro aberto pode ocorrer o bloqueio do mesmo. No bloqueio parcial, as partículas atravessam o poro, obstruindo sua a entrada, mas não bloqueando completamente o mesmo.
- *Bloqueio interno dos poros*: Partículas entram nos poros e são depositadas ou adsorvidas, reduzindo o volume de poro. Neste caso, resistência da membrana aumenta como consequência da redução de tamanho de poro. Além disso, se o bloqueio interno do poro acontece, o mecanismo de *fouling* torna-se independente da velocidade de fluxo cruzado e nenhum valor limite para o fluxo pode ser atingido.
- *Bloqueio completo dos poros*: Quando as partículas são maiores que o tamanho do poro e a porção de membrana é alcançada por essas partículas, ficando bloqueada esta área de filtração, acarretando obstrução completa de poro.

O controle do *fouling* na ultrafiltração tem seguido três direções: (a) desenvolvimento de membranas com um maior caráter hidrofílico; (b) ajuste das condições operacionais, como a velocidade tangencial, reduzindo a concentração de polarização e aumentando a tensão de cisalhamento na superfície da membrana; (c) desenvolvimento de equipamentos com pulso de gases (ar ou nitrogênio) para remover a camada aderida à membrana e reduzir a polarização de concentração (FANE e FELL, 1987).

Os recursos para controle do *fouling* são limitados, muitas vezes, pela configuração do equipamento, ocorrendo deposição de material na membrana, embora de forma controlada. Quando isto ocorre, limpezas são necessárias, geralmente realizadas da forma automatizada do CIP (Cleaning In Place). Quatro fatores são responsáveis pela correta remoções dos depósitos na membrana: tempo, temperatura, ação mecânica e atividade química. A combinação destes quatro parâmetros é que definirá a eficiência de uma limpeza. Se, por exemplo, uma membrana não suportar altas temperaturas, pode-se elevar o tempo de recirculação ou aumentar a velocidade tangencial de circulação, obtendo uma maior ação mecânica (KRACK, 2000).

A compreensão dos fenômenos de *fouling* ocorridos na separação com membranas elucidará maneiras de otimizar o processo filtração com membranas e vários trabalhos têm sido publicados neste sentido.

Atualmente, existem diversos modelos matemáticos disponíveis na literatura para descrever os fenômenos de *fouling*.

Vela, Blanca e Garcia, (2006) compararam os dados de fluxo, calculados aplicando o modelo de Wang e Song (1999), com resultados experimentais de ultrafiltração, obtendo aproximação satisfatória entre os mesmos. O modelo de Wang e Song (1999) necessita de correlações específicas para cálculo de determinados parâmetros e, assim, sua aplicabilidade limita-se também pela aplicabilidade das correlações utilizadas. Além disso, o modelo restringe-se a análise do *fouling* ocorrido por formação de torta.

Anot *et al.* (2000) compararam três diferentes modelos para representação do fluxo em filtração por membranas e concluíram que o modelo proposto por Field *et al.* (1995) é mais viável para representação dos dados experimentais.

Field *et al.* (1995) apresentaram um modelo matemático baseado na teoria convencional de filtração à pressão constante, o qual leva em consideração os quatro

mecanismos clássicos de *fouling* (formação de torta e fechamento interno, total ou parcial dos poros) aplicado em casos de filtração com fluxo tangencial. Este modelo baseou-se no modelo de Hermia (1982) desenvolvido para filtração perpendicular. O modelo de Field *et al.* (1995), aplicado na análise de dados de fluxo, permite a identificação do mecanismo de *fouling* dominante, dependendo da membrana utilizada e das condições de operação.

Certamente, os modelos mais consagrados na literatura são aqueles propostos por Hermia (1982) e Field *et al.* (1995), para filtração tangencial.

Assim, embora a literatura apresente um vasto número de modelos aplicados na determinação do *fouling* e no comportamento do fluxo de processos de filtração com membranas não há um consenso de aplicabilidade destes modelos. A maioria destes modelos são semi empíricos e necessitam de um determinado conjunto de dados experimentais que podem ser de difícil mensuração. Além disso, os modelos mais recentes necessitam de validação experimental.

3.3.1.3 Processo combinado coagulação/floculação e filtração por membranas

A filtração com membranas, realizada após o processo de coagulação/floculação utilizando a *Moringa oleifera* Lam como coagulante para obtenção de água potável é um processo recente, tendo poucos resultados encontrados na literatura.

Segundo Nazzal e Wiesner (1994), as soluções de ácido húmico produzem uma significativa redução de fluxo de permeado nas membranas cerâmicas feitas a partir de óxidos metálicos como Al_2O_3 , ZrO_2 e TiO_2 . Assim, as etapas de coagulação/floculação antecedendo a filtração têm a função de reduzir o entupimento e melhorar a eficiência do processo.

Segundo Ribeiro e De Luca (2000), a principal limitação do processo de ultrafiltração identificado no tratamento de água potável é o entupimento da membrana. Assim, para altos fluxos, as membranas cerâmicas utilizadas para ultrafiltração necessitam ser combinadas com o processo de coagulação, numa dosagem de coagulante ótima.

Estes autores afirmam ainda que, para águas com turbidez variável e com problemas de contaminação microbiológica, os problemas de contaminação estão relacionados com partículas, sendo que as membranas são, então, usadas pela sua

capacidade de clarificar e desinfetar a água. Processos como, coagulação, oxidação e adsorção podem ser associados à filtração para facilitar a performance dos processos com membranas.

Para o processo de coagulação/sedimentação/ ultrafiltração (ou microfiltração), ou para uma linha de coagulação/ultrafiltração, as condições ótimas ao processo combinado em termos de qualidade do permeado e *fouling* da membrana, são medidas pelo impacto das condições de coagulação modificadas para o modo de filtração (incluindo geometria e natureza da membrana) e pela performance do processo combinado.

As condições ótimas para coagulação (natureza do coagulante, pH e dose) geralmente utilizadas no tratamento de coagulação/sedimentação devem conduzir a uma boa performance em termos de qualidade da água para a coagulação/ultrafiltração em linha com filtração convencional.

Segundo Konradt-Moraes (2004), para o processo combinado de coagulação/floculação/ultrafiltração com membrana cerâmica de porosidade 0,05 μm e pressão transmembrana de 2 bar, nas condições ótimas de coagulação/floculação para o biopolímero quitosana, obtêm-se remoções de cor, turbidez, compostos que absorvem em UV-254 nm, nitrito, fosfato, coliformes totais e E. coli de 100 % e para carbono orgânico total, remoções de COT de 75 %.

Bouchard *et al.* (2003) estudaram os processos de microfiltração e coagulação/microfiltração, utilizando como coagulantes no processo combinado, o cloreto férrico e o sulfato de alumínio. Os ensaios de microfiltração foram realizados em um mini-módulo de membranas submersas, de fibras cruzadas da companhia Zenon, de porosidade 0,1 μm . Para o processo combinado, os resultados obtidos foram a retirada de 60 % de COT e uma redução superior a 80 % de compostos com absorção na faixa de UV-254 nm. O processo de coagulação/microfiltração mostrou-se benéfico permitindo uma redução significativa no “*fouling*” da membrana. Resultados estes já esperados pois, quando há coagulação, os colóides são desestabilizados e se aglomeram com formação de flocos maiores contribuindo para a diminuição do entupimento da membrana.

Guigui *et al.* (2002), afirmam que para o processo de coagulação/sedimentação/ ultrafiltração (ou microfiltração), ou para uma linha de coagulação/ultrafiltração, as condições ótimas para o processo combinado em termos de qualidade do permeado e “*fouling*” da membrana, são medidas pelo impacto das condições de coagulação

modificadas para o modo de filtração (incluindo geometria e natureza da membrana) e pela performance do processo combinado. As condições ótimas para coagulação (natureza do coagulante, pH e dosagem) geralmente utilizadas no tratamento de coagulação/sedimentação devem conduzir a uma boa performance em termos de qualidade da água para a coagulação/ultrafiltração em linha com filtração convencional.

A nanofiltração (NF), no geral, é mais eficiente que os processos de ultra e microfiltração. Porém, o gasto energético e de manutenção também é mais alto. Assim, alguns processos podem ser acoplados a ultra e microfiltração com a finalidade do aumento das eficiências de remoção dos compostos de interesse (LIN *et al.*, 2008). Pode-se citar a utilização de carvão ativado, em associação à ultrafiltração (JACANGELO *et al.*, 1995; LIN *et al.*, 2008) e ainda a utilização da quitosana, para remoção de metais, em associação à ultrafiltração, com eficiências de remoção aumentadas de 6 a 10 vezes se comparado com o processo de membranas aplicado isoladamente (JUANG e SHIAU, 2000).

Bazanella (2010) avaliou o processo combinado (coagulação/floculação com *Moringa oleifera* e filtração com membranas) para remoção de flúor e observou que tal processo produziu uma água fluorada dentro do padrão de potabilidade (1,02 mg F/L).

Verifica-se então que há uma grande potencialidade na utilização do processo combinado coagulação/floculação/membranas. No entanto, poucos trabalhos de pesquisa foram desenvolvidos até o presente momento, o que se faz necessário estudos mais aprofundados para um conhecimento das variáveis intervenientes no processo como um todo e que permita, não só a ampliação de escala do processo, como sua transferência para as empresas responsáveis pelo abastecimento público de água potável (KONRADT-MORARES, 2004).

Especificamente utilizando a *Moringa* como coagulante no processo combinado (coagulação/floculação/filtração com membranas), não se encontra dados na literatura disponíveis como referência, sendo de grande importância à realização deste estudo nesta área de interesse.

3.4 COAGULANTES

Muitos agentes coagulantes são usados nos processos de tratamento de água, como os coagulantes inorgânicos (sais de alumínio e ferro), polímeros orgânicos

sintéticos e naturais. A seguir são descritos alguns coagulantes utilizados no tratamento para obtenção de potável.

3.4.1 COAGULANTES QUÍMICOS

Os agentes coagulantes mais utilizados no tratamento de água são os sais de alumínio e ferro, por serem de baixo custo e terem capacidade coagulante já comprovada.

O sulfeto ferroso é utilizado com sucesso em algumas estações de tratamento sendo muito eficiente para tratar águas com pH elevado. O sulfato férrico é conveniente para tratamento de águas altamente coloridas ou ácidas e é efetivo na faixa de pH entre 5,0 a 11,0, sua desvantagem é que sua solubilidade só é apreciável em água quente. O cloreto férrico produz bons flocos nessa mesma faixa de pH (SPINELLI, 2001). Já o aluminato de sódio, considerado um coagulante básico, é usado em casos especiais ou como um aditivo para a coagulação secundária de águas superficiais altamente coloridas. O PCA, também conhecido como Hidroxicloreto de Alumínio, é muito utilizado em função da sua alta eficiência e baixa toxicidade.

A coagulação/floculação quando realizada com sais de alumínio e ferro resulta em dois fenômenos: o primeiro, que é essencialmente químico, consiste nas reações do coagulante com a água, formando espécies hidrolisadas com carga positiva. Depende da concentração do metal presente, da temperatura, da quantidade de impurezas e do pH final da mistura. O segundo, fundamentalmente físico, consiste no transporte dessas espécies hidrolisadas para que haja contato com as impurezas presentes na água (DI BERNARDO, 1993).

Segundo Borba (2001), os coagulantes clássicos ou convencionais, tais como sulfato de alumínio, cloreto ferroso e cloreto férrico, devido à grande eletropositividade dos elementos químicos que os compõem quando dissolvidos na água, geralmente formam compostos gelatinosos de cargas positivas.

O mecanismo de formação dos flocos ocorre através 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 de precipitarem quando há uma diminuição da velocidade de fluxo da água (BORBA, 2001).

Um polímero iônico ou um polieletrólito de mesmo sinal que as partículas podem causar floculação por ligação. Polímeros solúveis em água podem se ligar à superfície da partícula por uma variedade de mecanismos, incluindo ligações eletrostáticas, ligações hidrofóbicas, ligações de van der Waals e um grupo de interações físico-químicas específicas provenientes de ligações de hidrogênio para ligações covalentes (SPINELLI, 2001).

Os coagulantes convencionais só têm eficiência se a água bruta contiver alcalinidade natural ou adicionada. Caso contrário, não ocorrerá a coagulação/floculação, devido ao excesso de prótons liberado pelo coagulante (BORBA, 2001).

Nos últimos anos têm sido desenvolvidos diversos compostos poliméricos de ferro e alumínio, constituindo um novo tipo de coagulante amplamente usado nos países do primeiro mundo, conhecidos como polímeros inorgânicos (SILVA, 2005).

Sem dúvida, dentre os diversos coagulantes químicos aplicados no tratamento para obtenção de água potável, o sulfato de alumínio é o coagulante mais utilizado devido a sua eficiência, baixo custo, fácil mão de obra e produção em várias regiões brasileiras.

O uso deste coagulante é discutido em função do alumínio remanescente na água tratada e da grande quantidade de lodo produzido. Seu efeito como coagulante depende do pH, sendo mais efetivo na faixa de pH entre 5,5 e 8,0, sendo que no final do tratamento pode ficar presente uma alta concentração de alumínio residual na água, em consequência do pH de floculação utilizado (KAWAMURA, 1991). Se o mesmo estiver presente na água em uma concentração acima de 0,2 mg/L, pode trazer sérios riscos à saúde humana como distúrbios gastrointestinais, erupções na pele e úlceras (CLAYTON, 1989). Além disso, o alumínio não é biodegradável podendo causar sérios problemas de disposição e tratamento do lodo gerado (KONRADT-MORARES, 2004).

Há evidências de que lesões cerebrais, características do Mal de Alzheimer, podem estar associadas ao alumínio presente na água para consumo humano proveniente dos sistemas públicos de abastecimento quando esse se encontra em concentrações superior a $0,01 \text{ mg.L}^{-1}$ (BATALHA, 2006).

Segundo Goldkorn (2005), algumas pesquisas informam que a quantidade de alumínio encontrada no cérebro de portadores do Mal de Alzheimer é assustadoramente

alta. O Mal de Alzheimer é caracterizado por alteração comportamental, insanidade, distúrbio na fala, contração muscular e convulsões. É uma doença degenerativa do cérebro.

O alumínio não é o causador principal do mal de Alzheimer, mas é responsável por várias transformações moleculares que causam o progresso da doença (MCLAFLAN, 1995).

3.4.2 COAGULANTES NATURAIS – *Moringa Oleifera* Lam

Nos últimos anos vários trabalhos foram desenvolvidos no sentido da utilização de coagulantes poliméricos alternativos aos coagulantes químicos, para a obtenção de água potável. Estes trabalhos inicialmente preocuparam-se em substituir ou auxiliar os coagulantes convencionais com o intuito de melhorar a etapa de coagulação/floculação, tanto pela qualidade dos flocos produzidos quanto pela ausência de metais do lodo gerado. Posteriormente notou-se uma preocupação com a saúde da população, principalmente em relação ao mal de Alzheimer, que de acordo com estudos realizados, pode ser agravado pelo alumínio (KONRADT-MORAES, 2004).

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, que apresentam cargas positivas, podem ser utilizados sem a aplicação do coagulante primário (SPINELLI, 2001).

O uso de materiais de origem natural para clarificar águas de superfície com elevada turbidez não é uma idéia nova. Entretanto, dos materiais de plantas que foram investigados, as sementes de *Moringa oleifera* se mostraram como uma das mais eficazes como coagulante preliminar para o tratamento de água.

Alguns autores dizem que o poder de coagulação está relacionado à proteína existente na semente da *Moringa oleifera*. Outros acreditam que o composto responsável é um polieletrólito.

No Brasil, a planta ainda é pouco conhecida. Porém, várias pesquisas no mundo mostraram que o gênero *Moringa* contém propriedades de coagulação.

Embora alguns pesquisadores estejam se dedicando ao estudo do uso da semente de *Moringa oleifera*, pouco se sabe sobre as características desta semente, havendo, portanto, uma grande carência de estudos no que tange a sua utilização e caracterização.

A Tabela 3.3 apresenta as famílias e o número de espécies que são conhecidas pelas propriedades coagulantes das suas sementes.

Tabela 3.3. Número de Espécies Vegetais com Capacidade Coagulante

| <i>Família</i> | <i>Número de Espécies Usadas para Clarificar Água Bruta</i> |
|----------------------|---|
| <i>Acanthaceae</i> | 3 |
| <i>Anacardiaceae</i> | 5 |
| <i>Annonaceae</i> | 3 |
| <i>Araceae</i> | 2 |
| <i>Cactaceae</i> | 11 |
| <i>Capparidaceae</i> | 8 |
| <i>Malvaceae</i> | 5 |
| <i>Moringaceae</i> | 7 |
| <i>Papilionideae</i> | 13 |
| <i>Tiliaeae</i> | 7 |

Fonte: (JANH, 1986)

Da Silva, De Souza e Magalhães, (2003) afirmam que, alguns biopolímeros vêm sendo investigados mais intensamente que outros, como é o caso da *Moringa oleifera* Lam, da quitosana e do tamarindo. Em geral, os estudos são aplicados ao tratamento de águas para fins potáveis.

Segundo Gerdes (1997), das muitas espécies de plantas testadas, algumas apresentaram grande capacidade de clarificar águas brutas, principalmente as espécies da família *Moringaceae*.

Segundo Ndabigengesere e Narasiah (1996), as sementes de *Moringa oleifera* Lam são uma alternativa viável de agente coagulante em substituição aos sais de alumínio, utilizados no tratamento de água em todo o mundo. Comparada com o alumínio, essas sementes não alteram significativamente o pH e a alcalinidade da água após o tratamento e não causam problemas de corrosão.

Além disto, a eficiência do processo utilizando a *Moringa oleifera* Lam como agente coagulante não depende do pH da água bruta (SCHWARZ, 2000 citado por

EMBRAPA, 2006), ao contrário do sulfato de alumínio, que tem aplicação restrita a pH entre 5,5 e 8,0 (MEDEIROS-FILHO, 2006).

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 desinfecção (SILVA, 2005). Sendo assim, é de extrema importância o estudo das características sensoriais da água tratada com este coagulante natural.

A *Moringa oleifera* Lamarck, é uma planta pertencente à família das Moringaceae nativa da Índia e amplamente cultivada nos trópicos de todo o mundo (KARADI *et al.*, 2006). Cresce rapidamente, sendo capaz de sobreviver em solos pobres e em longos períodos de seca, requerendo o mínimo de atenção (MCCONNACHIE *et al.*, 1999).

Segundo Joly (1979), *Moringa oleifera* é uma planta arbórea com longas vagens verdes, sementes aladas, folhas grandes e flores brancas perfumadas (Figura 3.8).



Figura 3.8. Árvore de *Moringa oleifera* lam

Essa planta pode ser facilmente propagada e as sementes podem ser plantadas diretamente no local definitivo ou em sementeiras. Adapta-se a uma ampla faixa de solo e é tolerante à seca. A Figura 3.9 representa as vagens da *Moringa oleifera* Lam.



Figura 3.9. Vagens de *Moringa oleifera* Lam

A Figura 3.10 apresenta as sementes com casca e sem casca, respectivamente.



Figura 3.10. Semente de *Moringa oleifera* lam com casca e sem casca, respectivamente.

As árvores de *Moringa* podem alcançar 4 m de altura, gerando flores e frutos em um ano; múltiplas colheitas de sementes são possíveis em muitas partes do mundo (MCCONNACHIE *et al.*, 1999). Possui significativa importância econômica na indústria e medicina (MAKKAR e BECKER, 1996). Nas Filipinas, as folhas jovens, flores e vagens verdes são comuns na dieta (GUEVARA *et al.*, 1999); é usada medicinalmente em Guiné, La Reunion, Madagascar, Guiana e Burma (KARADI *et al.*, 2006); são consumidas por populações do sudoeste da Ásia que acreditam ter efeitos benéficos na visão (LIU *et al.*, 2007). Devido ao uso na medicina popular, estudos têm sido feitos visando o isolamento de compostos bioativos.

As folhas são boas fontes protéicas e não contêm taninos, lectinas ou inibidores de tripsina, segundo Makkar e Becker (1996). Possui hormônios promotores do crescimento (MAKKAR e BECKER, 1996) e atividade contra a infecção com vírus herpes simplex tipo 1 (LIPIPUN *et al.*, 2003). Também possuem atividade antioxidante (IQBAL e BHANGER, 2006; LAKO *et al.*, 2007, REDDY *et al.*, 2005) e são ricas em polifenóis totais, quercetina, campferol e β -caroteno (LAKO *et al.*, 2007). Tahiliani e

Kar (1999) estudaram que o extrato aquoso de folhas de *M. oleifera* em baixa concentração pode ser usado para regulação do hipertiroidismo. RICHTER *et al.* (2003) observaram que as folhas de *M. oleifera* podem ser usadas para alimentar tilápias do Nilo substituindo 10% da dieta protéica sem alterar significativamente o crescimento desses peixes. Vacas alimentadas com folhagens de moringa tiveram aumento na produção de leite sem alteração na sua composição de leite (SANCHEZ *et al.*, 2006).

As folhas têm um alto conteúdo de proteína, em torno de 27% e são ricas em vitaminas A e C, cálcio, ferro e fósforo.

As sementes também são utilizadas para extração de óleo (ABDULKARIM *et al.*, 2005) e podem ser usadas no tratamento de água para uso doméstico (SULEYMAN e EVISON, 1995).

A Figura 3.11 mostra a equivalência de 1,0 grama de folhas de *Moringa oleifera* Lam na alimentação humana quando comparada com outros alimentos normalmente consumidos em uma dieta alimentar.

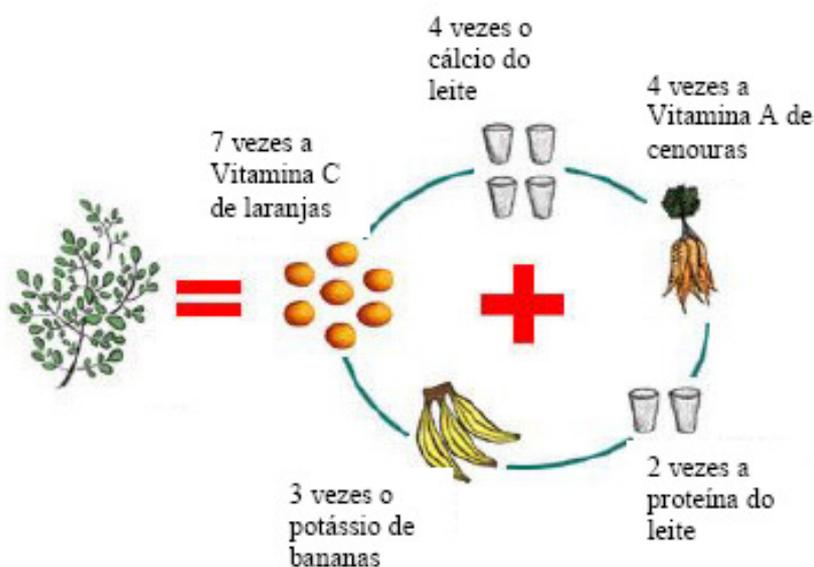


Figura 3.11. Equivalência da Ingestão de 1 grama de Folhas de *Moringa oleifera* Lam Comparada com Outros Alimentos - Fonte: (SILVA, 2005)

Santos *et al.* (2005) observaram que uma lectina solúvel em água está presente em sementes desta planta.

Okuda *et al.* (1999), realizaram experimentos testando a eficiência da extração da proteína coagulante da semente de *Moringa oleifera* lam com NaCl, KCl, KNO₃, NaNO₃. Observaram que a extração com NaCl 1 M tem capacidade de coagulação 7,4 vezes maior do que o extrato em água. Okuda *et al.* (2001) isolaram outro componente

com propriedades coagulantes, que não foi detectado por métodos que quantificam proteínas, nem por análises para polissacarídeos e lipídeos; o pH ótimo para coagulação foi maior ou igual a 8. Foi definido que o coagulante é um polieletrólito orgânico de peso molecular 3.000 daltons.

Gassenschmidt *et al.* (1995), utilizaram sementes de *M. oleifera* trituradas e desengorduradas e obtiveram a partir de extrato, em tampão fosfato, 3 frações contendo atividade floculante. Uma proteína caracterizada como sendo uma molécula catiônica de massa molecular 6.500 daltons foi isolada de uma das frações. A comparação da estrutura primária com sequências de proteínas conhecidas não revelou significativa homologia. A atividade floculante da proteína foi similar à atividade de um polímero sintético catiônico.

Experimentos de coagulação com proteínas purificadas das sementes (NDABIGENGESERE e NARASIAH, 1998) revelaram que a dosagem ótima foi 0,5 a 1 mg/L e que a proteína foi totalmente solúvel em água; como coagulante, a *Moringa oleifera* pode ser um substituto em potencial para o alumínio (NDABIGENSERE *et al.*, 1995).

Adicionalmente, os resultados obtidos por Ghebermichael *et al.* (2005) confirmaram que as proteínas são os principais componentes ativos em extratos de sementes. Katayon *et al.* (2006) observaram que as sementes de *Moringa oleifera* possuem potenciais coagulantes e podem ser usadas principalmente em águas com elevada turbidez e que a atividade coagulante tem o seu efeito diminuído com o aumento do tempo de estocagem das sementes.

Em países tropicais em desenvolvimento, a clarificação de águas turvas de rios é uma prática doméstica antiga, baseada no uso de materiais naturais que atuam como coagulantes primários. Um destes é a semente da árvore tropical *Moringa oleifera*, a qual contém agentes ativos com excelente atividade e propriedades coagulantes. O extrato das sementes tem sido mencionado por diminuir drasticamente o lodo e a quantidade de bactérias em águas residuais (MUYIBI e EVISON, 1995).

Segundo Ndabigengesere e Narasiah (1996) e Gallão (2006), as sementes de *Moringa oleifera* são uma alternativa viável de agente coagulante em substituição aos sais de alumínio, que são utilizados no tratamento de água em todo o mundo.

A respeito do seu reconhecido valor medicinal e como hortaliça não-convencional rica em vitamina A, ainda carece de estudos que focalizem a viabilidade das sementes durante o armazenamento. As sementes são ricas em proteínas (33,9%) e

lipídeos (37,2%), requerendo estudos direcionados à sua exploração comercial (BEZERRA *et al.*, 2004).

É relatada em *Moringa oleifera* a presença de uma proteína catiônica dimérica de alto peso molecular, que desestabiliza as partículas contidas na água e através de um processo de neutralização e adsorção, flocculam os colóides seguindo-se de sedimentação. Comparada com o alumínio, as sementes de *Moringa oleifera* não alteraram significativamente o pH e a alcalinidade da água após o tratamento e não causam problemas de corrosão (NDABIGENGESERE *et al.*, 1995).

O uso das sementes de *Moringa oleifera* Lam para a purificação de água a um custo menor que a do tratamento químico convencional, constitui uma alternativa de maior importância (SILVA, 2005).

Segundo Jahn (1989), foi isolado o produto coagulante presente nas sementes de *Moringa oleifera* Lam; dessa forma, foram identificados seis polipeptídios, que são formados por várias unidades de aminoácidos. Enfim, a fração ativa deste coagulante se deve à presença de uma proteína catiônica de alto peso molecular, que desestabiliza as partículas contidas na água e coagula os colóides (NDABIGENGESERE *et al.*, 1995).

Segundo Davino (1976) o mecanismo de coagulação/floculação provocado pela proteína existente na polpa da *Moringa oleifera* Lam assemelha-se ao mecanismo provocado pelos polieletrólitos. Quando a coagulação/floculação é realizada por polieletrólitos, não há 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. Isso ocorre porque esses polieletrólitos são constituídos de complexos de grandes cadeias moleculares, que apresentam sítios com cargas positivas ou negativas, com grande capacidade de adsorção de partículas ao seu redor. Assim, esse tipo de coagulação/floculação praticamente independe da alcalinidade da água, pode ocorrer numa grande faixa de valores de pH, entre 4,0 e 12,0 (BORBA, 2001).

Coelho *et al.* (2006) realizaram estudos buscando as melhores condições experimentais para remoção de flúor em amostras de águas utilizando uma solução de *Moringa oleifera* lam. Os resultados obtidos mostraram a remoção de 60% de flúor utilizando 5,0 mL do extrato de 50,0 gL⁻¹ e de 100% para 10,0 mL do extrato de 50,0 gL⁻¹. O procedimento proposto foi aplicado em amostras de águas destinadas ao consumo humano. Segundo estes autores o procedimento é simples, de baixo custo e uma alternativa ao tratamento de águas cuja concentração de flúor encontra-se acima daquela permitida pela legislação.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA

A parte experimental deste trabalho foi realizada no Laboratório de Gestão, Controle e Preservação Ambiental, do Departamento de Engenharia Química – DEQ, da Universidade Estadual de Maringá – UEM, utilizando água bruta coletada na SANEPAR, localizada na cidade de Maringá – Paraná, proveniente da bacia do Rio Pirapó.

A pesquisa foi dividida em cinco etapas.

Primeiramente, foi realizada a extração, caracterização e aplicação do composto ativo da semente de *Moringa Oleifera* Lam, responsável pela coagulação de compostos que conferem cor e turbidez às águas de abastecimento.

Na segunda etapa, aplicou-se o composto ativo, encontrados para as condições ótimas de operação no processo combinado de coagulação/floculação/ filtração com membranas.

Posteriormente, foi realizada a avaliação da estabilidade da semente e do poder coagulante do composto ativo em relação ao tempo de estocagem.

Logo após, foi realizada uma análise cinética avaliando os valores de cor, turbidez e compostos com absorção em UV-254 nm em função do tempo no processo de coagulação/floculação/sedimentação.

Na última etapa, realizou-se análise matemática dos dados experimentais (fluxo X tempo) obtidos no processo de filtração com membranas.

Cada uma destas etapas será detalhada a seguir.

4.1 EXTRAÇÃO, PURIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO COMPOSTO ATIVO DA SEMENTE DE *MORINGA OLEÍFERA* LAM

Esta fase de estudo se apresenta com intuito de extrair, purificar e caracterizar os extratos obtidos, que posteriormente foram aplicados no processo de coagulação/floculação.

Foram utilizadas nesta pesquisa sementes frescas provenientes da Universidade Federal da Sergipe – UFS e também da Fazenda Experimental da UEM, foram

utilizadas durante toda a parte experimental da pesquisa, para que os resultados obtidos não fossem comprometidos por perda da eficácia do princípio ativo coagulante da *Moringa oleifera* Lam.

Como em muitas espécies, o peso da semente é um indicativo de sua qualidade fisiológica, influenciando a percentagem e o índice de velocidade de germinação, de forma que, em um mesmo lote, sementes leves normalmente apresentam menor desempenho do que as pesadas (BEZERRA *et al*, 2004), também neste trabalho foram consideradas as diferenças (tamanho e peso) entre lotes. Basicamente, o critério de exclusão baseou-se na cor e estado de dessecação dos cotilédones, segundo as recomendações de Jahn (1986).

Desta forma, foram utilizadas durante toda a pesquisa sementes sadias, a fim de que se obtivessem bons resultados de extração do composto ativo.

4.1.1 Extração e purificação do composto ativo da semente de *Moringa oleifera*

Para obtenção do composto ativo a ser utilizado nos ensaios de coagulação/floculação/filtração com membranas, foram avaliadas extrações com diferentes soluções.

Na presente etapa foram realizados ensaios de extração do composto ativo com água, solução tampão e solução salina.

A Figura 4.1 apresenta um esquema da extração do composto ativo. Inicialmente foi retirada a casca da semente de *Moringa* e em seguida, as mesmas foram trituradas em um liquidificador e logo após foi realizada a extração e purificação do composto ativo. Obtendo-se ao final três diferentes tipos de solução, sendo elas solução coagulante extraída com água (SCA), solução extraída com solução tampão (SCpH) e solução extraída com sal (SC).

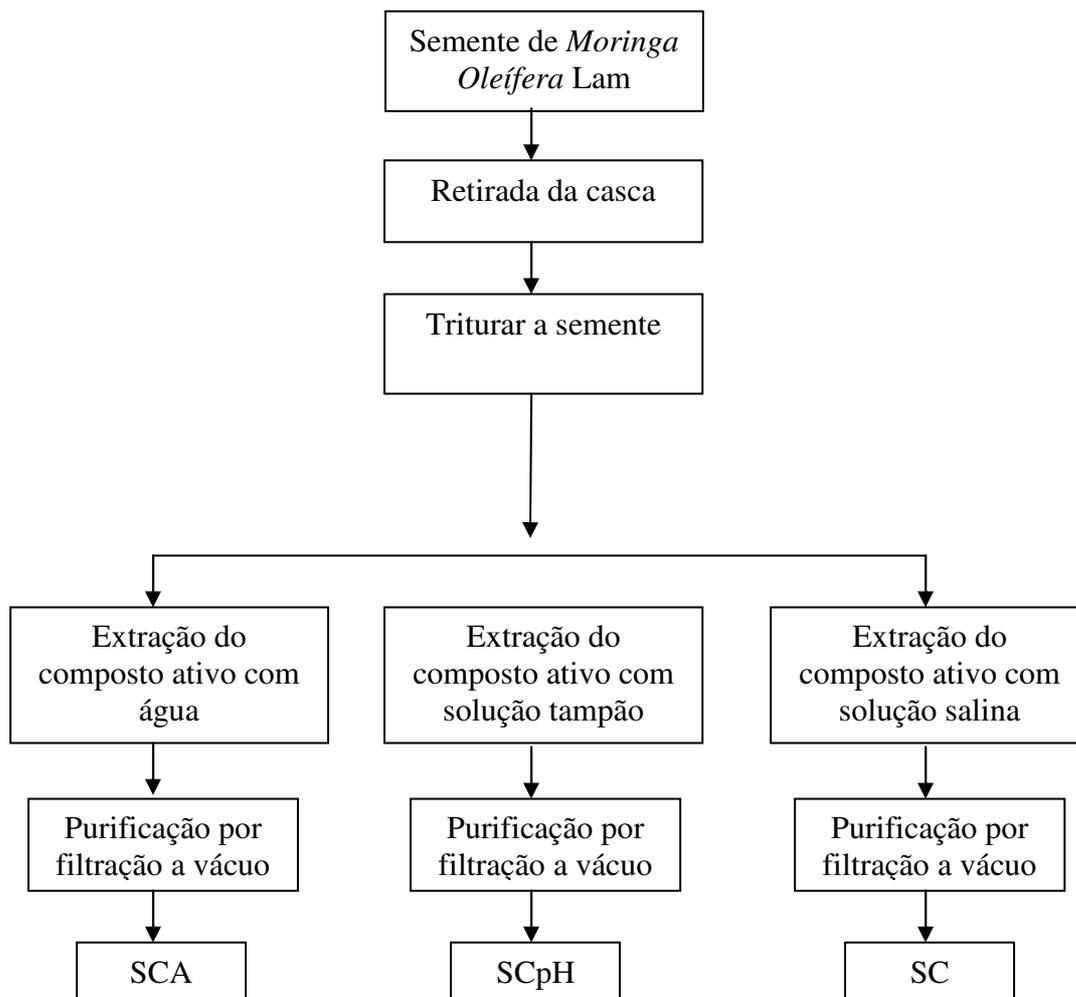


Figura 4.1. Obtenção dos diferentes extratos de *Moringa Oleifera* Lam.

4.1.1.1 Extração e purificação do composto ativo com água (SCA)

A solução de *Moringa oleifera* Lam extraída com água, denominada SCA, possuía concentração de 1%, ou seja, para cada 1000 mg de polpa de semente da *Moringa oleifera* Lam, completou-se o volume para 0,1 L de água destilada. No preparo desta solução a semente foi triturada no liquidificador, após ficou sob agitação por 30 minutos e, por fim, foi filtrada a vácuo (CARDOSO, 2007).

A Figura 4.2 apresenta as etapas de trituração, agitação e filtração à vácuo respectivamente.



Figura 4.2. Esquema da Preparação da Solução Padrão de *Moringa oleifera* Lam.

A extração sempre foi realizada no momento do ensaio de coagulação/floculação, pois estudos demonstraram que o armazenamento dessa solução por alguns dias poderia ocasionar perda de eficiência (CARDOSO, 2007).

Nos casos de avaliação do tempo de armazenamento do extrato (item 4.3.2), as soluções eram preparadas e armazenadas para serem avaliadas nos diferentes tempos de armazenamento.

4.1.1.2 Extração e purificação do composto ativo com solução tampão (SCpH)

A solução de *Moringa oleifera* Lam extraída com solução tampão, tinha concentração de 1%, ou seja, para cada 1000 mg de polpa de semente da *Moringa oleifera* Lam, completou-se o volume para 0,1 L de solução tampão com pH 4 ou 10. Estas soluções foram classificadas como SCpH4 e SCpH10, respectivamente.

Foi utilizado o mesmo procedimento de preparo adotado no item 4.1.1.1.

4.1.1.3 Extração e purificação do composto ativo com solução salina (SC)

A solução de *Moringa oleifera* Lam extraída com solução salina, também com concentração de 1%, ou seja, para cada 1000 mg de polpa de semente da *Moringa oleifera* Lam, completou-se o volume para 0,1 L de solução salina, considerando três molaridades e diferentes sais.

Em uma primeira etapa foi avaliada a eficiência do processo em função da molaridade do sal. Na literatura os dados encontrados são referentes à extração com

solução salina 1 Molar (OKUDA *et al.*, 2000 e NKURUNZIZA *et al.* 2009), optou-se na presente pesquisa em variar a molaridade do sal em 0,01 M, 0,1 M e 1 M.

A água bruta utilizada possuía turbidez inicial 250 uT, ou seja, um valor médio dentre os avaliados.

Na segunda etapa convencionou-se utilizar soluções 1 Molar dos sais NaCl, KCl, CaCl₂ e MgCl₂. Optou-se por utilizar estes sais devido a dados encontrados na literatura (OKUDA *et al.*, 1999; NKURUNZIZA *et al.*, 2009).

Posteriormente foi utilizado o mesmo procedimento de preparo adotado no item 4.1.1.1.

4.1.2 Caracterização do composto ativo das sementes de *Moringa oleifera*

Nesta etapa do trabalho foram avaliados dois lotes de sementes, produzidos na mesma época, porém, provenientes de dois locais de produção distintos. Sendo eles, amostra A (proveniente da cidade de Aracaju-SE) e Amostra B (proveniente da cidade de Maringá-PR).

Para a caracterização quantitativa e qualitativa do composto ativo da *Moringa oleifera* foram realizadas análises de dosagem de proteínas e eletroforese.

Avaliou-se ainda a caracterização físico-química das sementes destes dois lotes, segundo IAL (1985).

4.1.2.1 Dosagem de proteínas dos extratos obtidos das sementes de *Moringa oleifera*

Para determinar a quantidade de proteínas totais extraída na preparação da solução padrão de *Moringa oleifera* Lam, a fim de verificar a relação existente entre a dosagem de proteínas e eficiência do coagulante, segundo OKUDA *et al.* (1999) foi adotado o método de Lowry *et al.* (1951).

De maneira geral, o uso desse método é recomendado, pois, no estudo comparativo de metodologias para quantificar proteínas, o mesmo mostrou-se mais sensível, com maior exatidão, menor consumo de amostra e, dependendo do caso, menos suscetível a alguns tipos de interferentes (ZAIA *et al.*, 1998).

O procedimento para a determinação de proteínas, bem como a curva padrão, estão descritos no Anexo I.

4.1.2.2 Eletroforese dos extratos obtidos das sementes de *Moringa oleifera*

O peso molecular da proteína foi estimado por eletroforese em gel de poliacrilamida com Dodecil sulfato de sódico (SDS-PAGE) como descrito por Laemmli (1970). Os géis foram corados com Azul Brilhante de Coomassie para proteínas (LAEMMLI, 1970). Foi utilizado o padrão da marca Bio Rad (161-0324).

4.1.2.3 Caracterização físico-química das sementes de *Moringa oleifera*

As análises de umidade, cinzas, lipídeos e proteína foram realizadas conforme as técnicas do Instituto Adolfo Lutz (IAL, 1985). Sendo que ao final calculou-se carboidratos por diferença.

4.2 APLICAÇÃO DO COMPOSTO ATIVO NO PROCESSO DE COAGULAÇÃO/ FLOCULAÇÃO/ FILTRAÇÃO COM MEMBRANAS

4.2.1 Caracterização da Água Bruta Superficial

A água bruta utilizada no desenvolvimento da pesquisa foi coletada na Companhia de Saneamento do Paraná – SANEPAR, proveniente da bacia do Rio Pirapó - Paraná (Figura 4.3).



Figura 4.3. Vista Aérea do Ponto de Captação de Água de Maringá – PR

Fonte: (CASSARO e CARREIRA, 2001)

Para a caracterização da água bruta, os seguintes parâmetros físico-químicos foram analisados: cor, turbidez, sólidos, pH, alcalinidade e acidez volátil, dureza total, nutrientes e compostos orgânicos. Em termos de parâmetros bacteriológicos, foram avaliadas a presença ou ausência de coliformes totais e *Escherichia coli*.

Foram utilizados diversos métodos analíticos em função do experimento. Os parâmetros de qualidade da água avaliados e os métodos e equipamentos utilizados para cada procedimento estão resumidamente descritos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Parâmetros analíticos avaliados, seus respectivos métodos de análise e equipamentos.

| Parâmetro | Método de análise | Equipamento |
|--|--|---|
| Cor aparente (uH) | Redução da intensidade da luz ao atravessar a amostra | Espectrofotômetro/HACH DR/2010 |
| Turbidez (uT) | Nefelométrico | Turbidímetro /HACH 2100P |
| Sólidos suspensos totais (mg.L⁻¹) | Gravimétrico | - |
| Sólidos dissolvidos totais (mg.L⁻¹) | Gravimétrico | - |
| pH | Potenciométrico | pHmetro Digimed DM-2 |
| Alcalinidade (mg CaCO₃/L) | Titulométrico (H ₂ SO ₄ – 0,02N) | - |
| Dureza total | Titulométrico (EDTA) | - |
| Acidez volátil | Titulométrico | - |
| Demanda Química de Oxigênio (mgO₂L⁻¹) | Micrométrico | - |
| Compostos com absorção em UV – 254nm | Absorbância ($\lambda=254$ nm) | Espectrofotômetro LS Logen Scientific - ALPAX |
| Coliformes totais e <i>Escherichia coli</i> | Microbiológico | Placa 3M Petrifilm |
| Carbono Orgânico Dissolvido (mgL⁻¹) | Combustão a 680°C e detecção do CO ₂ em infravermelho | Analizador TOC/Shimadzu - 5000A |

4.2.2 Ensaio de coagulação/floculação

Após a obtenção do composto ativo em solução procedeu-se a aplicação no processo de coagulação/floculação. Procurou-se trabalhar com variados valores de turbidez inicial da água bruta, sendo eles 150uT, 250uT, 350uT, 450uT e 550uT. Estes diferentes tipos de águas eram coletadas em diferentes épocas do ano, com a finalidade de avaliar a eficiência dos processos propostos em função da qualidade da água bruta

utilizada. Em alguns casos, para se obter a devida turbidez, fez-se necessário realizar uma mistura de água alta com água de baixa turbidez.

Nos ensaios variou-se a dosagem das soluções coagulantes, ou seja, dos extratos de *Moringa oleifera* Lam de 25mg/L a 300mg/L, obtidos conforme descrito no item 4.1.1.1.

A Tabela 4.2 apresenta as condições utilizadas neste trabalho.

Tabela 4.2. Condições de processo utilizadas nos ensaios de coagulação/floculação

| Parâmetro | Valor |
|-----------------------------------|--------------|
| Gradiente de mistura rápida (GMR) | 100 rpm |
| Tempo de mistura rápida (TMR) | 3 min |
| Gradiente de mistura lenta (GML) | 10 rpm |
| Tempo de mistura lenta (TML) | 15 min |
| Tempo de decantação | 60 min |

As condições apresentadas na Tabela 4.2, utilizadas no presente estudo foram previamente estudadas por Cardoso (2007) e Borba (2001).

Os ensaios de coagulação/floculação foram realizados em Jar Test simples, Nova Ética – modelo 218 LDB de seis provas, com regulador de rotação das hastes misturadoras, conforme mostrado na Figura 4.4.



Figura 4.4. Equipamento Jar Test.

O uso do Jar Test permitiu determinar a dosagem ideal de coagulante, ou auxiliar de coagulação, necessária para provocar a clarificação da água bruta.

Utilizou-se beakers contendo 1000 mL de água bruta. Em cada um desses, foram adicionadas quantidades pré-determinadas da solução coagulante utilizada, contando com a ajuda de uma pipeta automática e tubos de ensaio.

A temperatura da água foi mantida na faixa de 25,0°C para a realização dos ensaios.

Após o processo de coagulação/floculação e sedimentação, aproximadamente 30 mL de água tratada foram retirados de cada um dos beakers, contando com o auxílio de uma pipeta volumétrica de 50 mL. Foram analisados a cor, a turbidez e os compostos com absorção em UV-254nm.

4.2.3 Planejamento experimental

Para extração com água (SCA), extração com solução tampão (SCpH) e com os sais (NaCl, KCl, MgCl₂ e CaCl₂) 1 Molar (SC), foi aplicado um planejamento casualizado 5 X 12 fatorial (Tabela 4.3), segundo Nkurunziza et al. (2009).

Tabela 4.3. Valores de turbidez inicial da água e concentração de coagulante utilizados no planejamento de experimentos.

| | | | | | | | | | | | | |
|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Turbidez inicial | 150 | 250 | 350 | 450 | 550 | | | | | | | |
| (uT) | | | | | | | | | | | | |
| Concentração | 25 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 | 175 | 200 | 225 | 250 | 275 | 300 |
| de coagulante | | | | | | | | | | | | |
| (mg/L) | | | | | | | | | | | | |

Sendo o fator “A” a turbidez inicial com 5 (cinco) níveis e o fator “B”, a concentração de Moringa com 12 (doze) níveis. Este último fator variou desde 25 mg/L com incremento de 25mg/L, sendo que 12 concentrações foram aplicadas: 25mg/L, 50mg/L, 75mg/L, 100mg/L, 125mg/L, 150mg/L, 175mg/L, 200mg/L, 225mg/L, 250mg/L, 275mg/L e 300mg/L. A turbidez inicial variou de 150uT a 550uT com incremento de 100uT. Portanto, 5 níveis diferentes de turbidez inicial foram testados: 150uT, 250uT, 350uT, 450uT e 550uT. Os seguintes parâmetros foram avaliados: cor, turbidez e compostos com absorção em UV-254nm, sendo que houve três repetições

para cada combinação dos dois fatores. As leituras dos fatores eram realizadas em triplicata.

Os dados obtidos foram avaliados no programa computacional STATISTICA 5.0. Em todos os casos aplicou-se uma probabilidade de erro de 5%. Após análise determinou-se os pontos ótimos do processo de coagulação/floculação para aplicação no processo de filtração com membranas. Realizou-se o teste F de contraste sendo que para avaliar a melhor condição encontrada era considerado o menor valor para os parâmetros analisados.

4.2.4 Processo combinado coagulação/floculação/filtração com membranas

Considerando que as leis encontram-se cada vez mais rígidas e que há uma grande busca por processos de tratamento de água mais eficientes e eficazes, optou-se em trabalhar com o processo de filtração com membranas, pois sabe-se que este tipo de processo garante obtenção de água potável com excelente qualidade. Neste sentido, a ultra e a microfiltração são consideradas alternativas economicamente viáveis.

Aliado a este fato outros processos de filtração utilizando a *Moringa oleifera* como agente coagulante foram anteriormente estudados por Cardoso (2007) e Paterniani et al. (2010).

Segundo Konradt-Moraes (2009) para separar as águas em cor e turbidez relativamente baixas e altas, tem-se alguns valores médios aproximados dos parâmetros físico-químicos como, para as águas de cor e turbidez relativamente baixas, valores até em torno de 299 uH para cor aparente e 150 uT para turbidez. Águas com valores médios aproximados acima destes, para os parâmetros mencionados, foram consideradas de cor e turbidez relativamente altas nesta pesquisa.

Sendo assim, convencionou-se trabalhar com dois valores extremos do planejamento para o fator turbidez, sendo um deles de 150 uT, considerada uma água com características de cor e turbidez relativamente baixas e outro de 550 uT com características de cor e turbidez altas. Estas águas foram coletadas em diferentes épocas do ano, com a finalidade de avaliar a eficiência dos processos propostos em função da qualidade da água bruta utilizada.

Após a otimização dos processos de coagulação e floculação foram realizados ensaios em “jar test”, nas condições otimizadas, e posteriormente feita a filtração com

membranas no módulo citado no item 4.2.4.1, utilizando 2 membranas tubulares cerâmicas.

A primeira de porosidade de 0,1 μm , monocanal, a segunda, de porosidade 0,2 μm , também monocanal. As membranas monocanal possuíam área de filtração de 0,005m².

As pressões de trabalho escolhidas foram de 1 e 2 bar para evitar o entupimento pois, de acordo com Lemanski (2004), o uso de pressões mais baixas imprime um fluxo inicial menor porém, ao longo do tempo de filtração, o fluxo de permeado se estabiliza em valores maiores, diminuindo o entupimento da membrana, se comparados com pressões mais altas.

Para se ter uma uniformidade nos ensaios fixou-se o volume inicial da alimentação em 20 litros e o tempo de ensaio em 180 minutos.

O objetivo desta etapa de Ultrafiltração (UF) era obter água potável e um maior fluxo permeado, devido ao prévio tratamento com a semente de MO.

Em um primeiro momento foram avaliados os parâmetros cor, turbidez e compostos com absorção em UV-254 nm da água tratada, com a finalidade de verificar se estes parâmetros se enquadravam na legislação vigente, determinada pela Portaria nº 518 de 25 de março de 2004 do Ministério da Saúde (MS), responsável pela vigilância da qualidade da água para o consumo humano e seu padrão de potabilidade.

Analizou-se ainda, os seguintes parâmetros de qualidade: sólidos dissolvidos totais (SDT), sólidos totais (SST), carbono orgânico dissolvido (COD), pH, alcalinidade e acidez volátil, dureza total, fosfato, nitrato, nitrito, amônia, metais, coliformes totais e *Escherichia coli*, de acordo com APHA (1998), com objetivo de averiguar se esses parâmetros também atendiam aos valores máximos estabelecidos pela legislação brasileira.

4.2.4.1 Processo de filtração com membranas

Foi utilizada uma unidade de micro-ultrafiltração NETZSCH (Figura 4.5), pelo princípio da filtração tangencial, na qual foi possível adaptar diferentes tipos de membrana para a filtragem com a troca do “housing” ou suporte da membrana (1).

Este módulo é de aço inox, com membranas cerâmicas de $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ /ZrO₂. O sistema é equipado com manômetros na entrada (2) e na saída (3), para controle da pressão transmembrana, e ligado a um banho termostático (4) para controle da

temperatura da solução contida no tanque de alimentação (5) em $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$. A saída de permeado era coletada com abertura da válvula (6) e o retorno do concentrado para o tanque de alimentação era realizado pela mangueira (7).



Figura 4.5. Unidade experimental de micro-ultrafiltração.

Inicialmente foram realizados ensaios de filtração para a caracterização do fluxo das membranas com água pura, sendo utilizada água de osmose. Foram coletadas massas de permeado em tempos pré-determinados, por intervalos de tempos conhecidos, e os fluxos calculados a partir da Equação 1.

$$f_{\text{Permeado}} = \frac{m}{\rho_{25^{\circ}\text{C}} \cdot \Delta t \cdot A_m} \quad (1)$$

Em que f_{Permeado} é o fluxo de permeado, m é a massa de água coletada, $\rho_{25^{\circ}\text{C}}$, a densidade da água a 25°C , Δt , o intervalo de tempo em que a massa de água foi coletada e A_m , a área filtrante da membrana.

As amostras de permeado foram coletadas em intervalos de tempo pequenos, no início da filtração, sendo estes intervalos, aumentados posteriormente, para uma boa determinação da curva de fluxo de permeado em função do tempo.

Depois do término da filtração com a água bruta, foram realizados dois enxágües rápidos da membrana e o fluxo de água de osmose foi medido novamente, para

comparação com o fluxo de água da membrana limpa e posterior cálculo do “*fouling*” percentual.

O entupimento ou “*fouling*” foi calculado de acordo com a Equação 2 (RAO, 2002):

$$Entupimento = 1 - \left(\frac{f_p}{f_a} \right) \quad (2)$$

Na qual, f_p é o fluxo de água de osmose medido após o processo de filtração e f_a é o fluxo de água de osmose antes da realização do experimento, ou seja, fluxo da membrana limpa.

Após cada ensaio de filtração a membrana foi submetida à limpeza. Posteriormente, o fluxo da água de osmose foi medido, em variadas pressões e na temperatura de 25⁰C, com o objetivo de verificar se a permeabilidade da membrana havia retornado ao valor inicial depois do processo de limpeza.

4.2.4.2 Limpeza da Membrana

O processo descrito a seguir foi o mesmo utilizado por Konradt-Moraes (2009).

Para a limpeza das membranas cerâmicas utilizadas nos ensaios, foram utilizadas soluções de lavagem de hidróxido de sódio e ácido cítrico 1 % m/v.

As membranas, após o uso, foram colocadas em provetas de 250mL. As provetas eram inseridas em um aparelho de ultra-som e, no interior das provetas, junto às membranas, eram colocadas as soluções de lavagens.

Inicialmente utilizou-se a solução de hidróxido de sódio, para remoção da matéria orgânica, com 8 banhos de 10 minutos cada, em temperatura entre 60 a 70⁰C. Posteriormente, o pH da membrana era estabilizado próximo da neutralidade, com vários banhos consecutivos de água de osmose, cada um deles com duração de 10 minutos. Sendo a próxima etapa a lavagem com solução ácida.

A lavagem com ácido cítrico foi realizada da mesma forma que com a base. Foram 8 banhos, de 10 minutos cada, em temperatura entre 60 e 70⁰C, no banho de ultra-som. Assim, a matéria inorgânica era removida.

Após o término dos banhos com solução ácida, o pH da membrana era novamente estabilizado com vários banhos consecutivos com água que passou pelo processo de purificação de osmose inversa.

Depois de limpas, as membranas eram guardadas em água purificada pelo processo de osmose inversa, com algumas gotas de hipoclorito de sódio.

4.3 AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DA SEMENTE E DO COMPOSTO ATIVO DA *MORINGA OLEIFERA*

Nesta etapa do trabalho foi avaliada a estabilidade em função do tempo de armazenamento da semente *in natura* de *Moringa Oleifera* Lam, bem como do composto ativo extraído e purificado conforme descrito no item 4.1.1. Esta estabilidade foi avaliada pelos parâmetros de remoção de cor, turbidez e UV- 254 nm.

4.3.1 Avaliação da Estabilidade de Armazenamento das Sementes de *Moringa oleifera*

As sementes *in natura* proveniente de um mesmo lote, da cidade de Aracaju-Se, foram devidamente embaladas e armazenadas sob refrigeração (5°C) durante 2 anos. Posteriormente estas foram avaliadas a cada ano em ensaios de coagulação/floculação, descrito no item 4.2.2, com o objetivo de verificar a eficiência do poder coagulante da semente. Realizou-se extração com água para obtenção da solução coagulante, sendo que as mesmas eram preparadas sempre na data de utilização.

As concentrações de coagulante utilizadas variavam de 25 a 300 mg/L e a água utilizada nesta etapa do processo foi de turbidez média (aproximadamente 250 uT). Foi realizada análise de dosagem de proteína nas soluções coagulantes pelo método descrito no item 4.1.2.1.

Avaliou-se, ainda a composição centesimal destas neste mesmo período de tempo, segundo Instituto Adolf Lutz (IAL, 1985).

4.3.2 Avaliação da estabilidade dos extratos obtidos da semente de *Moringa oleifera*

Os extratos purificados obtidos por extração com água e com solução salina KCl 1 Molar, foram avaliados quanto a sua estabilidade ao longo do tempo de armazenamento durante 7 meses. Todas as análises foram realizadas até o momento em

que era observada remoção de todos os parâmetros de cor, turbidez e compostos com absorção em UV-254 nm, encerrou-se os ensaios nos casos em que a eficiência de remoção não era expressiva.

Os compostos ativos purificados (extratos) foram mantidos sob refrigeração e a sua capacidade coagulante/floculante, foi avaliada por meio de ensaios em Jar Test em água de turbidez média (aproximadamente 250uT) e as concentrações de coagulante utilizadas foram de 25 a 300 mg/L.

Avaliou-se ainda o teor de proteínas de acordo com Lowry *et al.* (1951), conforme descrito no item 4.1.2.1.

4.4 Avaliação da cinética do processo de coagulação/floculação

Com intuito de avaliar a cinética da reação durante o processo de coagulação/floculação, realizaram experimentos com todos os valores de turbidez inicial avaliados para as outras etapas deste trabalho, ou seja, 150, 250, 350, 450 e 550 uT. Aplicou-se os pontos ótimos obtidos por meio do planejamento de experimentos para a solução coagulante extraída com KCl 1 Molar, a qual obteve os menores valores para todos os parâmetros avaliados.

Foram realizados ensaios de coagulação/floculação, conforme descrito no item 4.2.2. Retiraram-se alíquotas em variados tempos (3, 6, 9, 12, 15 e 18 minutos) e para estas amostras foi realizada leitura de cor, turbidez e compostos com absorção em UV-254 nm, conforme metodologia descrita no item 4.2.1.

Optou-se inicialmente em testar modelos cinéticos de 1ª ordem devido a Masters (1991) na afirmação que a maior parte dos fenômenos ambientais é inicialmente considerada em cinética de 1ª ordem. Para tanto, a redução de cor, turbidez e UV- 254 nm pode ser calculada por meio da Equação 3.

$$\frac{dC}{dt} = -k.C \quad (3)$$

Em que:

C é a cor ou turbidez ou uv final;

C₀ é a cor ou turbidez ou uv inicial;

t é o intervalo de tempo entre C₀ e C;

k é a constante de transformação de 1ª ordem (1/tempo).

Numa plotagem de concentração ($-\ln C/C_0$) versus tempo, a constante de transformação (k) é simplesmente a inclinação da reta.

Como a velocidade da reação (r_A) é proporcional à concentração, a equação da velocidade é descrita pela Equação 4.

$$-r_A = k C \quad (4)$$

O tempo de meia vida ($t^{1/2}$) para a reação é o tempo requerido para que a metade dos reagentes seja convertida em produtos. Ele está diretamente relacionado com a constante da velocidade para uma reação de primeira ordem que, de acordo com Levenspiel (1974), é descrito pela Equação 5.

$$t^{1/2} = \frac{0,693}{k} \quad (5)$$

4.5 ANÁLISE MATEMÁTICA DOS DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS NO PROCESSO DE FILTRAÇÃO POR MEMBRANAS

No processo de filtração com membranas, realizado após o processo de coagulação/floculação avaliou-se os fluxos do permeado. O fluxo é um parâmetro limitante no processo de membranas, pois é ele que irá predizer qual é o tipo de fenômeno que está ocorrendo em função da diminuição do fluxo em relação ao tempo.

Neste trabalho, analisou-se a ocorrência de *fouling* nos casos de estudo descritos acima, aplicando o modelo desenvolvido por Hermia (1982). Este modelo é semi-empírico e tem a vantagem de apresentar parâmetros com significado físico.

Hermia (1982) apresentou um modelo matemático para a descrição de *fouling* em filtração perpendicular. Este modelo é baseado na teoria convencional da filtração a pressão constante. Embora o modelo de Hermia (1982) seja desenvolvido para filtração dead-end, muitos autores utilizam este modelo também para filtração cross-flow (Salahi et al., 2010). Assim a aplicação deste modelo foi avaliada neste trabalho dada sua simplicidade e interpretação dos parâmetros.

Hermia (1982) mostrou que para a formação de torta ($n=0$), a Equação 6 deve ser aplicada:

$$\frac{d^2}{dt^2} V(t) = \frac{1}{K_t} \quad (6)$$

Para o bloqueio parcial dos poros (n=1), o autor propõe a Equação 7:

$$\frac{d^2}{dt^2} V(t) = \frac{\frac{dV(t)}{dt}}{K_p} \quad (7)$$

No bloqueio interno dos poros (n=1,5), a Equação 8 foi apresentada:

$$\frac{d^2}{dt^2} V(t) = \frac{\left(\frac{dV(t)}{dt}\right)^{\frac{3}{2}}}{K_i} \quad (8)$$

O autor propôs a Equação 9 para o bloqueio total dos poros (n=2):

$$\frac{d^2}{dt^2} V(t) = \frac{\left(\frac{dV(t)}{dt}\right)^2}{K_b} \quad (9)$$

Estas equações podem ser integradas e linearizadas conforme apresentado na Tabela 4.4 (Salahi et al., 2010).

Tabela 4.4. Equações características para cada tipo de entupimento

| <i>Modelo</i> | <i>Mecanismo de fouling</i> |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| $\ln(J) = \ln(J_o) - K_b t$ | Bloqueio completo dos poros |
| $1/J^{1/2} = 1/J_o^{1/2} + K_a t$ | Bloqueio padrão dos poros |
| $1/J = 1/J_o + K A t$ | Bloqueio intermediário dos poros |
| $1/J^2 = 1/J_o^2 + K_c t$ | Formação de torta |

Fonte: Adaptado de Salahi et al., 2010

A modelagem do processo foi realizada ajustando os pontos experimentais obtidos por cada uma das equações lineares apresentadas na Tabela 4.4. Este ajuste foi realizado com auxílio do software Microsoft Excel.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos no trabalho experimental desenvolvido no presente estudo. Inicialmente foram realizados ensaios de caracterização e extração do composto ativo com água, solução tampão e solução salina e, posteriormente, estes extratos foram utilizados em ensaios de coagulação/floculação.

Foi realizada análise para avaliar a cinética do processo de coagulação/floculação.

Após análise estatística aplicaram-se os pontos ótimos para extração com água e com solução salina no processo combinado coagulação/floculação/filtração com membranas. Foi realizada a análise numérica dos dados obtidos neste processo.

Avaliou-se também a estabilidade das sementes e dos extratos em função do tempo de armazenamento.

5.1 EXTRAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO COMPOSTO ATIVO DA SEMENTE DE *MORINGA OLEÍFERA* LAM

5.1.1 Extração e caracterização do composto ativo com água

Esta etapa apresenta resultados referentes à dosagem de proteínas e eletroforese dos extratos obtidos das sementes de *Moringa oleifera* e caracterização físico-química das sementes de *Moringa oleifera*.

5.1.1.1 Dosagem de proteína dos extratos obtidos das sementes de *Moringa oleifera*

Após a realização do processo de extração, avaliou-se a quantidade de proteína existente no extrato. Para extração com água, solução SCA, obteve-se um valor de 1564,33 mg/L de proteína em solução.

5.1.1.2 Análise de eletroforese dos extratos obtidos das sementes de *Moringa oleifera*

Esta análise foi possível apenas na extração com água, sendo que para extração com solução tampão e com solução salina, ocorria um tipo de precipitação e consequentemente não era possível proceder às análises, isso provavelmente ocorreu pela interação dos reagentes aplicados para análise de eletroforese com os sais e com as soluções tampão utilizadas. Sendo assim, este item foi descrito somente para a solução coagulante SCA.

Após a extração do composto ativo de duas amostras diferentes de semente de *Moringa oleifera* lam com água, foi realizada a caracterização por meio de uma eletroforese (Figura 5.1), com o intuito de se avaliar qual era o peso molecular (PM) do composto ativo encontrado nos extratos.

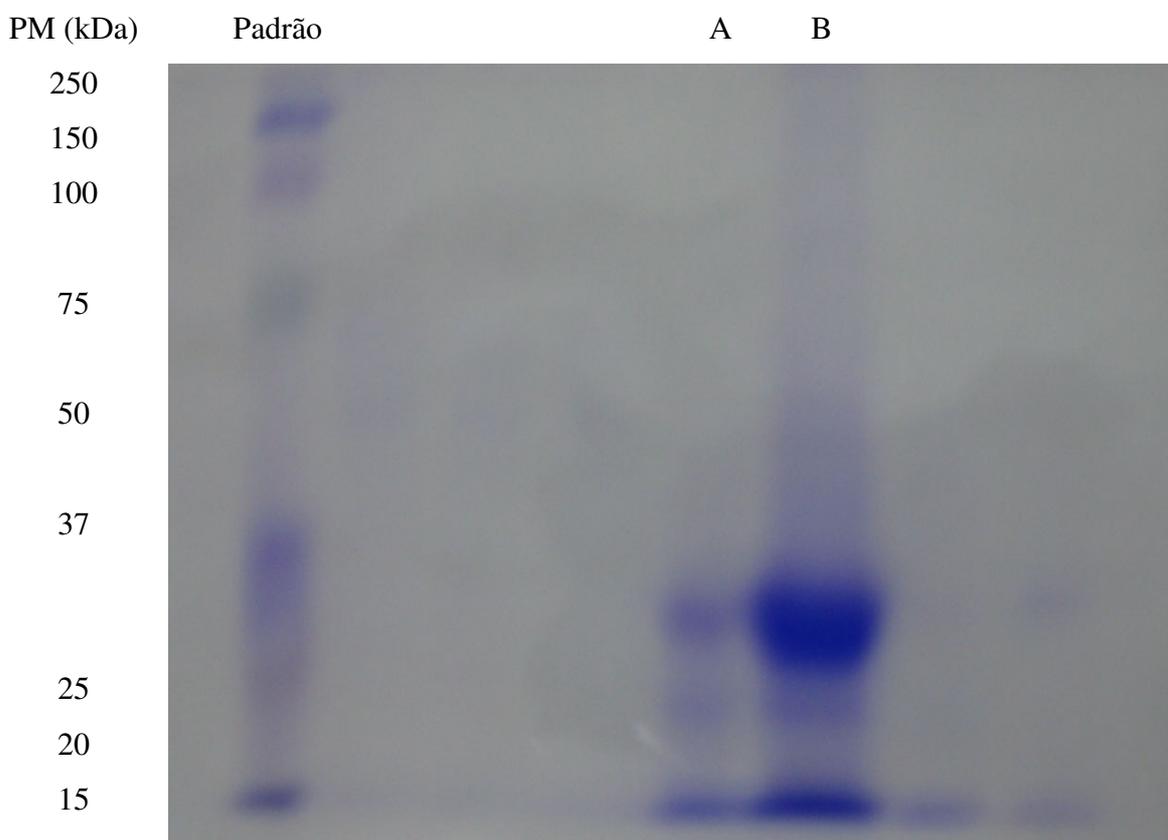


Figura 5.1. Eletroforese em gel de poliacrilamida (12%) de SSMoL (100 µg), tratada com β-mercaptoetanol.

Segundo Santos *et al.* (2005) a proteína encontrada no extrato aquoso obtido da semente de *Moringa oleifera* Lam possui massa molecular de aproximadamente 30 kDa. A Figura 5.1 apresentou o resultado da análise de eletroforese no extrato aquoso

obtido de duas amostras diferentes de *Moringa*, uma delas é proveniente da cidade de Aracajú (amostra A) e a outra da cidade de Maringá (amostra B). Como pode ser observado a mesma massa molecular encontrada por Santos *et al.* (2005) foi encontrada para a proteína das duas amostras avaliadas, sendo que a amostra B provavelmente possui maior concentração desta proteína.

Comparando os dados obtidos com a literatura, nota-se que proteínas coagulantes foram previamente reportadas em sementes de *M. oleifera*. Nadabgengesere et al. (1995) descreveu uma proteína catiônica dimérica com massa molecular de 12-14 kDa e ponto isoelétrico (pI) entre 10 e 11; Ghebremichael *et al.* (2005) estudaram uma proteína catiônica com pI maior que 9,6 e massa molecular menor que 6,5 kDa; Gassenschmidt et al. (1995) purificaram uma proteína catiônica com pI maior que 10 e massa molecular em torno de 6,5 kDa. A atividade coagulante de derivados catiônicos de alto peso molecular é explicada pelo modelo de formação de pontes; coagulação de partículas carregadas negativamente resulta de ligações por meio de forças de Coulomb; proteínas carregadas positivamente ligam-se a superfície de partículas carregadas negativamente (GASSENSCHIMIDT et al., 1995).

De uma maneira geral, os resultados encontrados na literatura apresentam diferentes massas moleculares para proteína da semente de *Moringa Oleifera*, sendo que estes variam desde 6,5 kDa até 30 kDa.

5.1.1.3 Caracterização físico-química da semente

A caracterização físico-química da semente de MO, proveniente de dois locais Amostra A (proveniente de Aracaju-SE) e Amostra B (proveniente da Fazenda Experimental da Universidade Estadual de Maringá - Iguatemi-PR), está apresentada na Tabela 5.1.

Tabela 5.1. Caracterização físico-química da semente de *Moringa Oleifera*

| Parâmetro | Amostra A (%) | Amostra B (%) |
|----------------|---------------|---------------|
| Lipídios | 33,98 ± 0,02 | 29,02 ± 0,02 |
| Proteína | 26,72 ± 0,01 | 28,16 ± 0,02 |
| Umidade | 8,49 ± 0,02 | 8,61 ± 0,01 |
| Cinzas | 2,56 ± 0,03 | 2,74 ± 0,04 |
| Carboidratos * | 28,25 ± 0,04 | 31,47 ± 0,03 |

* Carboidratos por diferença

Por meio da Tabela 5.1, observa-se que a amostra A apresenta maior teor de lipídios e menor teores de proteína, umidade, cinzas e carboidratos, se comparada com a amostra B.

Gallao (2006) encontrou um teor de 39,3% de proteínas na semente de MO, valor este bem superior ao encontrado com a semente estudada neste trabalho. Por outro lado, o teor de lipídeos foi inferior, sendo de somente 18,80%, enquanto que o resultado obtido com a semente proveniente de Maringá – PR foi de 29,02%. O teor de umidade da semente proveniente de Camocim - CE de 6,3% foi também inferior aquele encontrado na semente proveniente de Maringá - PR, o qual foi de 8,61%.

Estes resultados indicam que as condições de plantio, tais como clima, solo, adubação, etc. levam a produção de sementes com diferentes características, o que pode influenciar na sua eficiência sobre os processos de coagulação e floculação nos tratamentos de água.

5.1.2 Extração e caracterização do composto ativo com solução tampão (SCpH)

Nesta etapa são apresentados os resultados referentes à extração da solução coagulante de *Moringa oleifera* utilizando tampão pH 4 e tampão pH 10.

5.1.2.1 Dosagem de proteína do extrato de *Moringa oleifera* obtido com solução tampão

A concentração de proteína alcançada para o extrato obtido com solução tampão pH 4 (SCpH4) foi de 3152,8 mg/L. Já a extração com tampão pH 10 (SCpH10) promoveu um extração de proteína 1,4 vezes maior do que a extraída com tampão pH 4, sendo encontrado um valor de 4279,5mg/L de concentração protéica para a mesma.

Para as duas soluções citadas acima (SCpH4 e SCpH10) o valor foi inferior se comparadas à extração com água (SCA).

Segundo Coelho et al. (2009) a proteína encontrada na *Moringa Oleifera* é a lectina. É ela a responsável pela coagulação/floculação da água.

5.1.3 Extração e caracterização do composto ativo com solução salina (SC)

Este item apresenta os resultados da concentração de proteína referente a extração com solução salina em diferentes molaridades e posteriormente mostra os valores de teor de proteína para extração com os sais KCl, MgCl₂ e CaCl₂ 1 M.

5.1.3.1 Dosagem de proteína dos extratos obtidos com os sais NaCl, KCl, MgCl₂ e CaCl₂

Os valores indicativos de proteínas presentes nas soluções de *Moringa* com NaCl em molaridades diferentes (0,01M, 0,1M e 1M) são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2. Quantidade de proteína para as diferentes molaridades de sais.

| <i>Tipo de solução extraída</i> | <i>Teor de proteína (mgL⁻¹)</i> |
|---------------------------------|--|
| Extração com NaCl 0,01 Molar | 1290,86 |
| Extração com NaCl 0,1 Molar | 3388,01 |
| Extração com NaCl 1 Molar | 4499,19 |

A Tabela 5.2 mostra o valor da proteína em função do tipo de extração realizado. Um aumento na quantidade de proteínas é observado devido à elevação da concentração de NaCl. Este é um fato importante, pois sabe-se que a proteína de sementes de *Moringa Oleifera* é o composto mais importante no processo de clarificação da água. Tem-se relatado na literatura que a semente de *Moringa Oleifera* possui uma proteína dimérica catiônica de alto peso molecular, o que desestabiliza as partículas na água através de um processo de neutralização e de adsorção, floculação de colóides seguidos de sedimentação (VIEIRA *et al.*, 2009). É importante notar que o menor valor encontrado para a concentração de proteína foi extraída com solução NaCl 0,01M.

Considerando que os melhores valores de remoção de cor, turbidez e UV-254 nm encontrados no processo de coagulação/floculação e que a maior dosagem de proteínas foi encontra na extração com NaCl 1 Molar, e ainda que este teor de proteína é diretamente proporcional ao potencial de coagulação no tratamento de água potável, optou-se investigar a solução 1 M para os outros sais (KCl, CaCl₂ e MgCl₂). Os teores de proteína encontrados para estes sais encontram-se na Tabela 5.3.

Tabela 5.3. Quantidade de proteína para os diferentes tipos de sais.

| <i>Tipo de solução extraída</i> | <i>Teor de proteína (mgL⁻¹)</i> |
|--|--|
| Extração com KCl 1 Molar | 4818,64 |
| Extração com MgCl ₂ 1 Molar | 950,32 |
| Extração com CaCl ₂ 1 Molar | 940,13 |

Segundo a Tabela 5.3, dentre os sais avaliados o KCl obteve maior teor de proteína. Este sal foi escolhido para ser utilizado na próxima etapa da pesquisa, ou seja, no processo combinado de coagulação/floculação/filtração. Aliado a este fato, nota-se que maior parte dos estudos encontrados na literatura são para o sal NaCl, sendo assim, a utilização de KCl culminaria em resultados inéditos.

5.2 APLICAÇÃO DO COMPOSTO ATIVO NO PROCESSO DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO/FILTRAÇÃO COM MEMBRANAS

Esta fase do trabalho está dividida da seguinte forma:

Primeiramente são apresentados os resultados de caracterização da água bruta utilizadas nos ensaios de coagulação/floculação, e posteriormente os valores de porcentagem de remoção, visando identificar a melhor relação “dosagem de coagulante X turbidez inicial”, considerando os parâmetros de remoção de cor, turbidez e compostos com absorção em UV-254 nm, com o intuito de se avaliar a melhor dosagem para cada tipo de coagulante e em cada valor de turbidez inicial.

Os resultados de remoção de cor, turbidez e compostos com absorção em UV-254nm são apresentados para os diferentes valores de turbidez inicial da água bruta em função da concentração de solução coagulante de *Moringa Oleifera*.

Após são apresentados os valores dos pontos ótimos encontrados para cada extrato avaliado. É válido lembrar que a análise estatística dos dados foi realizada para cada parâmetro separadamente, sendo assim, as faixas de concentração ótimas são diferentes para cada valor de turbidez inicial e para cada fator avaliado (cor, turbidez e compostos com absorção em UV-254 nm).

Para facilitar o entendimento, ao final de cada sub item será indicado, em uma tabela, a faixa de concentração e o ponto ótimo para os três parâmetros avaliados. Esta faixa engloba valores que não têm diferença significativa entre si ($p < 0,05$), para cada valor de turbidez inicial.

Finalmente são apresentados os pontos ótimos encontrados, os quais foram aplicados no processo combinado coagulação/floculação/filtração com membranas. Primeiro apresenta-se em uma tabela as características físico-químicas microbiológicas da água bruta e da água tratada e após avalia-se os valores de fluxo x tempo para cada ensaio realizado no processo com membranas.

5.2.1 Caracterização da Água Bruta Superficial

Este item apresenta um resumo das características das águas utilizadas nesta etapa da pesquisa. Considerando que para o presente trabalho não utilizou-se água sintética e sim água bruta coleta no rio Pirapó, é importante citar que os compostos naturais podem causar variações em sua composição, que podem interferir no processo de tratamento.

Todos esses fatores são levados em conta ao avaliar os resultados obtidos. Nos ensaios em “jar test”, utilizou-se águas com características distintas, sendo que os valores médios de suas características físico-químicas e microbiológicas estão apresentados no Anexo II e resumidas na Tabela 5.4.

Tabela 5.4. Valores médios das características das águas superficiais utilizadas nos ensaios em “jar test”.

| Parâmetro | Unidade | 150 uT | 250 uT | 350 uT | 450 uT | 550 uT |
|----------------------------------|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Cor Aparente | uH = mgPt-CoL ⁻¹ | 484 | 1.695 | 1720 | 2407 | 2675 |
| Turbidez | uT | 150 | 251 | 353 | 450 | 551 |
| UV-254 nm | cm ⁻¹ | 0,718 | 0,923 | 1,007 | 1,487 | 1,603 |
| pH | - | 7,96 | 8,17 | 7,69 | 7,98 | 8,12 |
| Sólidos Suspensos Totais (SST) | mgL ⁻¹ | 376 | 1.332 | 310 | 560 | 1506 |
| Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) | mgL ⁻¹ | 160 | 228 | 273 | 256 | 400 |
| Coliformes Totais | UFC/100 mL ⁽¹⁾ | 5.620 | 3.955 | 2.000 | 8690 | 10000 |
| <i>Escherichia coli</i> | UFC/100 mL ⁽¹⁾ | 340 | 800 | 600 | 500 | 700 |

(1) UFC/100 mL – Unidades Formadoras de Colônia em 100 mL de amostra

Pode-se observar pela Tabela 5.4 as diferentes características de águas brutas utilizadas na presente pesquisa. Em geral, os valores de cor, turbidez e compostos com absorção em UV – 254 nm apresentam comportamento similar, sendo que quanto maior a turbidez da água maior o valor dos parâmetro citados.

Já para os resultados de sólidos, *Coliformes totais* e *E. coli* não nota-se uma relação linear. Conforme foi citado, este fato ocorre em função de compostos naturais que podem alterar as características da água bruta superficial.

Todos os valores dos parâmetros físico-químicos cor e turbidez das amostras coletadas ficaram fora dos padrões exigidos pela legislação, tornando esta água bruta imprópria para o consumo humano, sendo indispensável então, um tratamento adequado a fim de torná-la potável.

Os valores de turbidez apresentaram-se relativamente altos, foram coletados em épocas de chuvas na região de Maringá - PR, fazendo com que a água dos mananciais de superfície fiquem turvas, devido ao carregamento dos sedimentos das margens.

5.2.2 Resultados do processo de Coagulação/floculação/sedimentação utilizando a solução coagulante extraída com água (SCA)

Nas Figuras 5.2 a 5.4 são apresentadas as porcentagens de remoção de cor, turbidez e compostos com absorção em UV-254 nm, respectivamente para os diferentes valores de turbidez inicial estudados.

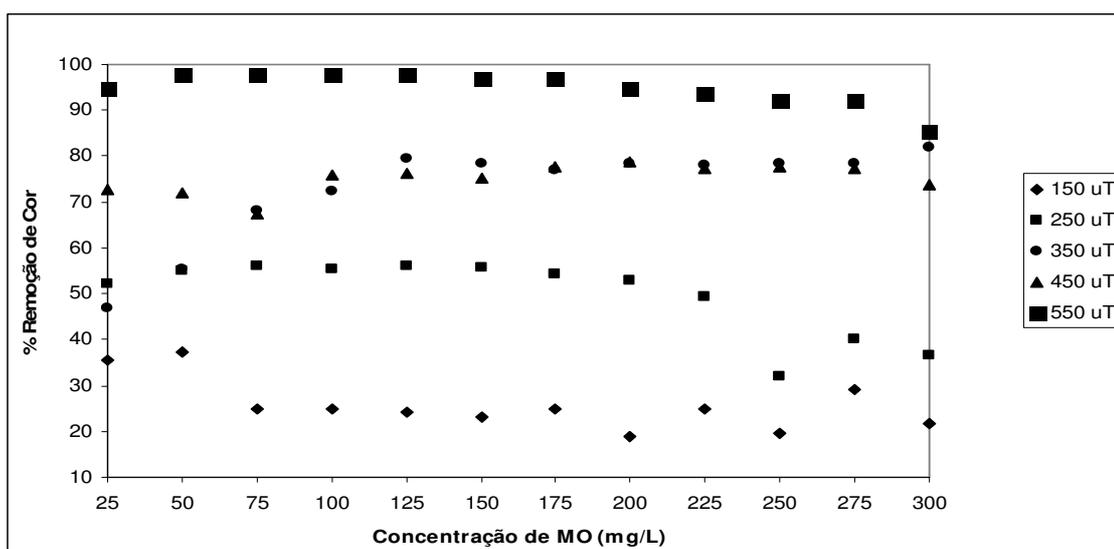


Figura 5.2. Porcentagem de remoção de cor para os diferentes valores de turbidez inicial e solução extraída com água (SCA).

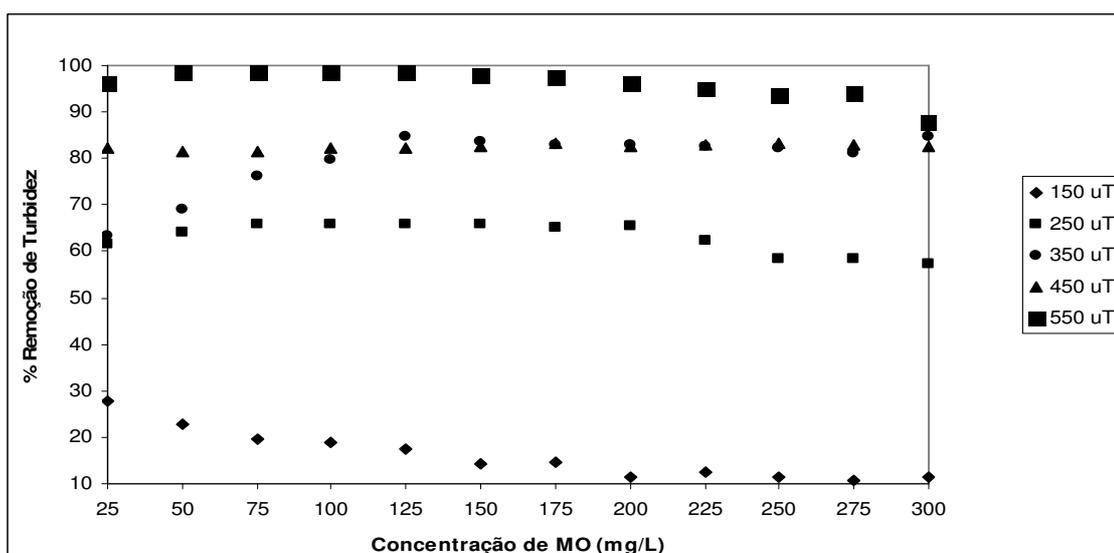


Figura 5.3. Porcentagem de remoção de turbidez para os diferentes valores de turbidez inicial e solução extraída com água (SCA).

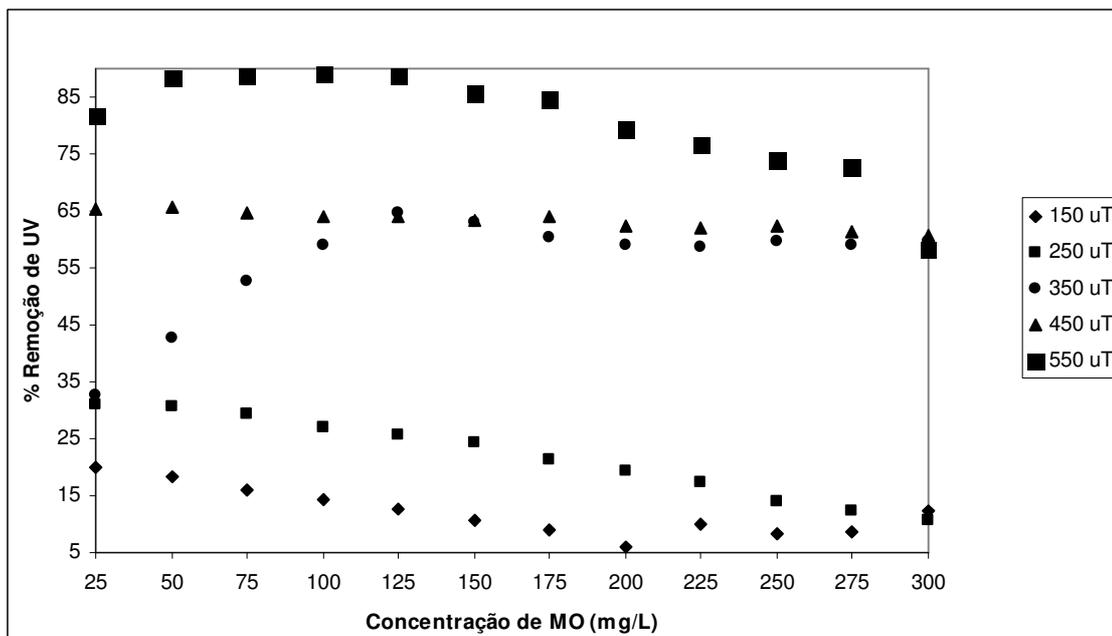


Figura 5.4. Porcentagem de remoção de compostos com absorção em UV-254 nm para os diferentes valores de turbidez inicial e solução extraída com água (SCA).

Segundo a análise estatística para remoção de cor e turbidez a influência da turbidez inicial ($F=1,79$) e da concentração de MO ($F=7,91$) sobre a remoção de cor foi significativa ($p<0,05$).

Tendo em vista a extração da solução coagulante com água (SCA), a faixa de concentração com maior remoção de cor para turbidez inicial de 150 uT foi de 25 a 300 mg/L de solução coagulante, sendo que as eficiências de remoção de cor foram de aproximadamente 20%.

Para turbidez inicial de 250 uT a melhor faixa foi de 25 a 225 mg/L, para turbidez inicial de 350 uT a melhor faixa foi de 75 a 300 mg/L. Considerando a turbidez inicial de 450 uT foram encontradas valores maiores de concentração, estando eles entre 100 e 300 mg/L. Finalmente para uma turbidez alta (550 uT) a melhor faixa de concentração foi de 25 a 250 mg/L.

Hening et al. (2007) encontraram valores de aproximadamente 70% de remoção para cor e 80% para turbidez em uma dosagem de *Moringa* equivalente a 50mg/L para águas de baixa cor e turbidez. Este fato já era esperado era esperado, pois Neto (2005) afirma que, a dosagem de coagulante a ser utilizada depende da turbidez inicial da água, e que para água de baixa turbidez, uma solução padrão correspondente a 50 mg/L é suficiente.

Para remoção de turbidez foi possível observar amplas faixas de concentração, sendo que o mais indicado é se utilizar as menores concentrações possíveis.

Para turbidez inicial de 150 uT a faixa de concentração com melhor remoção foi de 25 a 275 mg/L, porém os valores de porcentagem de remoção foram relativamente inferiores, estando entre 10 e 30%. Para turbidez inicial de 250 uT as porcentagens de remoção foram superiores (aproximadamente 60%), e assim como para cor a faixa de concentração com melhor remoção foi de 25 a 225 mg/L. Para turbidez de 350 uT a melhor faixa de concentração foi de 125 a 300 mg/L. Na turbidez de 450 uT tanto para turbidez quanto para cor a melhor faixa encontrada foi de 100 a 300 mg/L. Já para o maior valor de turbidez inicial (550 uT), maiores foram os valores de porcentagem de remoção (aproximadamente 99%), porém a menor faixa de concentração foi encontrada, de 50 a 175 mg/L.

Cardoso *et al.* (2008) encontraram remoções de 83 e 87% para remoção de cor e turbidez, respectivamente, com uma dosagem de solução padrão (com água) de 250 mg/L, para água de turbidez inicial 247 uT, aplicando um tempo de sedimentação de 30 minutos.

Tanto a faixa de concentração quanto a porcentagem de remoção de materiais com absorção em UV-254 nm foi um pouco inferior, quando comparados aos valores para remoção de cor e turbidez.

Por meio da análise estatística nota-se que para remoção de UV-254 nm a influência da turbidez inicial ($F=250,98$) e da concentração de MO ($F=580,18$) sobre a remoção de cor foi significativa ($p<0,05$).

Para a remoção destes compostos na turbidez inicial de 150 uT e 450 uT as concentrações ótimas foram de 25 e 50 mg/L, para turbidez inicial de 250 uT de 25, 50 e 75 mg/L. Na turbidez inicial de 350 uT foram encontradas duas concentrações ótimas, sendo elas de 100 e 125 mg/L. A faixa mais ampla de concentração encontrada de 50 a 125 mg/L foi maior o maior valor de turbidez (550 uT).

Observa-se que para os três parâmetros analisados (cor, turbidez e compostos com absorção em UV-254 nm), águas de alta cor e turbidez são mais fáceis de serem tratadas. Essas águas possuem flocos maiores, com maiores velocidades de sedimentação, sendo mais facilmente decantados proporcionando melhores eficiências de remoção de cor, turbidez e compostos com absorção em UV 254 nm (PEREIRA e DI BERNARDO, 2005)

Em geral, após análise dos três parâmetros citados acima (cor, turbidez e UV-254nm), pode-se encontrar o ponto ótimo ou concentração ótima de solução coagulante para a solução extraída com água (SCA). Ou seja, a concentração de coagulante de melhor eficiência, em cada valor de turbidez, sendo adotado sempre o valor de menor concentração na faixa, na qual não havia diferença significativa ($p < 0,05$), estes valores são apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5. Concentrações ótimas de coagulante para solução extraída com água (SCA)

| Turbidez Inicial (uT) | Faixa de Concentração de solução coagulante (mg/L) | Concentração ótima de solução coagulante (mg/L) |
|--------------------------|---|--|
| 150 | 25 a 50 | 25 |
| 250 | 25 a 75 | 25 |
| 350 | 125 a 300 | 125 |
| 450 | 50 a 300 | 50 |
| 550 | 50 a 125 | 50 |

A partir da Tabela 5.5, observa-se que em geral quanto maior o valor da turbidez inicial da água bruta, maior é a concentração ótima de coagulante que deverá ser utilizada.

5.2.3 Resultados para extração do composto ativo com solução tampão (SCpH)

Nesta fase são apresentados os resultados de remoção de cor, turbidez e compostos com absorção em UV-254 nm, referentes à aplicação no processo de coagulação/floculação de duas soluções coagulantes, sendo uma delas extraída com solução tampão pH 4 (SCpH4) e outra com solução tampão pH 10 (SCpH10).

5.2.3.1 Resultados para extração do composto ativo com solução tampão (SCpH4)

As Figuras 5.5 a 5.7 apresentam a porcentagem de remoção de cor, turbidez e compostos com absorção em UV-254nm, respectivamente utilizando a solução extraída com tampão pH 4 (SCpH4) como coagulante, no processo de coagulação/floculação.

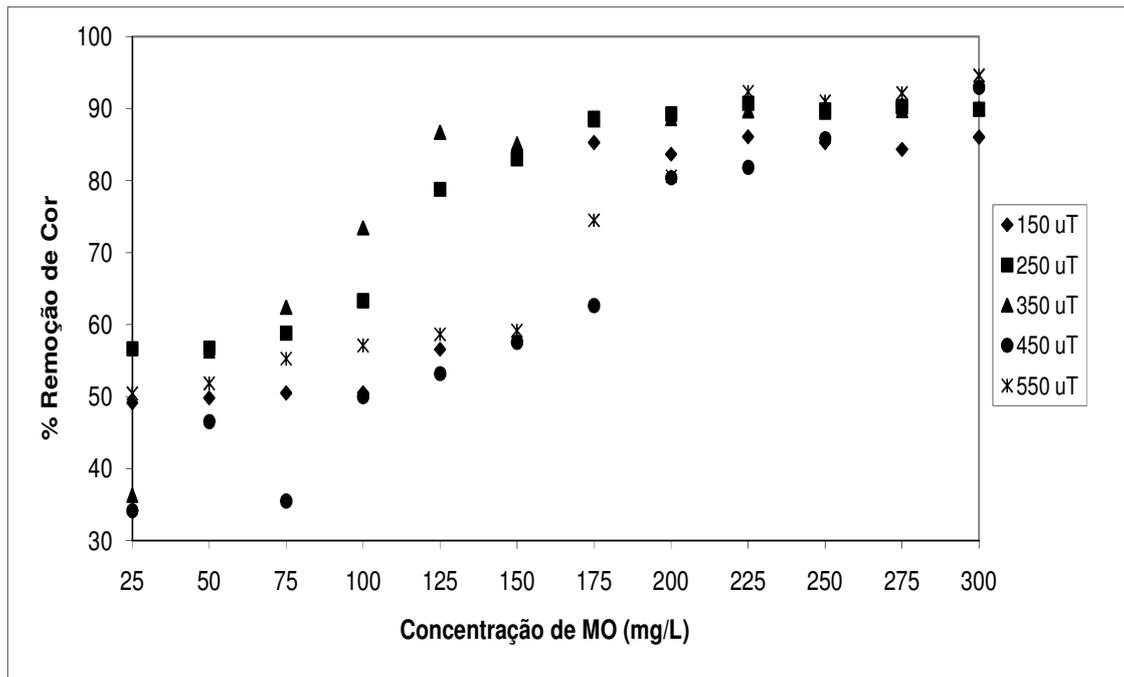


Figura 5.5. Porcentagem de remoção de cor para solução coagulante SCpH4 para os diferentes valores de turbidez inicial.

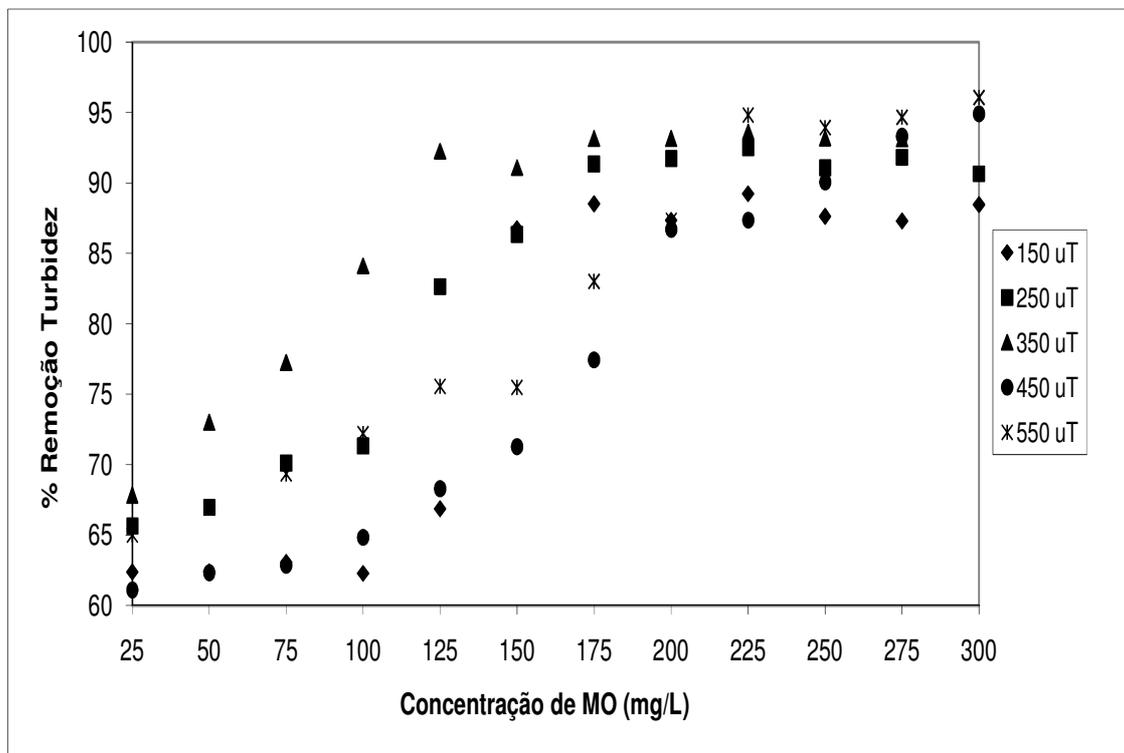


Figura 5.6. Porcentagem de remoção de turbidez para solução coagulante SCpH4 para os diferentes valores de turbidez inicial.

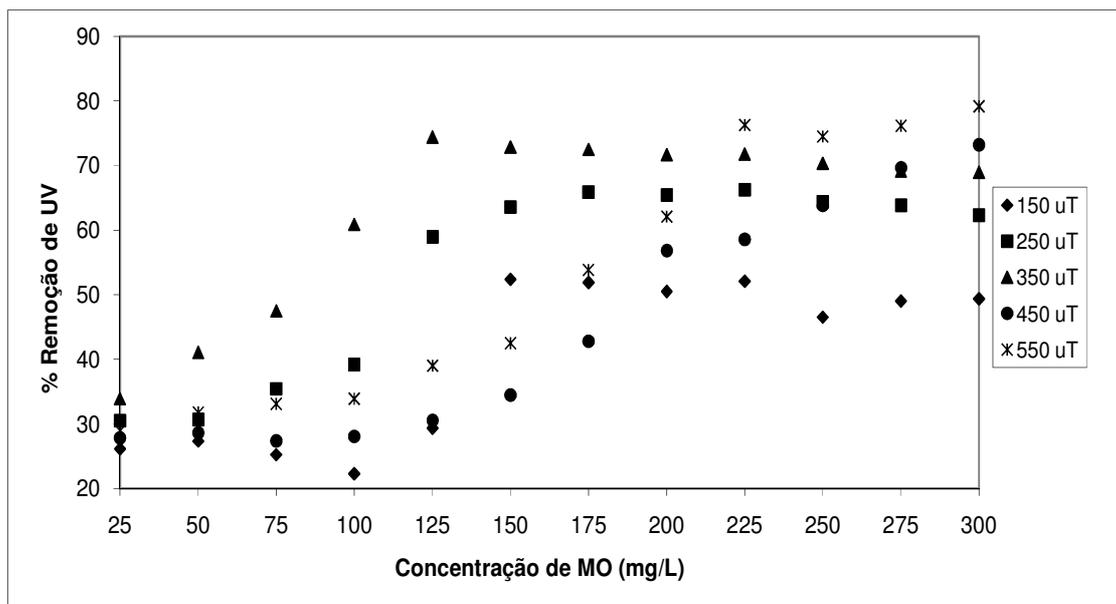


Figura 5.7. Porcentagem de remoção de compostos com absorção em UV-254 nm para solução coagulante SCpH4 para os diferentes valores de turbidez inicial.

Pela análise estatística nota-se que a influência da turbidez inicial ($F=483,59$) e da concentração de MO ($F=210,72$) sobre a remoção de cor foi significativa ($p<0,05$). Para a remoção de cor na turbidez inicial de 150 uT e 250 uT a concentração ótima foi de 225 mg/L, a faixa em que não há diferença significativa é de 125 a 300 mg/L. A concentração de 300 mg/L foi a condição ótima para os outros valores de turbidez inicial avaliados (350, 450 e 550 uT). Já a faixa de concentração na qual não há diferença significativa para turbidez inicial de 350 uT foi entre 125 e 300 mg/L, para 450 uT, entre 200 e 300 mg/L e finalmente para 550 uT, de 225 a 300 mg/L. Nestas últimas concentrações, as eficiências variaram entre 80 a 90% de remoção de cor (Figura 5.5).

Para remoção de turbidez nos pontos ótimos as eficiências foram um pouco maiores quando comparadas a remoção de cor, variando desde 90 a 95% de remoção.

No tratamento avaliado, para todos os valores de turbidez inicial, utilizando o coagulante SCpH4, aplicando a análise estatística nota-se que a influência da turbidez inicial ($F=25,59$) e da concentração de MO ($F=29,66$) sobre a remoção de turbidez foi significativa ($p<0,05$). Porém, não foi possível observar faixas de concentração que apresentassem diferença significativa e sim pontos isolados de concentração ótima (Figura 5.6).

Sendo assim, para menores valores de turbidez inicial, como por exemplo, 150, 250 e 350 uT, a concentração ótima de coagulante foi de 225 mg/L. Para turbidez inicial de 450 e 550 uT observou-se um aumento nesta concentração, sendo o ponto ótimo encontrado para utilização 300 mg/L da solução coagulante em questão.

Considerando valores de turbidez inicial de água bruta mais baixos, observa-se que as concentrações ótimas de coagulante também são menores. Ao se utilizar uma alta concentração nota-se um aumento nos valores de turbidez da água tratada, corroborando os resultados apresentados por Muybi e Evison (1995) e Nkurunziza *et al.* (2009). Pode-se verificar também que para esta faixa de turbidez existe uma dosagem ótima de coagulante, sendo que dosagens superiores a esta promovem o aumento da turbidez, constatação também efetuada por Muyibi e Evison (1995). Tais autores atribuem este fato a reestabilização ou reversão de cargas das partículas desestabilizadas devido ao baixo número de partículas coloidais frente ao excesso de íons positivos no meio. No presente fenômeno devido ao excesso de íons positivos no meio, os colóides tornam-se carregados positivamente (DI BERNARDO, 1993).

Segundo Ndabigengesere *et al.* (1995), apesar de ter comprovado a não ocorrência de reestabilização de cargas em caso de superdosagem de coagulante para valores elevados de turbidez, pode-se aceitar que os prováveis mecanismos envolvidos no processo de coagulação utilizando *Moringa Oleifera* sejam adsorção e neutralização de cargas e adsorção e formação de pontes, sendo difícil a definição de um mecanismo exato, pois na realidade estes podem ocorrer simultaneamente, segundo os autores.

As menores eficiências encontradas foram para remoção de compostos com absorção em UV 254 nm. Aplicando a análise estatística notou-se que a influência da turbidez inicial ($F=527,82$) e da concentração de MO ($F=139,06$) sobre a remoção de compostos com absorção em UV foi significativa ($p<0,05$).

Para a remoção destes compostos na turbidez inicial de 150 uT a dosagem ótima de solução coagulante foi de 150 mg/L e a faixa de concentração em que não houve diferença significativa foi entre 150 e 300 mg/L.

Para turbidez inicial de 250 uT a concentração ótima foi de 225 mg/L e a melhor faixa de concentração encontra-se entre 175 e 225 mg/L. Para turbidez inicial de 350 uT a concentração ótima foi de 125 mg/L sendo que esta concentração não difere ($p<0,05$) apenas da concentração de 150 mg/L.

Nos maiores valores de turbidez da água bruta (450 e 550 uT) observou-se que apenas a concentração de 300 mg/L foi efetiva, sendo todas as outras diferente estatisticamente desta ($p < 0,05$).

Em geral, após análise dos três parâmetros citados acima, pode-se encontrar o ponto ótimo para a solução extraída com tampão no pH 4 (SCpH4) em cada valor de turbidez, sendo que adotou-se sempre o valor de menor concentração na faixa na qual não havia diferença significativa ($p < 0,05$). Como explicado anteriormente em alguns casos não se encontrou essa faixa ótima de concentração, assim considerou-se apenas o ponto ótimo, estes valores são apresentados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6. Concentrações ótimas para solução extraída com tampão pH 4 (ScpH4)

| Turbidez Inicial (uT) | Faixa de Concentração de solução coagulante (mg/L) | Concentração ótima de solução coagulante (mg/L) |
|--------------------------|---|--|
| 150 | Ne | 225 |
| 250 | Ne | 225 |
| 350 | Ne | 225 |
| 450 | Ne | 300 |
| 550 | Ne | 300 |

* Ne- não encontrado

A partir da Tabela 5.6, observa-se que em geral quanto maior o valor da turbidez inicial da água bruta, maior é a concentração ótima de coagulante que deverá ser utilizada. Se comparado aos outros tipos de extração e como exemplo cita-se a extração com água (SCA), esta solução coagulante (extraída com solução tampão pH4) apresentou maiores valores de concentração de coagulante. Em geral na extração com solução tampão de pH 4 (SCpH4), percebe-se uma melhora nas eficiências de remoção com o aumento na concentração de solução coagulante utilizada.

Considerando os resultados obtidos, para as condições estudadas os ensaios com solução coagulante extraída com solução tampão (SCpH4) não culminaram em bons resultados, não sendo possível observar as melhores faixas de concentração e sim apenas pontos isolados. Não se aplicou o coagulante obtido na próxima etapa do processo, ou seja, o processo combinado coagulação/floculação/sedimentação/filtração.

5.2.3.2 Resultados para extração do composto ativo com solução tampão (SCpH10)

As Figuras 5.8 a 5.10 apresentam a porcentagem de remoção de cor, turbidez e compostos com absorção em UV-254nm, respectivamente utilizando a solução extraída com tampão pH 10 (SCpH10) como coagulante, no processo de coagulação/floculação.

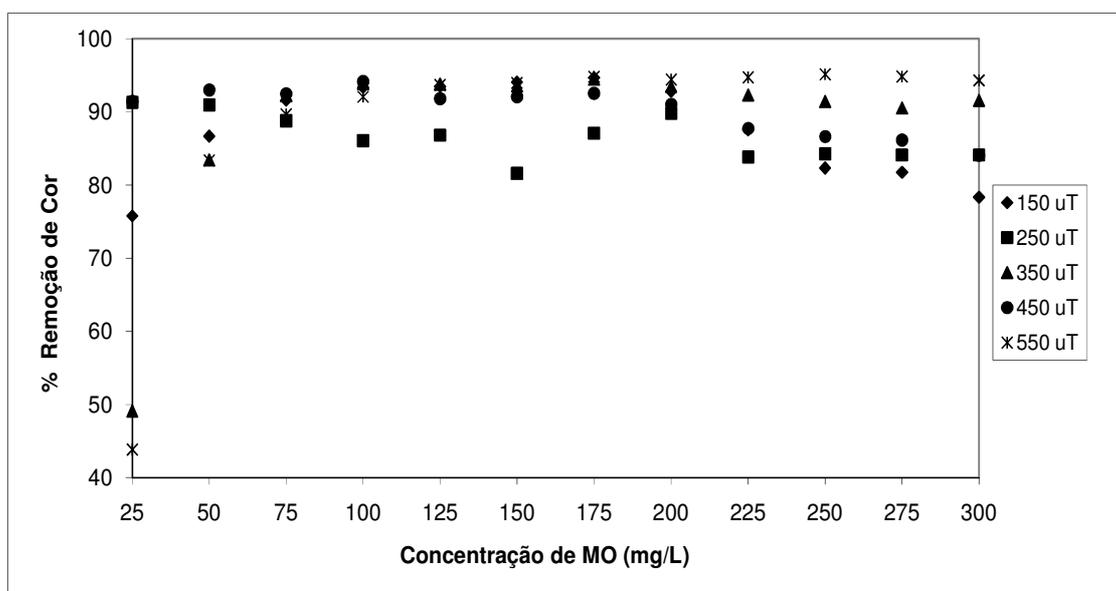


Figura 5.8. Porcentagem de remoção de cor para solução coagulante SCpH10 para os diferentes valores de turbidez inicial.

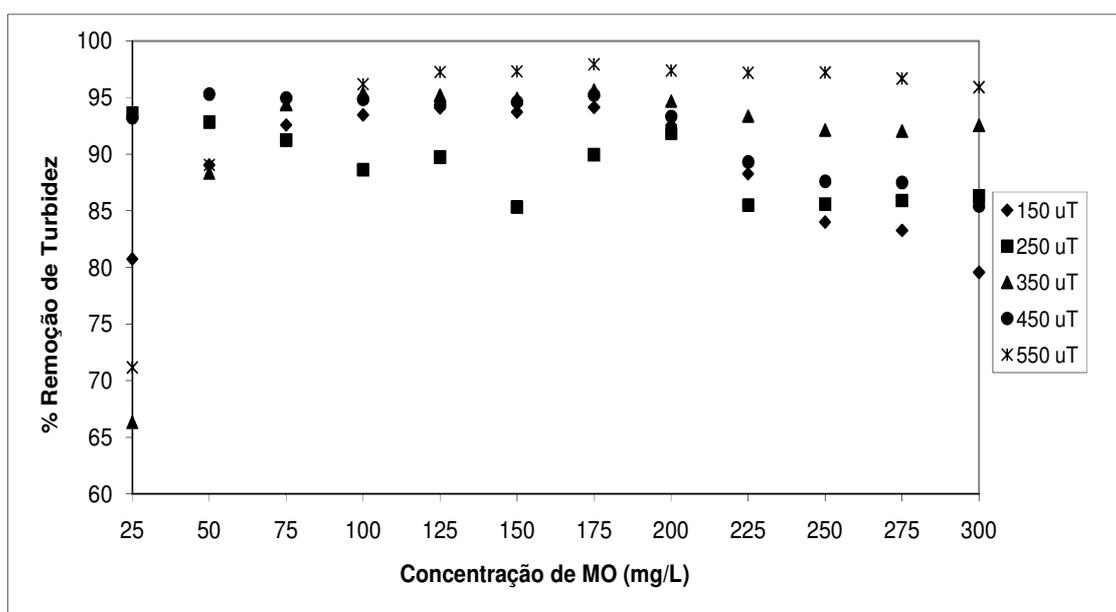


Figura 5.9. Porcentagem de remoção de turbidez para solução coagulante SCpH10 para os diferentes valores de turbidez inicial.

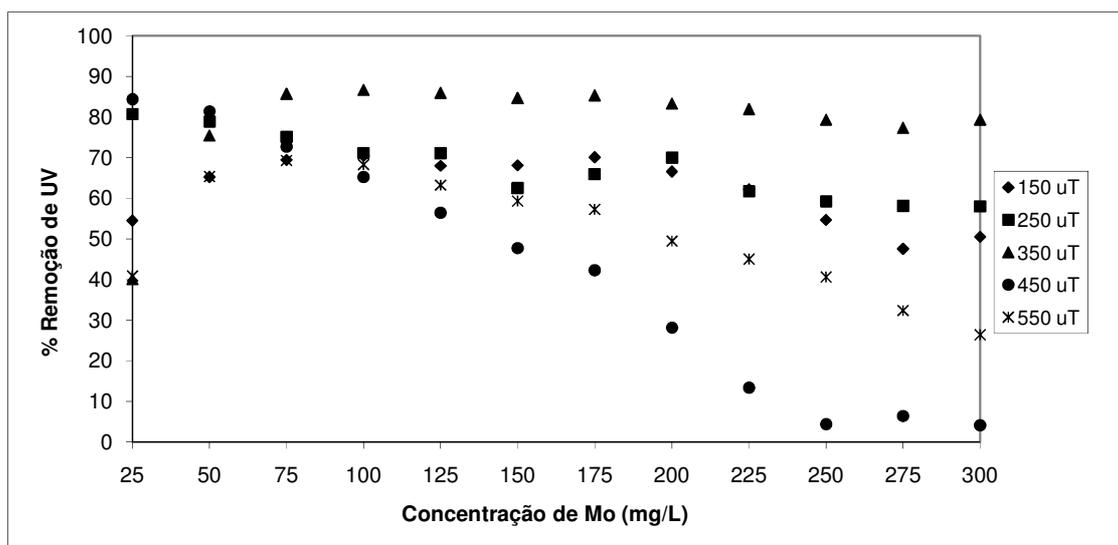


Figura 5.10. Porcentagem de remoção de compostos com absorção em UV-254 nm para solução coagulante SCpH10 para os diferentes valores de turbidez inicial.

Os melhores resultados encontrados para remoção de cor ocorreram para água de mais alta turbidez inicial (550 uT). Aplicando a análise estatística notou-se que a influência da turbidez inicial ($F=2699,68$) e da concentração de MO ($F=2520,34$) sobre a remoção de cor foi significativa ($p<0,05$).

A concentração de 175 mg/L foi a ótima encontrada para turbidez inicial de 150 e 350 uT. Porém a faixa ótima de concentração foi de 75 a 200 mg/L para turbidez de 150 uT e de 100 a 200 mg/L para turbidez inicial de 350 uT.

Na turbidez inicial de 250 uT a concentração ótima de coagulante foi de 25 mg/L e a faixa em que não houve diferença significativa ($p<0,05$) foi de 25 a 75 mg/L. Para turbidez inicial de 450 uT não encontrou-se uma faixa de concentração, mas sim apenas um valor ótimo de 100 mg/L.

Finalmente, para o maior valor de turbidez avaliado (550 uT), o ponto ótimo encontrado foi de 250 mg/L e a faixa de concentração de 125 a 300 mg/L.

A Figura 5.9 apresenta as porcentagens de remoção de turbidez para as referidas concentrações de coagulante nos diferentes valores de turbidez inicial avaliados. Nota-se que as melhores remoções de 80 a 92% ocorreram para águas de alta turbidez.

Para a solução coagulante extraída com tampão pH 10 (SCpH10), pode-se observar que o comportamento é bem diferente do encontrado para solução extraída com tampão pH 4 (SCpH4). Sendo em geral, a região de melhor eficiência de remoção de turbidez é bem ampla. Nota-se por meio da análise estatística que há influência entre

a turbidez inicial ($F= 1038,67$) e a concentração de coagulante ($F=2037,00$) ao nível de 5% de significância para remoção de turbidez.

Para turbidez inicial de 150 uT a concentração ótima deste coagulante foi de 175 mg/L e a melhor faixa de remoção de 75 a 200 mg/L. Para turbidez de 250 uT foram encontradas apenas duas concentrações ótimas, sendo elas 25 e 50 mg/L.

Analisando a turbidez de 350 e a de 550 uT observou-se a mesma concentração ótima, ou seja, 175 mg/L. E por fim, para turbidez inicial de 450 uT a concentração ótima foi de 50 mg/L sendo a faixa em que não apresenta diferença significativa de 50 a 175 mg/L.

Pode-se considerar que para remoção de compostos com absorção em UV- 254 nm, não se tem um padrão, assim como se observou nos outros parâmetros. Sendo que as melhores eficiências de remoção foram para água de turbidez inicial 350 uT e as menores para turbidez inicial 450 uT. Observa-se na remoção de compostos com absorção em UV-254 nm, que há interação entre a turbidez inicial ($F= 2685,98$) e a concentração de coagulante ($F=282,49$) ao nível de 5% de significância.

Para turbidez inicial de 150 e 350 uT a concentração ótima foi de 100 mg/L, e nesta menor turbidez (150 uT) a faixa de melhor remoção ocorreu nas concentrações entre 50 e 200 mg/L e na maior turbidez (350 uT) de 75 a 225 mg/L. Para turbidez de 250 e 450 uT, não foi possível encontrar uma faixa de concentração, sendo o ponto ótimo nos dois casos para a concentração de coagulante de 25 mg/L.

Considerando a turbidez de 550 uT a concentração ótima foi de 75 mg/L, não sendo possível se obter uma faixa de concentração.

Em geral, se comparadas as eficiências de remoção de cor, turbidez e UV-254 nm para solução extraída com tampão pH 4 (SCpH4) e com tampão pH 10 (SCpH10), esta última apresenta melhores resultados. Este fato pode ser relacionado ao teor de proteína nas soluções coagulantes. Portanto, o declínio na concentração de proteína implica em menores porcentagens de remoção tanto para cor, quanto para turbidez e UV-254nm. Para solução extraída com tampão pH 10 (SCpH10) como o nível de proteína aumenta, maior é a atividade de coagulação. Consequentemente, melhor é a eficiência de remoção de turbidez.

Em geral, após análise dos três parâmetros citados acima, pode-se encontrar o ponto ótimo para a solução extraída com tampão no pH 10 (SCpH10) em cada valor de turbidez, sendo adotado sempre o valor de menor concentração na faixa, na qual não havia diferença significativa ($p<0,05$). Como explicado anteriormente, em alguns casos

não se encontrou essa faixa ótima de concentração, assim considerou-se apenas o ponto ótimo, estes valores são apresentados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7. Concentrações ótimas para solução extraída com tampão pH 10 (ScpH10)

| Turbidez Inicial (uT) | Faixa de Concentração de solução coagulante (mg/L) | Concentração ótima de solução coagulante (mg/L) |
|--------------------------|---|--|
| 150 | 75 a 200 | 175 |
| 250 | Ne | 25 |
| 350 | 75 a 200 | 75 |
| 450 | Ne | 25 |
| 550 | Ne | 75 |

* Ne – não encontrado

A partir da Tabela 5.7, observa-se que em geral não há uma relação linear entre a turbidez inicial e a concentração de coagulante. Não sendo possível obter conclusões consistentes sobre os ensaios. As remoções dos parâmetros de cor, turbidez e UV- 254 nm não foram tão expressivas. Assim, os resultados encontrados nesta etapa do trabalho não foram considerados representativos, implicando na não aplicação do coagulante obtido na próxima etapa do processo (coagulação/floculação/filtração com membranas).

5.2.4 Resultados para extração do composto ativo com solução salina (SC)

Nesta etapa do trabalho primeiramente está apresentado os dados referentes ao estudo para avaliar qual seria a melhor molaridade a ser utilizada no decorrer da pesquisa.

5.2.4.1 Resultados da avaliação da melhor molaridade extração para o sal NaCl

As Figuras 5.11 a 5.13 apresentam a porcentagem de remoção de cor, turbidez e compostos com absorção em UV-254nm, respectivamente para os diferentes extratos utilizados no processo de coagulação/floculação para uma água de turbidez média (250uT).

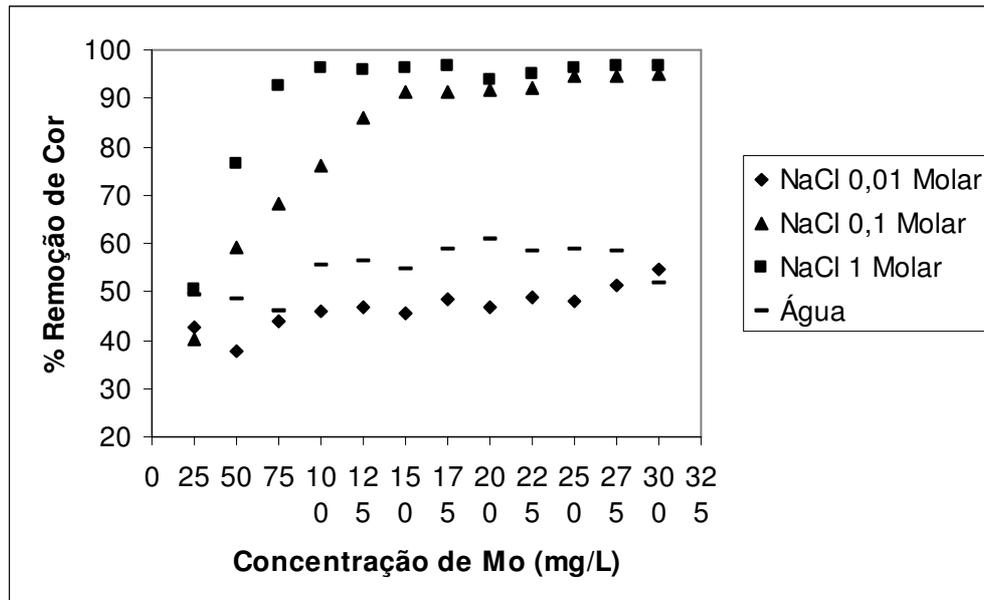


Figura 5.11. Porcentagem de remoção de cor para as diferentes molaridades de sal avaliadas.

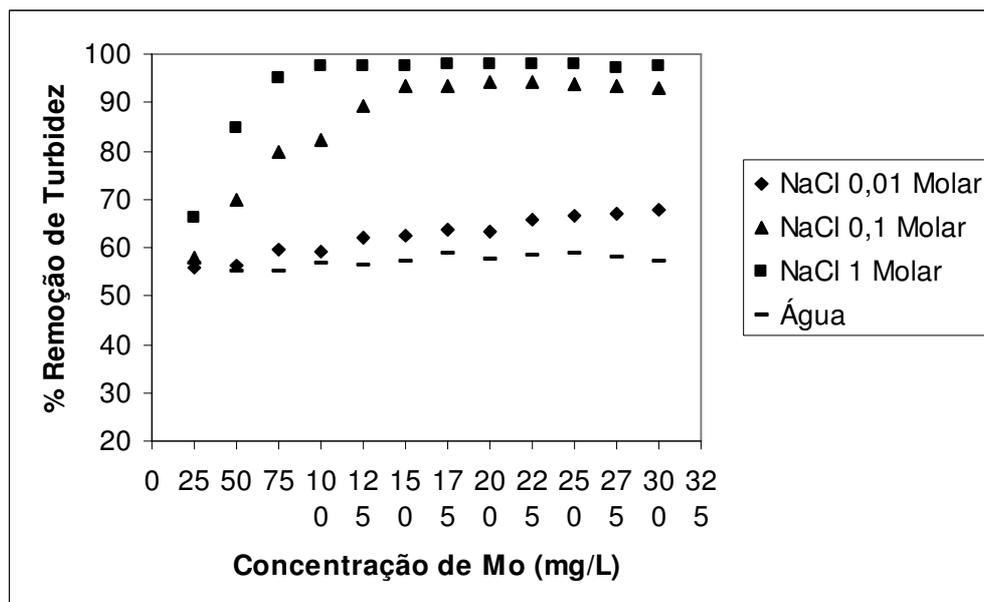


Figura 5.12. Porcentagem de remoção de turbidez para as diferentes molaridades de sal avaliadas.

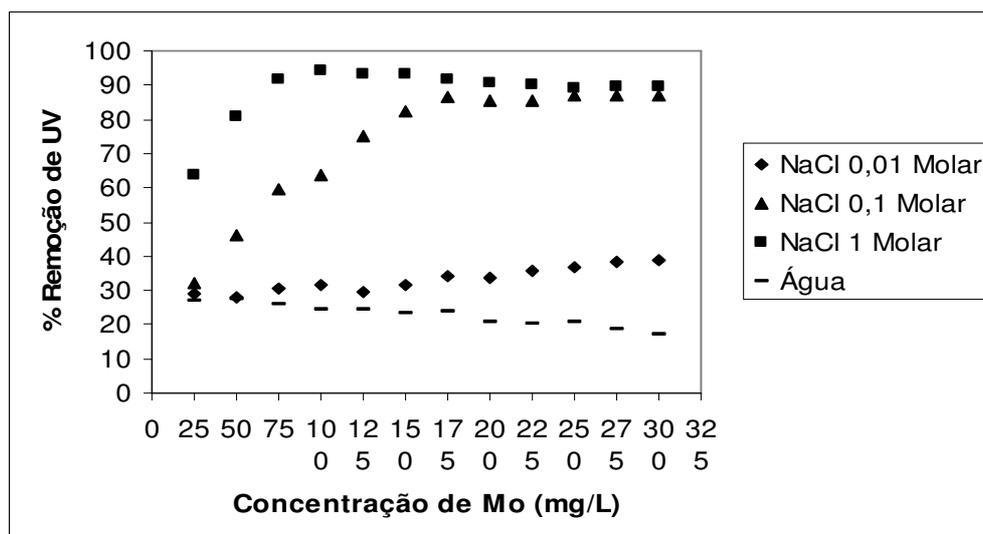


Figura 5.13. Porcentagem de remoção de compostos com absorção em UV-254 nm para as diferentes molaridades de sal avaliadas.

Na Figura 5.11 observa-se que as melhores porcentagens de remoção de cor ocorreram na faixa de 125 a 300 mg/L de solução coagulante. A solução extraída com NaCl 1M apresentou remoção de 97% de cor, seguida da solução extraída com NaCl 0,1, depois a extraída com água e por último a extraída com NaCl 0,01 M.

Para remoção de turbidez (Figura 5.12), os melhores resultados foram obtidos na faixa de concentração de 100 a 300 mg/L com a maior concentração salina, ou NaCl 1 M, com um grau de remoção de aproximadamente 99,8%. Para NaCl 0,1 M, os valores ficaram entre 55 e 90%, 60% para o NaCl 0,01 M e apenas 55% para extração com água.

Portanto, o declínio na concentração salina provoca diminuição nas porcentagens de remoção de turbidez. Isso pode estar relacionado com a quantidade de proteína encontrada nas três diferentes soluções salinas (Tabela 5.2). Para maiores molaridades como o nível de proteína aumenta, maior é a atividade de coagulação. Consequentemente, melhor é a eficiência de remoção de turbidez.

Okuda *et al.* (1999) estudaram o processo de coagulação aplicando extratos obtidos a partir de *Moringa oleifera* com água e com NaCl 1 M, encontraram uma redução de turbidez de aproximadamente 95% para extração com sal e 78% para extração com água. Nesse caso, a amostra de água tinha turbidez inicial de 50 UT e foi utilizada uma solução de 4 mg/L de coagulante obtido com NaCl 1M. Para a extração com água foi necessária uma solução com 32 mg/L.

Nkurunziza *et al.* (2009) empregaram uma solução de 3% de MO, extraídos com uma solução de NaCl 1M, encontrando uma taxa de remoção de turbidez de 83,2% (dado uma turbidez da água inicial de 50 UT) e 99,8% (turbidez da água inicial de 450 uT). Observa-se então que a semente da MO é mais eficaz para o tratamento de águas com alta turbidez (BAWA *et al.*, 2001).

Para remoção de compostos com absorção em UV-254 nm observa-se comportamento similar ao da remoção de turbidez, sendo a faixa de concentração de melhor remoção entre 100 e 300 mg/L. A extração com NaCl 1 M foi a mais eficiente e a menos eficiente foi a extração com água.

Amagloh e Benang (2009) recomendam em casos de baixa eficiência de remoção a combinação da Moringa com outro coagulante para que se tenham resultados mais promissores.

Madrona *et al.* (2010) avaliaram a extração do composto ativo da *Moringa* com o sal KCl nas molaridades de 0,01 M, 0,1 M e 1 M e encontraram melhores remoções de cor, turbidez e compostos com absorção em UV- 254 nm para a maior molaridade, ou seja, solução de KCl 1 Molar para águas de alta cor e turbidez (850 uT).

Considerando os resultados obtidos na presente etapa para uma turbidez média, optou-se por utilizar para variados valores de turbidez inicial da água os sais NaCl, KCl, MgCl₂ e CaCl₂ com solução 1Molar para a extração do composto ativo e posterior aplicação no processo de floculação/floculação.

5.2.4.2 Resultado do estudo dos diferentes sais utilizados na extração

Nesta fase do trabalho serão apresentados os resultados dos ensaios de coagulação/floculação realizados para avaliar as eficiências de remoções de cor, turbidez e compostos com absorção em UV- 254nm, utilizando soluções 1 Molar de diferentes sais (NaCl, KCl, MgCl₂ e CaCl₂).

5.2.4.2.1 Resultados para aplicação do extrato de *Moringa oleifera* com NaCl

As Figuras 5.14 a 5.16 apresentam a porcentagem de remoção de cor, turbidez e compostos com absorção em UV-254nm, respectivamente para as diferentes concentrações de solução coagulante utilizadas no processo de coagulação/floculação para os variados valores de turbidez inicial.

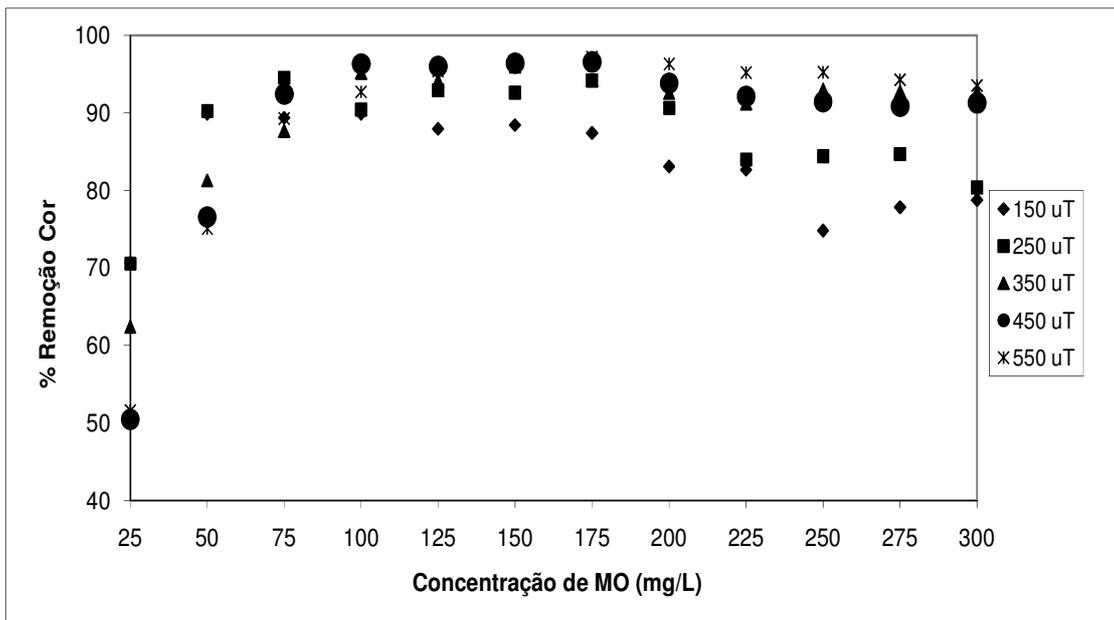


Figura 5.14. Porcentagem de remoção de cor para as diferentes concentrações de solução coagulante, utilizando extração com NaCl 1 Molar para os diferentes valores de turbidez inicial avaliados.

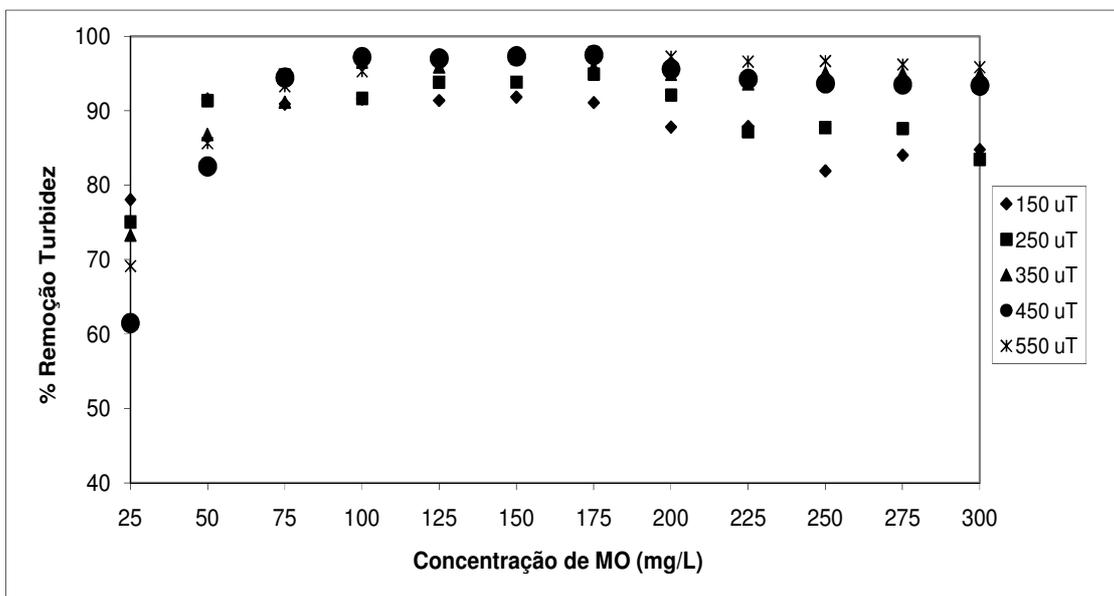


Figura 5.15. Porcentagem de remoção de turbidez para as diferentes concentrações de solução coagulante, utilizando extração com NaCl 1 Molar para os diferentes valores de turbidez inicial avaliados.

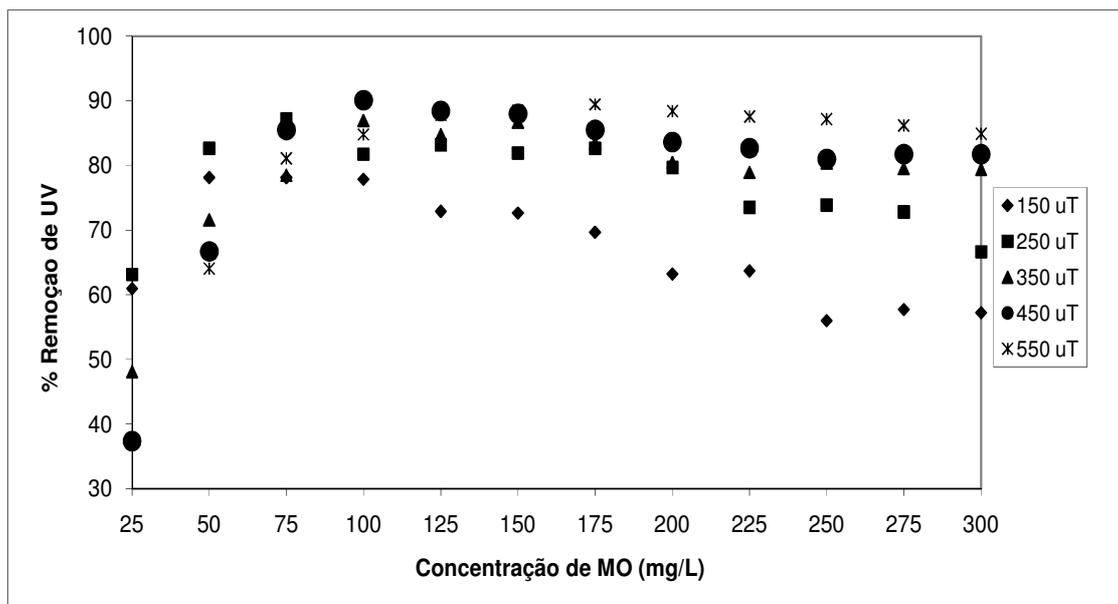


Figura 5.16. Porcentagem de remoção de compostos com absorção em UV-254 nm para as diferentes concentrações de solução coagulante, utilizando extração com NaCl 1 Molar para os diferentes valores de turbidez inicial avaliados.

Segundo a análise estatística a influência da turbidez inicial ($F=1,79$) e da concentração de MO ($F=7,91$) sobre a remoção de cor e da turbidez inicial ($F=2,26$) e da concentração de MO ($F=11,54$) para remoção de turbidez foram significativas ($p<0,05$).

Avaliando o parâmetro remoção de cor, utilizando-se extração com NaCl 1Molar, para turbidez inicial de 150 uT a faixa de concentração ótima foi de 100 a 150 mg/L. Para turbidez inicial de 250 uT, encontrou-se um faixa mais ampla de 100 a 220 mg/L. E para 350 uT, entre 100 e 175 mg/L. Nota-se, por meio da Figura 5.14, que um aumento nos valores de turbidez, provocam um aumento na faixa de concentração onde se encontram as melhores remoções de cor. Sendo assim, para turbidez inicial de 450 e 550 uT a faixa de concentração é de 150 a 200 mg/L.

As melhores remoções na região de varredura, de acordo com a literatura, são devidas às características dos flocos formados. Estes flocos são maiores e possuem maiores velocidades de sedimentação, sendo mais facilmente decantados proporcionando, no geral, melhores remoções dos parâmetros analisados (PEREIRA e DI BERNARDO, 2005).

Para remoção de turbidez, utilizando-se extração com NaCl 1Molar, para turbidez inicial de 150, 250 e 350 uT a faixa de concentração ótima foi de 100 a 175 mg/L. Nota-se, por meio da Figura 5.15, similar ao analisado para remoção de cor, na qual um

aumento nos valores de turbidez, provocam um aumento na faixa de concentração, em que se encontram as melhores remoções de turbidez. Sendo assim, para turbidez inicial de 450 e 550 uT, a faixa de concentração é de 150 a 200 mg/L.

Nkurunziza *et al.* (2009) realizaram extração com NaCl 1 Molar, utilizando sementes de Moringa como coagulante, e analisaram o parâmetro remoção de turbidez. Encontraram o valor de 125 mg/L como dosagem ótima para águas de turbidez inicial de 150, 250, 350 e 450 uT.

Para remoção de compostos com absorção em UV-254 nm, pode-se notar que ocorreu o mesmo comportamento para os outros parâmetros, ou seja, as melhores porcentagens de remoção foram para águas de alta turbidez (450 uT e 550 uT).

A faixa de concentração da solução coagulante para turbidez baixa foi menor, geralmente variando entre 50 e 175 mg/L. Para valores de turbidez inicial altos a faixa encontrada foi de aproximadamente 100 a 275 mg/L.

Segundo a análise estatística, a influência da turbidez inicial ($F=2,80$) e da concentração de MO ($F=8,18$) sobre a remoção de compostos com absorção em UV-254 nm foi significativa ($p<0,05$).

Em geral, após análise dos três parâmetros citados acima, cor, turbidez e UV-254nm, pode-se encontrar o ponto ótimo de solução coagulante para a solução extraída com NaCl (SCNaCl) em cada valor de turbidez, estes valores são apresentados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8. Concentrações ótimas de solução coagulante para extração com NaCl

| Turbidez Inicial (uT) | Faixa de Concentração da solução coagulante (mg/L) | Concentração ótima de solução coagulante (mg/L) |
|--------------------------|---|--|
| 150 | 100 a 150 | 100 |
| 250 | 100 a 175 | 100 |
| 350 | 100 a 175 | 125 |
| 450 | 150 a 200 | 175 |
| 550 uT | 150 a 200 | 175 |

Assim como para extração com água para os maiores valores de turbidez inicial, maior deverá ser a concentração de coagulante a ser utilizada no processo de coagulação/floculação para a extração com NaCl 1 Molar. Destaca-se ainda que em geral,

as concentrações ótimas de concentração de solução coagulante extraída com NaCl 1 Molar encontradas nesta etapa da pesquisa são aproximadamente o dobro das concentrações encontradas para solução extraída com água (SCA).

5.2.4.2.2 Resultados para aplicação do extrato de *Moringa oleifera* com KCl

As Figuras 5.17 a 5.19 apresentam a porcentagem de remoção de cor, turbidez e compostos com absorção em UV-254nm, respectivamente para as diferentes concentrações de solução coagulante, extraída com KCl (SCKCl) e utilizadas no processo de coagulação/floculação para os variados valores de turbidez inicial.

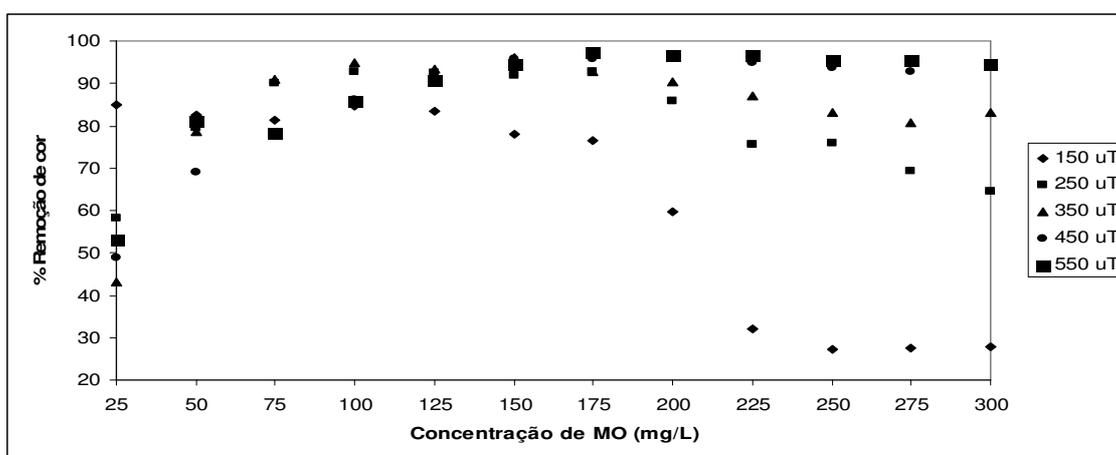


Figura 5.17. Porcentagem de remoção de cor para as diferentes concentrações de solução coagulante, utilizando extração com KCl 1 Molar para os diferentes valores de turbidez inicial avaliados.

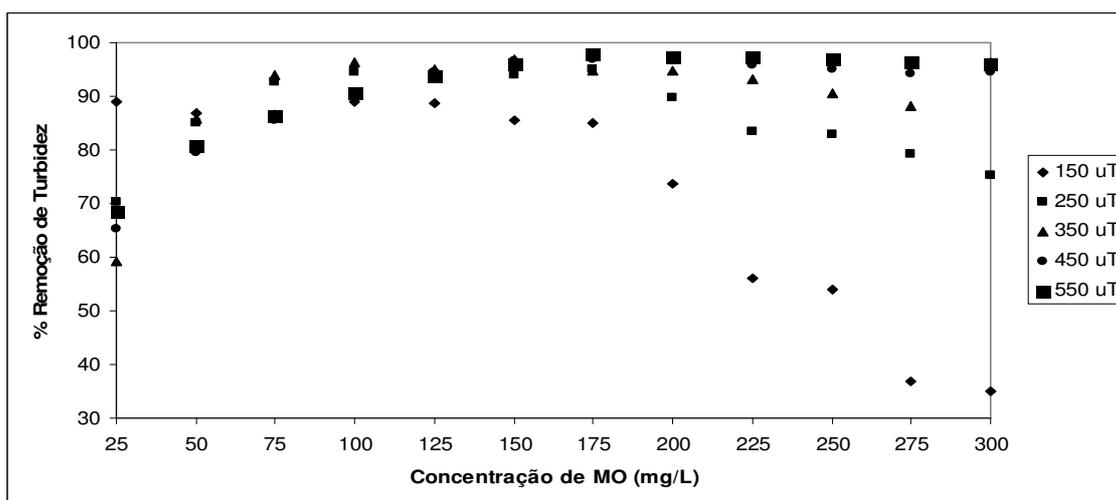


Figura 5.18. Porcentagem de remoção de turbidez para as diferentes concentrações de solução coagulante, utilizando extração com KCl 1 Molar para os diferentes valores de turbidez inicial avaliados.

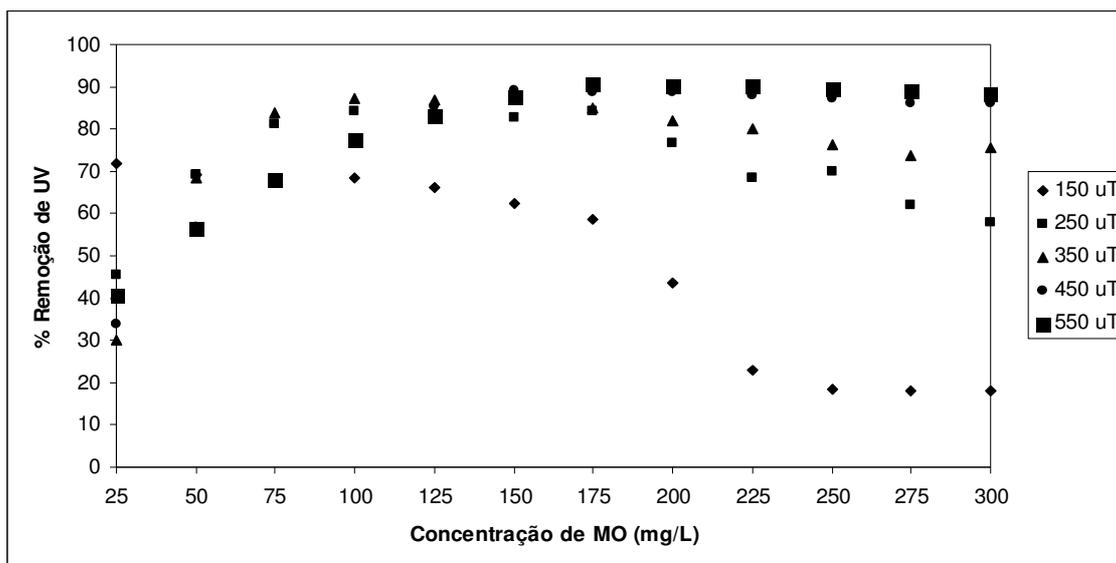


Figura 5.19. Porcentagem de remoção de compostos com absorção em UV-254 nm para as diferentes concentrações de solução coagulante, utilizando extração com KCl 1 Molar para os diferentes valores de turbidez inicial avaliados.

Segundo a análise estatística a influência da turbidez inicial ($F=216,2$) e da concentração de MO ($F=595,5$) sobre a remoção de cor foi significativa ($p<0,05$). Observa-se por meio da Figura 5.17 que as melhores eficiências foram para águas de mais alta turbidez (450 e 550 uT). Sendo que para turbidez inicial de 150 uT as melhores remoções de cor (aproximadamente 80%) ocorreram na faixa de concentração de coagulante de 25 a 125 mg/L. Para turbidez inicial de 250 uT as melhores remoções de cor foram na faixa de concentração de 50 a 250 mg/L.

Segundo Nkurunziza *et al* (2009), geralmente águas com valores de cor e turbidez altos, exigem uma concentração de coagulante alta.

Tal afirmação vem de encontro aos resultados encontrados no presente trabalho, sendo que para os maiores valores de turbidez inicial, encontrou-se uma faixa de concentração de valores mais altos. Para turbidez de 450 uT esta faixa era de 150 a 200 mg/L e quando se analisa a água de 550 uT, observa-se um incremento nesta faixa de 175 a 225 mg/L. Contudo, o ponto ótimo encontrado por meio da análise estatística é idêntico para esses dois últimos valores de turbidez inicial avaliados.

O comportamento para remoção de turbidez foi similar ao de remoção de cor. A menor faixa de concentração encontrada foi de 25 a 125 mg/L, para água de turbidez inicial 150 uT. Observa-se ainda que quanto maior o valor da turbidez inicial, maior é a concentração de coagulante a ser utilizada. Por meio da análise estatística nota-se que a

influência da turbidez inicial ($F=2564,6$) e da concentração de MO ($F=17242,2$) sobre a remoção de turbidez foi significativa ($p<0,05$).

Para remoção de compostos com absorção em UV-254 nm, pode-se notar que ocorreu o mesmo comportamento para os outros parâmetros, ou seja, as melhores porcentagens de remoção foram para águas de alta turbidez (450 uT e 550 uT).

A faixa de concentração da solução coagulante para turbidez baixa foi menor, geralmente variando entre 50 e 175 mg/L. Para valores de turbidez iniciais altos a faixa encontrada foi de aproximadamente 150 a 225 mg/L.

A análise estatística, a influência da turbidez inicial ($F=352,0$) e da concentração de MO ($F=688,4$) sobre a remoção de compostos com absorção em UV-254 nm, foi significativa ($p<0,05$).

De acordo com Okuda *et al.*, (1999), efetivamente, o sal possui por si só um efeito de clarificação, o que explica a remoção dos parâmetros avaliados. A simples elevação da força iônica do meio já desencadeou o processo de coagulação. Provavelmente o fenômeno de compressão da dupla camada elétrica contribuiu para este efeito, ou seja, há um balanço da força iônica entre o coagulante e o meio salino, na qual se atinge um ponto em que a força iônica do agente coagulante vence a do meio salino, obtendo um valor positivo na remoção dos parâmetros.

Em geral, após análise dos três parâmetros citados acima, pode-se encontrar o ponto ótimo para a solução SCKCl em cada valor de turbidez, estes valores são apresentados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9. Concentrações ótimas de solução coagulante para extração com KCl

| Turbidez Inicial (uT) | Faixa de Concentração de solução coagulante (mg/L) | Concentração ótima de solução coagulante (mg/L) |
|-----------------------|--|---|
| 150 | 25 a 125 | 100 |
| 250 | 75 a 175 | 125 |
| 350 | 75 a 200 | 150 |
| 450 | 150 a 200 | 175 |
| 550 | 175 a 225 | 175 |

As concentrações ótimas encontradas para extração com KCl 1 Molar foram bem próximas das avaliadas para NaCl 1 Molar. Sendo que para os maiores valores de turbidez

inicial, maior deverá ser a concentração de coagulante a ser utilizada no processo de coagulação/floculação. Destaca-se ainda que, em geral, as concentrações ótimas encontradas nesta etapa da pesquisa são bem próximas ou até mesmo iguais as encontradas para extração com NaCl 1 Molar (SCNaCl).

Segundo Paterniani *et al.* (2009), quanto maior a turbidez da água bruta a ser tratada maior também deve ser a concentração da solução coagulante de *Moringa* empregada, seja para a remoção de partículas sólidas por sedimentação quanto por filtração lenta.

5.2.4.2.3 Resultados para aplicação do extrato de *Moringa oleifera* com CaCl_2

As Figuras 5.20 a 5.22 apresentam a porcentagem de remoção de cor, turbidez e compostos com absorção em UV-254nm, respectivamente para as diferentes concentrações de solução coagulante, extraídas com CaCl_2 e utilizadas no processo de coagulação/floculação para os variados valores de turbidez inicial.

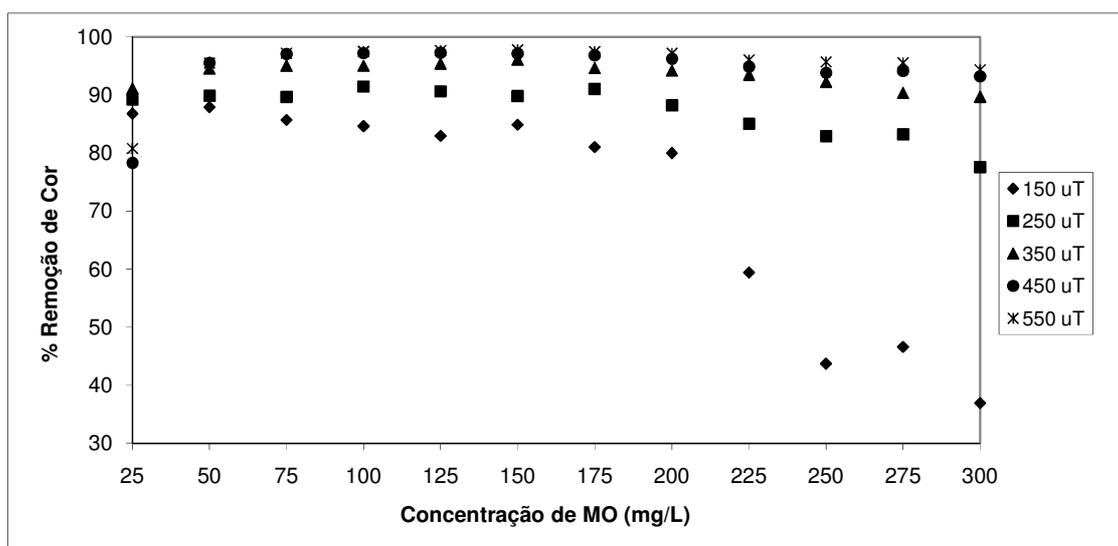


Figura 5.20. Porcentagem de remoção de cor para as diferentes concentrações de solução coagulante, utilizando extração com CaCl_2 1 Molar para os diferentes valores de turbidez inicial avaliados.

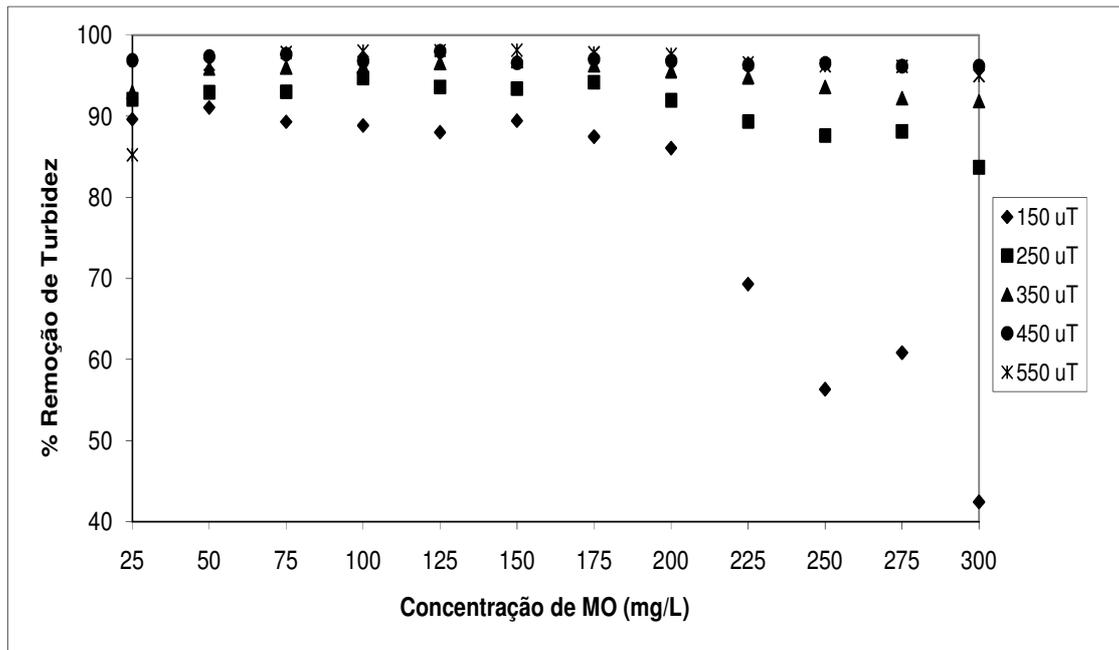


Figura 5.21. Porcentagem de remoção de turbidez para as diferentes concentrações de solução coagulante, utilizando extração com CaCl_2 1 Molar para os diferentes valores de turbidez inicial avaliados.

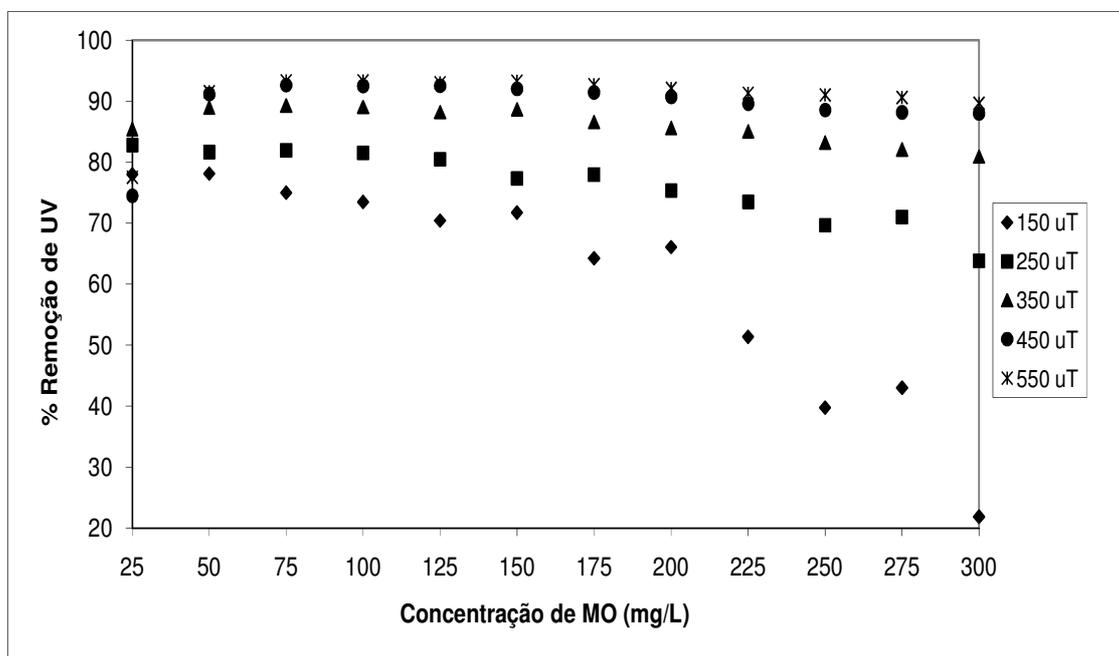


Figura 5.22. Porcentagem de remoção de compostos com absorção em UV-254 nm para as diferentes concentrações de solução coagulante, utilizando extração com CaCl_2 1 Molar para os diferentes valores de turbidez inicial avaliados.

Considerando a análise estatística realizada, nota-se que a influência da turbidez inicial ($F=5,37$) e da concentração de MO ($F=21,35$) sobre a remoção de cor foi significativa ($p<0,05$).

Sendo assim, as maiores eficiências de remoção de cor foram conseguidas para águas de mais alta turbidez, sendo estas de aproximadamente 95%.

Para turbidez inicial de 150 uT, a faixa ótima foi de 25 a 100 mg/L, para 250 uT, de 25 a 175 mg/L. Para maiores valores de turbidez inicial, maior foi a faixa de concentração encontrada. Considerando a turbidez inicial de 350 uT, encontrou-se uma faixa de 100 a 175 mg/L, para 450 uT de 75 a 175 mg/L e finalmente para 550 uT de 75 a 200 mg/L.

A influência da turbidez inicial ($F=7,18$) e da concentração de MO ($F=15,23$) sobre a remoção de turbidez, também foi significativa ($p<0,05$). Sendo assim, observa-se que na turbidez inicial de 150 uT não há diferença significativa para a faixa de concentração de coagulante de 25 a 150 mg/L. Para turbidez inicial de 250 uT, encontrou-se uma menor faixa desde 100 a 175 mg/L. Analisando a turbidez inicial de 350uT, observa-se que esta faixa vai de 125 a 150 mg/L. Com o aumento dos valores de turbidez inicial, ocorre um aumento nesta faixa de concentração, sendo encontrado valores de 75 a 175mg/L e de 100 a 175mg/L para turbidez inicial de 450 e 550uT, respectivamente.

Por meio da Figura 5.22, observa-se que assim como nos outros parâmetros avaliados, as menores eficiências de remoção ocorreram para turbidez mais baixa. A análise estatística mostra a influência da turbidez inicial ($F=2,52$) e da concentração de MO ($F=50,93$) sobre a remoção de compostos com absorção em UV-254 nm de forma significativa ($p<0,05$).

Pode-se considerar a melhor condição de trabalho para turbidez inicial de 150 uT, a concentração de coagulante de 25 a 50 mg/L. A faixa de 25 a 125 mg/L pode ser aplicada para turbidez inicial de 250 uT e 50 a 150 mg/L para 350 uT.

As maiores concentrações foram encontradas para os maiores valores de turbidez inicial, sendo a faixa de 75 a 125 mg/L para 450 uT e 75 a 175 mg/L para 550 uT.

Após análise dos três parâmetros citados acima, pode-se encontrar o ponto ótimo de solução coagulante para a solução extraída com o sal CaCl_2 (SCCaCl_2) em cada valor de turbidez, estes valores são apresentados na Tabela 5.10.

Tabela 5.10. Concentrações ótimas de solução coagulante para extração com CaCl_2

| Turbidez Inicial (uT) | Faixa de Concentração de solução coagulante (mg/L) | Concentração ótima de solução coagulante (mg/L) |
|-----------------------|--|---|
| 150 | 25 a 50 | 25 |
| 250 | 100 a 125 | 100 |
| 350 | 125 a 150 | 125 |
| 450 | 75 a 125 | 75 |
| 550 | 75 a 150 | 100 |

Assim como para todos os outros extratos obtidos para os maiores valores de turbidez inicial, maior deverá ser a concentração de coagulante a ser utilizada no processo de coagulação/floculação para a extração com CaCl_2 1 Molar.

5.2.4.2.4 Resultados para aplicação do extrato de *Moringa oleifera* com MgCl_2

As Figuras 5.23 a 5.25 apresentam a porcentagem de remoção de cor, turbidez e compostos com absorção em UV-254nm, respectivamente para as diferentes concentrações de solução coagulante, extraídas com MgCl_2 e utilizadas no processo de coagulação/floculação para os variados valores de turbidez inicial.

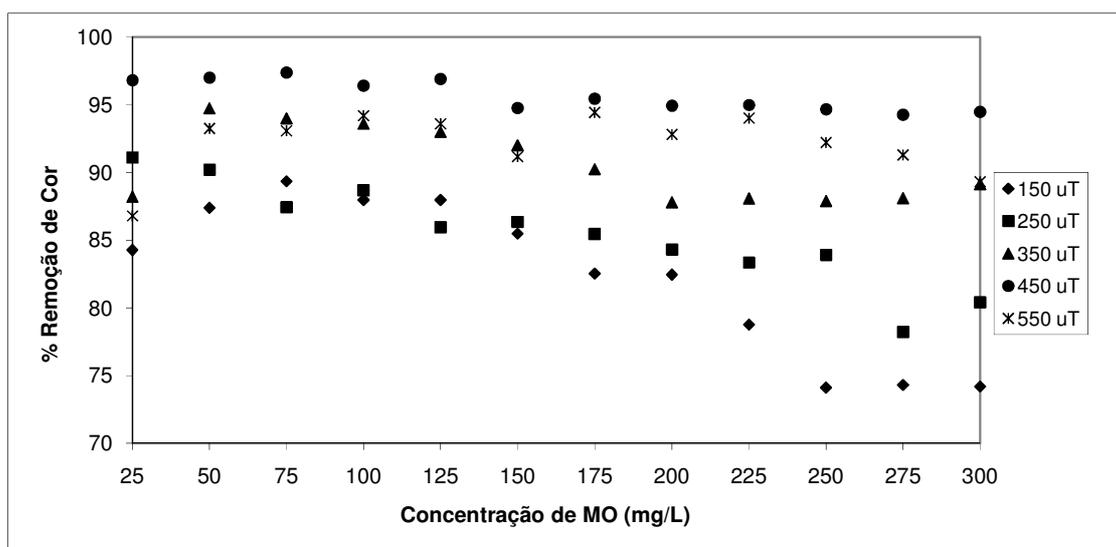


Figura 5.23. Porcentagem de remoção de cor para as diferentes concentrações de solução coagulante, utilizando extração com MgCl_2 1 Molar para os diferentes valores de turbidez inicial avaliados.

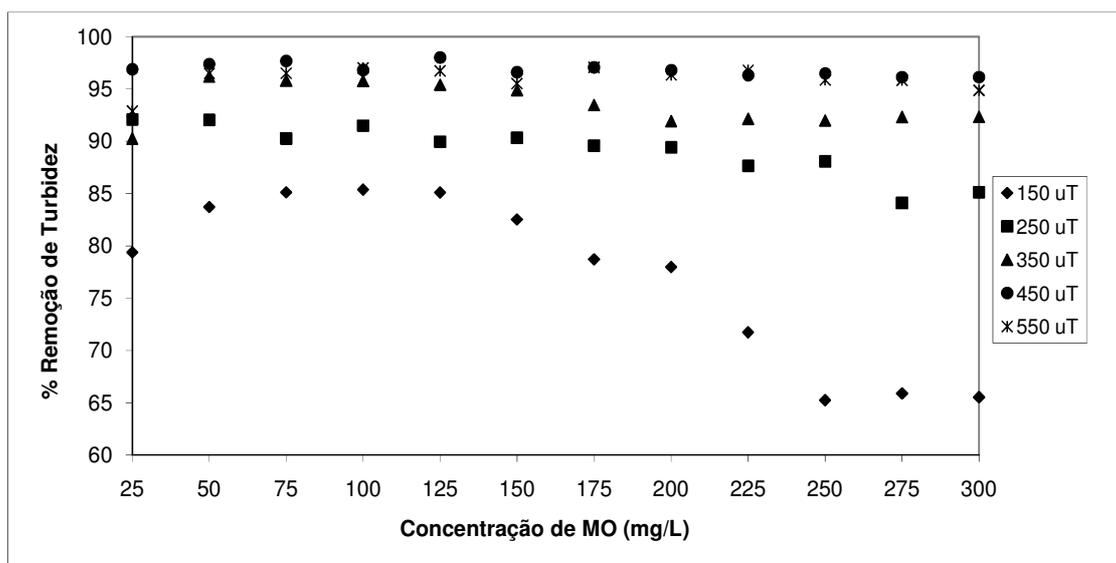


Figura 5.24. Porcentagem de remoção de turbidez para as diferentes concentrações de solução coagulante, utilizando extração com $MgCl_2$ 1 Molar para os diferentes valores de turbidez inicial avaliados.

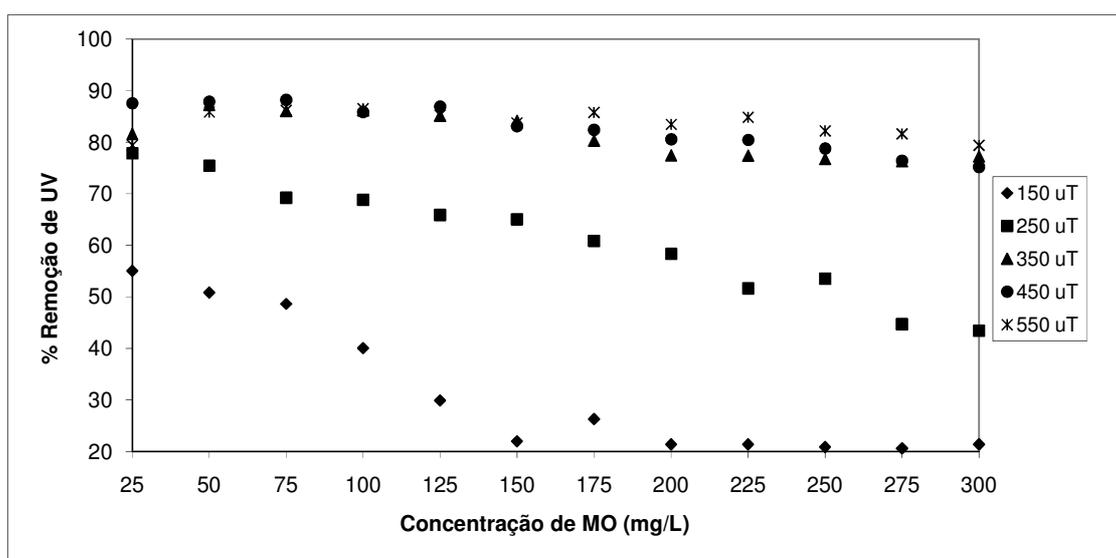


Figura 5.25. Porcentagem de remoção de compostos com absorção em UV-254 nm para as diferentes concentrações de solução coagulante, utilizando extração com $MgCl_2$ 1 Molar para os diferentes valores de turbidez inicial avaliados.

Em geral observa-se que as remoções de cor utilizando extração com $MgCl_2$ 1 Molar ($SCMgCl_2$), foram menores ao serem comparadas à extração com KCl. Nota-se também que geralmente as maiores remoções encontradas, para os outros sais avaliados, foram para mais alta turbidez inicial (550 uT), porém para esta extração com $MgCl_2$, o tratamento mais efetivo foi na turbidez inicial de 450 uT.

A influência da turbidez inicial ($F=8224,8$) e da concentração de MO ($F=2416,8$) sobre a remoção de cor foi significativa ($p<0,05$). Analisando os intervalos, nota-se que para turbidez inicial de 150 uT, a faixa de concentração de solução coagulante foi de 75 a 125mg/L. Para turbidez inicial de 250 uT, encontrou-se uma pequena faixa de 25 a 75mg/L. Quando utilizou-se água bruta de turbidez inicial 350 uT a faixa de concentração encontrada foi de 50 a 75mg/L. Para turbidez inicial de 450 uT nota-se uma ampla faixa de concentração desde 25 a 125 mg/L. E finalmente para a maior turbidez inicial (550 uT), a faixa encontrada foi de 100 a 175mg/L.

A influência da turbidez inicial ($F=9173,2$) e da concentração de MO ($F=1995,9$) sobre a remoção de turbidez, também foi significativa ($p<0,05$). Sendo assim, observa-se que na turbidez inicial de 150 uT não há diferença significativa para a faixa de concentração de coagulante de 75 a 125 mg/L. Para turbidez inicial de 250 uT, encontrou-se uma menor faixa desde 25 a 50 mg/L. Analisando a turbidez inicial de 350uT, observa-se que esta faixa vai de 50 a 100 mg/L. Com o aumento dos valores de turbidez inicial, ocorre um aumento nesta faixa de concentração, sendo encontrado valores de 100 a 125mg/L e de 100 a 175mg/L para turbidez inicial de 450 e 550uT, respectivamente.

Silva (2005) afirma que, a *Moringa oleifera* Lam satisfaz as características exigidas para um bom coagulante, ou seja, oferecer uma redução em termos de turbidez na ordem de 90% a 95%.

Os valores encontrados nesta parte do trabalho foram bem próximos aos obtidos no item anterior, para o coagulante $SCCaCl_2$.

Segundo a análise estatística a influência da turbidez inicial ($F=204,4$) e da concentração de MO ($F=8,783$) sobre a remoção de compostos com absorção em UV-254 nm foi significativa ($p<0,05$). Por meio desta análise foi possível encontrar uma ampla faixa de concentração (25 a 300mg/L) para todos os valores de turbidez inicial avaliados 150, 250, 350, 450 e 550 uT. Porém, observa-se por meio da Figura 5.25 que as porcentagens de remoção para compostos com absorção em UV-254 nm foram bem baixas, chegando a valores de aproximadamente 20% para menores valores de turbidez inicial.

Após análise dos três parâmetros citados acima, pode-se encontrar o ponto ótimo para a solução $SCMgCl_2$ em cada valor de turbidez, estes valores são apresentados na Tabela 5.11.

Tabela 5.11. Concentrações ótimas de solução coagulante para extração com $MgCl_2$

| Turbidez Inicial (uT) | Faixa de Concentração de solução coagulante (mg/L) | Concentração ótima de solução coagulante (mg/L) |
|--------------------------|---|--|
| 150 | 75 a 125 | 75 |
| 250 | 25 a 50 | 25 |
| 350 | 50 a 75 | 50 |
| 450 | 100 a 125 | 100 |
| 550 | 100 a 175 | 100 |

Na extração com $MgCl_2$ para os maiores valores de turbidez inicial, maior deverá ser a concentração de coagulante a ser utilizada no processo de coagulação/floculação. Sendo que, as concentrações ótimas encontradas nesta etapa da pesquisa são similares as encontradas para extração com $MgCl_2$ ($SCMgCl_2$).

Em geral, observa-se que as extrações realizadas são consideradas efetivas no tratamento para obtenção de água potável.

Contudo, as concentrações ótimas encontradas, não são consideradas tão expressivas, conseqüentemente o custo para utilização dos extratos de *Moringa* como solução coagulante no processo para obtenção de água potável é viável.

Aliado a este fato de acordo com Goh (2005) *apud* Katayon *et al.* (2006), o custo aproximado do cultivo produzindo 1 Kg (3400 sementes) de *Moringa oleifera* é aproximadamente US\$ 2. Embora seja mais caro que o custo do sulfato de alumínio (1 Kg=US\$ 1), que é o coagulante mais utilizado, ainda é mais benéfico às comunidades em termos de saúde e economia.

5.2.5 Comparação entre as eficiências de remoção com as soluções coagulantes (extraída com água, com solução tampão e com sais)

Neste item será apresentado um resumo de todas as soluções coagulantes estudadas (SCA, SCpH e SC) e suas eficiências de remoção.

A Tabela 5.12 apresenta o resumo dos resultados obtidos para turbidez inicial de 150 uT e todos os coagulantes testados.

Tabela 5.12. Resumo dos resultados obtidos para turbidez inicial de 150 uT e todos os coagulantes testados.

| Coagulante | Eficiência de Remoção (%) | | | |
|---------------------|---|--------------|--------------|--------------|
| | Concentração de coagulante ótima (mg/L) | Cor | Turbidez | UV-254nm |
| SCA | 25 | 35,63 | 27,68 | 4,64 |
| SCpH4 | 225 | 86,08 | 89,24 | 52,10 |
| SCpH10 | 175 | 84,68 | 84,14 | 70,07 |
| SCNaCl | 100 | 84,51 | 88,99 | 68,41 |
| SCKCl | 100 | 89,90 | 91,57 | 77,86 |
| SCCaCl ₂ | 25 | 86,79 | 89,63 | 78,01 |
| SCMgCl ₂ | 75 | 89,34 | 85,13 | 48,65 |

SCA - solução extraída com água; SCpH4 - solução extraída com tampão pH 4; SCpH10 - solução extraída com tampão pH 10; SCNaCl - solução extraída com NaCl 1 M; SCKCl - solução extraída com KCl 1 M; SCCaCl₂ - solução extraída com CaCl₂ 1 M; SCMgCl₂ - solução extraída com MgCl 1 M.

Observa-se que as melhores eficiências de remoção para água de 150 uT ocorreram na extração com solução salina de KCl 1 M (SCKCl) e as menores eficiências foram encontradas para solução extraída com água. Nota-se ainda que as melhores porcentagens de remoção se revelam encontradas para os parâmetros de cor e turbidez e por último compostos com absorção em UV- 254 nm.

Verifica-se ainda que para água de baixa cor/turbidez os resultados obtidos não oferecem remoções relativamente altas para a cor, turbidez e compostos com absorção em UV-254nm, como no caso do tratamento utilizando a *Moringa oleifera* Lam como coagulante em água altamente turva e colorida. Ou seja, as sementes de *Moringa oleifera* Lam são menos eficazes em águas de baixa turbidez, quando se trata da redução dos parâmetros estudados.

Quando se avalia os valores de porcentagem de remoção apresentados na Tabela 5.12 pode-se notar uma proximidade para alguns extratos avaliados, principalmente no caso dos sais. Porém é válido citar que por meio da análise estatística o sal KCl apresentou o maior valor de remoção para todos os parâmetros e por este motivo foi considerado como ponto de estudo nas próximas etapas deste trabalho.

A Tabela 5.13 apresenta o resumo das eficiências obtidas para turbidez inicial de 250 uT e todos os coagulantes testados.

Tabela 5.13. Resumo dos resultados obtidos para turbidez inicial de 250 uT e todos os coagulantes testados.

| Coagulante | <i>Eficiência de Remoção (%)</i> | | | |
|---------------------|---|--------------|--------------|--------------|
| | Concentração de coagulante ótima (mg/L) | Cor | Turbidez | UV-254nm |
| SCA | 25 | 52,13 | 61,65 | 30,91 |
| SCpH4 | 225 | 90,69 | 92,50 | 66,22 |
| SCpH10 | 25 | 91,32 | 93,61 | 80,75 |
| SCNaCl | 100 | 90,42 | 91,64 | 81,75 |
| SCKCl | 125 | 92,44 | 94,12 | 83,63 |
| SCCaCl ₂ | 100 | 91,48 | 94,02 | 81,54 |
| SCMgCl ₂ | 25 | 91,09 | 92,08 | 77,86 |

SCA - solução extraída com água; SCpH4 - solução extraída com tampão pH 4; SCpH10 - solução extraída com tampão pH 10; SCNaCl - solução extraída com NaCl 1 M; SCKCl - solução extraída com KCl 1 M; SCCaCl₂ - solução extraída com CaCl₂ 1 M; SCMgCl₂ - solução extraída com MgCl 1 M.

Na turbidez inicial de 250 uT, tem-se o mesmo comportamento que para turbidez de 150 uT. A melhor eficiência foi para solução extraída com KCl 1 M. Nota-se que ocorreu um ligeiro aumento nas porcentagens de remoção dos três parâmetros avaliados.

A Tabela 5.14 apresenta o resumo das porcentagens de remoções obtidas para turbidez inicial de 350 uT e todos os coagulantes testados.

Tabela 5.14. Resumo dos resultados obtidos para turbidez inicial de 350 uT e todos os coagulantes testados.

| Coagulante | <i>Eficiência de Remoção (%)</i> | | | |
|---------------------|---|--------------|--------------|--------------|
| | Concentração de coagulante ótima (mg/L) | Cor | Turbidez | UV-254nm |
| SCA | 125 | 79,40 | 84,54 | 64,65 |
| SCpH4 | 225 | 89,66 | 93,62 | 71,77 |
| SCpH10 | 75 | 93,85 | 95,38 | 86,68 |
| SCNaCl | 125 | 94,08 | 95,87 | 84,76 |
| SCKCl | 150 | 96,05 | 96,88 | 87,98 |
| SCCaCl ₂ | 125 | 95,38 | 96,53 | 87,22 |
| SCMgCl ₂ | 50 | 94,73 | 96,19 | 87,21 |

SCA - solução extraída com água; SCpH4 - solução extraída com tampão pH 4; SCpH10 - solução extraída com tampão pH 10; SCNaCl - solução extraída com NaCl 1 M; SCKCl - solução extraída com KCl 1 M; SCCaCl₂ - solução extraída com CaCl₂ 1 M; SCMgCl₂ - solução extraída com MgCl 1 M.

Assim como para turbidez de 250 uT, no caso de estudo da turbidez inicial de 350 uT, observa-se que houve um incremento nos valores de remoção de cor, turbidez e compostos com absorção em UV-254 nm quando da utilização da solução extraída com KCl 1M.

Por meio da extração salina, Okuda *et al.* (1999) concluíram que a solução base de sementes extraídas com NaCl 1 M apresenta atividade coagulante com dosagens 7,4 vezes maior que a solução preparada somente com água destilada.

A Tabela 5.15 apresenta o resumo das eficiências obtidas para turbidez inicial de 450 uT e todos os coagulantes testados.

Tabela 5.15. Resumo dos resultados obtidos para turbidez inicial de 450 uT e todos os coagulantes testados.

| Coagulante | <i>Eficiência de Remoção (%)</i> | | | |
|---------------------|---|--------------|--------------|--------------|
| | Concentração de coagulante ótima (mg/L) | Cor | Turbidez | UV-254nm |
| SCA | 50 | 48,37 | 55,16 | 27,69 |
| SCpH4 | 300 | 92,93 | 94,93 | 73,19 |
| SCpH10 | 25 | 91,42 | 93,21 | 84,34 |
| SCNaCl | 175 | 95,93 | 96,72 | 88,84 |
| SCKCl | 175 | 96,58 | 97,51 | 91,66 |
| SCCaCl ₂ | 75 | 96,04 | 97,01 | 89,49 |
| SCMgCl ₂ | 100 | 96,40 | 96,80 | 85,88 |

SCA - solução extraída com água; SCpH4 - solução extraída com tampão pH 4; SCpH10 - solução extraída com tampão pH 10; SCNaCl - solução extraída com NaCl 1 M; SCKCl - solução extraída com KCl 1 M; SCCaCl₂ - solução extraída com CaCl₂ 1 M; SCMgCl₂ - solução extraída com MgCl 1 M.

Para turbidez de 450 uT, as melhores porcentagem de remoção de cor, turbidez e UV-254 nm encontradas foram também para extração com KCl 1 M e as remoções mais baixas foram para extração com água, resultado similar ao encontrado nos outros valores de turbidez inicial avaliados até então.

A Tabela 5.16 apresenta o resumo das porcentagens de remoções obtidas para turbidez inicial de 550 uT e todos os coagulantes testados.

Tabela 5.16. Resumo dos resultados obtidos para turbidez inicial de 550 uT e todos os coagulantes testados.

| Coagulante | <i>Eficiência de Remoção (%)</i> | | | |
|---------------------|---|--------------|--------------|--------------|
| | Concentração de coagulante ótima (mg/L) | Cor | Turbidez | UV-254nm |
| SCA | 50 | 97,77 | 98,47 | 88,40 |
| SCpH4 | 300 | 94,57 | 96,06 | 79,13 |
| SCpH10 | 75 | 83,33 | 89,06 | 65,35 |
| SCNaCl | 175 | 97,15 | 97,85 | 89,47 |
| SCKCl | 175 | 97,47 | 99,02 | 93,63 |
| SCCaCl ₂ | 100 | 96,49 | 97,95 | 90,77 |
| SCMgCl ₂ | 100 | 94,21 | 97,00 | 86,46 |

SCA - solução extraída com água; SCpH4 - solução extraída com tampão pH 4; SCpH10 - solução extraída com tampão pH 10; SCNaCl - solução extraída com NaCl 1 M; SCKCl - solução extraída com KCl 1 M; SCCaCl₂ - solução extraída com CaCl₂ 1 M; SCMgCl₂ - solução extraída com MgCl 1 M.

Diferentemente do ocorrido nas outras condições de turbidez inicial avaliadas, para águas de alta cor e turbidez (550 uT) as melhores eficiências de remoção foram encontradas para extração com KCl 1 M e também na extração com água. Fato que já era esperado, pois segundo Muyibi e Evison (1995) o isolamento feito a partir de água é bastante eficaz no tratamento com turbidez elevada, enquanto que, para água com baixa turbidez apresenta-se ineficiente.

Em geral observa-se que para águas de baixa cor e turbidez foi observada melhor eficiência na remoção de cor, turbidez e UV- 254 nm para a extração com solução salina. Para águas de alta cor e turbidez nota-se também uma boa eficiência utilizando a solução coagulante extraída com água.

A partir dos levantamentos citados acima, é válido ressaltar que as maiores porcentagens encontradas dentre os sais avaliados para remoção de cor, turbidez e compostos com absorção em UV-254 nm foram para o sal KCl. Sendo assim este foi o escolhido para ser utilizado nas etapas posteriores. Esta opção não implica em dizer que apenas o KCl seria indicado para aplicação, poderia utilizar os outros tipos de extrações.

Apenas a utilização do processo de coagulação/floculação/sedimentação não foi eficiente para garantir que a água tratada apresentasse valores dentro dos parâmetros de qualidade citados pela Portaria nº 518 MS.

Dessa forma, observa-se que o uso das sementes de *Moringa oleifera* no tratamento de água não produz água totalmente purificada (SILVA, 2005). Sendo assim, faz-se necessária uma etapa posterior de filtração para melhorar a qualidade da água tratada pelo processo de coagulação/floculação/sedimentação.

5.3 Processo de filtração com membranas e processo combinado coagulação/floculação/filtração com membranas

Esta etapa apresenta resultados referentes ao processo de filtração com membranas e o processo combinado de coagulação/floculação/filtração com membranas nas condições de pressão de 1 e 2 bar e para as membranas 0,1 μm (monocanal), 0,2 μm (monocanal), com a finalidade de comparação dos resultados obtidos e avaliação das eficiências dos processos.

Alguns resultados relevantes ainda são apresentados com intuito de verificar se a etapa de coagulação/floculação, antes do processo de filtração com membranas, melhora o fluxo de permeado e/ou a qualidade da água tratada. Para tanto, foram utilizadas águas com cor e turbidez relativamente altas e baixas.

Os resultados apresentados foram obtidos para as condições ótimas de coagulação/floculação, para solução coagulante extraída com água (SCA) e solução coagulante extraída com KCl 1 M (SCKCl), obtidas a partir do planejamento experimental, conforme descrito na Tabela 5.17.

Tabela 5.17. Condições de coagulação/floculação aplicadas no processo combinado de coagulação/ floculação/filtração com membranas.

| <i>Característica da Água</i> <i>Bruta</i> | <i>Solução coagulante</i> | <i>Concentração</i> <i>(mg/L)</i> |
|---|-----------------------------------|--------------------------------------|
| Cor e turbidez relativamente baixa | Solução extraída com água (SCA) | 25 |
| | Solução extraída com KCl 1 M (SC) | 100 |
| Cor e turbidez relativamente alta | Solução extraída com água (SCA) | 50 |
| | Solução extraída com KCl 1 M (SC) | 175 |

Os dados apresentados na Tabela 5.17 foram aplicados no processo combinado. Os resultados deste item estão apresentados na seguinte ordem: primeiramente são

apresentados parâmetros referentes a qualidade da água, comparando o processo de coagulação/floculação com o processo combinado coagulação/floculação/filtração com membranas. E logo após são apresentados os resultados da análise do fluxo de permeado em função do tempo de filtração.

5.3.1 Avaliação dos resultados das análises físico-químicas e microbiológicas para membranas 0,1 μ m e 0,2 μ m – monocanal nas pressões de 1 e 2 bar

Esta etapa apresenta os resultados referentes à avaliação da qualidade da água. Para cada ensaio realizado foram verificados os principais parâmetros para a determinação da qualidade da água. Tais parâmetros foram avaliados para determinar a condição de operação que resultasse em uma boa qualidade do permeado aliada a um bom valor de fluxo. Uma boa qualidade do permeado seria atribuída àquela condição na qual ocorresse uma redução dos valores dos parâmetros avaliados. Os valores específicos para os outros parâmetros da água final em para cada ensaio encontram-se no Anexo III.

5.3.1.1 Membrana 0,1 μ m - Água com Cor e Turbidez Relativamente Baixas nas pressões de 1 bar e 2 bar

Para avaliação da qualidade da água tratada, os resultados de alguns parâmetros físico-químicos e microbiológicos estão apresentados a seguir, com a finalidade de comparação dos processos e das soluções coagulantes utilizadas.

Em cada uma das tabelas estão apresentados alguns dos parâmetros analisados para a água bruta (antes de qualquer tipo de tratamento), para o processo de filtração com membranas, para o de coagulação/floculação e para o processo combinado. Ainda estão citados os valores máximos permitidos pela Portaria 518-MS e as eficiências de remoção obtidas para os casos estudados.

As Tabelas 5.18 e 5.19 apresentam os valores obtidos para água de baixa cor e turbidez no processo de filtração com membranas para água bruta e no processo combinado (coagulação/floculação/ultrafiltração) para as soluções coagulantes extraídas com água (MSCA) e extraída com sal (MSC) quando da utilização da pressão de 1 bar e 2 bar, respectivamente.

Tabela 5.18. Eficiência do processo de ultrafiltração e do processo combinado (coagulação/floculação/ultrafiltração) para os diferentes coagulantes, para águas de baixa cor e turbidez na pressão de 1 bar – membrana 0,1 µm.

| <i>Parâmetros analisados</i> | <i>AB</i> | <i>UF</i> | <i>Ef (%)</i> | <i>CF</i> | <i>CFU</i> | <i>Ef (%)</i> | <i>CF</i> | <i>CFU</i> | <i>Ef (%)</i> | <i>Portaria 518/MS</i> |
|--|-----------|-------------------|---------------|-------------|------------|---------------|------------|------------|---------------|------------------------|
| | | <i>Água Bruta</i> | | <i>MSCA</i> | | | <i>MSC</i> | | | |
| Cor Aparente (uH) | 515 | Nd | 100,0 | 326,15 | Nd | 100,0 | 52,01 | Nd | 100,0 | 15 |
| Turbidez (uT) | 122 | 0,6 | 99,50 | 88,23 | 0,1 | 99,91 | 10,28 | 0,5 | 99,59 | 5,0/1,0 |
| UV-254 nm (cm⁻¹) | 0,323 | Nd | 100,0 | 0,308 | 0,001 | 99,69 | 0,071 | Nd | 100,0 | - |
| pH | 7,91 | 7,63 | - | 7,43 | 7,34 | - | 7,28 | 6,82 | - | 6,0-9,5 |
| Coliformes Totais (UFC/mL) | 1.500 | Nd | 99,99 | 500 | Nd | 99,99 | 500 | Nd | 99,99 | Ausência |
| E. coli (UFC/mL) | 150 | Nd | 99,99 | 50 | Nd | 99,99 | 50 | Nd | 99,99 | Ausência |
| SST | 288,0 | Nd | 100,0 | Nr | Nd | 100,0 | Nr | Nd | 100,0 | - |
| SDT | 276,0 | Nd | 100,0 | Nr | Nd | 100,0 | Nr | Nd | 100,0 | 1.000 |
| DQO (mgO₂L⁻¹) | 8,64 | 0,54 | 93,75 | Nr | 1,52 | 82,40 | Nr | 1,68 | 80,55 | 6,35 |

AB- Água Bruta; UF- ultrafiltração; Nd- não detectado; Nr- não realizado; CF – coagulação/floculação; CFU - coagulação/floculação/ultrafiltração; Ef – eficiência de remoção no processo combinado; MSCA – solução coagulante extraída com água e MSC – solução coagulante extraída com sal.

Tabela 5.19. Eficiência do processo de ultrafiltração e do processo combinado (coagulação/floculação/ultrafiltração) para os diferentes coagulantes, para águas de baixa cor e turbidez na pressão de 2 bar – membrana 0,1 µm.

| <i>Parâmetros analisados</i> | <i>AB</i> | <i>UF</i> | <i>Ef (%)</i> | <i>CF</i> | <i>CFU</i> | <i>Ef (%)</i> | <i>CF</i> | <i>CFU</i> | <i>Ef (%)</i> | <i>Portaria 518/MS</i> |
|--|-----------|-------------------|---------------|-------------|------------|---------------|------------|------------|---------------|------------------------|
| | | <i>Água Bruta</i> | | <i>MSCA</i> | | | <i>MSC</i> | | | |
| Cor Aparente (uH) | 515 | Nd | 100,0 | 326,15 | Nd | 100,0 | 52,01 | Nd | 100,0 | 15 |
| Turbidez (uT) | 122 | 0,2 | 99,84 | 88,23 | 0,5 | 99,59 | 10,28 | 0,2 | 99,84 | 5,0/1,0 |
| UV-254 nm (cm⁻¹) | 0,323 | Nd | 100,0 | 0,308 | 0,012 | 96,28 | 0,071 | 0,020 | 93,81 | - |
| pH | 7,91 | 7,67 | - | 7,43 | 7,21 | - | 7,28 | 6,76 | - | 6,0-9,5 |
| Coliformes Totais (UFC/mL) | 1.500 | Nd | 99,99 | 500 | Nd | 99,99 | 500 | Nd | 99,99 | Ausência |
| E. coli (UFC/mL) | 150 | Nd | 99,99 | 50 | Nd | 99,99 | 50 | Nd | 99,99 | Ausência |
| SST | 288,0 | 30 | 89,58 | Nr | 52 | 81,94 | Nr | 28 | 90,28 | - |
| SDT | 276,0 | 35 | 87,32 | Nr | 46 | 83,33 | Nr | 25 | 90,94 | 1.000 |
| DQO (mgO₂L⁻¹) | 8,64 | 0,49 | 94,33 | Nr | 2,36 | 72,68 | Nr | 1,59 | 81,60 | 6,35 |

AB- Água Bruta; UF- ultrafiltração; Nd- não detectado; Nr- não realizado; CF – coagulação/floculação; CFU - coagulação/floculação/ultrafiltração; Ef – eficiência de remoção no processo combinado; MSCA – solução coagulante extraída com água e MSC – solução coagulante extraída com sal.

Nota-se que em todos os casos apenas o processo de coagulação/floculação/sedimentação (CF) não foi eficaz para remoção dos parâmetros avaliados. Segundo Bawa *et al.* (2001), a etapa de coagulação/floculação para águas que apresentam baixa turbidez é difícil, pois os flocos formados demonstram dificuldade para decantar. Assim, neste caso, são necessárias etapas posteriores para obtenção de água com padrão de potabilidade.

Observa-se ainda que a água bruta em questão já possuía valores de sólidos dissolvidos totais (SDT) abaixo do requerido pela legislação, ainda assim, foi possível perceber uma redução destes valores de SDT após o processo de filtração com membranas em todos os casos de estudo. As remoções de sólidos solúveis totais (SST) e de demanda química de oxigênio (DQO) também foram efetivas sendo superiores a 72% em todos os ensaios realizados.

Analisando as Tabelas 5.18 e 5.19 nota-se que para o processo de coagulação/floculação/sedimentação (CF) alguns dos parâmetros estudados ficaram acima do permitido pela Portaria 518 do Ministério da Saúde. Porém, vale salientar que após este processo (CF), em uma Estação de Tratamento de água convencional, ainda haverá o processo de filtração e no caso do presente estudo, propõe-se o processo de ultrafiltração. Nota-se que após a realização do processo combinado todos os parâmetros ficaram de acordo com os padrões de potabilidade previstos pela legislação em vigor (Portaria 518/MS). Assim, é de fundamental importância a aplicação de uma etapa de filtração no tratamento para obtenção de água potável, quando se utiliza a *Moringa oleifera* como coagulante.

Tanto para aplicação da solução extraída com água (MSCA) e da extraída com sal (MSC) os valores encontrados foram satisfatórios.

Em todos os casos avaliados (pressão de 1 e 2 bar), as remoções de cor foram de 100 %, as de turbidez foram superiores a 99 % e as de compostos com absorção em UV-254 nm superiores a 93%.

No processo de filtração da água bruta e nos processos combinados com aplicação de coagulante, verifica-se que houve remoção na sua totalidade de coliformes totais na água final obtida. Assim, pode-se dizer que a membrana se comportou como um método de desinfecção física para microrganismos.

O pH da água tratada não sofreu grandes alterações, pois segundo Ndagengesere e Narasiah (1998), dentre as vantagens relacionadas ao uso de *Moringa oleifera* no tratamento de água, cita-se o fato de tal coagulante não promover alterações

significativas no pH da água tratada, o que resulta em uma maior facilidade operacional e redução de custos tendo em vista que não há necessidade de correção do pH. Os valores de pH da água bruta encontrados pelos autores forem de 8,34 a 8,74, após o tratamento foi verificada uma pequena redução em tais valores, que permaneceram na faixa de 7,48 a 8,24. Nota-se que os valores obtidos estão de acordo com a Portaria nº 518 – MS, que recomenda para o sistema de distribuição de água valores de pH na faixa de 6,0 a 9,5.

Em geral, pode-se afirmar que tanto o processo combinado, quanto o processo apenas de ultrafiltração foram eficientes e produziram uma água tratada de boa qualidade. Sendo assim, deve-se avaliar o entupimento da membrana para obter maiores conclusões.

Em relação a remoção dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos de forma geral, podemos dizer que para o processo de filtração com membranas, não houve modificação do comportamento para a pressão de 1 e 2 bar, considerando que foram encontradas elevadas eficiências de remoção. Ainda é válido citar que todos os parâmetros encontram-se de acordo com a legislação vigente.

5.3.1.2 Membrana 0,1 μ m - Água com Cor e Turbidez Relativamente Altas na pressão de 1 bar e 2 bar

As Tabelas 5.20 e 5.21 apresentam os valores obtidos para água de alta cor e turbidez no processo de filtração com membranas para água bruta e no processo combinado (coagulação/floculação/ultrafiltração) para as soluções coagulantes extraídas com água (MSCA) e extraída com sal (MSC) quando da utilização da pressão de 1 bar e 2 bar, respectivamente.

Tabela 5.20. Eficiência do processo de ultrafiltração e do processo combinado (coagulação/floculação/ultrafiltração) para os diferentes coagulantes, para águas de alta cor e turbidez na pressão de 1 bar – membrana 0,1 µm.

| <i>Parâmetros analisados</i> | <i>AB</i> | <i>UF</i> | <i>Ef (%)</i> | <i>CF</i> | <i>CFU</i> | <i>Ef (%)</i> | <i>CF</i> | <i>CFU</i> | <i>Ef (%)</i> | <i>Portaria 518/MS</i> |
|--|-----------|-------------------|---------------|-------------|------------|---------------|------------|------------|---------------|------------------------|
| | | <i>Água Bruta</i> | | <i>MSCA</i> | | | <i>MSC</i> | | | |
| Cor Aparente (uH) | 3214 | 4 | 99,87 | 71,67 | Nd | 100,0 | 81,31 | Nd | 100,0 | 15 |
| Turbidez (uT) | 550 | 0,70 | 99,87 | 8,41 | 0,3 | 99,94 | 5,39 | 0,2 | 99,96 | 5,0/1,0 |
| UV-254 nm (cm⁻¹) | 2,064 | Nd | 100,00 | 0,239 | 0,02 | 99,03 | 0,131 | 0,04 | 98,06 | - |
| pH | 7,52 | 6,99 | - | 6,83 | 6,75 | - | 6,67 | 6,76 | - | 6,0-9,5 |
| Coliformes Totais (UFC/mL) | 10230 | Nd | 99,99 | 650 | Nd | 99,99 | 400 | Nd | 99,99 | Ausência |
| E. coli (UFC/mL) | 6.980 | Nd | 99,99 | 200 | Nd | 99,99 | 150 | Nd | 99,99 | Ausência |
| SST | 310,7 | 40 | 87,12 | Nr | 62,67 | 79,83 | Nr | 40,0 | 87,12 | - |
| SDT | 273,3 | 24 | 91,22 | Nr | 46,60 | 82,95 | Nr | 66,0 | 75,85 | 1.000 |
| DQO (mgO₂L⁻¹) | 20,36 | 0,60 | 97,05 | Nr | 2,14 | 89,49 | Nr | 0,97 | 95,23 | 6,35 |

AB- Água Bruta; UF- ultrafiltração; Nd- não detectado; Nr- não realizado; CF – coagulação/floculação; CFU - coagulação/floculação/ultrafiltração; Ef – eficiência de remoção no processo combinado; MSCA – solução coagulante extraída com água e MSC – solução coagulante extraída com sal.

Tabela 5.21. Eficiência do processo de ultrafiltração e do processo combinado (coagulação/floculação/ultrafiltração) para os diferentes coagulantes, para águas de alta cor e turbidez na pressão de 2 bar – membrana 0,1 µm.

| <i>Parâmetros analisados</i> | <i>AB</i> | <i>UF</i> | <i>Ef (%)</i> | <i>CF</i> | <i>CFU</i> | <i>Ef (%)</i> | <i>CF</i> | <i>CFU</i> | <i>Ef (%)</i> | <i>Portaria 518/MS</i> |
|--|-----------|-------------------|---------------|-------------|------------|---------------|------------|------------|---------------|------------------------|
| | | <i>Água Bruta</i> | | <i>MSCA</i> | | | <i>MSC</i> | | | |
| Cor Aparente (uH) | 3214 | Nd | 100,00 | 71,67 | Nd | 100,00 | 81,31 | Nd | 100,00 | 15 |
| Turbidez (uT) | 550 | 0,5 | 99,91 | 8,41 | 0,51 | 99,90 | 5,39 | 0,27 | 99,95 | 5,0/1,0 |
| UV-254 nm (cm⁻¹) | 2,064 | 0,016 | 99,22 | 0,239 | 0,02 | 99,03 | 0,131 | 0,01 | 99,51 | - |
| pH | 7,52 | 7,55 | - | 6,46 | 6,44 | - | 6,67 | 6,33 | - | 6,0-9,5 |
| Coliformes Totais (UFC/mL) | 10230 | Nd | 99,99 | 650 | Nd | 99,99 | 400 | Nd | 99,99 | Ausência |
| E. coli (UFC/mL) | 6.980 | Nd | 99,99 | 200 | Nd | 99,99 | 150 | Nd | 99,99 | Ausência |
| SST | 310,7 | Nd | 100,00 | Nr | Nd | 100,00 | Nr | Nd | 100,00 | - |
| SDT | 273,3 | Nd | 100,00 | Nr | Nd | 100,00 | Nr | Nd | 100,00 | 1.000 |
| DQO (mgO₂L⁻¹) | 20,36 | 0,81 | 96,02 | Nr | 1,23 | 93,96 | Nr | 1,05 | 94,84 | 6,35 |

AB- Água Bruta; UF- ultrafiltração; Nd- não detectado; Nr- não realizado; CF – coagulação/floculação; CFU - coagulação/floculação/ultrafiltração; Ef – eficiência de remoção no processo combinado; MSCA – solução coagulante extraída com água e MSC – solução coagulante extraída com sal.

Pode-se observar ótimas eficiências de remoção tanto para o processo de ultrafiltração da água bruta, quando para aplicação das diferentes soluções coagulantes no processo combinado.

Como o ocorrido para a água de cor e turbidez relativamente baixa, quando da utilização de água bruta de cor e turbidez relativamente alta, todos os parâmetros após o processo de coagulação/floculação/filtração ficaram dentro da legislação. Assim, pode-se observar que mesmo com uma água de qualidade inferior, o processo com membranas mostrou-se adequado ao tratamento, em relação aos parâmetros observados, para a pressão de 1 bar (Tabela 5.20).

Como esperado, as eficiências de remoção dos parâmetros analisados, para o processo acoplado a filtração com membranas (CFU), ficaram mais altas do que quando da utilização apenas do processo de coagulação/floculação/sedimentação (CF).

Na remoção de cor, apenas a água bruta ultrafiltrada na pressão de 1 bar não apresentou 100 % de remoção. Em todos os casos a remoção de turbidez foi acima de 99 % e a remoção de UV- 254 nm acima de 98 %, valor este superior ao encontrado para águas de baixa cor e turbidez. Nota-se ainda que não ocorreram alterações nos valores de pH, segundo Muyibi e Evison (1995), a *Moringa oleifera* Lam não altera o pH da água tratada por não consumir alcalinidade do meio. Ndabigengesere e Narasiah (1996) afirmam que esse fato é típico dos polieletrólitos devido ao mecanismo das reações que ocorrem.

Pode-se observar ainda, que mesmo para concentrações altas das bactérias estudadas, a membrana se mostrou adequada para a remoção de coliformes totais e *E. coli*. Segundo Ribeiro e De Luca (2000), para águas com turbidez variável e com contaminação microbiológica os problemas estão relacionados com a presença de partículas. Assim, as membranas são usadas pela sua capacidade de clarificar e desinfetar a água. Os autores afirmam ainda que, a principal limitação do processo de ultrafiltração, identificado no tratamento para obtenção de água potável, é o entupimento da membrana. Portanto, para altos fluxos, as membranas cerâmicas de ultrafiltração necessitam ser combinadas com a coagulação, numa dosagem ótima de coagulante.

Konradt-Moraes (2009) avaliou a qualidade da água em diferentes processos de tratamento da água bruta, na mesma membrana (0,1µm – monocanal) e concluiu que as eficiências médias obtidas, utilizando a pressão de 1 bar, para os compostos com absorção em UV-254 nm variaram entre 79,2 e 96,3 %, quando utilizou sulfato de

alumínio, 87,2 a 96,9 %, para a associação dos coagulantes (sulfato de alumínio e quitosana) e 90,2 a 91,8 % para a quitosana. Quando da utilização da pressão de 2 bar, encontrou-se eficiências para os compostos com absorção em UV-254 nm entre 88,5 e 89,5 %, quando utilizou-se sulfato de alumínio, 88,5 a 93,0 %, para a associação dos coagulantes e 89,1 a 99,4 % para a quitosana.

Ribeiro e De Luca (2000) utilizaram quitosana nos ensaios com membrana 0,1 μm , monocanal, pressão 1 bar e água de cor e turbidez relativamente altas e verificaram boas eficiências de remoção dos parâmetros analisados, sendo coerente com os resultados encontrados na presente pesquisa.

Bergamasco *et al.* (2008), para membrana de 0,1 μm , obtiveram eficiências de remoção de compostos com absorção em UV- 254 nm entre 67 e 95%, utilizando o cloreto férrico e 34 a 76%, utilizando sulfato de alumínio, para processo combinados. Avaliando os resultados obtidos quando da aplicação de soluções de *Moringa oleifera* como coagulante, pode-se observar que os valores encontrados pelos autores foram inferiores aos observados no presente trabalho.

Para as condições estudadas, podemos observar que, de forma geral, o processo de coagulação/floculação/sedimentação não foi suficiente para a remoção total de alguns parâmetros estudados. Após o processo de filtração com membranas foram encontradas boas eficiências nos parâmetros avaliados. Cabe ressaltar ainda que, todos os parâmetros após o processo de coagulação/floculação/filtração ficaram dentro dos limites da legislação vigente.

De forma geral, podemos dizer que para o processo de filtração com membranas, não houve modificação do comportamento para a pressão de 1 e 2 bar, considerando as eficiências de remoção obtidas.

5.3.1.3 Membrana 0,2 μm - Água com Cor e Turbidez Relativamente Baixas nas pressões de 1 bar e 2 bar

As Tabelas 5.22 e 5.23 apresentam dados referentes à caracterização da água bruta, após o processo de microfiltração e filtrada após o processo combinado. As tabelas também apresentam a eficiência de remoção com relação aos parâmetros avaliados e os valores máximos permitidos pela legislação quando da utilização da pressão de 1 bar e 2 bar.

Tabela 5.22. Eficiência do processo de microfiltração e do processo combinado (coagulação/floculação/microfiltração) para os diferentes coagulantes, para águas de baixa cor e turbidez na pressão de 1 bar – membrana 0,2 µm.

| <i>Parâmetros analisados</i> | <i>AB</i> | <i>UF</i> | <i>Ef (%)</i> | <i>CF</i> | <i>CFU</i> | <i>Ef (%)</i> | <i>CF</i> | <i>CFU</i> | <i>Ef (%)</i> | <i>Portaria 518/MS</i> |
|--|-------------------|-----------|---------------|-------------|------------|---------------|------------|------------|---------------|------------------------|
| | <i>Água Bruta</i> | | | <i>MSCA</i> | | | <i>MSC</i> | | | |
| Cor Aparente (uH) | 515 | Nd | 100,00 | 312,2 | Nd | 100,00 | 48,98 | Nd | 100,00 | 15 |
| Turbidez (uT) | 122 | 0,1 | 99,92 | 94,74 | 0,1 | 99,92 | 11,04 | 0,2 | 99,85 | 5,0/1,0 |
| UV-254 nm (cm⁻¹) | 0,323 | 0,02 | 97,56 | 0,782 | 0,03 | 96,34 | 0,181 | 0,01 | 98,78 | - |
| pH | 7,91 | 7,57 | - | 6,25 | 6,38 | - | 6,47 | 6,50 | - | 6,0-9,5 |
| Coliformes Totais (UFC/mL) | 1.500 | Nd | 99,99 | 400 | Nd | 99,99 | 350 | Nd | 99,99 | Ausência |
| E. coli (UFC/mL) | 150 | Nd | 99,99 | 100 | Nd | 99,99 | 180 | Nd | 99,99 | Ausência |
| SST | 288,0 | 25 | 91,32 | Nr | 2 | 99,30 | Nr | 3 | 98,95 | - |
| SDT | 276,0 | 51 | 81,52 | Nr | 21 | 92,39 | Nr | 10 | 96,38 | 1.000 |
| DQO (mgO₂L⁻¹) | 8,64 | 1,1 | 81,67 | Nr | 0,5 | 91,67 | Nr | 0,84 | 86,00 | 6,35 |

AB- Água Bruta; UF- ultrafiltração; Nd- não detectado; Nr- não realizado; CF – coagulação/floculação; CFU - coagulação/floculação/microfiltração; Ef – eficiência de remoção no processo combinado; MSCA – solução coagulante extraída com água e MSC – solução coagulante extraída com sal.

Tabela 5.23. Eficiência do processo de microfiltração e do processo combinado (coagulação/floculação/microfiltração) para os diferentes coagulantes, para águas de baixa cor e turbidez na pressão de 2 bar – membrana 0,2 µm.

| <i>Parâmetros analisados</i> | <i>AB</i> | <i>UF</i> | <i>Ef (%)</i> | <i>CF</i> | <i>CFU</i> | <i>Ef (%)</i> | <i>CF</i> | <i>CFU</i> | <i>Ef (%)</i> | <i>Portaria 518/MS</i> |
|--|-------------------|-----------|---------------|-------------|------------|---------------|------------|------------|---------------|------------------------|
| | <i>Água Bruta</i> | | | <i>MSCA</i> | | | <i>MSC</i> | | | |
| Cor Aparente (uH) | 515 | Nd | 100,00 | 312,0 | Nd | 100,00 | 312,0 | Nd | 100,00 | 15 |
| Turbidez (uT) | 122 | 0,74 | 99,43 | 94,74 | 0,5 | 99,62 | 94,74 | 0,35 | 99,73 | 5,0/1,0 |
| UV-254 nm (cm⁻¹) | 0,323 | 0,123 | 85,00 | 0,780 | Nd | 100,00 | 0,780 | 0,02 | 97,56 | - |
| pH | 7,91 | 6,11 | - | 6,40 | 6,37 | - | 6,16 | 6,17 | - | 6,0-9,5 |
| Coliformes Totais (UFC/mL) | 1.500 | Nd | 99,99 | 400 | Nd | 99,99 | 400 | Nd | 99,99 | Ausência |
| E. coli (UFC/mL) | 150 | Nd | 99,99 | 100 | Nd | 99,99 | 100 | Nd | 99,99 | Ausência |
| SST | 288,0 | 52,3 | 81,84 | Nr | Nd | 100,00 | Nr | Nd | 100,00 | - |
| SDT | 276,0 | 48,9 | 82,28 | Nr | Nd | 100,00 | Nr | Nd | 100,00 | 1.000 |
| DQO (mgO₂L⁻¹) | 8,64 | 1,5 | 75,00 | Nr | 1,2 | 80,00 | Nr | 0,97 | 83,83 | 6,35 |

AB- Água Bruta; UF- ultrafiltração; Nd- não detectado; Nr- não realizado; CF – coagulação/floculação; CFU - coagulação/floculação/microfiltração; Ef – eficiência de remoção no processo combinado; MSCA – solução coagulante extraída com água e MSC – solução coagulante extraída com sal.

A remoção de cor para todos os ensaios com pressão de 1 e 2 bar foi de 100 %. As remoções de sólidos solúveis totais (SST), sólidos dissolvidos totais (SDT) e

demanda química de oxigênio (DQO) também foram efetivas, sendo todas elas superiores a 75%.

Para pressão de 1 bar a remoção de turbidez no processo de filtração com membranas da água bruta foi de 99,92 %. O mesmo valor foi encontrado para o processo combinado, quando da utilização de solução extraída com água (SCA) e o valor encontrado na utilização de solução coagulante extraída com sal foi de 99,85 %. Para remoção de compostos com absorção em UV-254 nm os valores de remoção variaram de 96,35 até 98,78 %. E em todos os ensaios não foi detectada presença de Coliformes Totais no filtrado e no sobrenadante da decantação. Pode-se observar que todas as eficiências de remoção são muito semelhantes e ainda, todos os parâmetros se enquadraram dentro da legislação brasileira.

Na pressão de 2 bar a eficiência de remoção do parâmetro que avalia matéria orgânica (UV-254 nm) na sua maioria foram todas acima de 85 %. Em todas as condições de microfiltração, as eficiências de remoção de coliformes totais e *Escherichia coli* foram de 99,99 %, garantindo a qualidade da água tratada em relação a estes parâmetros microbiológicos.

Em geral, mesmo não havendo grandes variações nos valores de remoção de turbidez, na pressão de 2 bar, as maiores remoções deste parâmetro foram quando da aplicação de solução coagulante no processo combinado.

Este fato já era esperado de acordo com dados da literatura (Franco *et al.*, 2010). Os autores constataram que a aplicação de coagulante a base de *Moringa oleifera* em um sistema piloto de filtração em múltiplas etapas culminou em maiores eficiências de remoção de turbidez do que a filtração sem adição de coagulante.

Assim, de uma forma geral, quando da utilização da membrana de 0,2 µm, monocanal, nas pressões de 1 e 2 bar e condições de cor e turbidez relativamente baixas, os resultados obtidos foram muito semelhantes, independente da condição do sistema alterada.

5.3.1.4 Membrana 0,2µm - Água com Cor e Turbidez Relativamente Altas na pressão de 1 bar e 2 bar

As Tabelas 5.24 a 5.25 apresentam os valores obtidos para água de alta cor e turbidez no processo de filtração com membranas para água bruta e no processo combinado (coagulação/floculação/microfiltração) para as soluções coagulantes

extraídas com água (MSCA) e extraída com sal (MSC) quando da utilização da pressão de 1 bar e 2 bar, respectivamente.

Tabela 5.24. Eficiência do processo de microfiltração e do processo combinado (coagulação/floculação/microfiltração) para os diferentes coagulantes, para águas de alta cor e turbidez na pressão de 1 bar – membrana 0,2 µm.

| <i>Parâmetros analisados</i> | <i>AB</i> | <i>UF</i> | <i>Ef (%)</i> | <i>CF</i> | <i>CFU</i> | <i>Ef (%)</i> | <i>CF</i> | <i>CFU</i> | <i>Ef (%)</i> | <i>Portaria 518/MS</i> |
|--|-----------|-------------------|---------------|-------------|------------|---------------|------------|------------|---------------|------------------------|
| | | <i>Água Bruta</i> | | <i>MSCA</i> | | | <i>MSC</i> | | | |
| Cor Aparente (uH) | 3214 | Nd | 100,00 | 193,4 | Nd | 100,00 | 67,68 | Nd | 100,00 | 15 |
| Turbidez (uT) | 550 | 0,41 | 99,92 | 8,3 | 0,31 | 99,94 | 5,32 | 0,3 | 99,94 | 5,0/1,0 |
| UV-254 nm (cm⁻¹) | 2,064 | 0,001 | 99,94 | 0,186 | 0,001 | 99,94 | 0,102 | 0,04 | 97,50 | - |
| pH | 7,52 | 6,86 | - | 6,78 | 6,72 | - | 6,55 | 6,45 | - | 6,0-9,5 |
| Coliformes Totais (UFC/mL) | 10230 | Nd | 99,99 | 800 | Nd | 99,99 | 700 | Nd | 99,99 | Ausência |
| E. coli (UFC/mL) | 6.980 | Nd | 99,99 | 250 | Nd | 99,99 | 200 | Nd | 99,99 | Ausência |
| SST | 310,7 | 150 | 51,72 | Nr | 22,67 | 92,70 | Nr | 90,0 | 71,03 | - |
| SDT | 273,3 | 106 | 61,21 | Nr | 31,15 | 88,60 | Nr | 1,30 | 99,52 | 1.000 |
| DQO (mgO₂L⁻¹) | 20,36 | 1,2 | 90,24 | Nr | 0,86 | 93,00 | Nr | 0,75 | 93,90 | 6,35 |

AB- Água Bruta; UF- ultrafiltração; Nd- não detectado; Nr- não realizado; CF – coagulação/floculação; CFU - coagulação/floculação/microfiltração; Ef – eficiência de remoção no processo combinado; MSCA – solução coagulante extraída com água e MSC – solução coagulante extraída com sal.

Tabela 5.25. Eficiência do processo de microfiltração e do processo combinado (coagulação/floculação/microfiltração) para os diferentes coagulantes, para águas de alta cor e turbidez na pressão de 2 bar – membrana 0,2 µm.

| <i>Parâmetros analisados</i> | <i>AB</i> | <i>UF</i> | <i>Ef (%)</i> | <i>CF</i> | <i>CFU</i> | <i>Ef (%)</i> | <i>CF</i> | <i>CFU</i> | <i>Ef (%)</i> | <i>Portaria 518/MS</i> |
|--|-----------|-------------------|---------------|-------------|------------|---------------|------------|------------|---------------|------------------------|
| | | <i>Água Bruta</i> | | <i>MSCA</i> | | | <i>MSC</i> | | | |
| Cor Aparente (uH) | 3214 | Nd | 100,00 | 193,4 | Nd | 100,00 | 67,68 | Nd | 100,00 | 15 |
| Turbidez (uT) | 550 | 0,6 | 99,89 | 8,3 | 0,11 | 99,98 | 5,32 | 0,13 | 99,98 | 5,0/1,0 |
| UV-254 nm (cm⁻¹) | 2,064 | 0,02 | 98,75 | 0,186 | 0,013 | 99,19 | 0,102 | 0,030 | 98,13 | - |
| pH | 7,52 | 7,48 | - | 6,78 | 6,91 | - | 6,55 | 6,15 | - | 6,0-9,5 |
| Coliformes Totais (UFC/mL) | 10230 | Nd | 99,99 | 800 | Nd | 99,99 | 700 | Nd | 99,99 | Ausência |
| E. coli (UFC/mL) | 6.980 | Nd | 99,99 | 250 | Nd | 99,99 | 200 | Nd | 99,99 | Ausência |
| SST | 310,7 | Nd | 100,00 | Nr | Nd | 100,00 | Nr | Nd | 100,00 | - |
| SDT | 273,3 | Nd | 100,00 | Nr | Nd | 100,00 | Nr | Nd | 100,00 | 1.000 |
| DQO (mgO₂L⁻¹) | 20,36 | 0,5 | 95,93 | Nr | 0,68 | 94,47 | Nr | 0,72 | 94,15 | 6,35 |

AB- Água Bruta; UF- ultrafiltração; Nd- não detectado; Nr- não realizado; CF – coagulação/floculação; CFU - coagulação/floculação/microfiltração; Ef – eficiência de remoção no processo combinado; MSCA – solução coagulante extraída com água e MSC – solução coagulante extraída com sal.

Pode-se observar nas Tabelas 5.24 e 5.25 que a remoção dos parâmetros microbiológicos estudados foi de 99,99 %, para as pressões 1 e 2 bar, assim como o apresentado anteriormente para a membrana de 0,1 µm. Os parâmetros de cor e turbidez após aplicação do processo combinado também ficaram dentro do estabelecido pela Portaria 518/MS.

As remoções de cor foram de 100 % em todos os casos. Todos os valores de turbidez obtidos, para a água final, após todos os tratamentos, ficaram abaixo de 1,0 uT. A maior eficiência de remoção de turbidez (99,98 %) foi para o processo combinado utilizando solução coagulante extraída com sal (SC) e solução coagulante extraída com água (SCA).

As eficiências de remoção de compostos com absorção em UV-254 nm foram todas acima de 97,50 % para os coagulantes estudados e para o processo de filtração da água bruta. O que enquadra estes parâmetros dentro do limite previsto pela legislação brasileira.

Guigui *et al* (2002) afirmam que a adição de coagulante antes de unidades de ultra e microfiltração, com ou sem sedimentação, pode aumentar a remoção de matéria orgânica natural, para uma melhor redução dos produtos formados pela desinfecção, podendo ainda conferir melhores características de potabilidade e redução na concentração de alguns parâmetros importantes.

Segundo Pelegrin (2004) pode-se citar que a qualidade da água é garantida, independente de variações da qualidade da água de alimentação. Essa tecnologia de membranas apresenta plantas mais compactas e automatizadas, possibilitando aumentar a produção em até 50 % durante curtos períodos de tempo, sem comprometer a qualidade da água produzida nem a integridade da planta.

Analisando as duas membranas estudadas (0,1µm e 0,2µm) nas duas condições de pressão (1 e 2 bar) tanto para águas de baixa quanto para de alta cor e turbidez foi possível observar ótimos resultados de remoção de todos os parâmetros avaliados.

Assim, nestas condições todos os resultados encontrados na avaliação da qualidade físico-química e microbiológica da água foram expressivos e estão de acordo com o limite requerido pela legislação brasileira. Sendo que, para se avaliar melhor as condições do processo é necessário um estudo detalhado do fluxo de permeado em função do tempo e do entupimento da membrana, os resultados referentes a estes estudos são descritos no próximo item.

5.3.2 Avaliação dos resultados do fluxo permeado para membranas 0,1 μ m e 0,2 μ m – monocanal nas pressões de 1 e 2 bar

Os resultados de fluxos de permeado em função do tempo de operação foram determinados e serão apresentados nas figuras a seguir. As curvas obtidas para água bruta e coagulados/floculados foram sobrepostas, para facilitar a comparação. Os resultados serão apresentados para membrana 0,1 μ m e 0,2 μ m – monocanal, pressão de operação (1 e 2 bar) e característica da água bruta (cor e turbidez relativamente baixa ou alta).

Para facilitar a apresentação das legendas, foram utilizadas abreviações que são indicadas como: AB - fluxo obtido a partir da filtração da água bruta; MSCA - fluxo de permeado obtido a partir da filtração da água bruta previamente coagulada/floculada com solução extraída com água (SCA); MSC - fluxo de permeado obtido a partir da filtração da água bruta previamente coagulada/floculada com solução extraída com sal (SC).

5.3.2.1 Membrana 0,1 μ m - Água com Cor e Turbidez Relativamente Baixas e Altas para pressão de 1 e 2 bar

Este item apresenta resultados do fluxo de permeado em função do tempo para a membrana 0,1 μ m, nas pressões de 1 e 2 bar para águas de baixa e alta cor e turbidez.

A Figura 5.26 apresenta o comportamento dos fluxos de permeado obtidos nos ensaios de filtração e no processo combinado com a membrana de 0,1 μ m – monocanal, em temperatura de 25°C, nas pressões de 1 e 2 bar, para águas de baixa e alta cor e turbidez.

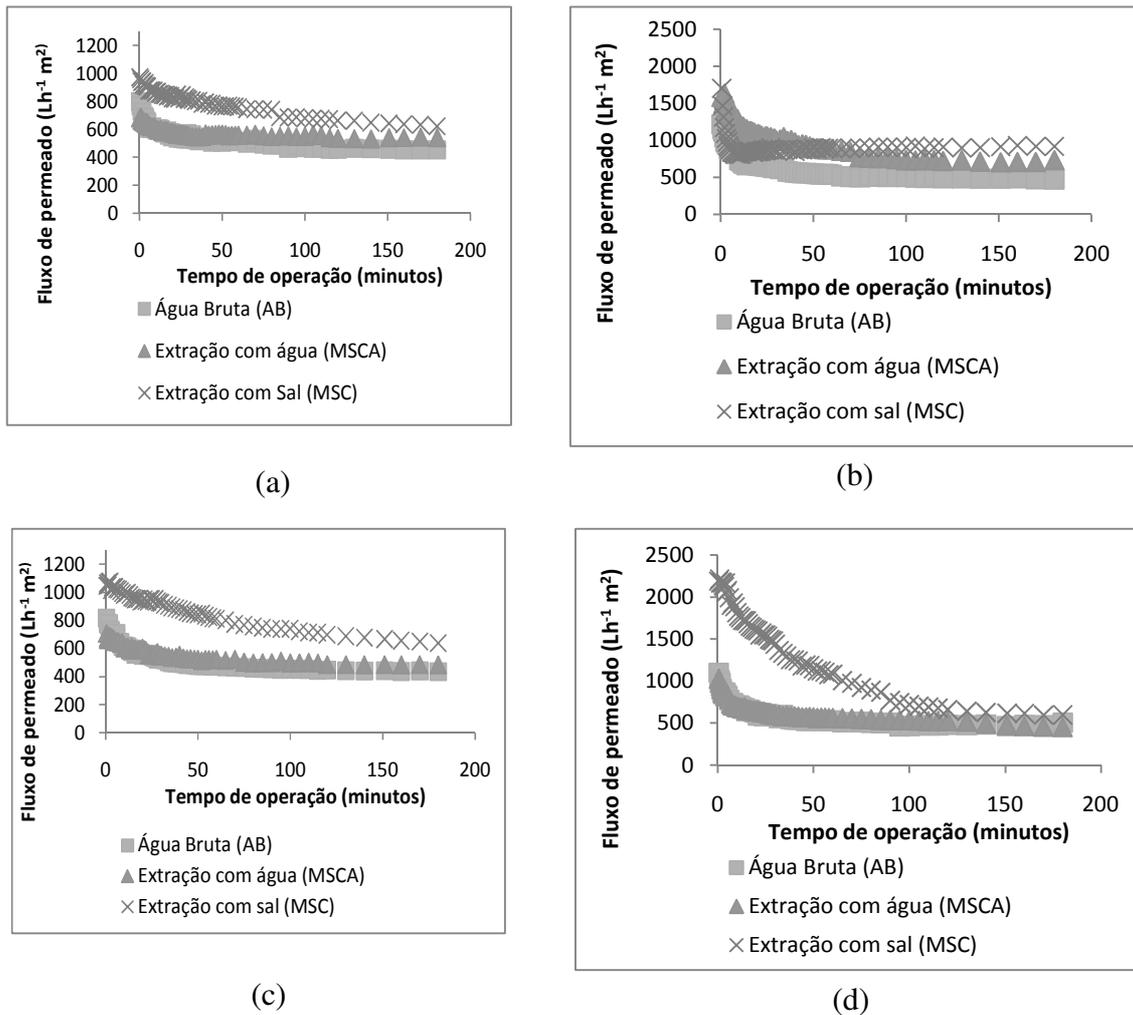


Figura 5.26. Fluxo de permeado em função do tempo de operação para a membrana de $0,1\mu m$ – monocanal: (a) Água de baixa e pressão de 1 bar; (b) Água de baixa e pressão 2 bar; (c) Água de alta e pressão de 1 bar e (d) Água de alta e pressão de 2 bar.

Os fluxos permeados diminuem com o tempo durante o processamento até atingirem um patamar onde permanecem constantes, chamado de fluxo estabilizado. Em todas as corridas realizadas o fluxo permeado diminuiu com o tempo de processamento, como pode ser observado na Figura 5.26.

Para águas de baixa cor e turbidez conforme apresentado na Figura 5.26 (a) e (b), pode-se observar que o entupimento da membrana no ensaio com água bruta (AB) em aproximadamente 180 minutos, sem a adição de coagulante foi de 92,71 % para pressão de 1 bar e 95,61% para pressão de 2 bar.

Nos ensaios de coagulação/floculação/ultrafiltração a 1 bar e água de cor e turbidez baixa, para o mesmo tempo de operação, o entupimento foi de

aproximadamente 90,06 % quando utilizado MSCA (extração com água) e 86,43% para MSC, ou seja, extração com solução salina.

Observa-se uma redução no entupimento quando se utiliza as soluções coagulantes em relação à filtração da água bruta, de 92,71% para 90,06% quando se usa MSCA e 86,43% para MSC. Assim, pode-se afirmar que, o processo combinado de coagulação/floculação/filtração apresentou diminuição significativa do entupimento em relação ao processo de ultrafiltração isoladamente.

Para águas de cor e turbidez baixa, nos ensaios a 2 bar do processo combinado o entupimento obtido, foi de 91,67% para solução extraída com água (MSCA) e 89,66% para solução extraída com sal (MSC). Da mesma forma que, para pressão de trabalho de 1 bar, pode-se observar que o maior entupimento ocorreu com a filtração da água bruta e o menor entupimento ocorreu no processo combinado utilizando extração com solução salina (MSC).

O tempo de operação de aproximadamente 180 minutos foi utilizado como base para os cálculos de entupimento. Observa-se que, de uma forma geral, os maiores entupimentos ocorreram para a filtração da água bruta e para a água coagulada/floculada com solução extraída com água (MSCA). O alto entupimento para a água bruta pode ser devido ao pequeno tamanho das partículas que entram nos poros da membrana, proporcionando um “*fouling*” por entupimento de poros.

Pode-se dizer que a utilização de agentes coagulantes no processo combinado, coagulação/floculação/ultrafiltração com membranas, ajudam a diminuir o entupimento em relação ao processo de filtração, melhorando o fluxo de permeado ao longo do tempo de operação. STOPKA *et al.*, (2001) afirmam que o declínio do fluxo permeado é o resultado da superposição dos vários mecanismos de “*fouling*” na membrana.

Li Xu *et al.* (2002) estudando a combinação de filtração tangencial, floculação e membranas cerâmicas atingiram bons resultados e redução do entupimento na aplicação de coagulante. Fato este, que também foi observado no presente estudo.

Considerando a utilização de águas de alta cor e turbidez, na filtração com a água bruta (AB), sem adição de coagulante, o entupimento foi de 92,75 % para pressão de 1 bar e 94,86 % para 2 bar. Quando se adicionou o coagulante antes da etapa de filtração com membranas, promovendo a etapa de coagulação/floculação antecedendo a filtração, os entupimentos foram ligeiramente reduzidos em relação ao da água bruta, sendo de 91,51 % quando da utilização da solução extraída com água (MSCA) como agente coagulante na pressão de 1 bar e 94,27 % na pressão de 2 bar, 89,57 % quando

da utilização da solução extraída com sal (MSC) na pressão de 1 bar e 93,81 % para 2 bar.

Por meio da Figura 5.26 (a), (c) e (d), nota-se que o perfil do fluxo quando da utilização de água bruta (AB) e da utilização do coagulante extraído com água no processo combinado apresentam comportamento muito parecidos, sendo que as curvas encontram-se sobrepostas.

Assim como para água de baixa cor e turbidez, para a membrana de 0,1 μ m – monocanal na pressão de 1 bar, o menor entupimento encontrado foi para solução coagulante extraída com sal (MSC), e o maior entupimento para água bruta.

Ribeiro e De Luca (2000) avaliaram a quitosana como coagulante em ensaios com membrana de 0, 1 μ m – monocanal, pressão 1 bar e água de alta cor e turbidez e encontraram menor entupimento em processos combinados e boas eficiências de remoção dos parâmetros analisados.

De modo semelhante, Konradt –Moraes (2009) utilizando o processo combinado coagulação/floculação/filtração e apenas a filtração, conclui que da mesma forma que para a pressão de trabalho de 1 bar, de uma forma geral, para pressão de 2 bar, o maior entupimento ocorreu para a filtração da água bruta e o menor entupimento encontrado foi no processo combinado.

A utilização de Moringa como coagulante natural, ainda não foi estudada em processos combinados de coagulação/floculação/ultrafiltração, por isto, justifica-se a escassez de dados para comparação.

Em geral, nota-se que os maiores valores de fluxo inicial e de entupimento foram obtidos na pressão de 2 bar. E ainda que em todos os casos o maior valor de fluxo atingido inicialmente foi para solução extraída com sal (MSC).

5.3.2.2 Resumo dos dados de “fouling” para membrana 0,1 μ m – monocanal

Com intuito de comparar os dados de entupimento neste item é apresentado um resumo das condições estudadas. Na Tabela 5.26 são apresentados os valores de percentagem de fouling, para a membrana 0,1 μ m – monocanal nas pressões de 1 e 2 bar. Os valores destacados em negrito expressam as melhores condições de processo, ou seja, onde ocorreu menor entupimento da para a membrana avaliada.

Tabela 5.26. Avaliação do “fouling” da membrana 0,1 μ m – monocanal, nas pressões 1 e 2 bar para águas de baixa e alta cor e turbidez.

| Membrana (μ m) / Pressão (bar) | % fouling | |
|--|--------------|--------------|
| | 1 bar | 2 bar |
| Água com cor e turbidez relativamente baixa | | |
| Água Bruta (AB) | 92,71 | 95,61 |
| Extração com água (MSCA) | 90,06 | 91,67 |
| Extração com sal (MSC) | 86,43 | 89,66 |
| Água com cor e turbidez relativamente alta | | |
| Água Bruta (AB) | 92,75 | 94,86 |
| Extração com água (MSCA) | 91,51 | 94,27 |
| Extração com sal (MSC) | 89,57 | 93,81 |

Da análise da Figura 5.26 e da Tabela 5.26 foi observado que todos os ensaios realizados com a água bruta causaram um maior “fouling”.

Assim, para a membrana monocanal de porosidade de 0,1 μ m, pode-se observar que, de uma forma geral, os entupimentos foram semelhantes para todos os testes realizados, variando de 86,43 a 95,61 %, sendo os menores entupimentos em todos os casos de estudo, ocorreram quando da utilização do processo combinado utilizando solução coagulante de Moringa extraída com sal (MSC).

Observou-se ainda que o aumento da pressão transmembrana acentuou o efeito do “fouling” sobre o comportamento do fluxo permeado para a membrana avaliada, tanto para águas de cor e turbidez relativamente baixas quanto para as de alta.

5.3.2.3 Membrana 0,2 μ m - Água com Cor e Turbidez Relativamente Baixas e Altas para pressão de 1 e 2 bar

A Figura 5.27 apresenta o comportamento dos fluxos de permeado obtidos nos ensaios de filtração e no processo combinado com a membrana de 0,2 μ m – monocanal, em temperatura de 25°C, nas pressões de 1 e 2 bar, para águas de baixa e alta cor e turbidez.

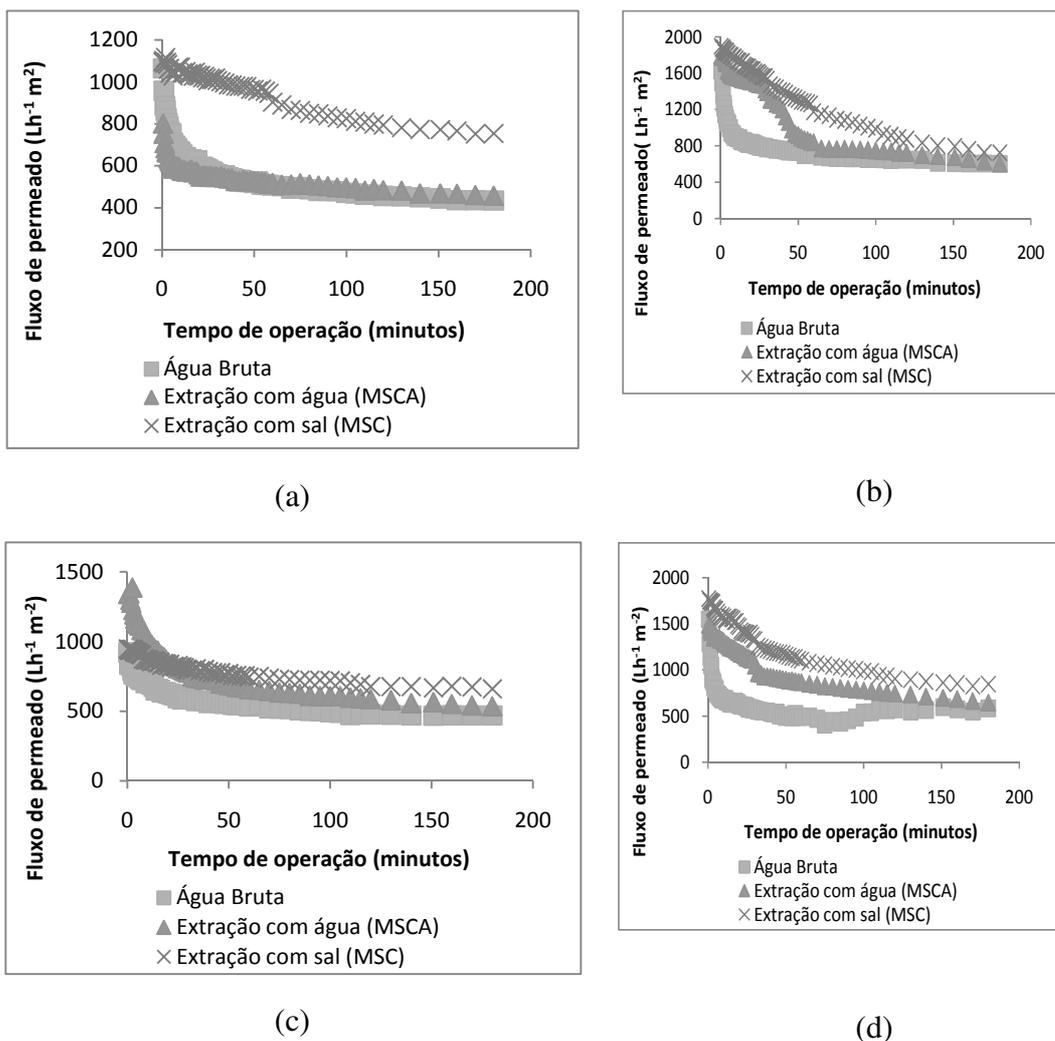


Figura 5.27. Fluxo de permeado em função do tempo de operação para a membrana de 0,2 μm – monocanal: (a) Água de baixa e pressão de 1 bar; (b) Água de baixa e pressão 2 bar; (c) Água de alta e pressão de 1 bar e (d) Água de alta e pressão de 2 bar.

Para águas de baixa cor e turbidez o “*fouling*” ou entupimento foi de 92,38 % para a água bruta (AB) quando da utilização da pressão de 1 bar e 94,28 % para 2 bar. No que se refere aos ensaios de coagulação/floculação/microfiltração o entupimento obtido, foi de 90,47 % para utilização da extração com água (MSCA) em 1 bar e 91,99 % em 2 bar e ainda 87,04 % para a extração com sal (MSC) na pressão de 1 bar e 83,47 % para 2 bar.

Os maiores entupimentos ocorreram para a filtração da água bruta e também para a água coagulada/floculada com a solução extraída com água (MSCA).

Bouchard *et al.* (2003), quando estudaram o processo de microfiltração e o processo combinado de coagulação/microfiltração, utilizando como coagulantes o cloreto férrico e o sulfato de alumínio, obtiveram resultados semelhantes, com redução significativa no entupimento da membrana, quando utilizado o processo combinado, como comentado anteriormente, também para águas superficiais com características de cor e turbidez relativamente baixas.

Para águas de alta cor e turbidez, com base na Figura 5.27 (c) e (d) é possível avaliar que o maior entupimento encontrado foi na pressão de 2 bar (94,56 %) seguido do ocorrido na pressão de 1 bar (94,19 %), obtidos na filtração da água bruta.

Para os ensaios de coagulação/floculação/filtração com membranas, encontrou-se entupimentos de 90,70 % quando da utilização de extração com água (MSCA) e pressão de 1 bar, 93,49 % para 2 bar e ainda 88,50 % para a extração com solução salina (MSC) na pressão 1 bar e 91,20 % na pressão de 2 bar.

Como nos casos anteriores, pode-se observar que os maiores entupimentos ocorreram para pressão de 2 bar e quando da filtração da água bruta seguida do processo combinado quando da aplicação da solução extraída com água (MSCA).

Assim, o processo combinando utilizando como coagulante a solução extraída com sal (MSC) apresentou-se mais eficiente em relação à diminuição do entupimento quando comparado ao processo de microfiltração da água bruta e ao processo combinado utilizando a solução coagulante de *Moringa oleifera* extraída com água.

Cita-se ainda que o comportamento encontrado para esta membrana de 0,2µm foi similar ao encontrado na outra membrana avaliada (0,1 µm).

5.3.2.4 Avaliação do “fouling” para membrana 0,2µm – monocanal

Na Tabela 5.27 são apresentados os valores de percentagem de fouling, para a membrana 0,2µm – monocanal nas pressões de 1 e 2 bar para águas de baixa e alta cor e turbidez.

Tabela 5.27. Avaliação do “fouling” da membrana 0,2 μ m – monocanal, nas pressões 1 e 2 bar para águas de baixa e alta cor e turbidez.

| Membrana (μ m) / Pressão (bar) | % <i>fouling</i> | |
|--|------------------|--------------|
| | 1 bar | 2 bar |
| Água com cor e turbidez relativamente baixa | | |
| Água Bruta (AB) | 92,38 | 94,28 |
| Extração com água (MSCA) | 90,47 | 91,99 |
| Extração com sal (MSC) | 87,04 | 83,47 |
| Água com cor e turbidez relativamente alta | | |
| Água Bruta (AB) | 94,19 | 94,54 |
| Extração com água (MSCA) | 90,70 | 93,49 |
| Extração com sal (MSC) | 88,50 | 91,20 |

Assim como para a membrana 0,1 μ m – monocanal observa-se que todos os ensaios realizados com a água bruta causaram um alto “*fouling*”. Os valores de entupimento encontrados neste caso, ou seja, para membrana 0,2 μ m, foram bem próximos aos encontrados para a outra membrana avaliada (0,1 μ m).

Observou-se ainda que o aumento da pressão transmembrana acentuou o efeito do “*fouling*” sobre o comportamento do fluxo permeado para a membrana avaliada, tanto para águas de cor e turbidez relativamente baixas quanto para as de alta.

Nota-se que o processo de filtração com membranas foi efetivo e que todas as águas finais obtidas pelo processo de filtração com membranas apresentaram qualidade de água potável, estando em acordo com a legislação brasileira, conforme já citado no item 5.3.1.

De acordo com Mo e Huang (2003), com a progressiva degradação da qualidade dos recursos hídricos e a crescente demanda por águas de melhor qualidade, existe uma urgente necessidade no desenvolvimento de tecnologias eficientes para assegurar um fornecimento de água potável.

Assim, a tecnologia de filtração com membranas mostrou-se eficiente em todos os casos de estudo avaliados nesta pesquisa, lembrando que sempre se levou em consideração os diferentes tipos de água bruta com a finalidade de se verificar a qualidade da água final produzida.

5.4 AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE EM RELAÇÃO AO TEMPO DE ARMAZENAMENTO DA SEMENTE E DO COMPOSTO ATIVO

Este item apresenta os resultados referentes a avaliação da estabilidade da semente e do composto ativo em relação ao tempo de armazenamento. Ele está separado em duas etapas distintas.

Primeiro, apresenta-se a avaliação da estabilidade das sementes em relação ao tempo de armazenamento, durante dois anos.

Em seguida, são apresentados os resultados da aplicação das soluções coagulantes extraídas com água (SCA) e com KCl 1 M (SC) , sendo que estas foram armazenadas sob refrigeração e logo após avaliadas ao longo de sete meses.

É válido lembrar que a aplicação das soluções coagulantes no processo de coagulação/floculação foi realizadas em Jar Test, para turbidez inicial da água bruta de 250 uT e para variados valores de concentração de coagulante (25 a 300 mg/L). Os resultados das eficiências foram avaliados em função da remoção de cor, turbidez e UV-254 nm.

5.4.1 Dosagem de proteína e composição centesimal da Semente de *Moringa Oleifera*

Neste item é apresentada as dosagens de proteína obtidas nas soluções coagulantes, preparadas com as sementes que ficaram sob refrigeração durante o tempo de análise, ou seja, dois anos.

Amostras das sementes armazenadas sob refrigeração eram retiradas sempre no dia da utilização, procedia-se a extração e logo após estes extratos eram avaliados em função do teor de proteína.

Para avaliação da composição centesimal, as sementes eram retiradas nos respectivos tempos de análise (zero, um e dois anos).

5.4.1.1 Dosagem de proteína no extrato de *Moringa oleifera* nos diferentes tempos de armazenamento

A Tabela 5.28 apresenta os teores de proteína na solução coagulante obtida com as sementes armazenadas em diferentes tempos.

Tabela 5.28. Dosagem de proteína na solução coagulante nos diferentes anos avaliados.

| Tempo | Teor de proteína (mg/L) |
|------------|-------------------------|
| Tempo zero | 1832,53 |
| Um ano | 804,75 |
| Dois anos | 390,86 |

Considerando a análise do teor de proteína para um mesmo lote de sementes armazenadas sob refrigeração durante 2 anos, observou-se que a concentração de proteína no extrato obtido da semente após um ano de armazenamento é 2,3 vezes inferior ao teor de proteína da semente no tempo zero.

Após dois anos de armazenamento observou-se uma redução ainda maior sendo que o teor de proteína é 4,7 vezes menor que se comparado ao teor no tempo zero e 2,1 vezes menor que o teor do extrato obtido a partir da semente com um ano de armazenamento.

Borba (2001) acredita que o mau estado de conservação das sementes de *Moringa oleifera* Lam é responsável pela degradação de sua proteína coagulante, provavelmente ocasionada por reações enzimáticas, atribuídas à presença de fungos e bactérias, ou ainda, devido às reações de oxi-reduções, as quais ocorrem entre a proteína e o vapor de água ou outros componentes da atmosfera, na presença da luz, provocando sua incapacidade de coagulação/floculação. Sendo assim, o ideal é sempre utilizar sementes colhidas recentemente para o tratamento de água.

5.4.1.2 Composição centesimal das sementes de *Moringa oleifera* sob armazenamento

A caracterização físico-química das sementes de MO, avaliadas em função do tempo de armazenamento, está apresentada na Tabela 5.29.

Tabela 5.29. Caracterização físico-química da semente de *Moringa Oleifera* nos diferentes tempos estudados.

| Parâmetro | Tempo 0 | 1 ano | 2 anos |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|
| Lipídios (%) | 33,98 ± 0,02 | 30,65 ± 0,02 | 30,51 ± 0,01 |
| Proteína (%) | 26,72 ± 0,01 | 26,40 ± 0,03 | 25,15 ± 0,02 |
| Umidade (%) | 8,49 ± 0,02 | 5,40 ± 0,02 | 5,23 ± 0,02 |
| Cinzas (%) | 2,56 ± 0,03 | 2,46 ± 0,04 | 2,45 ± 0,03 |
| Carboidratos* (%) | 28,25 ± 0,04 | 35,09 ± 0,03 | 35,66 ± 0,04 |

* Carboidratos por diferença

Analisando a Tabela 5.29, pode-se notar que há um ligeiro decréscimo nos valores de lipídios, proteínas, umidade e cinzas em função do tempo de armazenagem. Estes resultados nos levam a concluir que ao decorrer do tempo algumas alterações que ocorrem com as sementes podem influenciar em suas características físicas e químicas. Nota-se que ocorreu perda de água nas sementes ao longo do tempo de armazenamento.

Ao analisar o valor referente à porcentagem de proteína nota-se que entre o tempo zero e um ano de armazenamento não há grande variação e que o menor valor encontrado foi para a semente com dois anos de armazenamento. Comparando com os resultados do teor de proteína no extrato pode-se entender também o porquê o extrato obtido com as sementes armazenadas durante 2 anos, obteve menor dosagem protéica.

Mesmo não havendo grandes variações no teor de proteína da semente nos tempos zero e um ano de armazenamento após a obtenção do extrato pode-se observar uma redução na dosagem de proteínas, sendo que a extração não é tão eficiente ou ainda que provavelmente na semente tem-se uma mistura de proteínas que podem estar conjugadas, sendo mais difícil separá-las e conseqüentemente menor é a eficiência de extração. Este fato pode ser explicado, pois Ghebremichael et al. (2005) detectaram que o composto ativo não é uma proteína única, mas sim uma mistura de proteínas com características físicas similares.

Comparando os resultados da avaliação físico-química da semente com o resultado apresentado por Gallao (2006) observa-se uma diferença entre a composição de proteínas e lipídeos das amostras. Os autores avaliaram a composição química da semente fresca de MO proveniente do município de Camocim – CE, encontraram um percentual de 39,3% de proteínas e 18,80% de lipídios.

Considerando que as proteínas da semente são o agente coagulante, é válido citar que as alterações que ocorreram durante o armazenamento podem influenciar na eficiência sobre os processos de coagulação e floculação nos tratamentos de água.

5.4.1.3 Aplicação do extrato obtido com água e semente de *Moringa oleifera* armazenada no processo de coagulação/floculação/sedimentação

Neste item apresentam-se os resultados do processo de coagulação/floculação/sedimentação, quando da aplicação dos extratos obtidos com água e sementes de *Moringa Oleifera* em diferentes tempos de armazenamento. As sementes *in natura* proveniente de um mesmo lote foram armazenadas sob refrigeração

durante 2 anos e posteriormente analisadas em função da remoção de cor, turbidez e compostos com absorção em UV-254 nm, com o intuito de se verificar a eficiência do poder coagulante da semente em função do tempo de armazenamento. A caracterização da água bruta utilizada nesta etapa encontra-se no Anexo II.

As Figuras 5.28 a 5.30 apresentam os resultados, utilizando água para extração do composto ativo, avaliando a eficiência de remoção de cor, turbidez e compostos com absorção em UV-254nm, respectivamente.

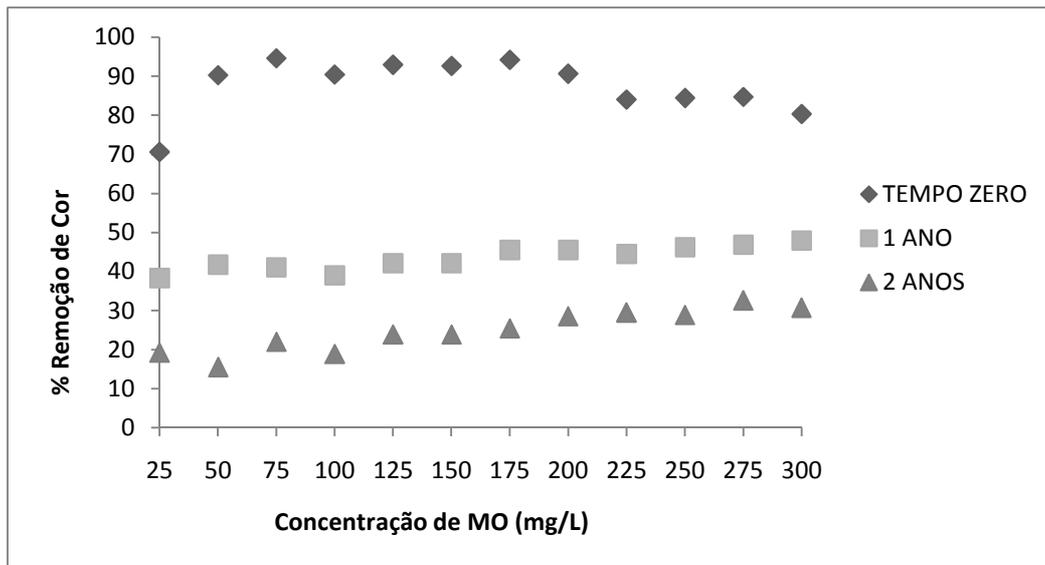


Figura 5.28. Porcentagem de remoção de cor nos diferentes tempos de armazenamento da semente de *Moringa oleifera*.

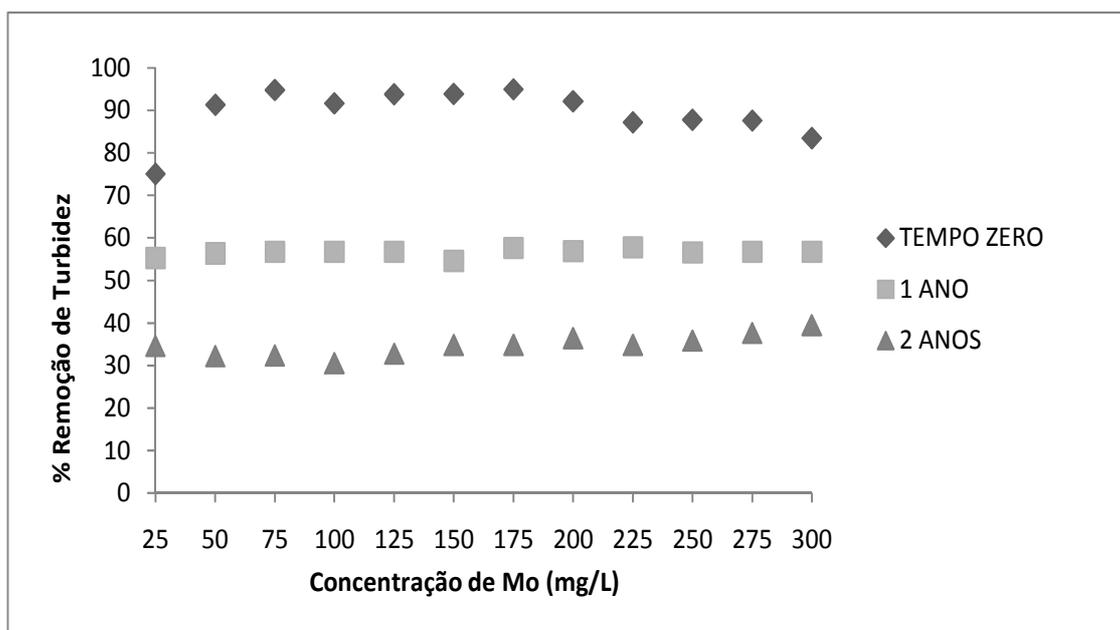


Figura 5.29. Porcentagem de remoção de turbidez nos diferentes tempos de armazenamento da semente de *Moringa oleifera*.

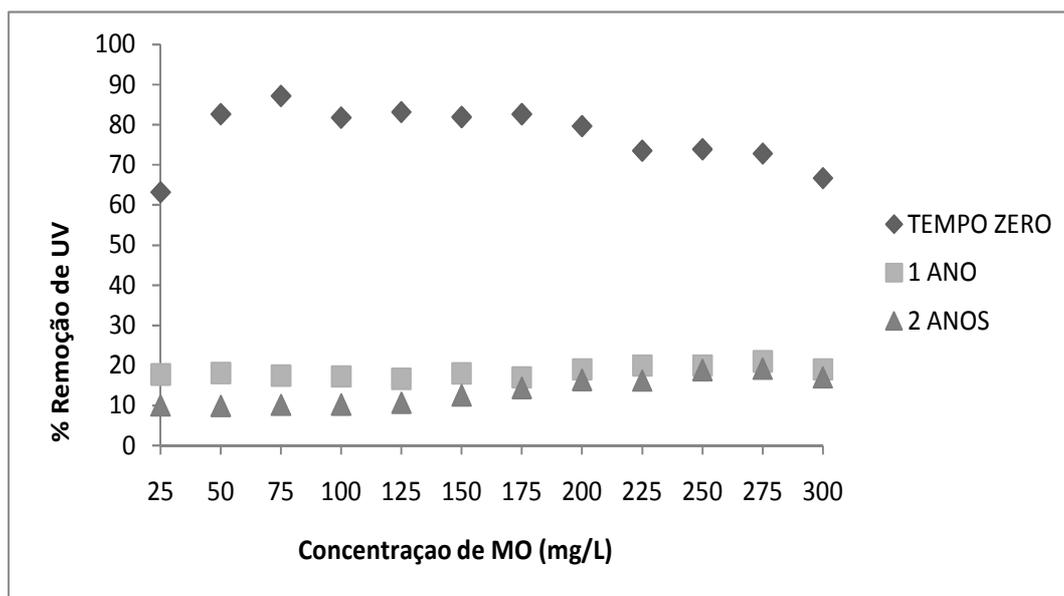


Figura 5.30. Porcentagem de remoção de compostos com absorção em UV-254nm nos diferentes tempos de armazenamento da semente de *Moringa oleifera*.

Conforme os dados apresentados na Figura 5.28, constatamos que as melhores eficiências de remoção de cor (aproximadamente 90%), ocorreram para a semente no tempo zero, seguida das sementes com 1 ano de armazenamento, com remoções próximas a 40% e por fim as sementes com 2 anos de armazenamento, sendo encontrados menores valores de remoção (em média 20%).

Observa-se ainda que não houve variações significativas em relação às diferentes concentrações utilizadas, sendo que ao que parece há uma redução na remoção, apenas na concentração de 25 mg/L para remoção de cor, turbidez e compostos com absorção em UV-254 nm.

Este fato já era esperado, e pode ser explicado pela redução nos teores de proteínas dos extratos obtidos das sementes em função do tempo de armazenamento.

Alguns autores (NDABIGENGESERE *et al.*, 1995; OKUDA *et al.*, 1999; KATAYON *et al.*, 2006) avaliaram a estabilidade das sementes de *Moringa* como coagulante realizando extração com solvente e avaliaram que este método de extração do composto ativo da semente de *Moringa Oleifera* apresenta, ainda, como desvantagem a estabilidade do coagulante. O extrato da semente perde seu poder coagulante com o tempo, devendo ser utilizado em até 3 dias, enquanto que a semente pode ser mantida em geladeira por vários meses sem alteração do seu poder coagulante.

Contudo, na literatura os valores encontrados se referem a menos de 1 ano de armazenamento.

Assim como observado para remoção de cor, os valores de remoção de turbidez foram decaindo em função do tempo de armazenamento das sementes. Sendo de aproximadamente 90% no tempo zero, 55% para 1 ano e 30% para 2 anos.

Katayon *et al.* (2006) afirmam que sementes de *Moringa oleifera* Lam armazenadas durante um mês apresentam melhores resultados de remoção de turbidez do que às guardadas por três e cinco meses. Os autores ainda estudaram a eficiência de coagulação de *Moringa oleifera* para o tratamento de águas, sob diferentes condições de estocagem da semente, a 3°C e 28°C, e tempos de 1, 3 e 5 meses. De acordo com os autores a eficiência de coagulação da *Moringa Oleifera* foi independente da temperatura de estocagem da semente, porém a eficiência de coagulação diminui com o aumento do tempo de estocagem.

As menores eficiências de remoção foram encontradas para o parâmetro de compostos com absorção em UV- 254 nm. Assim como nos outros parâmetros, as sementes no tempo zero de armazenamento apresentaram melhor eficiência (remoções variando de 60 a 86%). Após 1 ano de armazenamento esta eficiência caiu para aproximadamente 20% e com 2 anos obteve-se 10% de remoção.

Teófilo *et al.* (2003) avaliaram a germinação e demonstraram que sementes de *Moringa* acondicionadas em garrafas plásticas, conservam-se por seis meses, em ambiente natural, e por nove meses, em câmara fria. Os autores atribuem essa redução na qualidade fisiológica às transformações degenerativas características da deterioração.

Assim sendo, para se obter resultados promissores durante a pesquisa, recomenda-se utilizar sementes colhidas recentemente pois, as propriedades flocculantes das mesmas podem diminuir com o tempo.

5.4.2 Avaliação da Estabilidade dos Extratos de *Moringa oleifera* obtidos com água e KCl e armazenados sob refrigeração (5°C)

Este item apresenta os resultados referentes a aplicação dos extratos obtidos com água (SCA) e com sal (SC) e semente de *Moringa Oleifera*. Para se verificar a estabilidade ao longo do tempo de armazenamento, os extratos purificados ou soluções coagulantes extraídas com água e com KCl 1 Molar foram armazenados sob refrigeração e após foram avaliadas em ensaios de coagulação/floculação em até sete

meses. Os compostos ativos purificados foram mantidos sob refrigeração e a sua capacidade coagulante/floculante foi avaliada em ensaios com Jar Test.

É bom ressaltar que todas as análises foram realizadas até o momento em que era observada remoção de todos os parâmetros (cor, turbidez e compostos com absorção em UV-254 nm).

5.4.2.1 Dosagem de proteína no extrato de *Moringa Oleifera* com água nos diferentes tempos de armazenamento

A Tabela 5.30 apresenta os teores de proteína no extrato com água e *Moringa Oleifera* armazenado em diferentes tempos.

Tabela 5.30. Dosagem de proteína no extrato com água e *Moringa Oleifera* nos diferentes tempos avaliados.

| Tempo | Teor de proteína (mg/L) |
|--------------|-------------------------|
| Primeiro dia | 1832,53 |
| Segundo dia | 901,97 |
| Terceiro dia | 685,90 |
| Quarto dia | 554,75 |
| Quinto dia | 374,19 |

Nota-se um decréscimo nos valores de teor de proteína no extrato armazenado e analisado em função do tempo de armazenamento. Sendo que este teor é de 1832,53 mg/L no primeiro dia e no quinto dia ele foi reduzido em 4,9 vezes, podendo ocasionar, assim, perda na eficiência de coagulação.

5.4.2.2 Aplicação no processo de coagulação/floculação/sedimentação do extrato de *Moringa Oleifera* com água

As Figuras 5.31 a 5.33 apresentam as porcentagens de remoção de cor, turbidez e UV-254nm, respectivamente, para solução extraída com água em função do tempo de armazenamento, para uma turbidez inicial de 250 uT. A caracterização da água bruta utilizada nesta etapa encontra-se no Anexo II.

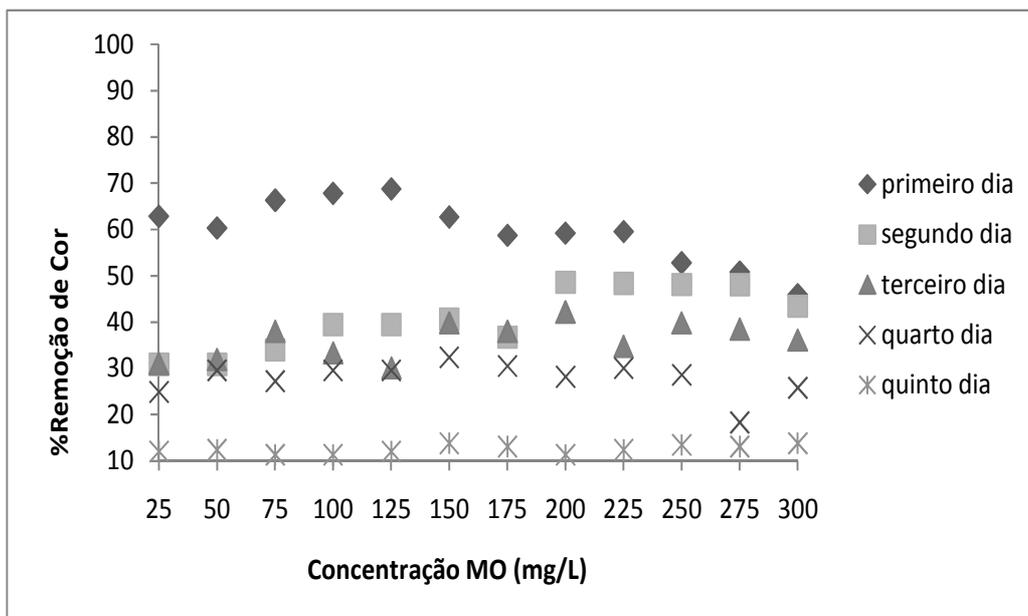


Figura 5.31. Porcentagem de remoção de cor nos diferentes tempos avaliados para o extrato obtido com água.

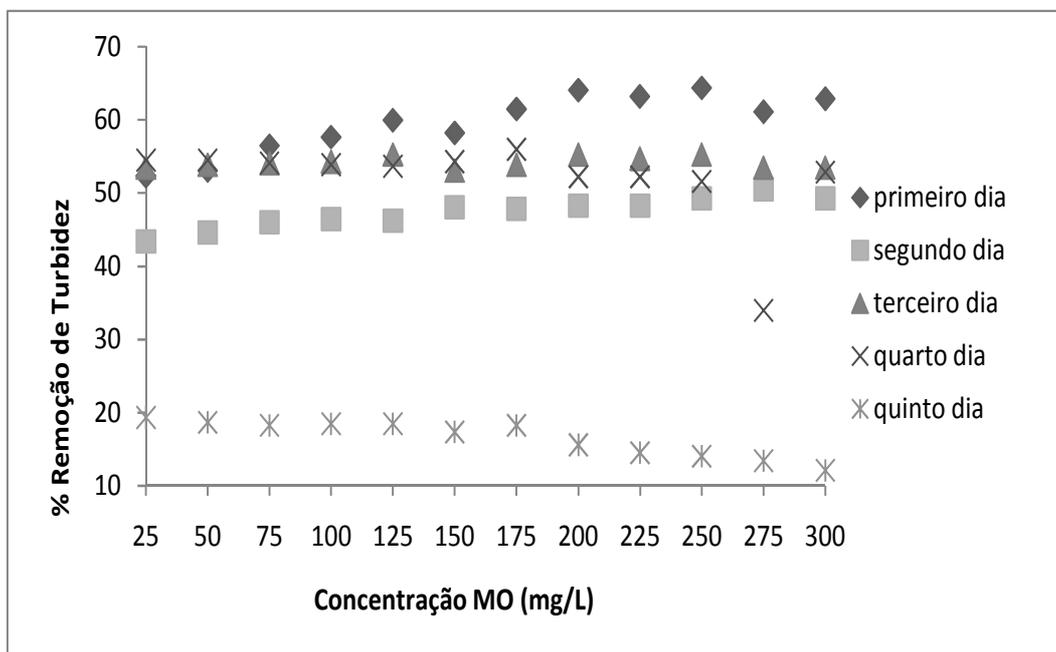


Figura 5.32. Porcentagem de remoção de turbidez nos diferentes tempos avaliados para o extrato obtido com água.

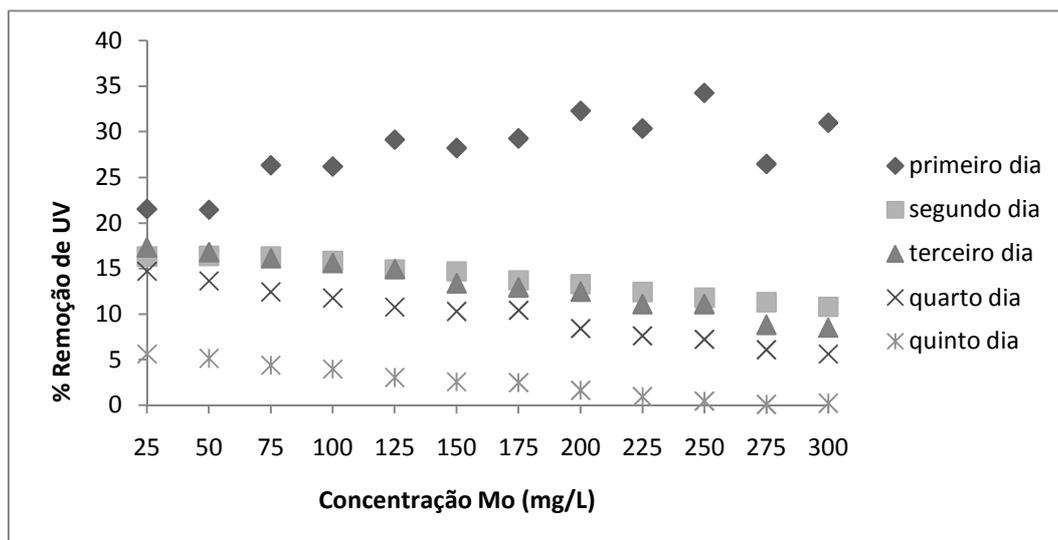


Figura 5.33. Porcentagem de remoção de compostos com absorção em UV-254 nm nos diferentes tempos avaliados para o extrato obtido com água.

Na Fig 5.31, observa-se que os maiores valores de remoção de cor encontrados foram para o primeiro e segundo dia de análise. Menores valores de remoção de cor foram encontrados no quinto dia, considerando que estes valores foram em torno de 10% optou-se por não dar continuidade aos ensaios para solução extraída com água, visto a baixa eficiência de remoção.

Nota-se ainda, analisando as Figuras 5.31 a 5.33 que parece não haver grande influência em relação à concentração de solução coagulante utilizada.

Resultados similares a esta pesquisa foram encontrados por Neto (2005). O autor cita que em clima seco e quente a solução padrão de *Moringa oleifera* Lam utilizada para o tratamento de água não tem estabilidade e, portanto, deve ser preparada diariamente. Entretanto, segundo o autor a uma temperatura de 18-19°C essa solução tem uma validade de três dias, e quando refrigerada a validade pode atingir até uma semana.

Assim como para remoção de cor, as maiores eficiências de remoção de turbidez encontradas foram nos primeiros dias de análise e as menores no quinto dia. Sendo que os valores encontrados neste último dia não foram expressivos tanto para remoção de cor quanto para remoção de turbidez.

Segundo Jahn (1988) a maior desvantagem da utilização do extrato aquoso de *Moringa oleifera* é que esta solução não pode ser armazenada por mais de 24 horas. Ndabigengesere et al. (1995) concluem que quando o extrato é armazenado por mais de

três dias pode ser desenvolvido odor desagradável devido a decomposição microbiana do material orgânico.

Para remoção de compostos com absorção em UV – 254 nm, foram observados menores valores de eficiência. É válido ressaltar que no quinto dia para altas concentrações a porcentagem de remoção de UV-254nm foi aproximadamente nula (0%). Fator este que foi determinante para a não continuidade nos ensaios com a solução extraída com água e armazenada sob refrigeração.

Segundo a literatura, o método de extração do composto ativo da semente de *Moringa* com solvente (Ndabigengesere *et al.*, 1995; Okuda *et al.*, 1999; Katayon *et al.*, 2006) apresenta, ainda, como desvantagem a estabilidade do coagulante. O extrato da semente perde seu poder coagulante com o tempo, devendo ser utilizado em até 3 dias, enquanto que a semente *in natura* pode ser mantida em geladeira por alguns meses sem alteração do seu teor coagulante.

Os resultados obtidos nesta etapa da pesquisa demonstram a necessidade de se investigar métodos de conservação do extrato obtido com sementes de *Moringa Oleifera*, sendo que em geral no segundo dia de armazenamento já houve redução nas remoções dos parâmetros avaliados.

5.4.2.3 Dosagem de proteína no extrato de *Moringa oleifera* com KCl nos diferentes tempos de armazenamento

A Tabela 5.31 apresenta os teores de proteína no extrato com KCl e *Moringa oleifera* armazenado em diferentes tempos.

Tabela 5.31. Dosagem de proteína no extrato com KCl e *Moringa oleifera* nos diferentes tempos avaliados.

| Tempo | Teor de proteína (mg/L) |
|------------|-------------------------|
| Tempo zero | 4819,64 |
| Mês 1 | 4682,01 |
| Mês 2 | 3818,64 |
| Mês 3 | 3624,19 |
| Mês 4 | 3582,53 |
| Mês 5 | 2611,28 |
| Mês 5 | 1187,00 |
| Mês 7 | 980,77 |

Por meio da Tabela 5.31, pode se observar um decréscimo nos valores de teor de proteína no extrato armazenado e analisado em função do tempo de armazenamento. Sendo que não há grandes variações entre o tempo zero e o quinto mês. O menor valor de teor protéico obtido (980,77 mg/L) foi para o último mês de análise (mês 7).

5.4.2.4 Aplicação no processo de coagulação/floculação/sedimentação do extrato de *Moringa oleifera* com solução salina (KCl)

As Figuras 5.34 a 5.36 apresentam as porcentagens de remoção de cor, turbidez e UV-254nm, respectivamente, para solução extraída com solução KCl 1M em função do tempo de armazenamento, para uma turbidez inicial de 250 uT.

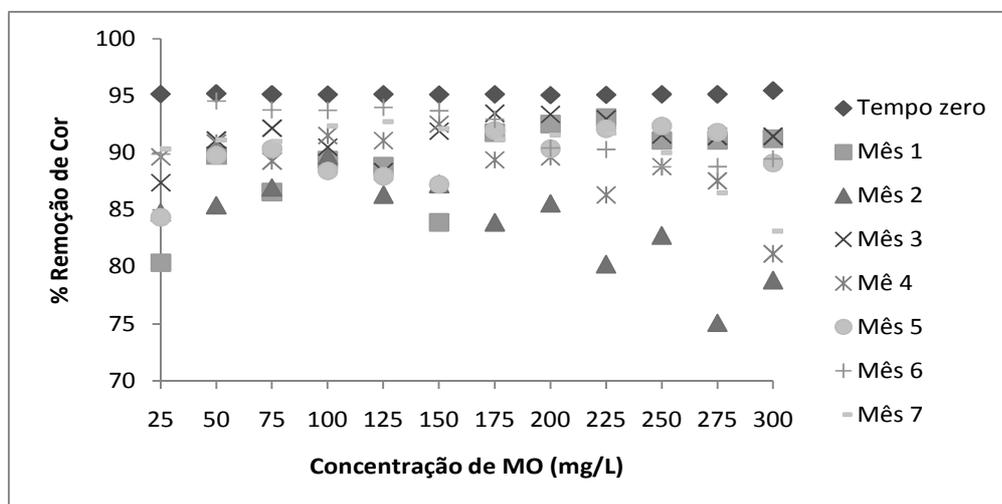


Figura 5.34. Porcentagem de remoção de cor nos diferentes tempos avaliados para extração com KCl 1 M.

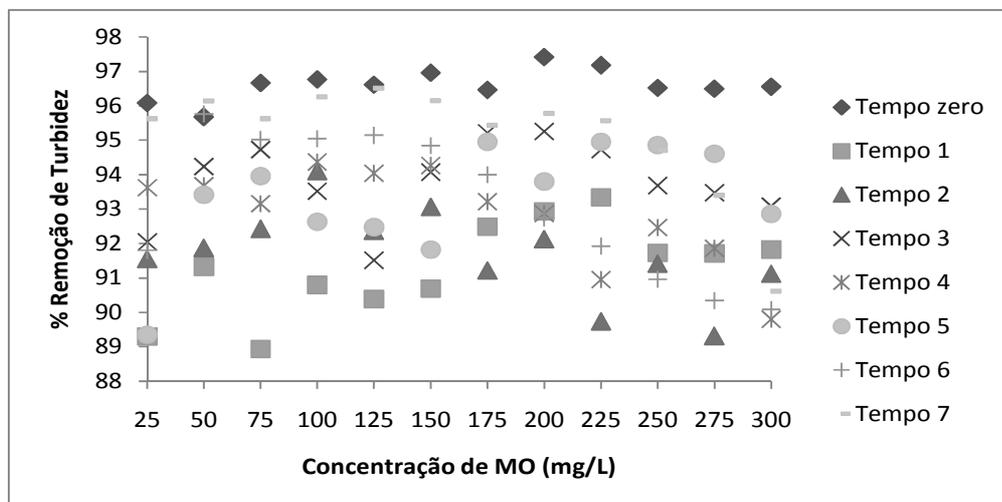


Figura 5.35. Porcentagem de remoção de turbidez nos diferentes tempos avaliados para extração com KCl 1 M.

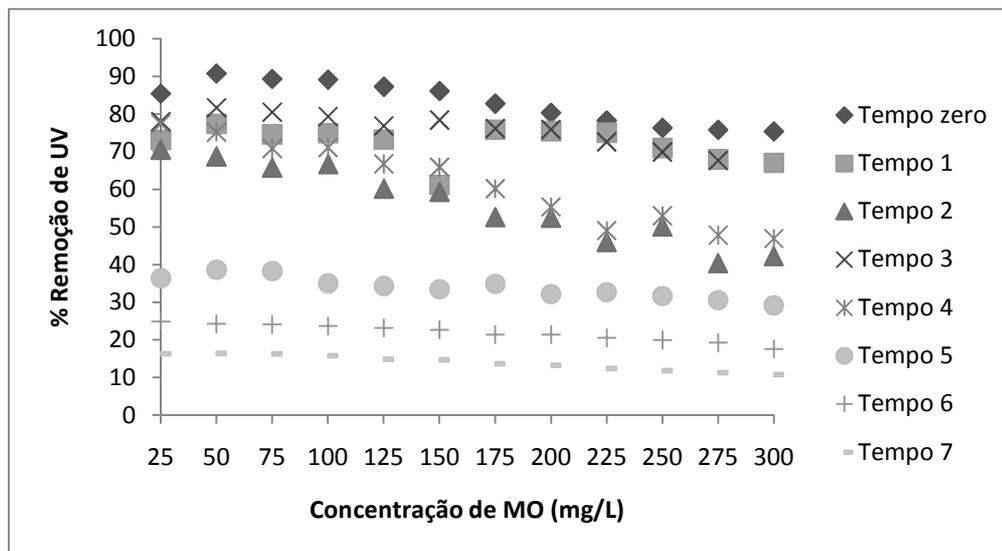


Figura 5.36. Porcentagem de remoção de UV-254 nm nos diferentes tempos avaliados para extração com KCl 1 M.

Por meio da Figura 5.34, observa-se que as melhores porcentagens de remoção de cor (aproximadamente 95%) foram para o extrato no tempo zero. Não houve grandes diferenças nos tempos de armazenamento de 1, 3, 4, 5, 6 e 7 meses, sendo a faixa de remoção de 80 a 95%.

No tempo de armazenamento de 2 meses, ocorreu uma diminuição de remoção de cor para as maiores concentrações encontrando assim valores de remoção próximos a 75%.

Nota-se ainda que na maioria dos casos, apenas no tempo zero parece não haver grandes oscilações em relação à porcentagem de remoção em função da concentração de coagulante. Para remoção de cor e turbidez observa-se que estas oscilações ocorrem com mais frequência do que na remoção de compostos com absorção em UV- 254 nm. Em geral, para alguns tempos avaliados parece que as remoções diminuem com o aumento da concentração de coagulante, este fato é nítido quando se observa a Figura 5.36, para remoção de compostos com absorção em UV- 254 nm.

Assim como para remoção de cor, na remoção de turbidez as melhores eficiências de remoção foram para o tempo zero, sendo encontradas remoções de aproximadamente 97%. Para os meses 1 a 7 as remoções variaram de 89 a 96%. Sendo

que para este parâmetro a solução armazenada não perdeu sua eficácia no tempo estudado (7 meses).

Analisando a Figura 5.36, observa-se que o fator determinante para análise dos ensaios foi a remoção de compostos com absorção em UV- 254 nm. No sétimo mês de armazenamento observaram-se baixos valores de remoção estando estes entre 10 e 20%. Não sendo assim avaliado como eficaz a utilização desta solução. O que pode ter ocorrido é que a solução coagulante sofreu alterações em sua composição durante o tempo de armazenamento, ou ainda pode ter acontecido algum tipo de contaminação microbiológica.

Este fato pode ser explicado, pois de acordo com Frederico *et al.* (1999) 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, que são originárias da degradação biológica de resíduos animais e vegetais e da atividade sintética de microorganismos.

Avaliando a extração com solução salina, nota-se uma relativa melhora no tempo de armazenamento do extrato se comparada à extração com água. Sendo que as menores remoções dos parâmetros estudados ocorreram apenas a partir do mês cinco. Em geral, ao que parece, não foi possível observar uma relação linear entre a porcentagem de remoção e a concentração de coagulante.

5.5 Resultados do Estudo Cinético em processos de coagulação/floculação

Neste item são apresentados os resultados referentes ao estudo cinético no processo de coagulação/floculação. É válido ressaltar que experimentos cinéticos estudam a velocidade na qual as reações ocorrem, quer dizer como a concentração de algumas espécies molecular muda em função do tempo. Neste experimento foram estudados diferentes valores de turbidez inicial (150, 250, 350, 450 e 550 uT) para os pontos ótimos encontrados na análise estatística, ou seja para extração com solução salina (KCl 1 M), conforme descrito anteriormente na Tabela 5.9.

A Figura 5.37 apresenta um gráfico de $-\ln(C/C_0)$ em função do tempo, utilizando o método integral, verificou-se a ordem da reação para remoção dos parâmetros de cor, turbidez e compostos com absorção em UV- 254 nm, para turbidez inicial de 150 uT e concentração de coagulante de 100 mg/L.

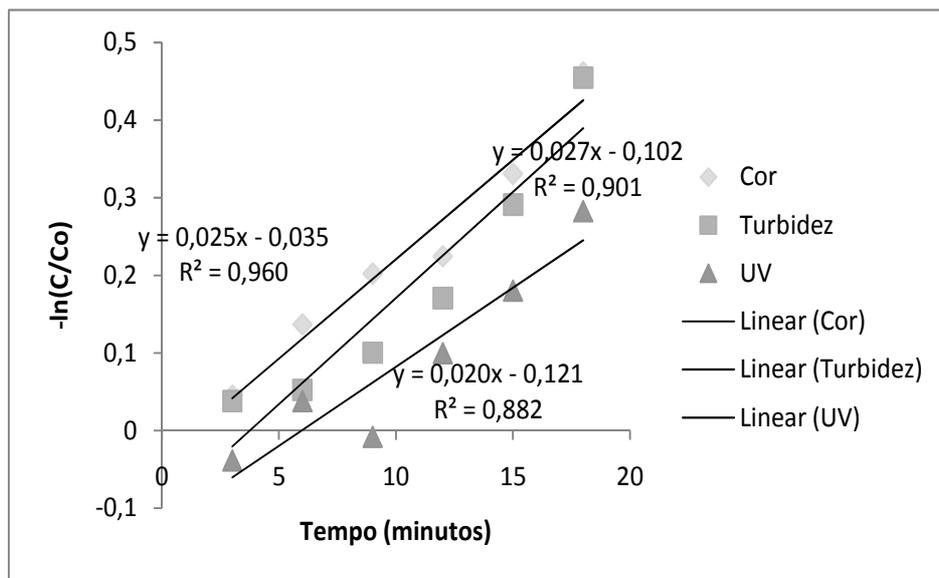


Figura 5.37. Variação de $(-\ln C/C_0)$ em função do tempo para tubidez inicial 150 uT.

Dessa maneira, de acordo com a Figura 5.37, a reação é de primeira ordem ($n = 1$) com k igual a $0,027 \text{ min}^{-1}$ para turbidez, $0,026 \text{ min}^{-1}$ para cor e $0,020 \text{ min}^{-1}$ para UV, significando que a velocidade de sua reação é proporcional à concentração.

Silva e Matos (2008) avaliaram a cinética de dispersões de *Moringa Oleifera* e encontraram para um tempo de operação de 40 minutos valores de k iguais a $0,06 \text{ min}^{-1}$ para cor e $0,061 \text{ min}^{-1}$ para turbidez. Os autores ainda relataram que há correlação entre as constantes de cor e turbidez.

O tempo de meia vida está diretamente relacionado com a constante da velocidade para uma reação de primeira ordem. Assim o tempo de meia vida para remoção de cor foi de 25,66 minutos, para turbidez 26,65 minutos e para compostos com absorção em UV-254 nm de 34,65 min.

A Figura 5.38 apresenta o gráfico de $-\ln(C/C_0)$ em função do tempo, para turbidez inicial de 250 uT e concentração de coagulante de 125 mg/L. Avaliou-se as concentrações iniciais e finais dos parâmetros de cor, turbidez e compostos com absorção em UV- 254 nm.

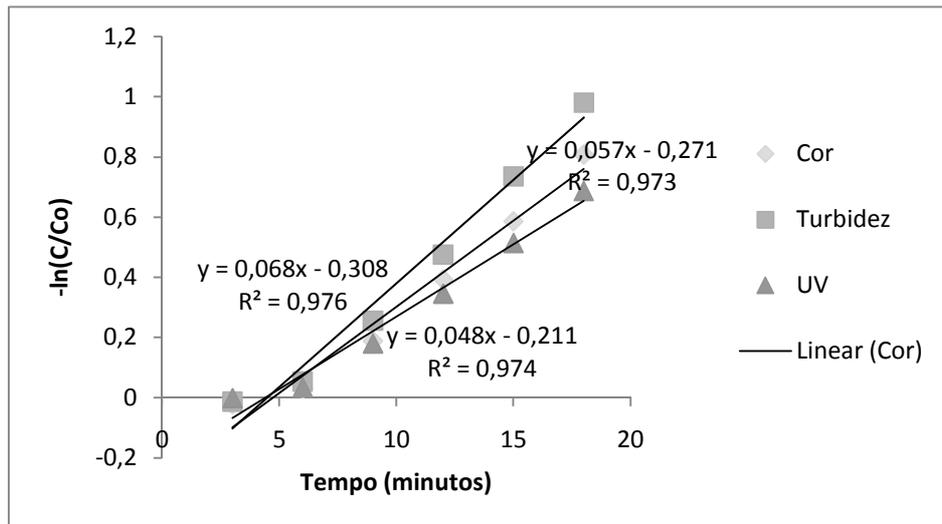


Figura 5.38. Variação de $(-\ln C/C_0)$ em função do tempo para tubidez inicial 250 uT.

Por meio da Figura 5.38 observa-se que os valores de constante de velocidade (k) foram de $0,069 \text{ min}^{-1}$ para turbidez, $0,057 \text{ min}^{-1}$ para cor e $0,048 \text{ min}^{-1}$ para UV. O tempo de meia vida está diretamente relacionado com a constante da velocidade para uma reação de primeira ordem.

Assim o tempo de meia vida para remoção de cor foi de 12,16 minutos, para turbidez 10,34 minutos e para compostos com absorção em UV-254 nm de 14,44 min. Destaca-se que assim como para turbidez inicial de 150 uT o maior tempo de meia vida foi para remoção de UV-254 nm.

Santana et al. (2009) aplicaram solução de Moringa extraída com NaCl em amostras de águas oleosas produzidas (sintéticas) e observaram para remoção de TOG (teor de óleos e graxas) o valor de k foi de $0,0487 \text{ min}^{-1}$ e o tempo de meia vida de 14,23 min.

A Figura 5.39 apresenta o gráfico de $-\ln(C/C_0)$ em função do tempo, para turbidez inicial de 350 uT e concentração de coagulante de 150 mg/L. Avaliou-se as concentrações iniciais e finais dos parâmetros de cor, turbidez e compostos com absorção em UV- 254 nm.

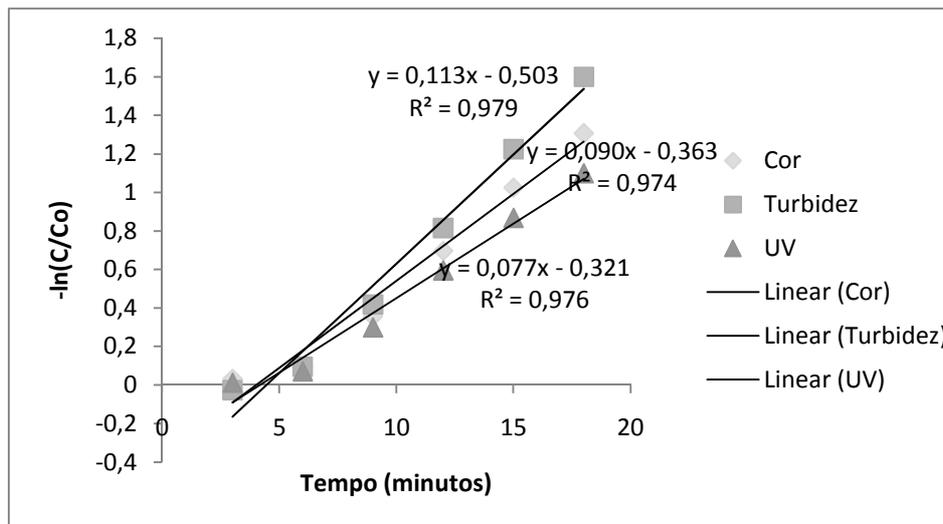


Figura 5.39. Variação de $(-\ln C/C_0)$ em função do tempo para turbidez inicial 350 uT.

Para turbidez inicial de 350 uT, observa-se que os valores da constante de velocidade de reação (k) foram de $0,090 \text{ min}^{-1}$ para cor, $0,113 \text{ min}^{-1}$ para turbidez e $0,077 \text{ min}^{-1}$ para UV. Sendo assim, o tempo de meia vida para remoção de cor foi de 7,70 minutos, para remoção de turbidez de 6,13 minutos e para remoção de UV- 254 nm de 9,00 minutos.

A Figura 5.40 apresenta o gráfico de $-\ln(C/C_0)$ em função do tempo, para turbidez inicial de 450 uT e concentração de coagulante de 175 mg/L. Avaliou-se as concentrações iniciais e finais dos parâmetros de cor, turbidez e compostos com absorção em UV- 254 nm.

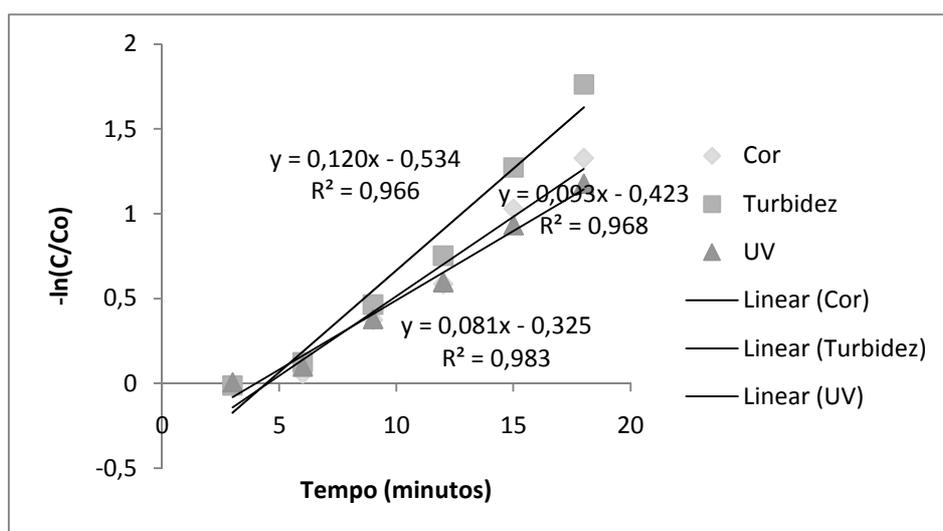


Figura 5.40. Variação de $(-\ln C/C_0)$ em função do tempo para turbidez inicial 450 uT.

Por meio da Figura 5.40 observa-se que os valores de constante de velocidade (k) foram de $0,094 \text{ min}^{-1}$ para cor, $0,120 \text{ min}^{-1}$ para turbidez e $0,082 \text{ min}^{-1}$ para Uv. O tempo de meia vida está diretamente relacionado com a constante da velocidade para uma reação de primeira ordem. Assim o tempo de meia vida para remoção de cor foi de 7,37 minutos, para turbidez 5,77 minutos e para compostos com absorção em UV-254 nm de 8,45 min. Assim como para os outros casos avaliados, a remoção de UV- 254 nm apresentam maior tempo de meia vida, seguida da remoção de cor e por ultimo a remoção de turbidez.

A Figura 5.41 mostra o gráfico de $-\ln(C/C_0)$ em função do tempo, para turbidez inicial de 550 uT e concentração de coagulante de 175 mg/L. Avaliou-se as concentrações iniciais e finais dos parâmetros de cor, turbidez e compostos com absorção em UV- 254 nm.

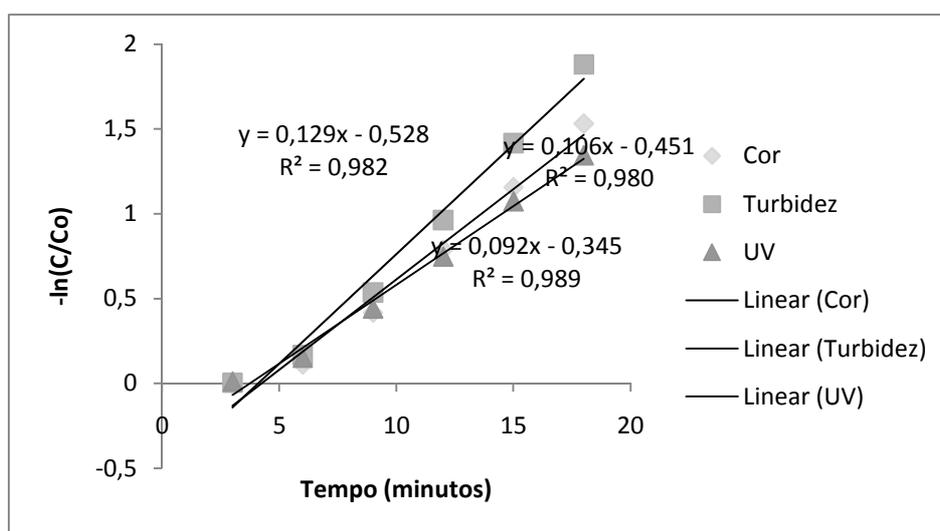


Figura 5.41. Variação de $(-\ln C/C_0)$ em função do tempo para turbidez inicial 550 uT.

De acordo com a Figura 5.41, k é igual a $0,106 \text{ min}^{-1}$ para cor, $0,129 \text{ min}^{-1}$ para turbidez e $0,090 \text{ min}^{-1}$ para UV, significando que a velocidade de sua reação é proporcional à concentração. O tempo de meia vida está diretamente relacionado com a constante da velocidade para uma reação de primeira ordem. Assim o tempo de meia vida para remoção de cor foi de 6,54 minutos, para turbidez 5,37 minutos e para compostos com absorção em UV-254 nm de 7,70 min.

A Tabela 5.32 apresenta um resumo dos valores da constante de velocidade cinética e do tempo de meia vida encontrados em cada caso avaliado.

Tabela 5.32. Valores da constante de velocidade cinética e do tempo de meia vida para cada valor de turbidez inicial avaliado.

| <i>Turbidez inicial (uT)</i> | <i>Constante cinética (min⁻¹)</i> | | | <i>Tempo de meia vida (minutos)</i> | | |
|------------------------------|--|----------|-------|-------------------------------------|----------|-------|
| | Cor | Turbidez | UV | Cor | Turbidez | UV |
| 150 | 0,026 | 0,027 | 0,020 | 25,66 | 26,65 | 34,65 |
| 250 | 0,057 | 0,067 | 0,048 | 12,16 | 10,34 | 14,44 |
| 350 | 0,090 | 0,113 | 0,077 | 7,70 | 6,13 | 9,00 |
| 450 | 0,094 | 0,120 | 0,082 | 7,37 | 5,77 | 8,45 |
| 550 | 0,106 | 0,129 | 0,090 | 6,54 | 5,37 | 7,70 |

Por meio da Tabela 5.32 nota-se que quanto maior o valor da turbidez inicial maior é o valor da constante cinética (k), ou seja, mais efetiva é a reação que está ocorrendo e conseqüentemente menor o tempo de meia vida do processo de coagulação/floculação. Sendo assim, como já era esperado maior deverá ser o tempo requerido no tratamento de águas de baixa cor e turbidez, implicando em maiores gastos em uma estação de tratamento de água.

Sendo o tempo de meia vida definido como o tempo em que a atividade de um determinado elemento seja reduzida à metade da atividade inicial, pode-se concluir que os maiores tempos de meia vida encontrados são no processo de remoção de compostos com absorção em UV- 254 nm e os menores são para remoção de turbidez. Tornando clara a idéia de que as remoções de cor e turbidez são mais acentuadas mesmo em pequenos tempos enquanto os compostos com absorção em UV- 254 nm são mais difíceis e demandam mais tempo para uma remoção efetiva.

5.6 Análise Matemática dos dados experimentais obtidos no processo de filtração por membranas

Nesta etapa são apresentados os resultados da aplicação da modelagem dos dados com o modelo de Hermia (1982) para as membranas 0,1 µm e 0,2 µm – monocanal, nas pressões de 1 e 2 bar, para águas de baixa e alta cor e turbidez.

5.6.1 Modelagem para membrana 0,1 μm - Água de baixa cor e turbidez nas pressões de 1 e 2 bar

As Figuras 5.42 e 5.43 apresentam o ajuste dos dados experimentais para água de baixa cor e turbidez nas pressões de 1 e 2 bar, respectivamente, com o modelo de Hermia (1982). Os dados foram ajustados por equações lineares e os valores de R^2 são apresentados nas Tabelas 5.33 e 5.34 nas pressões de 1 e 2 bar, respectivamente. Valores de R^2 mais próximos a 1,00 correspondem a um melhor ajuste ao modelo.

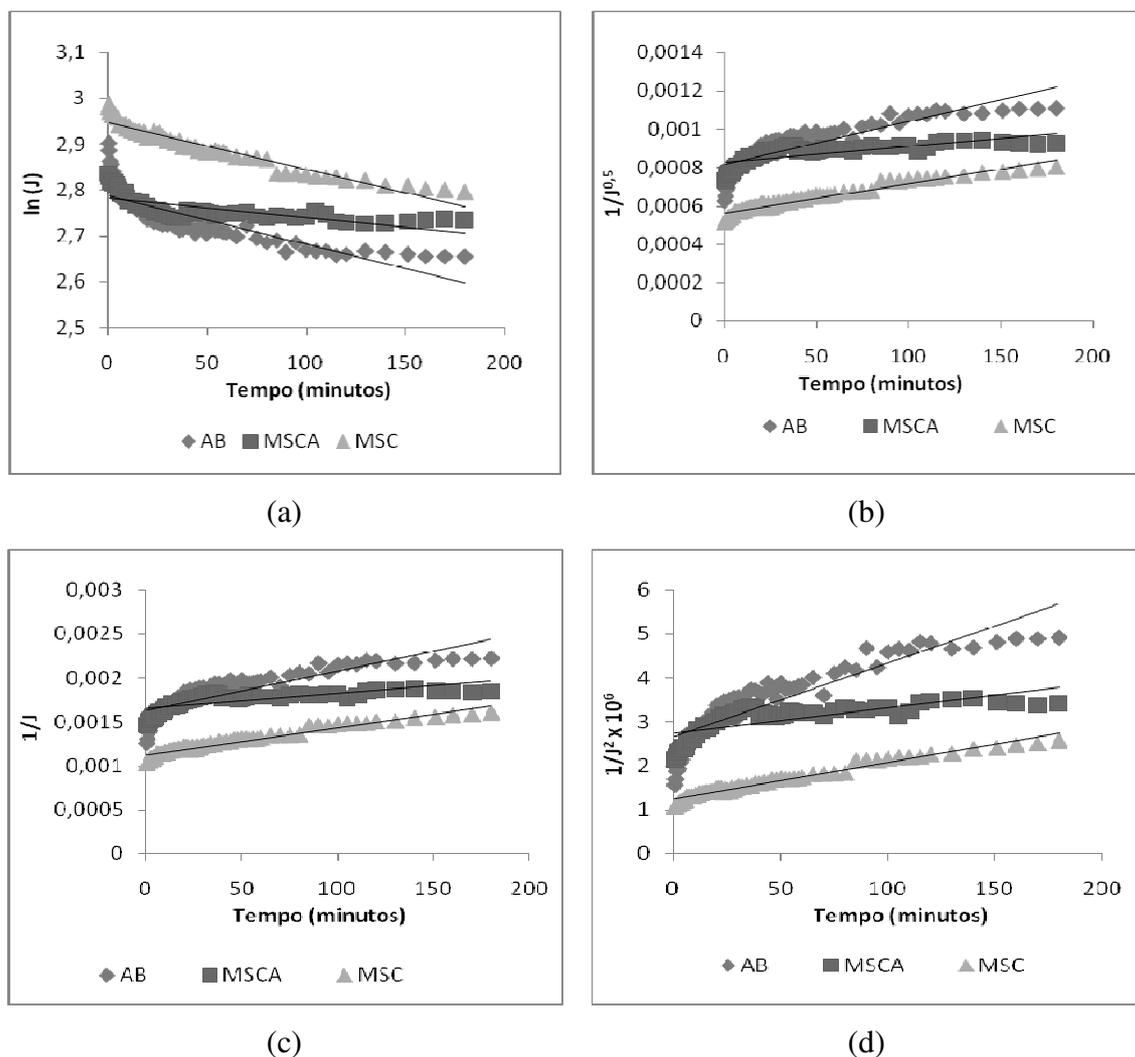


Figura 5.42. Ajuste dos dados experimentais a 1 bar para a membrana de 0,1 μm – monocanal e água de baixa cor e turbidez: (a) Modelo de bloqueio completo dos poros; (b) Modelo de bloqueio padrão dos poros; (c) Modelo de bloqueio intermediário dos poros e (d) Modelo de formação de torta.

Tabela 5.33. Valores de R^2 para cada modelo e experimento a 1 bar, membrana 0,1 μm e água de baixa cor e turbidez.

| Experimento | Bloqueio completo | Bloqueio padrão | Bloqueio intermediário | Formação de torta |
|--------------------------|-------------------|-----------------|------------------------|-------------------|
| Água Bruta (AB) | 0,679 | 0,743 | 0,743 | 0,799 |
| Extração com água (MSCA) | 0,487 | 0,507 | 0,507 | 0,526 |
| Extração com sal (MSC) | 0,922 | 0,948 | 0,948 | 0,966 |

Os valores apresentados na Tabela 5.33 indicam que, em geral, os ajustes são da mesma ordem para cada tipo de mecanismo de fouling em cada experimento. Isto revela o fato de que de forma geral os mecanismos devem estar influenciando a ocorrência de fouling. Os melhores ajustes foram obtidos para filtração utilizando solução salina de moringa (MSC).

De fato, nas filtrações de água bruta ou de água pré-tratada com solução aquosa de *Moringa* tem-se uma queda brusca do fluxo no início da filtração com membranas. Com isso, não é possível ajustar satisfatoriamente o conjunto completo de dados experimentais a um modelo. De qualquer maneira, para todos os experimentos, o melhor ajuste foi obtido com o modelo de formação de torta.

Salahi *et al.* (2010) utilizaram o modelo de Hermia para investigar os mecanismos envolvidos na ultrafiltração de águas residuárias. Os resultados mostraram que o melhor ajuste aos dados experimentais corresponde ao modelo de formação de torta seguido pelo modelo intermediário de bloqueio para todas as condições experimentais testadas. Estes resultados corroboram com os obtidos no presente trabalho.

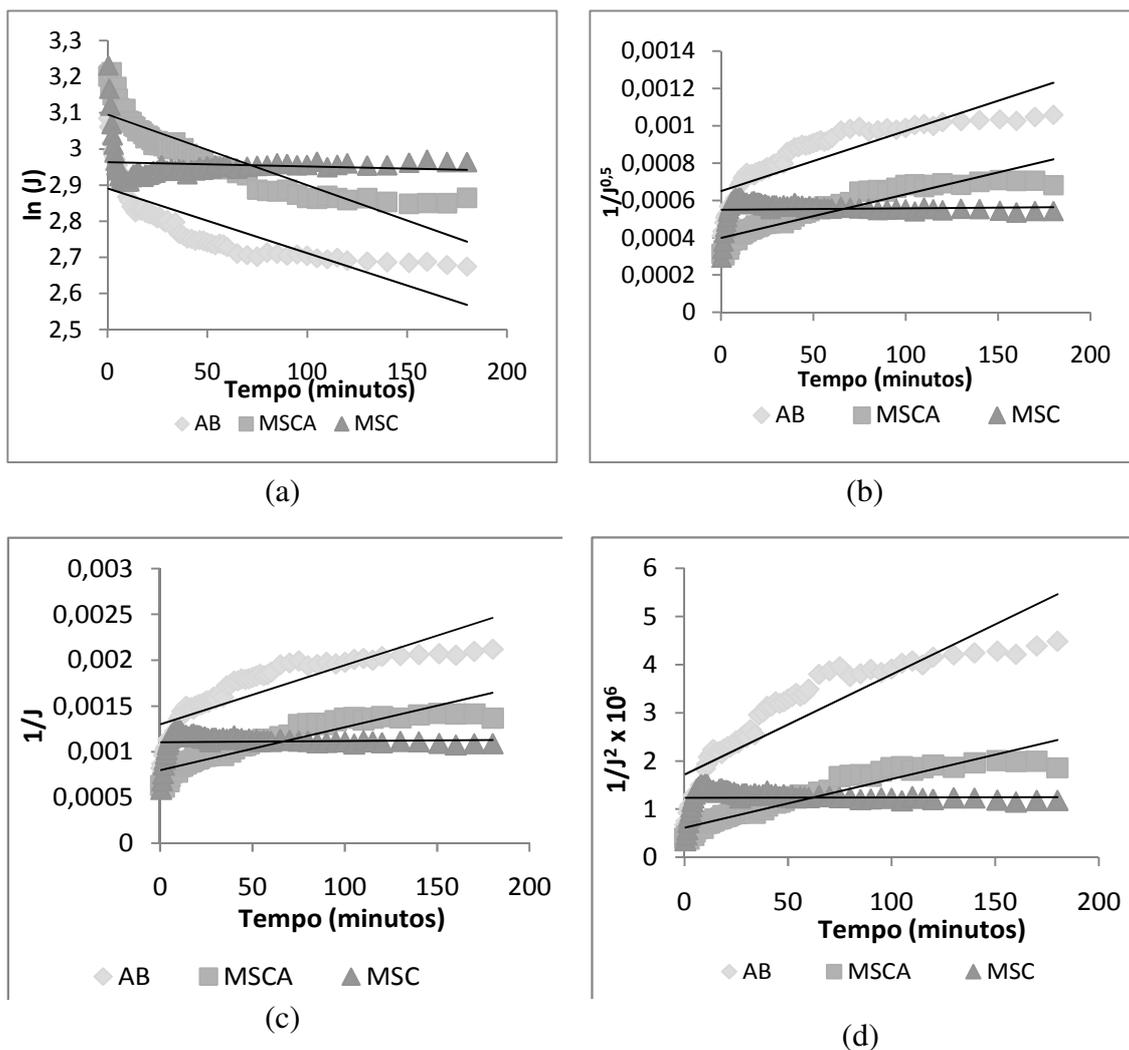


Figura 5.43. Ajuste dos dados experimentais a 2 bar para a membrana de 0,1 μ m – monocanal e água de baixa cor e turbidez: (a) Modelo de bloqueio completo dos poros; (b) Modelo de bloqueio padrão dos poros; (c) Modelo de bloqueio intermediário dos poros e (d) Modelo de formação de torta.

Tabela 5.34. Valores de R^2 para cada modelo e experimento a 2 bar, membrana 0,1 μ m e água de baixa cor e turbidez.

| Experimento | Bloqueio completo | Bloqueio padrão | Bloqueio intermediário | Formação de torta |
|--------------------------|-------------------|-----------------|------------------------|-------------------|
| Água Bruta (AB) | 0,614 | 0,712 | 0,712 | 0,794 |
| Extração com água (MSCA) | 0,786 | 0,859 | 0,859 | 0,908 |
| Extração com sal (MSC) | 0,010 | 0,003 | 0,003 | 0,000 |

Para pressão de 2 bar, de acordo com os resultados apresentados na Tabela 5.34 o melhor ajuste assim como para pressão de 1 bar foi obtido para o modelo de formação de torta. Para todos os tipos de entupimento a solução aquosa de moringa (MSCA) apresentou melhores valores de R^2 . Nesta pressão superior, 2 bar, não foi possível ajustar os dados de filtração com solução salina de *Moringa* em nenhum dos casos de fouling. Isso evidencia os fluxos maiores obtidos neste caso. Além disso, observa-se dois comportamentos distintos ao longo de toda a filtração, sendo um declínio mais acentuado no início da filtração e uma tendência subsequente à estabilização do fluxo. Ainda, vale ressaltar que neste caso de estudo tem-se uma membrana mais aberta com uma água mais limpa o que reduz os fenômenos de fouling.

De acordo com Vela *et al.* (2008), embora empíricos, os modelos numéricos são muito precisos. Modelos teóricos podem parcialmente contribuir para a compreensão dos fenômenos de “*fouling*”. No entanto, os modelos totalmente teóricos encontrados na literatura não conseguem prever com precisão o declínio do fluxo de permeado com o tempo, sem utilizar os dados experimentais para estimar pelo menos um dos seus parâmetros. Portanto, os modelos semi-empíricos, cujos parâmetros têm um significado físico representam uma solução adequada para atingir a predição exata da queda do fluxo de permeado na ultrafiltração e explicar os mecanismos de fouling, ao mesmo tempo.

5.6.2 Modelagem para membrana 0,1 μm – Água de alta cor e turbidez nas pressões de 1 e 2 bar

As Figuras 5.44 e 5.45 apresentam o ajuste dos dados experimentais para água de alta cor e turbidez nas pressões de 1 bar e 2 bar, respectivamente, com o modelo de Hermia (1982). Os dados foram ajustados por equações lineares e os valores de R^2 são apresentados nas Tabelas 5.35 e 5.36 para as pressões de 1 e 2 bar, respectivamente.

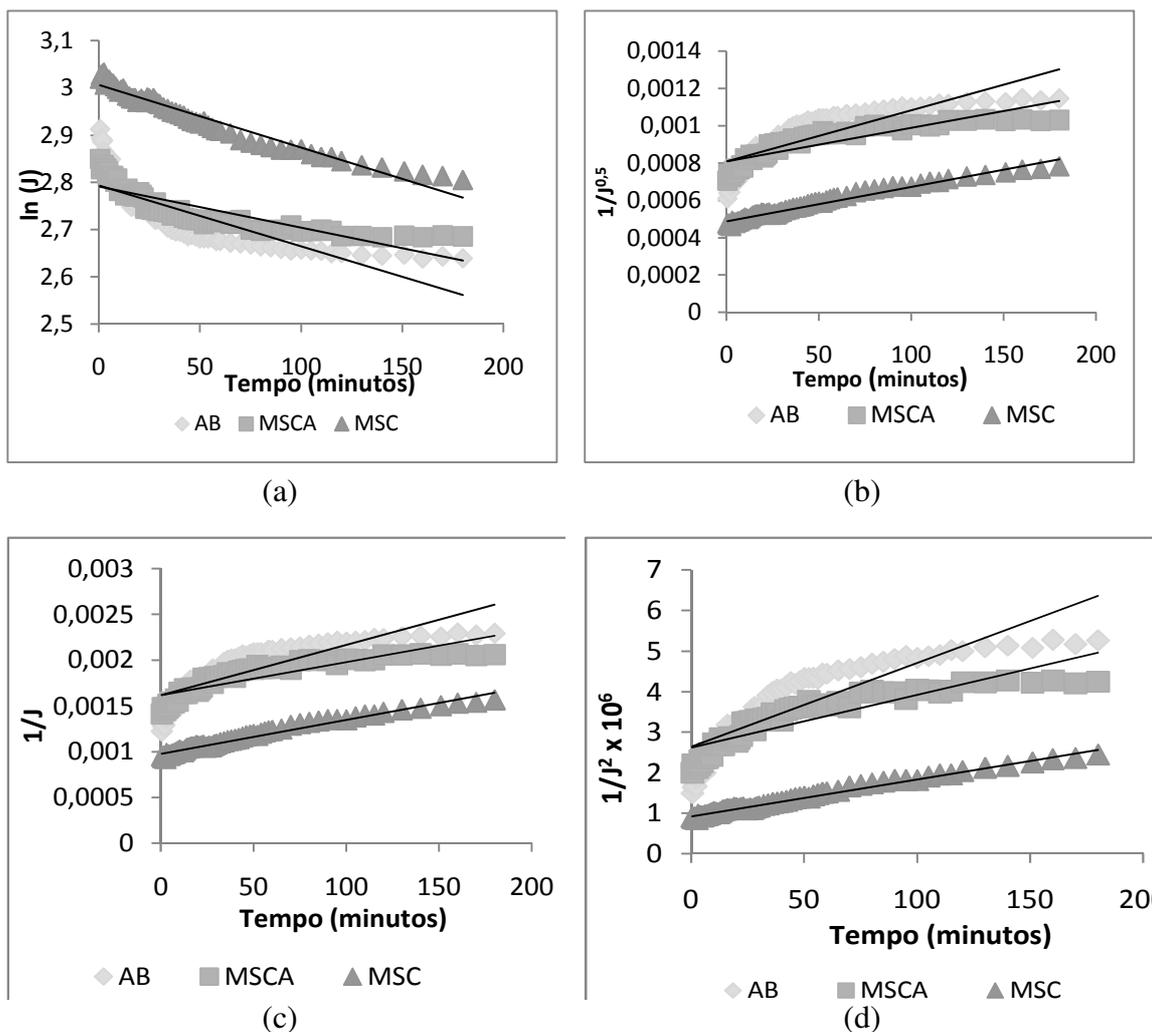


Figura 5.44. Ajuste dos dados experimentais a 1 bar para a membrana de $0,1\mu\text{m}$ – monocanal e água de alta cor e turbidez: (a) Modelo de bloqueio completo dos poros; (b) Modelo de bloqueio padrão dos poros; (c) Modelo de bloqueio intermediário dos poros e (d) Modelo de formação de torta.

Tabela 5.35. Valores de R^2 para cada modelo e experimento a 1 bar, membrana $0,1\mu\text{m}$ e água de alta cor e turbidez.

| Experimento | Bloqueio completo | Bloqueio padrão | Bloqueio intermediário | Formação de torta |
|--------------------------|-------------------|-----------------|------------------------|-------------------|
| Água Bruta (AB) | 0,647 | 0,710 | 0,710 | 0,767 |
| Extração com água (MSCA) | 0,710 | 0,746 | 0,746 | 0,780 |
| Extração com sal (MSC) | 0,951 | 0,974 | 0,974 | 0,989 |

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 5.35 o melhor ajuste foi obtido para formação de torta na filtração com solução salina de *Moringa Oleifera* (MSC). Sendo que, em geral esta solução apresentou os melhores valores de R^2 .

Os valores de R^2 foram idênticos para os modelos de bloqueio padrão e intermediário. Para todos os casos, o melhor ajuste foi obtido para solução extraída com sal (MSC). O comportamento encontrado neste caso foi similar ao encontrado para filtração de água de baixa cor e turbidez na pressão de 1 bar.

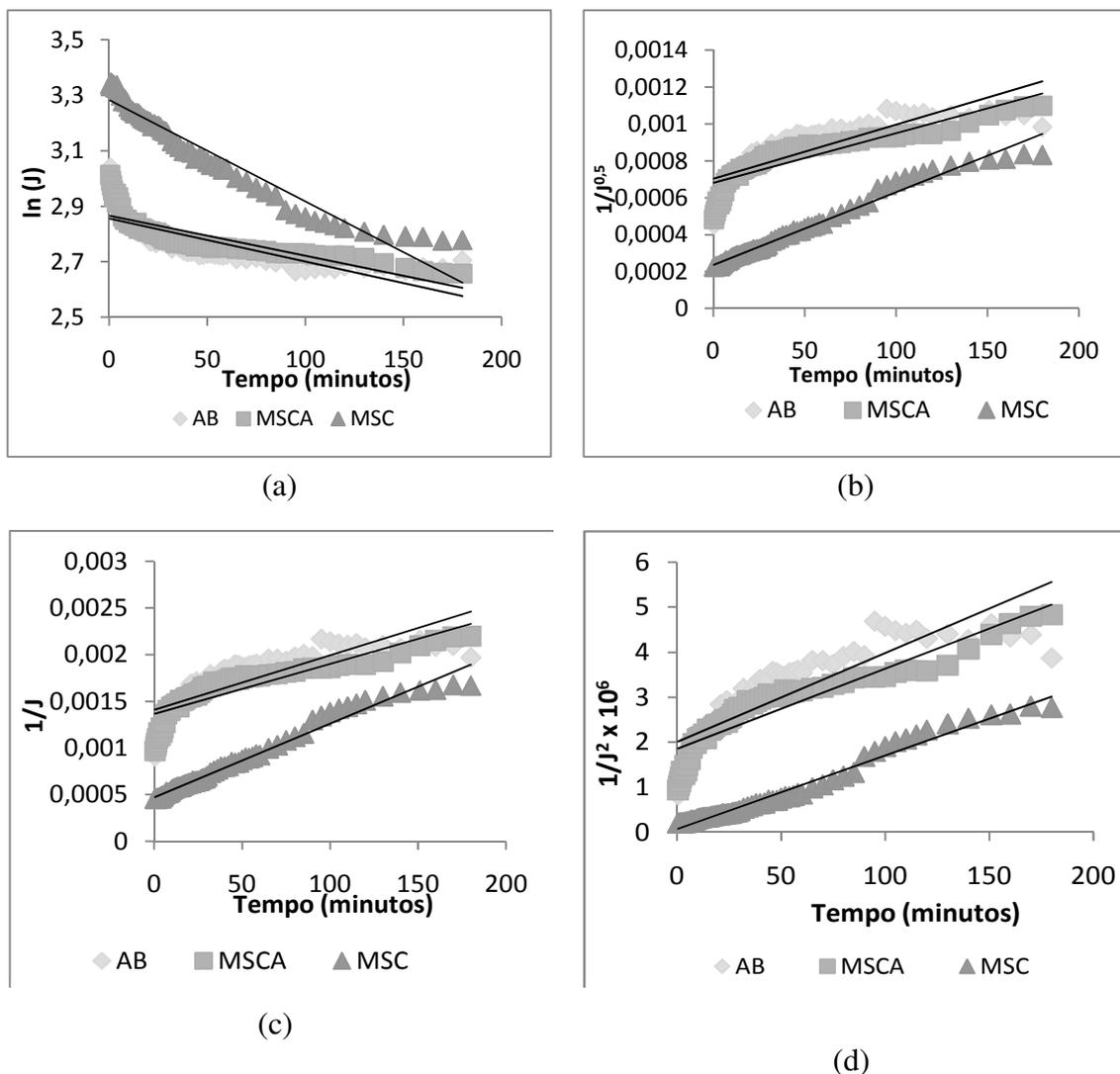


Figura 5.45. Ajuste dos dados experimentais a 2 bar para a membrana de 0,1 μ m – monocanal e água de alta cor e turbidez: (a) Modelo de bloqueio completo dos poros; (b) Modelo de bloqueio padrão dos poros; (c) Modelo de bloqueio intermediário dos poros e (d) Modelo de formação de torta.

Tabela 5.36. Valores de R^2 para cada modelo e experimento a 2 bar, membrana 0,1 μm e água de alta cor e turbidez.

| Experimento | Bloqueio completo | Bloqueio padrão | Bloqueio intermediário | Formação de torta |
|--------------------------|-------------------|-----------------|------------------------|-------------------|
| Água Bruta (AB) | 0,601 | 0,769 | 0,679 | 0,742 |
| Extração com água (MSCA) | 0,674 | 0,679 | 0,769 | 0,848 |
| Extração com sal (MSC) | 0,933 | 0,979 | 0,979 | 0,976 |

Assim como o observado na pressão de 1 bar, para águas de alta cor e turbidez, os melhores ajustes foram para solução extraída com sal (MSC). De acordo com os resultados apresentados na Tabela 5.36 os melhores ajustes foram obtidos para bloqueio padrão e intermediário, sendo que neste caso os valores de R^2 foram idênticos para estes modelos.

De maneira geral, pode-se observar que neste trabalho os modelos que melhor representaram os dados experimentais para a membrana cerâmica utilizada (0,1 μm), foram o de bloqueio padrão e intermediário de poros e a formação de torta, ou seja, modelos de fouling externos. Segundo VERNHET *et al.* (2003) e PINTO (2004) o fouling externo é relacionado à polarização de espécies retidas na superfície da membrana, o que leva a formação de uma camada de torta na sua superfície.

5.6.3 Modelagem para membrana 0,2 μm – Água de baixa cor e turbidez nas pressões de 1 e 2 bar

As Figuras 5.46 e 5.47 apresentam o ajuste dos dados experimentais para água de baixa cor e turbidez nas pressões de 1 bar e 2 bar, respectivamente, com o modelo de Hermia (1982) para a membrana 0,2 μm . Os dados foram ajustados por equações lineares e os valores de R^2 são apresentados nas Tabelas 5.37 e 5.38, nas pressões de 1 e 2 bar, respectivamente. Valores maiores de R^2 correspondem a um melhor ajuste ao modelo.

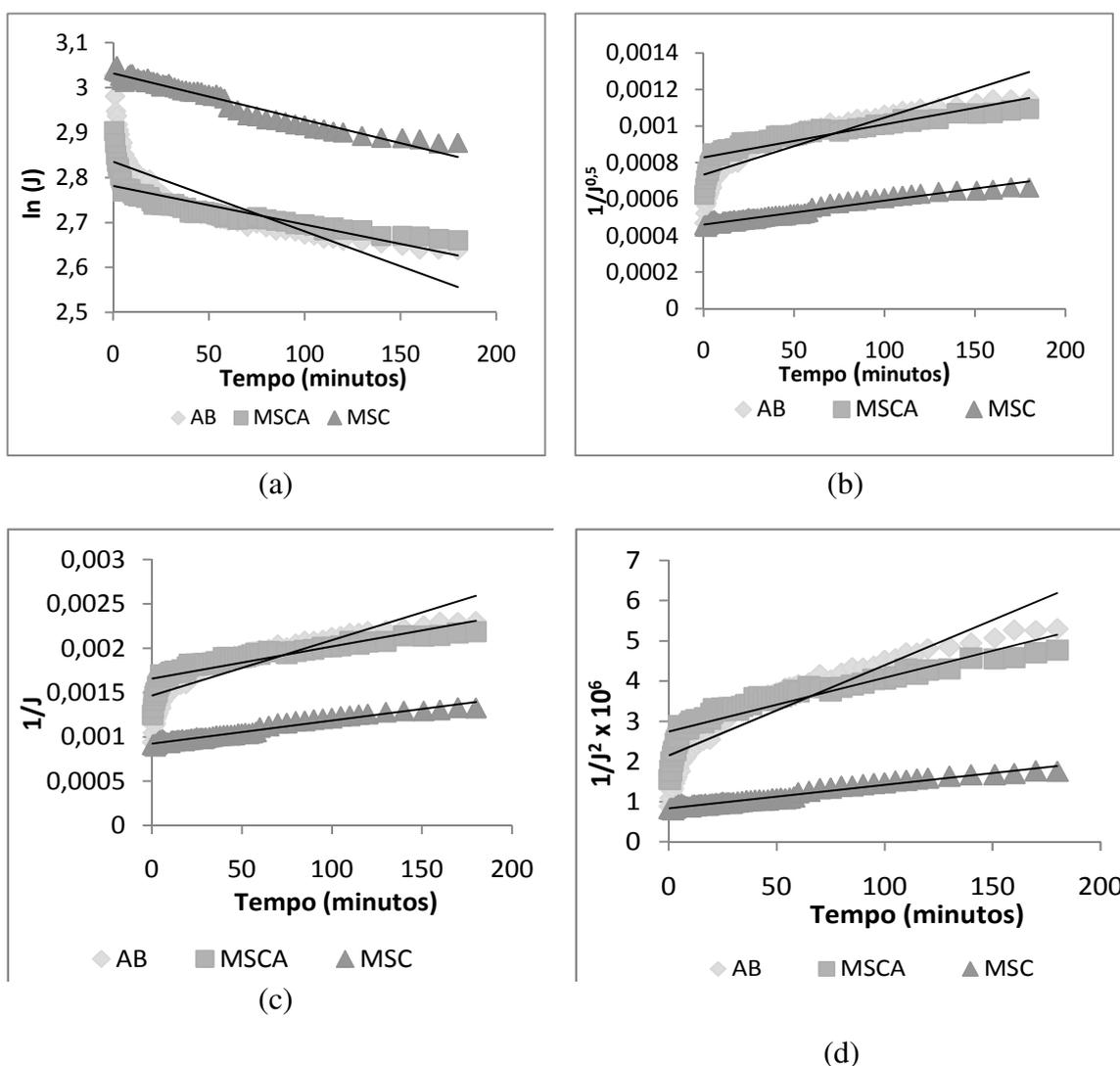


Figura 5.46. Ajuste dos dados experimentais a 1 bar para a membrana de 0,2 μ m – monocanal e água de baixa cor e turbidez: (a) Modelo de bloqueio completo dos poros; (b) Modelo de bloqueio padrão dos poros; (c) Modelo de bloqueio intermediário dos poros e (d) Modelo de formação de torta.

Tabela 5.37. Valores de R^2 para cada modelo e experimento a 1 bar, membrana 0,2 μ m e água de baixa cor e turbidez.

| Experimento | Bloqueio completo | Bloqueio padrão | Bloqueio intermediário | Formação de torta |
|--------------------------|-------------------|-----------------|------------------------|-------------------|
| Água Bruta (AB) | 0,667 | 0,767 | 0,767 | 0,849 |
| Extração com água (MSCA) | 0,673 | 0,746 | 0,746 | 0,810 |
| Extração com sal (MSC) | 0,960 | 0,968 | 0,968 | 0,973 |

Por meio da Tabela 5.37 pode-se observar que os valores de R^2 foram idênticos para os modelos de bloqueio padrão e intermediário. Os melhores ajustes foram obtidos

para filtração utilizando extração com solução salina (MSC). Para todos os casos, o melhor ajuste foi obtido com o modelo de formação de torta.

Alicieo *et al.* (2008), estudando a mesma membrana ($0,2 \mu\text{m}$) avaliando a filtração de cerveja, citam que o estudo da dinâmica do decaimento de fluxo mostrou que o mecanismo de fouling na membrana cerâmica para microfiltração de cerveja, para a pressão de 1 e 3 bar foi o de bloqueio completo de poros e para a pressão de 2 e 4 bar o de formação de torta. A formação da torta de filtração foi facilitada pelo fato de o mecanismo de *fouling* predominante, antes do estado estacionário, ser o bloqueio parcial de poros, o que diminuiu a passagem de materiais de tamanho menor que os poros da membrana, fazendo-os acumular-se sobre a superfície da membrana.

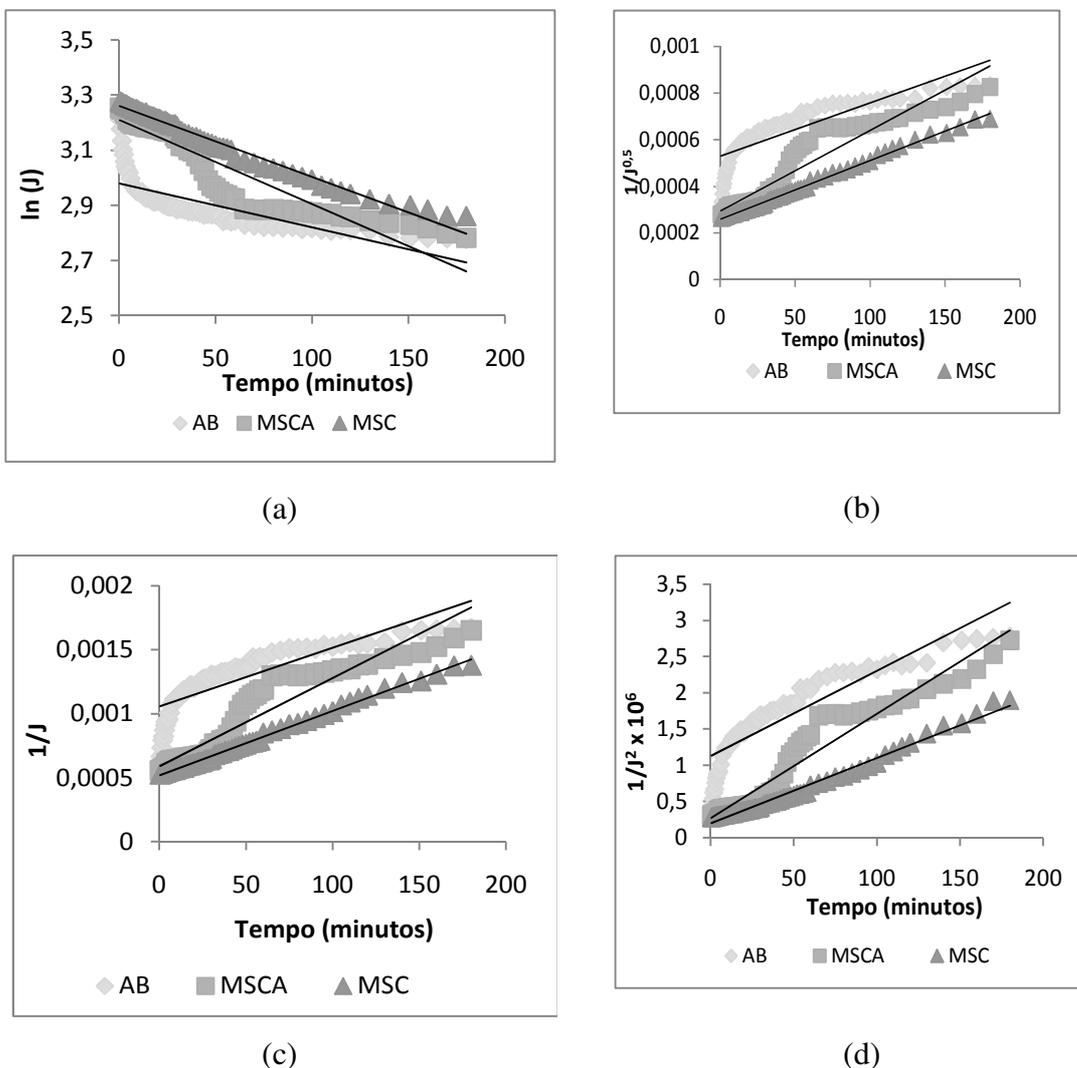


Figura 5.47. Ajuste dos dados experimentais a 2 bar para a membrana de $0,2\mu\text{m}$ – monocanal e água de baixa cor e turbidez: (a) Modelo de bloqueio completo dos poros; (b) Modelo de bloqueio padrão dos poros; (c) Modelo de bloqueio intermediário dos poros e (d) Modelo de formação de torta.

Tabela 5.38. Valores de R^2 para cada modelo e experimento a 2 bar, membrana 0,2 μm e água de baixa cor e turbidez.

| Experimento | Bloqueio completo | Bloqueio padrão | Bloqueio intermediário | Formação de torta |
|--------------------------|-------------------|-----------------|------------------------|-------------------|
| Água Bruta (AB) | 0,600 | 0,722 | 0,722 | 0,821 |
| Extração com água (MSCA) | 0,862 | 0,907 | 0,907 | 0,940 |
| Extração com sal (MSC) | 0,980 | 0,996 | 0,996 | 0,983 |

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 5.38 o melhor ajuste foi obtido para bloqueio padrão e intermediário dos poros para filtração com solução extraída com sal (SC). E em geral observa-se que a formação de torta é predominante nos três experimentos avaliados.

Os valores de R^2 encontrados para o bloqueio padrão e bloqueio intermediário foram idênticos, assim como ocorreu para os outros casos avaliados.

O fenômeno do fouling vem sendo objeto de muito estudo, pois as pesquisas publicadas ainda não apresentam um modelo ideal para predição do fouling. Ainda é válido citar que os resultados do presente estudo, referentes à avaliação do fouling no processo de filtração com membranas para obtenção de água potável poderão contribuir para o aprimoramento do processo de filtração por membranas.

Segundo Mohammadi *et al.* (2002), fouling pode ser definido como a deposição irreversível de microorganismos e de outros materiais sobre a superfície e no interior da membrana, resultando em um declínio do fluxo permeado.

5.6.4 Modelagem para membrana 0,2 μm – Água de alta cor e turbidez nas pressões de 1 e 2 bar

As Figuras 5.48 e 5.49 apresentam o ajuste dos dados experimentais para água de alta cor e turbidez nas pressões de 1 bar e 2 bar, respectivamente, com o modelo de Hermia (1982). Os dados foram ajustados por equações lineares e os valores de R^2 são apresentados nas Tabelas 5.39 e 5.40 para as pressões de 1 e 2 bar, respectivamente. Valores maiores de R^2 correspondem a um melhor ajuste ao modelo.

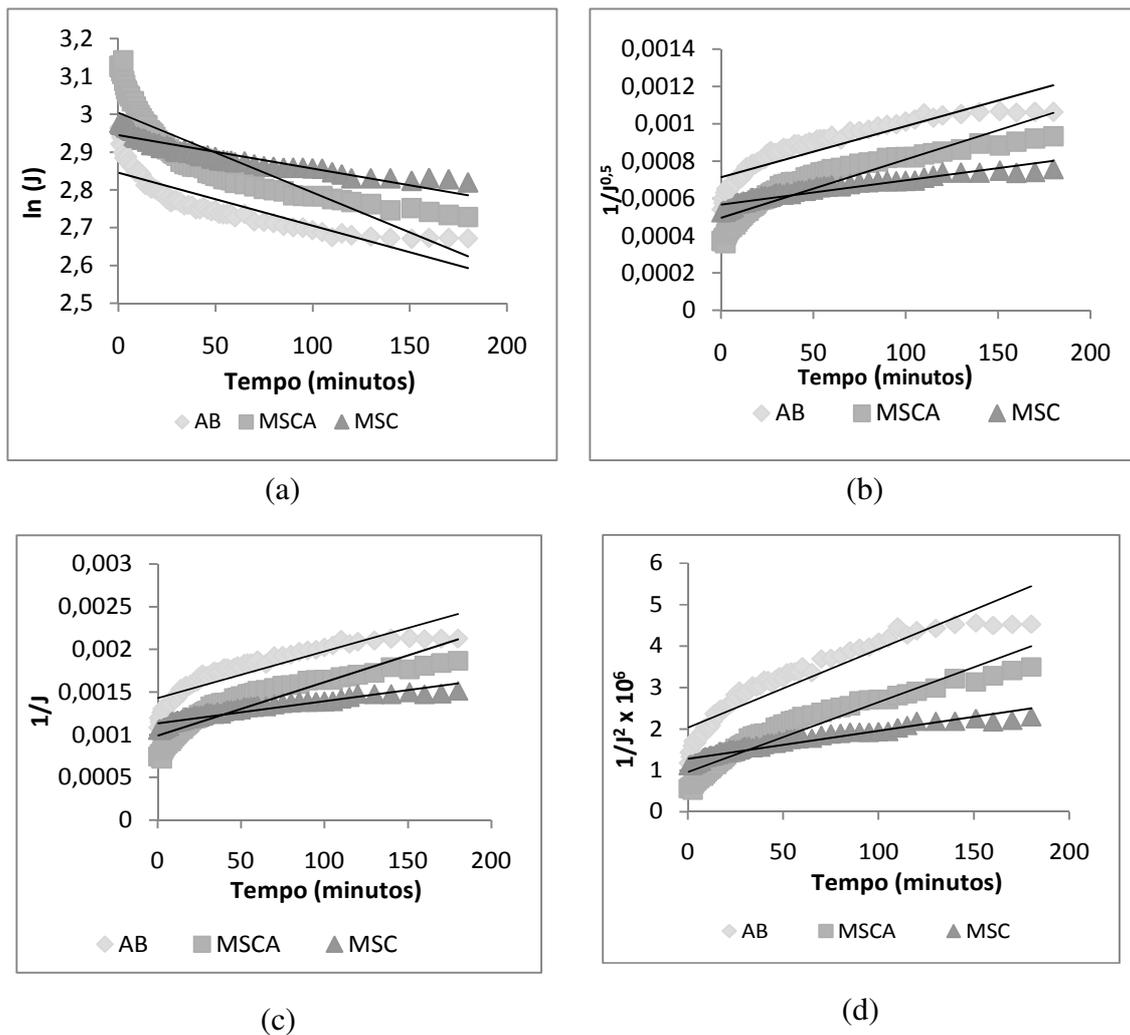


Figura 5.48. Ajuste dos dados experimentais a 1 bar para a membrana de $0,2\mu\text{m}$ – monocanal e água de alta cor e turbidez: (a) Modelo de bloqueio completo dos poros; (b) Modelo de bloqueio padrão dos poros; (c) Modelo de bloqueio intermediário dos poros e (d) Modelo de formação de torta.

Tabela 5.39. Valores de R^2 para cada modelo e experimento a 1 bar, membrana $0,2\mu\text{m}$ e água de alta cor e turbidez.

| Experimento | Bloqueio completo | Bloqueio padrão | Bloqueio intermediário | Formação de torta |
|--------------------------|-------------------|-----------------|------------------------|-------------------|
| Água Bruta (AB) | 0,741 | 0,809 | 0,809 | 0,866 |
| Extração com água (MSCA) | 0,737 | 0,832 | 0,832 | 0,907 |
| Extração com sal (MSC) | 0,857 | 0,889 | 0,889 | 0,917 |

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 5.39 o melhor ajuste foi obtido para formação de torta na filtração com solução salina e *Moringa* (MSC). Os valores de R^2 foram idênticos para os modelos de bloqueio padrão e intermediário. Para todos os casos, o melhor ajuste foi obtido para solução extraída com sal (MSC).

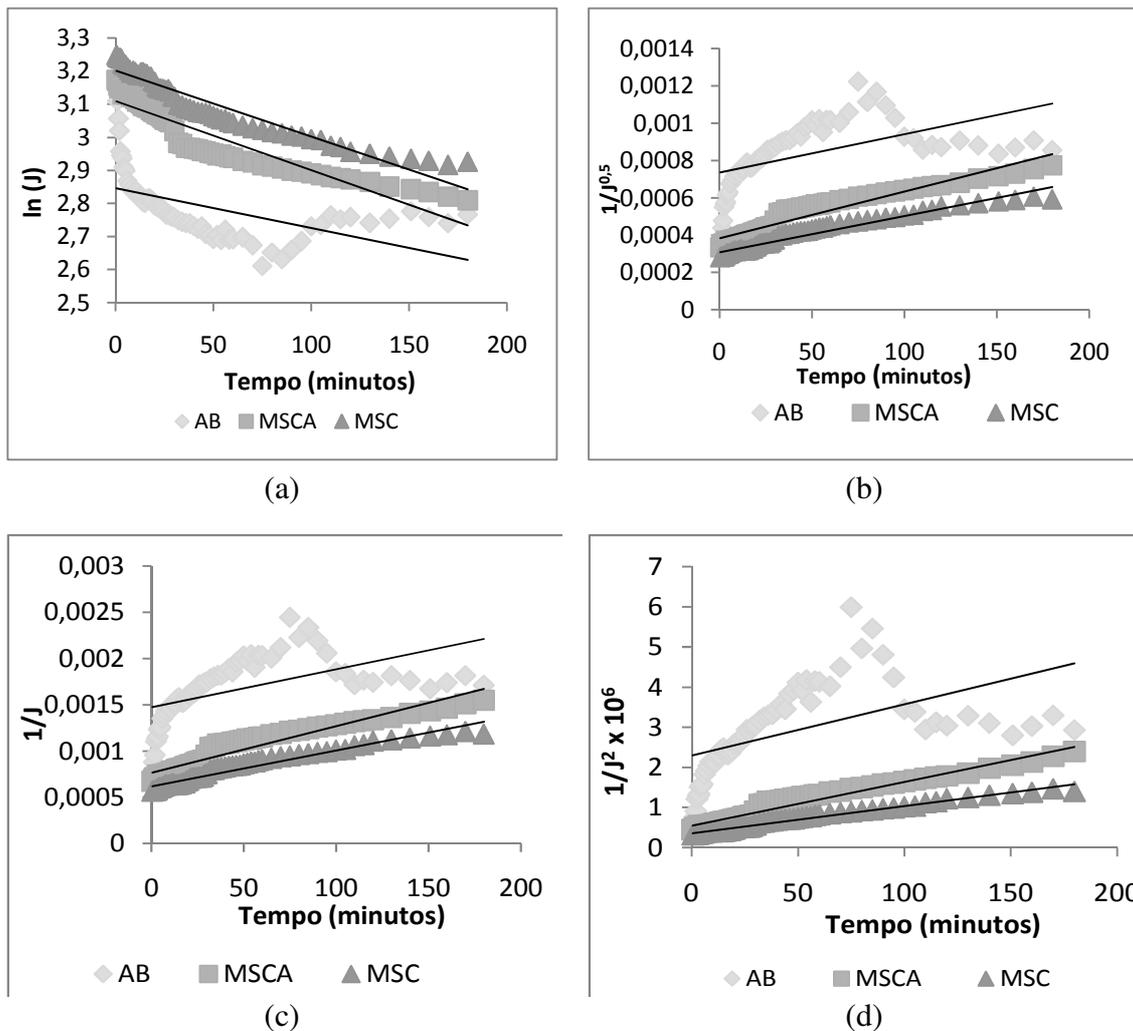


Figura 5.49. Ajuste dos dados experimentais a 2 bar para a membrana de $0,2\mu\text{m}$ – monocanal e água de alta cor e turbidez: (a) Modelo de bloqueio completo dos poros; (b) Modelo de bloqueio padrão dos poros; (c) Modelo de bloqueio intermediário dos poros e (d) Modelo de formação de torta.

Tabela 5.40. Valores de R^2 para cada modelo e experimento a 2 bar, membrana 0,2 μm e água de alta cor e turbidez.

| Experimento | Bloqueio completo | Bloqueio padrão | Bloqueio intermediário | Formação de torta |
|--------------------------|-------------------|-----------------|------------------------|-------------------|
| Água Bruta (AB) | 0,275 | 0,294 | 0,294 | 0,284 |
| Extração com água (MSCA) | 0,857 | 0,916 | 0,916 | 0,959 |
| Extração com sal (MSC) | 0,903 | 0,951 | 0,951 | 0,982 |

Assim como o observado na pressão de 1 bar, para águas de alta cor e turbidez, os melhores ajustes foram para solução extraída com sal (MSC). Os valores de R^2 foram idênticos para o bloqueio padrão e intermediário. O melhor ajuste foi na formação de torta para extração com solução salina (MSC).

Analisando todas as condições de operação, conclui-se que em todos os casos pras pressões de 1 e 2 bar, membrana 0,1 e 0,2 μm e águas de baixa e alta cor e turbidez os valores de R^2 foi idêntico para o bloqueio padrão e bloqueio intermediário dos poros. Sendo que em geral, na maioria dos casos o tipo de fouling avaliado foi o de formação de torta. E as melhores condições obtidas, ou seja, os melhores ajustes de R^2 foram quando se utilizou a solução extraída com sal (MSC). O comportamento atípico no fluxo de água bruta dificultou o ajuste dos dados experimentais com os modelos de fouling propostos. Contudo, em geral, os modelos de fouling se ajustam melhor aos dados experimentais quando submetidos à pressões mais elevadas, turbidez e cor iniciais mais elevadas e diâmetro de poros da membrana menores, comprovando que nestes casos extremos o fouling torna-se mais evidenciado.

Assim, o estudo matemático do processo de fouling foi considerado uma tarefa importante, sendo fundamental para o aprimoramento dos processos de separações por membranas.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Considerando os resultados obtidos neste estudo, em que se procurou extrair, caracterizar e aplicar no processo de coagulação/ floculação o composto ativo da semente de *Moringa Oleifera* Lam pode-se delinear algumas conclusões.

Analisando-se a etapa de extração do composto ativo da semente de *Moringa Oleifera* e aplicação no processo de coagulação/floculação para obtenção de água potável pode-se afirmar que:

- a extração do composto ativo da semente de *Moringa Oleifera* foi eficiente, sendo que este pode ser aplicado no processo de coagulação/floculação para o tratamento de obtenção de água;

- em geral, as maiores remoções foram para a extração realizada com o sal KCl para águas de baixa cor e turbidez e para extração realizada com água e com o mesmo sal para águas de alta cor e turbidez;

- o peso molecular encontrado para o composto ativo está de acordo com dados encontrados na literatura. O peso molecular do composto ativo da semente encontrado nessa pesquisa foi o mesmo para sementes cultivadas nas duas diferentes regiões avaliadas (Aracaju-SE e Maringá-PR);

- quanto maior o valor da turbidez inicial da água bruta, maior a dosagem de coagulante deverá ser utilizada;

- os extratos obtidos por meio da utilização de sementes de *Moringa Oleifera* Lam apresentaram-se eficientes na redução dos parâmetros de cor, turbidez e compostos com absorção em UV-254nm. Porém ainda é necessária a etapa de filtração.

Avaliando o processo de filtração com membranas e o processo combinado, nas condições ótimas de coagulação/floculação/sedimentação, para os extratos testados, com a finalidade de obtenção de água potável e a análise matemática dos dados de fluxo x tempo registra-se os seguintes resultados:

- os processos de ultrafiltração e microfiltração e o processo combinado produziram água tratada dentro do padrão de potabilidade (Portaria 518/MS);
- os entupimentos em todos os casos avaliados, foram maiores para o processo de filtração da água bruta do que se comparados ao processo combinado;
- a utilização de soluções coagulantes antes do processo de filtração com membranas, de forma geral, diminui o grau do entupimento. Sendo que os menores valores foram encontrados para solução de *Moringa Oleifera* extraída com sal;
- de forma geral, os melhores resultados considerando as características da água tratada, associado ao menor, entupimento foram na pressão de 1 bar;
- avaliando a análise matemática dos dados da filtração com membranas conclui-se que o modelo que melhor se ajusta, na maioria dos casos estudados, é o de formação de torta utilizando a solução extraída com sal.

Analisando o estudo cinético pode-se concluir que:

- maiores valores da constante cinética foram encontrados para maiores valores de turbidez inicial da água bruta;
- menores tempos de meia vida foram encontrados para água de alta cor e turbidez, sendo estas mais fáceis de serem tratadas se comparadas às águas de baixa cor e turbidez.

Considerando a estabilidade ao armazenamento pode-se constatar:

- as sementes diminuem o teor de coagulação após 1 ano de armazenamento;
- o extrato obtido com água e semente de *Moringa Oleifera* possui atividade coagulante até cinco dias de armazenamento. O extrato obtido com KCl 1 Molar apresenta-se eficiente em até cinco meses de armazenamento, ambos sob refrigeração.

A partir das conclusões expostas acima, considera-se que a utilização do composto ativo extraído das sementes de *Moringa Oleifera* Lam e do processo de filtração com membranas apresentou resultados satisfatórios, podendo ser considerada como uma técnica alternativa para a melhoria da qualidade de água destinada ao o consumo humano em relação ao tratamento convencional praticado.

CAPÍTULO 7

SUGESTÕES

Como sugestões para trabalhos futuros, pode-se citar:

- uma avaliação de diferentes lotes de semente de *Moringa oleifera*, coletados em diferentes épocas do ano, para verificar a eficiência nos processos de coagulação/floculação;
- uma continuação do estudo sobre o armazenamento das sementes e extratos de *Moringa oleifera*;
- encontrar formas eficientes para armazenar as sementes;
- uma avaliação da associação do coagulante natural *Moringa oleifera* com outros coagulantes naturais ou químicos;
- uma avaliação do processo de filtração com membranas para obtenção de um extrato purificado;
- uma aplicação de outro modelo matemático para avaliação do tipo de entupimento ocorrido;
- uma exploração mais aprofundada de parâmetros de qualidade específicos, cada vez, mais significativos, face a redução da qualidade dos recursos hídricos.

CAPÍTULO 8

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDULKARIM, S. M.; LONG, K.; LAI, O. M.; MUHAMMAD, S. K. S.; GHAZAL, H. M. Some physico-chemical properties of *Moringa oleifera* seed oil extracted using solvent and aqueous enzymatic methods. Food Chemistry. v. 93, p. 253-263, 2005.
- ALICIEO, T.V.R.; MENDES, E.S.; PEREIRA, N.C.; BARROS, S.T.D.; INNOCENTI, T.D.; ALVES, J.A. Análise do uso da membrana cerâmica de 0,2 µm na clarificação de cerveja. Revista Acta Sci. Tech., v. 30, n 02, p. 181-186, 2008.
- ALVES, R., FERREIRA-FILHO, S.S., Técnicas de avaliação de gosto e odor em águas de abastecimento: Método analítico, análise sensorial e percepção dos consumidores, Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 11, n. 4, p. 326-370, 2006.
- 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.
- APHA, AWWA & WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater., Clesceri, L. S.; Greenberg, A.E.; Eaton A.D., 20th Ed., Washington-USA, 1998.
- ARNOT, T.C., FIELD, R.W., KOLTUNIEWICZ, A.B. Cross-flow and dead-end microfiltration of oily-water emulsions - Part II. Mechanisms and modelling of flux decline. J. Memb. Sci., v. 169, p.1-15, 2000.
- AZEVEDO NETO, M. J.; MARTINS, J. A.; PUPPI, I. C.; BORSARI NETO, F.; FRANCO, P. N. C. Planejamento de Sistemas de Abastecimento de Águas. UFPR, 1973.

- BATALHA, B. H. L., 2006, Água Potável: o Imperativo da Atualização. Disponível em: <http://www.profcupido.hpg.ig.com.br/agua_potavel.htm>. Acesso em 19 de setembro de 2008.
- BAWA, L. M., DJANEYE-BOUNDJOU, G., BOUKARI, Y., SANI, A., 2001, “Coagulação de Algumas Soluções Húmicas Ácidas pela *Moringa oleifera* Lam: Efeito na Exigência do Cloro”, [Boletim da Sociedade Química de Etiópia](#), v. 15, n. 2, p. 119-129.
- BAZANELLA, G.C.S.; Processode de desfluoretação de águas subterrâneas a partir do uso de coagulantes naturais e do processo de separação por membranas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2010.
- BERGAMASCO, R; BOUCHARD, C.; SILVA, F. V.; REIS, M. H. M.; FAGUNDES-KLEN, M. R., An application of chitosan as a coagulant/floculant in a microfiltration processo of natural water. *Desalination* (in press), 2008.
- BEZERRA, A. M. E.; MEDEIROS- FILHO, S.; FREITAS, J. B. S.; TEÓFILO, E. M., Avaliação da qualidade das sementes de *Moringa oleifera lam.* durante o armazenamento, *Ciênc. Agrotec.*, Lavras, v. 28, n. 6, p. 1240-1246, 2004.
- BORBA, L.R. Viabilidade do uso da *Moringa oleifera* Lam no tratamento simplificado de água para pequenas comunidades. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente)–Universidade Federal da Paraíba, Fortaleza, 2001.
- BOTTINO, A., CAPANNELLI, A., DEL BORGHI, M., COLOMBINO, O., CONIO, O., “Water Treatment for Drinking Purpose: Ceramic Microfiltration Application”, *desalination*, v. 141, p. 75-79, 2001.
- BOUCHARD, Ç.; SERODES, J.; RAHNI, M.; ELLIS, D.; LAFLAMME, E.; RODRIGUES, M. Membrane fouling in ultrafiltration and coagulation-ultrafiltration of surface water, *J. Environ. Eng. And Scienc.* 2, 139-148, 2003

BRASIL, PORTARIA Nº 518/GM MINISTÉRIO DA SAÚDE. Em 25 de março de 2004. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. Ministério da Saúde, 2010.

CAMPOS, J. R., POVINELLI, J., “Coagulação e Floculação”. In: NETTO et al., Técnicas de Abastecimento e Tratamento de Água. 2ª ed., v. 2., cap. 19, São Paulo, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB, 1976.

CARDOSO, K. C., Estudo do processo de coagulação/floculação por meio da *moringa oleifera* lam para obtenção de água potável. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá – UEM, Maringá, Paraná, Brasil, 2007.

CARDOSO, K.C.; BERGAMASCO, R.; COSSICH, E.S.; KONRADT-MORAES, L.C.. Otimização dos tempos de mistura e decantação no processo de coagulação/floculação da água bruta por meio da *Moringa oleifera* Lam. Revista Acta Sci. Tech., v.30, n.02, p. 193-198, 2008.

CLAYTON, B, E. Report of the lower moor incident advisory group. Journal Ind. Med. v. 40, n. 3, p. 301-304, 1989.

COELHO, N.M.M.; DE PAULA, L.O.; MIRANDA, F.M.; DA SILVA, C.A. Uso da Moringa Oleífera para Remoção de Flúor em Águas. Revista Analytica, n.21, p. 72-75, 2006.

DAVINO, F. Tecnologia de tratamento de água: água na indústria. Rio de Janeiro: Almeida Neves, 1976.

DA SILVA, F. J. A.; DE SOUZA, L. M. M.; MAGALHÃES, S. N., “Uso Potencial de Biopolímeros De Origem Vegetal Na Descolorização De Efluente Têxtil Índigo”. In: 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Joinville, SC, Setembro, 2003.

- DI BERNARDO, L., Métodos e técnicas de tratamento de água. v.1, ABES, Rio de Janeiro, 1993.
- DI BERNARDO, L., DANTAS, A. D. B., Métodos e Técnicas de Tratamento de Água. 2ª ed. v. 1. São Carlos, RiMa, 2005.
- EMBRAPA, 2006, Sistema Simplificado para Melhoria da Qualidade de Água Consumida nas Comunidades Rurais do Semi-Árido do Brasil. Disponível em: <<http://www.jardimdeflores.com.br>>. Acesso em 09 de novembro de 2006.
- FALCÃO, R. B. M., OLIVEIRA, A. P. S., 2004, Projeto Água Subterrânea no Nordeste do Brasil. Disponível em: <<http://proasne.net/desenvolvimentosustentavel3.htm>>. Acesso em: 14 de dezembro de 2008.
- FANE, A.G.; FELL, C.J.D. A review of fouling and fouling control in ultrafiltration. Desalination, Amsterdam : Elsevier Science Publisher B.V, v.62, p. 117 – 136, 1987.
- FERGUSON, P. H., “Membrane Processing in th Food and Dairy Industries”. Elsevier Science, New York, 1989.
- FIELD, R.W., WU, D., HOWELL, J.A., GUPTA, B.B. Critical flux concept for microfiltration fouling. J. Membr. Sci. 100, 250–272, 1995.
- FRANCO, M.; ARANTES, C.C.; SILVA, G.K.; CHAMLET, J. PATERNIANI, J.E.S.. Uso de coagulante a partir de semente de *Moringa oleifera* na etapa do pré filtro no sistema de filtração em múltiplas etapas. In CD de anais do VI Congresso International de Ingenieria Agrícola. Chillan. Chile, 2010.
- FUNASA – FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE, Cianobactérias tóxicas na água para consumo humano na saúde pública e processos de remoção em águas para consumo humano. Ministério da Saúde, Brasília, p. 56, 2003.

- GALLÃO, I.M.. Avaliação química e estrutural da semente de Moringa. Cienc. Agron., Fortaleza, 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 (BBA) – General Subjects - V 1243, n. 3, p. 477-481, 1995.
- GERDES, G., Como Limpar e Tratar Água Suja com Sementes da *Moringa oleifera*. Fortaleza, Centro de Pesquisa e Assessoria – ESPLAR, 1997.
- 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.
- GIRARD, B.; FUKUMOTO, L. R. Membrane process of fruit juices and beverages: a review. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, CRC Press LLC, V. 40, n.2, p. 91 – 157, 2000.
- GOLDKORN, R., 2005, Alzheimer (O Mal do Século). Disponível em: <<http://lilioli.multiply.com/journal/item/138>>. Acesso em: 19 de dezembro de 2005.
- GUEVARA, A. P.; VARGAS, C.; SAKURAI, H.; FUJIWARA, Y.; HASHIMOTO, K.; MAOKA, T.; KOZUKA, M.; ITO, Y.; HARUKUNI, T.; NISHINO, H. An antitumor promoter from *Moringa oleifera* Lam. Mutation Research, v. 440, p. 181-188, 1999.
- GUIGUI, C., ROUCH, J.C., DURAND-BOURLIER, L., BONNELYE, V., APTEL, P., “Impact of Coagulation Conditions on the in-line Coagulation/UF Process for Drinking Water Production”. Elsevier Scienc – Desalination, v. 147, p. 95-100, 2002.

- HABERT, A.C., BORGES, C.P., NÓBREGA, N. Processos de Separação com Membranas. Apostila do curso da Escola Piloto em Engenharia Química da COPPE/UFRJ, 1997.
- HABERT, A. C.; BORGES, C. P.; NOBREGA, R. Processos de Separação por membranas. Escola piloto em engenharia química. 180 p. Rio de Janeiro: e-papers, 2006.
- HENNIG, D.; BERGAMASCO, R.; KONRADT-MORAES, L.C.; BONGIOVANI, M.C.; LOURENÇO, B.S.S.; Utilização da *Moringa oleifera* como agente coagulante/floculante para a obtenção de água potável, XVI EAIC, 2007.
- HERMIA, J. Constant pressure blocking filtration laws – application to power-law non-Newtonian fluids. Trans IChem. v.60, p. 83-187, 1982.
- IAL-Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz. 3ª ed., São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, (Volume 1, Métodos Químicos e Físicos para Análise de Alimentos) 1985.
- IQBAL, S.; BHANGER, M. I. Effect of season and production location on antioxidant activity of *Moringa oleifera* leaves grown in Pakistan. Journal of Food Composition and Analysis, v. 19, p. 544-551, 2006.
- JACANGELO, J. G., LAINE, J.M., CUMMINGS, E. W., ADHAM, S.S., “UF with Pretreatment for Removing DBP Precursors”. J. Am. Water Works, p. 100-112, 1995.
- JAHN, S. A. A., Proper Use of African Natural Coagulants for Rural Water Supplies. Eschborn, German Agency for Technical Cooperation, GTZ, 1986.
- JAHN, S.A.A. Monitored water coagulation with Moringa seeds in village households. GTZ: Gate. Eschborn, n. 1, p. 40-41, 1989.
- JOLY, A. B. Botanica: Introdução à taxonomia vegetal. 5. ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 1979.

- JUANG, R. S.; SHIAU, R. C. Metal removal from aqueous solutions using chitosan - enhanced membrane filtration. *J. Membrane Science*, v. 165, n. 2, 159-167, 2000.
- KARADI, R.V.; GADGE, N. B.; ALAGAWADI, K. R.; SAVADI, R. V. Effect of *Moringa oleifera* Lam. root-wood on ethylene glycol induced urolithiasis in rats. *Journal of Ethnopharmacology*, v. 105, p. 306-311, 2006.
- KATAYON, S.; NOOR, M. J. M. M.; ASMA, M.; ABDUL, G. L. 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, p. 1455-1460, 2006.
- KAWAMURA, S., Effectiveness of Natural Polyelectrolytes in Water Treatment, *Journal Awa, Japan*, v. 79, n. 6, p. 88-91, 1991.
- KONRADT-MORAES, L. C., Estudo da coagulação-ultrafiltração para produção de água potável. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Química/UEM, Maringá – PR, Brasil, p. 135, 2004.
- KONRADT-MORAES, L. C., Estudo dos Processos de coagulação e floculação seguidos de filtração com membranas para a obtenção de água potável. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Química/UEM, Maringá-PR, Brasil, p.192, 2009.
- KRACK, R. Cleaning of membranes in water and wastewater applications. In: HILLIS, P. (Editor). *Membrane technology in water and wastewater treatment*. Cambridge : The Royal Society of Chemistry, 2000. p. 166 - 172.
- LAEMMLI, U. K. Cleavage of structural proteins during the assembly of the head of bacteriophage T4. *Nature*, v. 227, p. 680-685, 1970.
- LAKO, J.; TRENERRY, V. C.; WAHLQVIST, M.; WATTANAPENPAIBOON, N.; SOTHEESWARAN, S.; PREMIER, R. Phytochemical flavonols, carotenoids and

the antioxidant properties of a wide selection of Fijian fruit, vegetables and other readily available foods. *Food Chemistry*, v. 101, p. 1727-1741, 2007.

LEAL, F.C.T., LIBÂNIO, M, “Estudo da Remoção da Cor por Coagulação Química no Tratamento Convencional de Águas de Abastecimento”. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 7, n. 3, p. 117-128, 2002.

LEMANSKI, S.R., “Purificação e Concentração do Extrato Aquoso de Stévia Rebaudiana Bertoni Através dos Processos com Zeólitas e Membranas”. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Química/UEM, Maringá, PR, Brasil, 2004.

LEONARDS, G. A. *Foundation Engineering - International Student Edition*. McGraw-Hill Book Company INC., 1962.

LETTERMAN, R.D., AMIRTHARAJAH, A., O’MELIA, C.R., *Coagulation and flocculation in water quality and treatment*. AWWA. 5ª ed., McGraw Hill Inc, 1999.

LEVENSPIEL, O. *Engenharia das reações químicas*. São Paulo: Editora Edgard Blücher, Ed. da Universidade de São Paulo, v. 2, 1974.

LIN, L. J.; HUANG, C.; PAN, J. R.; WANG, D. Effect of Al(III) speciation on coagulation of highly turbid water. *Chemosphere*, v. 72, p. 189-196, 2008.

LIPIUN, V.; KUROKAWA, M.; SUTTISRI, R.; TAWEECHOTIPATR, P.; PRAMYONTHIN, P.; HATTORI, M.; SHIRAK, K. Efficacy of Thai medicinal plant extracts against herpes simplex virus type 1 infection in vitro and in vivo. *Antiviral Research*, v. 60, p. 175-180, 2003.

LIU, Y.; PERERA, C. O.; SURESH, V. Comparison of three chosen vegetables with others from South East Asia for their lutein and zeaxanthin content. *Food Chemistry*, v. 101, p. 1533-1539, 2007.

- LI XU; WENPING, L.; SHUQUN, L.; ZHI W.; QIXIN, Z.; YI L. Treating dyieng waste water by ceramic membrane in crossflow microfiltration. *Desalination*, v. 149, p. 199-203, 2002.
- LOWRY, O. H.; ROSEBROUGH, N. J.; FARR, A. L.; RANDALL, R. J.; *J. Biol. Chem.*, v. 193, p. 265, 1951.
- MACLAFLAN, C. R. D., “Aluminium and the Risk for Alzheimer Disease”, *Environmetrics*, v. 6, p 233-275, 1995.
- MADRONA, G.S.; SERPELLONI, G.B.; VIEIRA, A.M.S.; NISHI, L.; CARDOSO, K.C.; BERGAMASCO, R. Study of the Effect os saline Solution on the Extraction of the *Moringa oleifera* Seed’s Active Component for Water Treatment. *Water, Air, Soil Pollut*, v. 211, p. 409-415, 2010.
- MAKKAR, H. P. S.; BECKER, K. Nutritional value and antinutritional components of whole and ethanol extracted *Moringa oleifera*. *Animal feed science and technology*, v. 63, p. 211-228, 1996.
- MASTERS, G.M. *Introduction to environmental engineering and sciences*. New Jersey: Prentice-Hall, p. 460, 1991.
- MAUTONE, C., KAZUKI, M., *Curso de análise sensorial: Teste de gosto e odor*. SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – Departamento de Controle de Qualidade dos Produtos Água e Esgotos. São Paulo, 2008.
- McCCONACHIE, G.L.; FOLKARD, G.K.; MATAWALI, M.A. & SUTHERLAND, J.P. Field trials of appropriate hydraulic flocculation processes. *Wat. Res.*, v 33, n.6, p. 1425-1434, 1999.
- MEDEIROS-FILHO, C.F. UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE, Capítulo VIII – Noções Sobre Tratamento de Água (13 Páginas). Disponível em:

<<http://www.dec.ufcg.edu.br/saneamento/Tratam00.htm>>. Acesso em: 19 de setembro de 2008, 2006.

MEDRI, W., DA COSTA, R. H. R., Modelo probabilístico de amostragem para controle da qualidade bacteriológica da água em redes de distribuição. Eng. Sanit. Amb., v. 6, n. 3, p. 100-107, 2001.

MENDES, C.G.N. Estudo da coagulação e floculação de águas sintéticas e naturais com turbidez e cor variáveis. Universidade de São Paulo - EESC. Tese de Doutorado, 1989.

MENDES, C. G. DA NAVE, Tratamento de águas para consumo humano – panorama mundial e ações do PROSAB. In: PÁDUA, V. L. de (coord.). Contribuição ao estudo da remoção de cianobactérias e microcontaminantes orgânicos por meio de técnicas de tratamento de água para consumo humano. Rio de Janeiro, ABES, 2006.

MO, L.; HUANG, X. Fouling characteristics and cleaning strategies in a coagulation–microfiltration combination process for water purification. Desalination, v. 159, p. 1–9, 2003.

MOHAMMADI, T., MADAENI, S.S., MOGHADAM, M.K. Investigation of membrane fouling. Desalination.v. 153, p. 155-160, 2002.

MONTGOMERY, J. Water treatment: principles and design. 2^a edição, New York, John Wiley & Sons, 2005.

MOPU – MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y URBANISMO, 1985, Guia para elaboración de estudios del medio físico: contenido y metodología. Madrid, Espanha. GEOTEMA, p. 572, 1985.

MOTA, S., Introdução à Engenharia Ambiental. 1^a ed. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES, 1997.

- MULDER, M., “Basic Principles of Membrane Technology”, Kluwer Academic Publishers; The Netherlands, 1991.
- MUYIBI, S., A.; EVISON, L. M., “*Moringa Oleifera* Seeds for Softening Hardwater”, Water Research, v. 29, n. 4, p. 1099-1105, 1995.
- NAZZAL, F. F.; WIESNER, M. R., pH and Ionic Strength Effects on the Performance of Ceramic Membranes in Water Purification. J. Memb. Sci., v. 93, p. 91-103, 1994.
- NDABIGENGESERE, A. *et al.* Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using *Moringa oleifera*. Water Res., New York, v. 29, n. 2, p. 703-710, 1995.
- NDABIGENGESERE A.; NARASIAH, S. K., Influence of operating parameters on turbidity removal by coagulation with *Moringa oleifera lam.* seeds. Environmental Technology, v.17, p.1103-1112, 1996.
- NDABIGENGESERE, A., NARASIAH, K. S., “Quality of Water Treated by Coagulation Using *Moringa oleifera* Seeds”, Water Research, v. 32, n. 3, p. 781-791, 1998.
- NETO, M.A.A. Uso da Semente do Gênero Moringa. Disponível em: http://www.cpatsa.embrapa.br/catalogo/doc/posteres/12_1_mario_augusto.doc. Acesso em 14 de novembro de 2008, 2005.
- NETTO, J. M. A., PEREIRA, B. E. B., YASSUDA, E. R., MARTINS, J. A., NOGAMI, P. S., GAGLIANONI, S., OLIVEIRA, W. E., Técnicas de Abastecimento e Tratamento de Água. 3ª ed., v. 1. São Paulo, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB, 1987.
- NKURUNZIZA, T.; NDUWAYEZU, J.B., BANADDA, E.N.; NHAPI, I. The effect of turbidity levels and *Moringa oleifera* concentration on the effectiveness of coagulation in water treatment. Water Science & Technology. p. 1551-1558, 2009.

- NOBLE, R.D., STERN, S.A., “Membrane Separation Technology – Principles and Applications”. Elsevier, p. 717, 1995.
- OKUDA, T., BAES, A.U., NISHIJIMA, W.; OKADA, M.. Improvements of extraction method of coagulation active components from *Moringa oleifera* seed Water Research, v 33, n 15, p. 3373-3378, 1999.
- OKUDA, T.; BAES, A. U.; NISHIJIMA, W.; OKADA, M., Isolation and characterization of coagulant extracted from *Moringa oleifera* seed by salt solution, Water Research, v. 35, n 2, p. 405-410, 2001.
- OZACAR, M.; SENGIL, A. The use of tannins from Turkish acorns (*Valonia*) in water treatment as a coagulant and coagulant aid. Journal of Engineering Environment Science, v.26, p. 255-263, 2002.
- 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. 06, p. 765-771, 2009.
- PATERNIANI, J.E.S.; RIBEIRO, T.A.P.; MANTOVANI, M.C.; SANT’ANNA, M.R. Water treatment by sedimentation and slow fabric filtration using *Moringa oleifera* seeds. African Journal of Agricultural Research, v. 5, n. 11, p. 1256-1263, 2010.
- PAULA, S.L. Clarificação do extrato aquoso de *Stevia Rebaudiana* (Bert.) Bertoni, utilizando polímeros naturais. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)– Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2004.
- PELEGRIN, D. C. Microfiltração Tangencial de Efluente Doméstico após Tratamento Biológico. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC, 2004.
- PEREIRA, E. T.; DI BARNARDO, L. Remoção de substâncias húmicas por meio da oxidação com ozônio e peróxido de hidrogênio e FiME. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 10, n. 4, p. 290-298, 2005.

- PINTO, D. M., Clarificação de vinho branco por ultrafiltração utilizando membranas cerâmicas. (Mestrado em Engenharia Química)– Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR, 2004.
- RAO, H.G.R.; Mechanisms of flux decline during ultrafiltration of dairy products and influence of pH on flux rates of whey and buttermilk. *Desalination*, v. 144, p.319-324, 2002.
- RASHASH, D.M.C., DIETRICH, A.M., HOEHN, R.C. FPA of selected odorous compounds. *Journal of American Water Works Association*. p. 131-141, 1997.
- REDDY, V.; UROOJ, A.; KUMAR, A. Evaluation of antioxidant activity of some plant extracts and their application in biscuits. *Food Chemistry*, v. 90, p. 317-321, 2005.
- RIBEIRO, M.L., DE LUCA, S.J., Tratamento de Águas por Filtração por Membranas. Estado da Arte, UFRGS, 2000.
- RITCHER, C.A.; AZEVEDO NETTO, J.M. Tratamento de água: tecnologia atualizada. São Paulo: Edgard Blücher, 2003.
- RICHTER, N.; SIDDHURAJU, P.; BECKER, K. Evaluation of nutritional quality of Moringa (*Moringa oleifera* Lam.) leaves as an alternative protein source for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.). *Aquaculture*, v. 217, p. 599-611, 2003.
- SALAH, A.; ABBASI, M.; MOHAMMADI, T. Permeate flux decline during UF of oily wastewater: Experimental and modeling. *Desalination*, v. 251, p.153-160, 2010.
- SANCHEZ, N. R.; SPRNDLY, E.; LEDIN, I. Effect of feeding different levels of foliage of *Moringa oleifera* to creole dairy cows on intake, digestibility, milk production and composition. *Livestock Science*, v. 101, p. 24-31, 2006.
- SANTANA, C.R.; PEREIRA, D.F.; ARAÚJO, N.A.; CAVALCANTI, E.B.; SILVA, G.F. Desempenho de Sementes de *Moringa Oleifera* Lam no Processo de

- coagulação/floculação de Água Produzida. In Cd de anais do XXXIV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, 2009.
- SANTOS, A. F. S.; ARGOLO, A. C. C.; COELHO, L. C. B. B.; PAIVA, P. M. G. Detection of water soluble lectin and antioxidant component from *Moringa oleifera* seeds. *Water Research*, v. 39, p. 975-980, 2005.
- SCOTT, K.; HUGHES, R. *Industrial membrane separation technology*. London: Blackie Academic & Professional, p. 305, 1996.
- SILVA, C. A., *Estudos Aplicados ao Uso da Moringa oleifera como Coagulante Natural para Melhoria da Qualidade de Águas*. Dissertação de M.Sc., Instituto de Química, Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil, 2005.
- SILVA, F.J.A.; MATOS, J.E.X. Sobre dispersões de *Moringa oleifera* para tratamento de água. *Rev. Tecnol. Fortaleza*, v. 29, n. 2, p.157-163, 2008.
- SPINELLI, V. A., *Quitosana: Polieletrólito Natural para o Tratamento de Água Potável*. Dissertação de M.Sc., Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, 2001.
- STOPKA, J., BUGAN, S. G., BROUSSOUS, L., Microfiltration of beer yeast suspensions through stamped ceramic membranes, *Separation and Purification Technology*, v. 25, 535-543, 2001.
- STRATHMANN, H. *Membrane Separation Process*. Journal of Membrane Science, Amsterdam: Elsevier Science Publisher B.V, v. 9, p. 121 – 189, 1981.
- SULEYMAN, A. M.; EVISON, L.M. *Moringa oleifera* seeds for softening hardwater. *Water Research*, v. 29, p. 1099-1105, 1995.

- TAHILIANI, P.; KAR, A. Role of *Moringa oleifera* leaf extract in the regulation of thyroid hormone status in adult male and female rats. *Pharmacological Research*, v. 41, p. 319-323, 1999.
- TEÖFILO, E. M.; FREITAS, J. B. S.; BEZERRA, A. M. E.; RAFAEL, M. S. S. Efeito dos tipos de embalagens, ambiente e tempo de armazenamento na qualidade fisiológica das sementes de moringa (*Moringa oleifera* Lam.)- Moringaceae. *Revista Científica Rural*, Bagé-RS, v.8, n.1, p.115-122, 2003.
- TODISCO, S.; PEÑA, L.; DRIOLI, E.; TALLARICO, P. Analysis of the fouling mechanism in microfiltration of orange juice. *Journal of the Food Processing and Preservation*, v. 20, p. 453-466, 1996.
- UFSC, UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, 1999, Águas Naturais. Disponível em: <<http://lema.engq.ufsc.br/Arquivos/AGUAS%20NATURAIS.htm>>. Acesso em 20 de julho de 2006.
- VARGAS, M. Introdução à mecânica dos solos. Editora McGraw-Hill do Brasil Ltda, São Paulo, 1977.
- VELA, M.C.V., BLANCO, S.A., GARCÍA, J.L. Crossflow ultrafiltration of cake forming solutes: a non-steady state model. *Desalination*. V. 184, p. 347-356, 2006.
- VELA, M.C.V.; BLANCO, S.A.; GARCIA, J.L.; RODRIGUEZ, E.B. Analysis of membrane pore blocking models applied to the ultrafiltration of PEG. *Separation and Purification Technology*, v. 62, p.489-498, 2008.
- VERNHET, A.; CARTALADE, D., MOUTOUNET, M.; Contribution to the understanding of fouling build-up during microfiltration of wines; *Journal of Membrane Science*, v. 211, p. 357-370, 2003.
- VIEIRA, A.M.S., VIEIRA, M.F., SILVA, G.F., ARAÚJO, A.A., FAGUNDES-KLEN, M.R. VEIT, M.T., BERGAMASCO, R. Use of *Moringa oleifera* Seed as a Natural

Adsorbent for Wastewater Treatment. Water, air, soil pollut, published on line, 2009.

WANG, L., SONG L. Flux decline in crossflow microfiltration and ultrafiltration: experimental verification of fouling dynamics. J. Membr. Sci. v. 160, p. 41-50, 1999.

ZAIA, D. A. M., ZAIA, C. T. B. V., LICHTIG, J., 1998, Determinação de Proteínas Totais Via Espectrofotometria: Vantagens e Desvantagens dos Métodos Existentes. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40421998000600020>. Acesso em 20 de setembro de 2006.

ANEXO I

DOSAGEM DE PROTEÍNAS – MÉTODO DE LOWRY**• Reativos**

a) Reativo A: 2 g de Carbonato de Sódio (Na_2CO_3) seco e 0,02 g de Tartarato Duplo de Sódio e Potássio em 100 mL de solução de Hidróxido de Sódio (NaOH) 0,1N (padronizada).

b) Reativo B: 0,5 g Sulfato de Cobre (CuSO_4) + 2 gotas de Ácido Sulfúrico (H_2SO_4) concentrado em 100mL de água destilada.

c) Solução AB: 50 mL A + 1 mL B. Preparar imediatamente antes da dosagem.

d) Reativo de Folin: Solução 1N, conservar ao abrigo da luz.

e) Solução Padrão de Soro Albumina Bovina (BSA) 100 mg.L⁻¹: 100 mg BSA (0,1 g) em 1000 mL de água destilada, adicionar cuidadosamente água no balão volumétrico para evitar a formação de bolhas. Conservar sob refrigeração.

• Procedimento ExperimentalCurva Padrão:

→ Preparar uma série de amostras a partir da solução padrão de BSA, contendo a concentração de proteínas indicadas na Tabela 1.

→ De cada tubo de ensaio (1 a 11) pipetar, em triplicata 1 mL da solução de proteína a dosar.

→ Adicionar 3 mL da solução AB. Tampar os tubos, agitar e esperar 10 min (precisos) ao abrigo da luz.

→ Adicionar 0,3 mL do reativo de Folin 1N. Tampar os tubos, agitar e deixar 30 min em repouso ao abrigo da luz.

→ Efetuar a leitura em espectrofotômetro a 760nm.

Tabela 1. Construção da Curva Padrão de Proteínas

| Tubo | Concentração Solução BSA (mg.L⁻¹) | Volume Solução BSA (mL) | Volume H₂O (mL) |
|-------------|---|--------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | 0 | 0,0 | 1,0 |
| 2 | 10 | 0,1 | 0,9 |
| 3 | 20 | 0,2 | 0,8 |
| 4 | 30 | 0,3 | 0,7 |
| 5 | 40 | 0,4 | 0,6 |
| 6 | 50 | 0,5 | 0,5 |
| 7 | 60 | 0,6 | 0,4 |
| 8 | 70 | 0,7 | 0,3 |
| 9 | 80 | 0,8 | 0,2 |
| 10 | 90 | 0,9 | 0,1 |
| 11 | 100 | 1,0 | 0,0 |

Dosagem:

→ 1 mL de solução de proteína a dosar. Preparar o branco com 1 mL de água destilada.

→ 3 mL de solução AB. Tampar os tubos, agitar e esperar 10 min (precisos) ao abrigo da luz.

→ Adicionar 0,3 mL de reativo de Folin 1N. Tampar os tubos, agitar e deixar 30 min em repouso ao abrigo da luz.

→ Efetuar a leitura em espectrofotômetro a 760nm.

→ Calcular, a partir da curva padrão obtida, o teor de proteína da amostra em questão.

CURVA PADRÃO DE PROTEÍNAS

Os dados obtidos para a construção da curva padrão de proteínas (Figura 1), estão mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. Dados Obtidos para a Construção da Curva Padrão de Proteínas

| Tubo | Concentração Solução BSA ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) | Volume Solução BSA (mL) | Volume Água (mL) | Abs 1 | Abs 2 | Média Abs |
|------|--|-------------------------|------------------|-------|-------|-----------|
| 1 | 0 | 0,0 | 1,0 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| 2 | 10 | 0,1 | 0,9 | 0,077 | 0,079 | 0,078 |
| 3 | 20 | 0,2 | 0,8 | 0,173 | 0,173 | 0,173 |
| 4 | 30 | 0,3 | 0,7 | 0,222 | 0,226 | 0,224 |
| 5 | 40 | 0,4 | 0,6 | 0,291 | 0,289 | 0,290 |
| 6 | 50 | 0,5 | 0,5 | 0,349 | 0,350 | 0,350 |
| 7 | 60 | 0,6 | 0,4 | 0,416 | 0,410 | 0,413 |
| 8 | 70 | 0,7 | 0,3 | 0,503 | 0,505 | 0,504 |
| 9 | 80 | 0,8 | 0,2 | 0,559 | 0,551 | 0,555 |
| 10 | 90 | 0,9 | 0,1 | 0,620 | 0,624 | 0,622 |
| 11 | 100 | 1,0 | 0,0 | 0,634 | 0,636 | 0,635 |

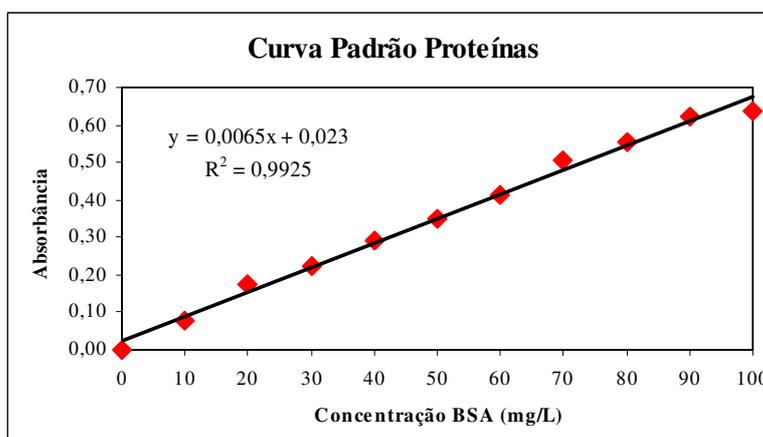


Figura 1. Curva Padrão de Proteínas

ANEXO II

RESULTADOS MÉDIOS OBTIDOS PARA A CARACTERIZAÇÃO DAS
ÁGUAS BRUTAS UTILIZADAS

Tabela 2. Valores médios das características das águas superficiais utilizadas nos ensaios em “jar test”.

| Parâmetro | Unidade | Água 150uT | Água 250uT | Água 350uT | Água 450uT | Água 550uT |
|-------------------------------------|----------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Cor Aparente | uH = mgPt-CoL ⁻¹ | 484 | 1695 | 1720 | 2407 | 2675 |
| Turbidez | uT | 150 | 251 | 353 | 450 | 551 |
| UV-254 nm | cm ⁻¹ | 0,718 | 0,923 | 1,007 | 1,487 | 1,063 |
| pH | - | 7,96 | 8,17 | 7,69 | 7,98 | 8,12 |
| Amônia | mgL ⁻¹ | 0,39 | 0,57 | 0,74 | 1,57 | 2,68 |
| Nitrito | mgL ⁻¹ | 0,009 | 0,015 | 0,036 | 0,043 | 0,053 |
| Nitrato | mgL ⁻¹ | 3,0 | 3,5 | 5,2 | 13,4 | 16,0 |
| Sulfito | mgL ⁻¹ | Nd | 0,108 | 0,195 | 0,196 | 0,214 |
| Sulfato | mgL ⁻¹ | 32 | 41 | 54 | 59 | 65 |
| Fosfato | mgL ⁻¹ | 0,19 | 0,27 | 0,33 | 0,61 | 0,73 |
| Sólidos Suspensos Totais (SST) | mgL ⁻¹ | 376 | 1332 | 310 | 560 | 1506 |
| Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) | mgL ⁻¹ | 160 | 228 | 273 | 256 | 400 |
| Alcalinidade | mgL ⁻¹ | 46 | 56 | 62 | 73 | 78 |
| Acidez Volátil | mgL ⁻¹ | 24 | 30 | 44 | 46 | 52 |
| Dureza | mgL ⁻¹ | 18,2 | 21,5 | 10,2 | 23 | 35 |
| COD | mgO ₂ L ⁻¹ | 2,2 | 4,5 | 6,0 | 11,6 | 12,5 |
| Coliformes Totais | UFC/100 mL ⁽¹⁾ | 5620 | 3955 | 2000 | 8690 | 10000 |
| <i>Escherichia coli</i> | UFC/100 mL ⁽¹⁾ | 340 | 800 | 600 | 500 | 700 |
| Prata | mgL ⁻¹ | 0,006 | 0,009 | 0,010 | 0,028 | 0,051 |
| Alumínio | mgL ⁻¹ | 0,427 | 1,132 | 1,930 | 2,010 | 2,135 |
| Bário | mgL ⁻¹ | Nd | 0,001 | 0,002 | 0,002 | 0,005 |
| Cádmio | mgL ⁻¹ | 0,002 | 0,004 | 0,008 | 0,008 | 0,009 |
| Cromo | mgL ⁻¹ | 0,029 | 0,030 | 0,050 | 0,057 | 0,638 |
| Cobre | mgL ⁻¹ | 0,090 | 0,091 | 0,137 | 0,249 | 0,394 |
| Ferro | mgL ⁻¹ | 7,991 | 33,473 | 41,009 | 45,231 | 60,135 |
| Manganês | mgL ⁻¹ | 0,600 | 1,267 | 2,456 | 1,972 | 2,000 |
| Sódio | mgL ⁻¹ | 2,347 | 6,792 | 18,762 | 19,447 | 13,696 |
| Chumbo | mgL ⁻¹ | Nd | 0,010 | 0,020 | 0,003 | 0,049 |

| | | | | | | |
|-------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Zinco | mgL ⁻¹ | 0,187 | 0,359 | 0,880 | 1,312 | 0,927 |
|-------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|

(1) UFC/100 mL – Unidades Formadoras de Colônia em 100 mL de amostra; Nd-não detectado

ANEXO III

RESULTADOS MÉDIOS OBTIDOS PARA A CARACTERIZAÇÃO DAS ÁGUAS FILTRADAS

Tabela 3. Valores médios das características das águas filtradas obtidas nos ensaios de filtração para membrana 0,1 µm, água de baixa cor e turbidez nas pressões 1 e 2 bar.

| Parâmetro | Unidade | 1 bar | | | 2 bar | | |
|----------------------------------|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | AB | MSCA | MSC | AB | MSCA | MSC |
| Cor Aparente | uH = mgPt-CoL ⁻¹ | Nd | Nd | Nd | Nd | Nd | Nd |
| Turbidez | uT | 0,6 | 0,1 | 0,5 | 0,2 | 0,5 | 0,2 |
| UV-254 nm | cm ⁻¹ | Nd | 0,001 | Nd | Nd | 0,012 | 0,002 |
| pH | - | 7,63 | 7,34 | 6,82 | 7,67 | 7,21 | 6,76 |
| Amônia | mgL ⁻¹ | 0,003 | 0,004 | 0,02 | 0,004 | 0,002 | 0,002 |
| Nitrito | mgL ⁻¹ | 0,004 | 0,006 | 0,006 | 0,04 | 0,005 | 0,006 |
| Nitrato | mgL ⁻¹ | 1,2 | 1,5 | 1,2 | 13,4 | 7,1 | 1,1 |
| Sulfito | mgL ⁻¹ | Nd | 0,08 | 0,095 | 0,07 | 1 | 0,99 |
| Sulfato | mgL ⁻¹ | Nd | Nd | Nd | Nd | Nd | 1 |
| Fosfato | mgL ⁻¹ | 0,09 | 0,05 | 0,05 | 0,07 | 0,17 | 0,11 |
| Sólidos Suspensos Totais (SST) | mgL ⁻¹ | Nd | Nd | Nd | 30 | 52 | 28 |
| Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) | mgL ⁻¹ | Nd | Nd | Nd | 35 | 46 | 25 |
| Alcalinidade | mgL ⁻¹ | 26 | 19 | 22 | 18,5 | 22 | 18 |
| Acidez Volátil | mgL ⁻¹ | 6 | 6 | 6 | 6 | 7 | 6 |
| COD | mgO ₂ L ⁻¹ | 1,6 | 0,821 | 1,79 | 2,275 | 1,232 | 1,541 |
| Coliformes Totais | UFC/100 mL ⁽¹⁾ | Nd | Nd | Nd | Nd | Nd | Nd |
| <i>Escherichia coli</i> | UFC/100 mL ⁽¹⁾ | Nd | Nd | Nd | Nd | Nd | Nd |
| Prata | mgL ⁻¹ | Nd | Nd | Nd | Nd | Nd | Nd |
| Alumínio | mgL ⁻¹ | 0,023 | 0,003 | 0,003 | 0,021 | 0,026 | 0,043 |
| Bário | mgL ⁻¹ | Nd | 0,001 | 0,002 | 0,180 | 1,834 | 2,001 |
| Cádmio | mgL ⁻¹ | 0,001 | 0,002 | 0,004 | 0,007 | 0,008 | 0,009 |
| Cromo | mgL ⁻¹ | 0,012 | 0,020 | 0,007 | 0,004 | Nd | 0,007 |
| Cobre | mgL ⁻¹ | 0,080 | 0,023 | 0,020 | Nd | 0,004 | 0,029 |
| Ferro | mgL ⁻¹ | 0,021 | 0,021 | 0,023 | 0,022 | 0,020 | 0,024 |
| Manganês | mgL ⁻¹ | Nd | Nd | 0,08 | Nd | Nd | 0,024 |
| Sódio | mgL ⁻¹ | 1,07 | 3,197 | 2,972 | 3,465 | 3,487 | 2,996 |
| Chumbo | mgL ⁻¹ | Nd | 0,001 | 0,148 | 0,161 | 0,151 | 0,161 |
| Zinco | mgL ⁻¹ | 0,026 | 0,025 | 0,026 | 0,026 | 0,018 | 0,026 |

(2) UFC/100 mL – Unidades Formadoras de Colônia em 100 mL de amostra; Nd-não detectado

AB- filtração da água bruta, MSCA – aplicação da solução coagulante extraída com água no processo combinado e MSC – aplicação da solução coagulante extraída com sal no processo combinado.

Tabela 4. Valores médios das características das águas filtradas obtidas nos ensaios de filtração para membrana 0,1 μm , água de alta cor e turbidez nas pressões 1 e 2 bar.

| Parâmetro | Unidade | 1 bar | | | 2 bar | | |
|----------------------------------|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | AB | MSCA | MSC | AB | MSCA | MSC |
| Cor Aparente | $\text{uH} = \text{mgPt-CoL}^{-1}$ | 4 | Nd | Nd | Nd | Nd | Nd |
| Turbidez | uT | 0,7 | 0,3 | 0,2 | 0,5 | 0,51 | 0,27 |
| UV-254 nm | cm^{-1} | Nd | 0,02 | 0,04 | 0,016 | 0,02 | 0,01 |
| pH | - | 6,99 | 6,75 | 6,67 | 7,55 | 6,44 | 6,33 |
| Amônia | mgL^{-1} | 0,005 | 0,007 | 0,05 | 0,003 | 0,006 | 0,002 |
| Nitrito | mgL^{-1} | 0,002 | 0,005 | 0,005 | 0,038 | 0,001 | 0,003 |
| Nitrato | mgL^{-1} | 0,7 | 1,6 | 1,2 | 4,6 | 1 | 1,3 |
| Sulfito | mgL^{-1} | Nd | 5 | 0,048 | 1 | 7 | 1,5 |
| Sulfato | mgL^{-1} | Nd | 1 | 1 | Nd | 1 | 4 |
| Fosfato | mgL^{-1} | 0,02 | 0,05 | 0,38 | 0,016 | 0,14 | 0,62 |
| Sólidos Suspensos Totais (SST) | mgL^{-1} | 40 | 62,67 | 40,00 | Nd | Nd | Nd |
| Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) | mgL^{-1} | 24 | 46,60 | 66,00 | Nd | Nd | Nd |
| Alcalinidade | mgL^{-1} | 23,5 | 30 | 31 | 27,5 | 25,5 | 30 |
| Acidez Volátil | mgL^{-1} | 9 | 6 | 9 | 6 | 6 | 6 |
| COD | $\text{mgO}_2\text{L}^{-1}$ | 2,6 | 1,77 | 1,86 | 1,15 | 1,09 | 2,88 |
| Coliformes Totais | $\text{UFC}/100 \text{ mL}^{(1)}$ | Nd | Nd | Nd | Nd | Nd | Nd |
| <i>Escherichia coli</i> | $\text{UFC}/100 \text{ mL}^{(1)}$ | Nd | Nd | Nd | Nd | Nd | Nd |
| Prata | mgL^{-1} | Nd | Nd | Nd | Nd | Nd | 0,005 |
| Alumínio | mgL^{-1} | 0,013 | 0,001 | 0,023 | 0,053 | 0,046 | 0,030 |
| Bário | mgL^{-1} | 1,749 | 1,592 | 1,846 | 1,940 | 2,072 | 2,390 |
| Cádmio | mgL^{-1} | 0,006 | 0,006 | 0,008 | 0,009 | 0,009 | 0,004 |
| Cromo | mgL^{-1} | 0,006 | 0,007 | 0,009 | Nd | 0,005 | Nd |
| Cobre | mgL^{-1} | 0,028 | 0,023 | 0,039 | Nd | 0,005 | 0,085 |
| Ferro | mgL^{-1} | 0,020 | 0,018 | 0,025 | 0,026 | 0,021 | 0,011 |
| Manganês | mgL^{-1} | Nd | Nd | 0,002 | Nd | Nd | 0,006 |
| Sódio | mgL^{-1} | 3,57 | 3,521 | 3,850 | 3,006 | 3,004 | 3,320 |
| Chumbo | mgL^{-1} | 0,157 | 0,150 | 0,151 | 0,152 | 0,154 | 0,119 |
| Zinco | mgL^{-1} | 0,026 | 0,034 | 0,033 | 0,018 | 0,021 | 0,016 |

(3) UFC/100 mL – Unidades Formadoras de Colônia em 100 mL de amostra; Nd-não detectado

AB- filtração da água bruta, MSCA – aplicação da solução coagulante extraída com água no processo combinado e MSC – aplicação da solução coagulante extraída com sal no processo combinado.

Tabela 5. Valores médios das características das águas filtradas obtidas nos ensaios de filtração para membrana 0,2 μm , água de baixa cor e turbidez nas pressões 1 e 2 bar.

| Parâmetro | Unidade | 1 bar | | | 2 bar | | |
|----------------------------------|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | AB | MSCA | MSC | AB | MSCA | MSC |
| Cor Aparente | $\text{uH} = \text{mgPt-CoL}^{-1}$ | Nd | Nd | Nd | Nd | Nd | Nd |
| Turbidez | uT | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,74 | 0,5 | 0,35 |
| UV-254 nm | cm^{-1} | 0,02 | 0,03 | 0,01 | 0,123 | Nd | 0,02 |
| pH | - | 7,57 | 6,38 | 6,5 | 6,11 | 6,37 | 6,17 |
| Amônia | mgL^{-1} | 0,03 | 0,03 | 0,05 | 0,02 | 0,02 | 0,07 |
| Nitrito | mgL^{-1} | 0,009 | 0,003 | 0,002 | 0,008 | 0,002 | 0,004 |
| Nitrato | mgL^{-1} | 2,5 | 1,8 | 1,6 | 1,6 | 2,1 | 1,5 |
| Sulfito | mgL^{-1} | 1 | 2 | 2 | Nd | 2 | 1 |
| Sulfato | mgL^{-1} | 1 | Nd | Nd | Nd | 1 | 1 |
| Fosfato | mgL^{-1} | 0,22 | 0,12 | 0,25 | 0,08 | 0,06 | 0,19 |
| Sólidos Suspensos Totais (SST) | mgL^{-1} | 25 | 2 | 3 | 52,3 | Nd | Nd |
| Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) | mgL^{-1} | 51 | 21 | 10 | 48,9 | Nd | Nd |
| Alcalinidade | mgL^{-1} | 39,5 | 27,5 | 17,5 | 13,5 | 18,5 | 16,5 |
| Acidez Volátil | mgL^{-1} | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| COD | $\text{mgO}_2\text{L}^{-1}$ | 1,638 | 1,227 | 0,919 | 0,758 | 2,188 | 2,364 |
| Coliformes Totais | $\text{UFC}/100 \text{ mL}^{(1)}$ | Nd | Nd | Nd | Nd | Nd | Nd |
| <i>Escherichia coli</i> | $\text{UFC}/100 \text{ mL}^{(1)}$ | Nd | Nd | Nd | Nd | Nd | Nd |
| Prata | mgL^{-1} | 0,001 | 0,002 | 0,002 | 0,003 | 0,001 | 0,004 |
| Alumínio | mgL^{-1} | 0,036 | 0,049 | 0,094 | 0,038 | 0,046 | 0,056 |
| Bário | mgL^{-1} | 2,49 | 2,62 | 2,91 | 0,51 | 0,59 | 0,84 |
| Cádmio | mgL^{-1} | 0,002 | 0,002 | 0,004 | Nd | 0,001 | 0,001 |
| Cromo | mgL^{-1} | Nd | Nd | Nd | Nd | Nd | Nd |
| Cobre | mgL^{-1} | 0,085 | 0,017 | 0,009 | 0,011 | 0,030 | 0,023 |
| Ferro | mgL^{-1} | 0,015 | 0,009 | 0,009 | 0,014 | 0,018 | 0,016 |
| Manganês | mgL^{-1} | 0,004 | 0,004 | 0,010 | Nd | 0,009 | 0,006 |
| Sódio | mgL^{-1} | 3,799 | 2,412 | 2,114 | 2,458 | 1,700 | 2,561 |
| Chumbo | mgL^{-1} | 0,119 | 0,126 | 0,122 | 0,056 | 0,056 | 0,048 |
| Zinco | mgL^{-1} | 0,017 | 0,016 | 0,019 | 0,012 | 0,012 | 0,011 |

(4) UFC/100 mL – Unidades Formadoras de Colônia em 100 mL de amostra; Nd-não detectado

AB- filtração da água bruta, MSCA – aplicação da solução coagulante extraída com água no processo combinado e MSC – aplicação da solução coagulante extraída com sal no processo combinado.

Tabela 6. Valores médios das características das águas filtradas obtidas nos ensaios de filtração para membrana 0,2 μm , água de alta cor e turbidez nas pressões 1 e 2 bar.

| Parâmetro | Unidade | 1 bar | | | 2 bar | | |
|----------------------------------|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | AB | MSCA | MSC | AB | MSCA | MSC |
| Cor Aparente | $\text{uH} = \text{mgPt-CoL}^{-1}$ | Nd | Nd | Nd | Nd | Nd | Nd |
| Turbidez | uT | 0,41 | 0,31 | 0,3 | 0,6 | 0,11 | 0,13 |
| UV-254 nm | cm^{-1} | 0,001 | 0,001 | 0,04 | 0,02 | 0,013 | 0,030 |
| pH | - | 6,86 | 6,72 | 6,45 | 7,48 | 6,91 | 6,15 |
| Amônia | mgL^{-1} | 0,03 | 0,02 | 0,13 | 0,06 | 0,04 | 0,06 |
| Nitrito | mgL^{-1} | 0,004 | 0,005 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,010 |
| Nitrato | mgL^{-1} | 1,6 | 2,0 | 1,0 | 1,3 | 2,4 | 1,5 |
| Sulfito | mgL^{-1} | Nd | 3,0 | 11 | 2,0 | 3,0 | 5,0 |
| Sulfato | mgL^{-1} | Nd | Nd | 1,0 | 1,0 | Nd | 1,5 |
| Fosfato | mgL^{-1} | 0,41 | 0,10 | 0,04 | 0,05 | 0,09 | 0,39 |
| Sólidos Suspensos Totais (SST) | mgL^{-1} | 150 | 22,67 | 90 | Nd | Nd | Nd |
| Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) | mgL^{-1} | 106 | 31,15 | 1,30 | Nd | Nd | Nd |
| Alcalinidade | mgL^{-1} | 24,5 | 17,5 | 38,5 | 34,5 | 18,5 | 32,5 |
| Acidez Volátil | mgL^{-1} | 6 | 4,5 | 6 | 7 | 6 | 6 |
| COD | $\text{mgO}_2\text{L}^{-1}$ | 1,736 | 2,460 | 2,331 | 1,456 | 2,341 | 2,311 |
| Coliformes Totais | $\text{UFC}/100 \text{ mL}^{(1)}$ | Nd | Nd | Nd | Nd | Nd | Nd |
| <i>Escherichia coli</i> | $\text{UFC}/100 \text{ mL}^{(1)}$ | Nd | Nd | Nd | Nd | Nd | Nd |
| Prata | mgL^{-1} | Nd | 0,002 | 0,005 | 0,002 | 0,003 | 0,006 |
| Alumínio | mgL^{-1} | 0,095 | 0,086 | 0,086 | 0,047 | 0,079 | 0,067 |
| Bário | mgL^{-1} | 3,05 | 3,15 | 3,630 | 0,790 | 0,910 | 1,320 |
| Cádmio | mgL^{-1} | 0,004 | 0,005 | 0,006 | 0,033 | 0,045 | 0,085 |
| Cromo | mgL^{-1} | Nd | Nd | Nd | Nd | Nd | Nd |
| Cobre | mgL^{-1} | 0,003 | 0,008 | Nd | 0,056 | 0,047 | 0,074 |
| Ferro | mgL^{-1} | 0,015 | 0,010 | 0,017 | 0,012 | 0,010 | 0,016 |
| Manganês | mgL^{-1} | 0,004 | 0,004 | 0,007 | Nd | 0,002 | 0,002 |
| Sódio | mgL^{-1} | 2,069 | 2,000 | 2,409 | 3,129 | 2,469 | 3,799 |
| Chumbo | mgL^{-1} | 0,119 | 0,130 | 0,136 | 0,053 | 0,064 | 0,064 |
| Zinco | mgL^{-1} | 0,017 | 0,016 | 0,020 | 0,010 | 0,016 | 0,014 |

(5) UFC/100 mL – Unidades Formadoras de Colônia em 100 mL de amostra; Nd-não detectado

AB- filtração da água bruta, MSCA – aplicação da solução coagulante extraída com água no processo combinado e MSC – aplicação da solução coagulante extraída com sal no processo combinado.