

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DIRETORIA DE GRADUAÇÃO E EDUCAÇÃO PROFISSIONAL  
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

ISABELA SOLANA

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE UTILIZAÇÃO DE UM POLÍMERO DE  
BASE ORGÂNICA EM SUBSTITUIÇÃO AO CLORETO FÉRRICO NO  
TRATAMENTO DE EFLUENTE INDUSTRIAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

MEDIANEIRA  
2014

ISABELA SOLANA

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE UTILIZAÇÃO DE UM POLÍMERO DE  
BASE ORGÂNICA EM SUBSTITUIÇÃO AO CLORETO FÉRRICO NO  
TRATAMENTO DE EFLUENTE INDUSTRIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental, do Curso de Engenharia Ambiental, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Medianeira.

Orientador: Profa. Dra Juliana Bortoli Rodrigues Mees

Co-orientador: Prof. Me Ismael Laurindo Costa Junior

MEDIANEIRA

2014



Ministério da Educação  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
Câmpus Medianeira  
Diretoria de Graduação e Educação Profissional  
Coordenação do Curso de Engenharia Ambiental



---

## TERMO DE APROVAÇÃO

ESTUDO DA VIABILIDADE DE UTILIZAÇÃO DE UM POLÍMERO COM BASE  
ORGÂNICA EM SUBSTITUIÇÃO AO CLORETO FÉRRICO NO TRATAMENTO DE  
EFLUENTE INDUSTRIAL

por

ISABELA SOLANA

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado às 14:00h do dia 09 de dezembro de 2014, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental. A candidata foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Profa. Dra. Juliana Bortoli R. Mees  
Orientadora

---

Prof. Me. Ismael Laurindo Costa Junior  
Co-orientador

---

Profa. Dra. Leidi Cecilia Friedrich  
Membro titular

---

Prof. Me. Eduardo Borges Lied  
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

A Instituição e seu corpo docente, pela oportunidade da minha graduação e por tudo que vivi e aprendi nesses 5 anos.

A minha orientadora Profa. Dra Juliana Bortoli R. Mees e ao meu co-orientador Prof. Me. Ismael L. C. Junior, por toda a ajuda, aprendizado, por suas correções e incentivo.

Ao Departamento Ambiental da Frimesa Cooperativa Central pelo apoio e pela abertura para a realização desse trabalho.

As minhas amigas Claudia Gasparovic, Fernanda Fonseca, Karina Navarro, Jeysa Passos, Bruna Cunha, Alessandra Freddo e Cristiane Witcel. Foram tantas coisas que passamos juntas, momentos alegres, desafiadores, muitos trabalhos em grupos e muitas visitas técnicas, enfim, todos esses momentos foram muito bons por ter vocês comigo.

Ao meu grupo de jovens, que me deram todo o apoio, entenderam minhas faltas, me animaram e motivaram.

Agradeço aos meus pais Joana e Claudenir, e meu noivo Jeferson, pelo amor, incentivo e apoio incondicional, pois sem eles tudo teria sido mais difícil.

Ao PROGRAD pela bolsa de fomento às ações do trabalho de conclusão de curso.

Enfim, a todos os que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Apesar dos nossos defeitos, precisamos enxergar que somos pérolas únicas no teatro da vida e entender que não existem pessoas de sucesso ou pessoas fracassadas. O que existe são pessoas que lutam pelos seus sonhos ou desistem deles. (CURY, Augusto)

## RESUMO

SOLANA, Isabela. **Estudo da viabilidade de utilização de um polímero de base orgânica em substituição ao cloreto férrico no tratamento de efluente industrial.** 2014. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2014.

No tratamento de efluentes industrial, em alguns casos, é necessário um pós-tratamento para garantir o atendimento às legislações vigentes. Uma das formas é pelo processo de coagulação/floculação, com o uso de produtos químicos, principalmente sais a base de ferro e alumínio. Porém, o uso desses produtos traz algumas dificuldades para a empresa, como a destinação do lodo, pela presença de metais e por não ser biodegradável. Assim, este trabalho objetivou avaliar a viabilidade técnica e econômica da troca de um coagulante inorgânico por um de base orgânica e propor a aplicação de outro coagulante de origem vegetal, no tratamento de efluentes de uma agroindústria. Estudaram-se os coagulantes a base de Moringa oleífera (MO) e o NOVFLCOC, e o floculante POLFLCOC da NOVTEC®. Foi aplicada a metodologia de planejamento experimental e otimização de processos, tendo em um estudo, como variáveis independentes a concentração de NOVFLCOC e de POLFLCOC, e no outro estudo da MO e do POLFLCOC, tendo como variável resposta a remoção de turbidez. Foram avaliados os parâmetros DQO, pH, sólidos dissolvidos totais e condutividade elétrica. Primeiramente realizou-se um planejamento inicial fatorial  $2^2$ , seguido de Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR). Economicamente a substituição foi inviável, pois o custo de R\$ 0,44 passou para R\$ 0,76, por metro cúbico de efluente tratado. Porém, tecnicamente foi viável, pois praticamente não alterou a eficiência e permitiu atender a legislação vigente de lançamento de efluente, além de muitos outros ganhos para a empresa e para o meio ambiente. Com o NOVFLCOC, conseguiu-se a otimização na faixa de 550 a 700 ppm de coagulante, com uma remoção de 100% da turbidez, sendo que o POLFLCOC não se apresentou significativo. Para DQO removeu-se 56,93% com uma concentração de 120 ppm de coagulante e 6 ppm de floculante. Com a MO não se alcançou a otimização, porém chegou-se a resultados de remoção de até 61,11%, com 200 a 250 ppm de coagulante e de 4 a 6 ppm de floculante, e uma remoção de DQO de 99%, com 95,2 ppm de coagulante e 4 ppm de floculante.

**Palavras-chave:** Coagulação. Moringa oleífera. Otimização.

## ABSTRACT

SOLANA, Isabela. **Feasibility evaluation of the ferric chloride replacement for organic polymer in industrial wastewater treatment.** 2014. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2014.

In some cases, in wastewater treatment, it is necessary a post-treatment in order to ensure legal compliance. A way to do this is through the coagulation/flocculation process, which uses chemical products, mainly iron and aluminum salts. However, the use of these products brings some difficulties to the company, such as sludge destination, given that it contains metal substances and that it is not biodegradable. Thereby, the purpose of this paper was to evaluate the technical and economical feasibility related to the exchange of a inorganic coagulant for a organic based one, and also, to propose the utilization of another, plant based coagulant, in the wastewater treatment of an agro-industry. The coagulants Moringa oleifera (MO) and NOVFLCOC, and the flocculant POLFLCOC by NOVTEC® were studied. It was applied the experimental design and process optimization method, in which in one experiment, the independent variables were the NOVFLCOC and POLFLCOC concentration, and in another, the MO and POLFLCOC concentration in the wastewater, whereas in both cases, the response variable was the turbidity removal. There were also evaluation parameters the COD, pH, total dissolved solids and electrical conductivity. Firstly, it was carried out a initial factorial 2<sup>2</sup> experimental design, followed by a Composite Central Rotatable Design (CCRD). Economically, the substitution was not feasible, given that the initial R\$ 0,44 cost for treated wastewater cubic meter became R\$ 0,76. However, it proved to be technically feasible, because the substitution did not significantly change the treatment efficiency and allowed the effluent release legal compliance, not to mention many other advantages for the company and the environment. For NOVFLCOC, the optimization was obtained at the 500 to 700 ppm range of coagulant concentration, presenting a 100% turbidity efficiency removal, whereas the POLFLCOC concentration did not prove to be statistically significant. The COD removal was of 56,93%, when it was applied a 120 ppm coagulant concentration and a 6 ppm flocculant concentration. The optimization was not obtained with the MO experiment, but there were obtained turbidity removal results up to 61,11%, with a 200 to 250 ppm range of coagulant concentration and 4 to 6 of flocculant concentration, and also, a COD removal of 99%, when using 95,2 ppm of coagulant and 4 ppm of flocculant.

Keywords. Coagulant. Moringa Oleifera. Optimization.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Configuração Esquemática da Dupla Camada Elétrica.....	16
Figura 2 - Coagulação de Partículas Coloidais por Neutralização de Cargas.....	17
Figura 3 – Coagulação por Agregação dos Coloides.....	18
Figura 4 – Coagulação por Ligação Entre Partículas Através de Polímeros.....	19
Figura 5 – Extrato de MO sob Agitação.....	29
Figura 6 – Jar Test Utilizado nos Ensaios.....	30
Figura 7 – Caracterização do Efluente.....	38
Figura 8 – Início da Coagulação com Concentração de 30ppm de NOVLOC.....	39
Figura 9 - Início da Coagulação com Concentração de 150 ppm de MO.....	39
Figura 10 – Gráfico de Turbidez e pH.....	40
Figura 11 - Diagrama de Pareto para Remoção de Turbidez no Processo Coagulação/floculação.....	43
Figura 12 - Superfície Resposta na Remoção de Turbidez em Efluente.....	44
Figura 13 - Superfície Resposta na Remoção de Turbidez em Efluente.....	47
Figura 14 – Gráfico da Probabilidade Normal dos Resíduos.....	49
Figura 15 – Gráfico dos Resíduos pelos Valores Observados.....	49
Figura 16 - (a) Superfície Resposta; (b) Superfície de Contorno.....	51
Figura 17 - Diagrama de Pareto para Remoção de Turbidez em Água Sintética.....	54
Figura 18 - Superfície Resposta na Remoção de Turbidez em Efluente.....	55
Figura 19 - Superfície Resposta na Remoção de Turbidez em Efluente.....	58

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores Recomendados para <i>Jar Test</i> .....	14
Tabela 2 – Métodos e Protocolos Utilizados na Caracterização do Efluente.....	27
Tabela 3 – Níveis Reais e Codificados das Variáveis Estudadas.....	32
Tabela 4 – Níveis Reais e Codificados das Variáveis Estudadas.....	32
Tabela 5 – Volume Mensal de Efluente Tratado no Flotador (em m <sup>3</sup> ).....	34
Tabela 6 – Custo Mensal com Coagulantes e Floculante no Flotador (em R\$).....	35
Tabela 7 – Custo do m <sup>3</sup> de Efluente Tratado no Flotador (em R\$/m <sup>3</sup> ).....	35
Tabela 8 - Valores de DQO do Afluente e Efluente do Flotador.....	36
Tabela 9 – Caracterização do Efluente Agroindustrial na Entrada do Flotador, Padrão de Lançamento de Efluentes Especificados na Resolução do CONAMA 430/2011 e Recomendações do IAP (1998).....	38
Tabela 10 – Determinação de pH Ótimo (NOVFLOC e MORINGA).....	40
Tabela 11 - Matriz do Planejamento Experimental Inicial com Níveis Reais e Codificados das Variáveis.....	41
Tabela 12 - Efeitos dos Fatores Estudados para Remoção de Turbidez em Efluente.....	42
Tabela 13 - Análise de Variância (Intervalo de Confiança de 95%).....	43
Tabela 14 - Matriz do DCCR com Níveis Reais e Codificados das Variáveis.....	45
Tabela 15 - Efeitos dos Fatores Estudados para Remoção de Turbidez em Efluente.....	46
Tabela 16 - Análise de Variância (Intervalo de Confiança de 95%).....	46
Tabela 17 - Matriz do DCCR com Níveis Reais e Codificados das Variáveis.....	48
Tabela 18 - Efeitos dos Fatores Estudados para Remoção de Turbidez em Efluente.....	48
Tabela 19 - Análise de Variância (Intervalo de Confiança de 95%).....	50
Tabela 20 - Matriz do Planejamento Experimental Inicial com Níveis Reais e Codificados das Variáveis.....	52
Tabela 21 - Efeitos dos Fatores Estudados para Remoção de Turbidez em Efluente.....	53
Tabela 22 - Análise de Variância (Intervalo de Confiança de 95%).....	54
Tabela 23 - Matriz do DCCR com Níveis Reais e Codificados das Variáveis.....	56
Tabela 24 - Efeitos dos Fatores Estudados para Remoção de Turbidez em Efluente.....	57
Tabela 25 - Análise de Variância (Intervalo de Confiança de 95%).....	57

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>2 OBJETIVO GERAL</b> .....	<b>12</b>
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>13</b>
3.1 TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO: COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO.....	13
3.1.1 Mecanismos de coagulação .....	14
3.1.1.1 Compressão da Camada Difusa ou por Dupla Camada.....	15
3.1.1.2 Adsorção e Neutralização de Carga.....	16
3.1.1.3 Varredura.....	17
3.1.1.4 Adsorção e Formação de Pontes .....	18
3.1.2 Coagulantes inorgânicos .....	19
3.1.2.1 Sulfato de alumínio .....	20
3.1.2.2 Cloreto férrico .....	20
3.1.3 Coagulantes orgânicos .....	21
3.1.3.1 Acácia negra.....	22
3.1.3.2 Moringa oleífera.....	23
3.1.3.3 Quitosana .....	24
3.1.4 Polímeros como auxiliares de floculação.....	24
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>26</b>
4.1 VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA.....	26
4.2 COLETA E CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE .....	27
4.3 PREPARO DAS SOLUÇÕES .....	28
4.3.1 NOVFLOC 1540.....	28
4.3.2 POLFLOC D150.....	28
4.3.3 Moringa Oleífera .....	29
4.4 ENSAIOS PRELIMINARES DE COAGULAÇÃO .....	30
4.4.1 Dosagem mínima de coagulante .....	30
4.4.2 Determinação do pH ótimo .....	31
4.5 ENSAIOS DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO E DECANTAÇÃO .....	31
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>34</b>
5.1 VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA.....	34
5.2 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE.....	37
5.3 DOSAGEM MÍNIMA E PH ÓTIMO.....	39
5.4 OTIMIZAÇÃO DO NOVFLOC E POLFLOC.....	41
5.4.1 Planejamento inicial: fatorial (2) <sup>2</sup> .....	41

5.4.2 Delineamento Composto Central Rotacional .....	45
5.4.3 Delineamento Composto Central Rotacional deslocado .....	47
5.5 OTIMIZAÇÃO MORINGA OLEÍFERA E POLFLOC .....	52
5.5.1 Planejamento inicial: fatorial (2) <sup>2</sup> .....	52
5.5.2 Delineamento Composto Central Rotacional .....	55
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>60</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>62</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Após a utilização das águas, diversos resíduos são incorporados alterando suas características físicas, químicas e biológicas, gerando assim os efluentes líquidos industriais, esgotos domésticos e sanitários. Esses despejos quando gerenciados de forma incorreta podem contaminar as águas, o solo e a atmosfera, afetando substancialmente a saúde dos seres vivos. Portanto, antes de serem descartados num corpo hídrico ou dispostos no solo, os efluentes líquidos devem passar por um sistema de tratamento que pode ser composto por operações físicas e processos químicos e/ou biológicos, dependendo da natureza dos poluentes presentes.

Nos processos físico-químicos empregados para o tratamento de efluentes líquidos industriais são usados vários agentes químicos, na coagulação/floculação os principais agentes utilizados são sais coagulantes à base de ferro ou alumínio, mas esses coagulantes não são biodegradáveis e geram muito lodo, por isso se tornam problema para os sistemas de tratamento. Além disso, muitas vezes são utilizados como auxiliares do processo de coagulação, polieletrólitos (aniônicos, catiônicos ou não iônicos), com a finalidade de aumentarem a velocidade de sedimentação dos flocos e a resistência às forças de cisalhamento. Contudo, esses polímeros sintéticos, também apresentam riscos à saúde por não serem biodegradáveis.

Uma alternativa para minimizar problemas nas estações de tratamento de águas, esgotos e principalmente de efluentes industriais é substituir o uso de polímeros inorgânicos, como o cloreto férrico, por polímeros orgânicos que são biodegradáveis e não tóxicos, geram um menor volume de lodo com menor teor de metais, podendo esse lodo ser destinado a outros fins, como o uso agrícola, sem apresentar riscos.

Os coagulantes inorgânicos mais utilizados são: cloreto férrico, sulfato de alumínio, policloreto de alumínio (PAC) e sulfato férrico. Já os coagulantes/floculantes orgânicos que já vem sendo usados e estudados são: Moringa oleífera, quiabo, cacau, quitosana e acácia negra.

## 2 OBJETIVO GERAL

Avaliar a viabilidade técnica e econômica da utilização do polímero de base orgânica (NOVFLOC 1540) em substituição ao cloreto férrico, como agente no processo de coagulação/floculação, no tratamento de efluente agroindustrial.

### 2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar o efluente agroindustrial e avaliar a eficiência do processo de coagulação/floculação através dos parâmetros físico-químicos: sólidos dissolvidos totais, pH, condutividade elétrica, turbidez e demanda química de oxigênio;
- Verificar a viabilidade econômica da substituição do coagulante inorgânico (cloreto férrico) pelo de base orgânica (NOVFLOC 1540) avaliando um histórico do consumo diário e custo;
- Comparar o desempenho, com base nos parâmetros físico-químicos analisados, do coagulante inorgânico (cloreto férrico) versus coagulante orgânico (NOVFLOC 1540);
- Propor o uso de outro coagulante orgânico a base de sementes de *Moringa Oleífera Lam*;
- Determinar a dosagem mínima dos coagulantes NOVLOC 1540 e do extrato de *Moringa Oleífera Lam*, e o pH ótimo de coagulação;
- Determinar a concentração ótima dos coagulantes orgânicos (NOVFLOC 1540 e *Moringa Oleífera Lam*) e do auxiliar de coagulação (polímero catiônico - POLFLOC D150), utilizando a ferramenta estatística de planejamento experimental.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO: COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO

O processo de coagulação/floculação tem por finalidade a remoção das partículas coloidais, parcela das partículas em suspensão, que causam a turbidez, e das partículas dissolvidas, que causam a cor. Esse processo também contribui para a redução da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO).

A coagulação ocorre, pois o agente coagulante adicionado à água reduz as forças que tendem a manter separadas as superfícies em suspensão, e a floculação promove colisões entre as partículas desestabilizadas na coagulação, por meio de transporte de fluido, formando partículas maiores, os flocos (RICHTER, 2009). Para que isso aconteça a coagulação deve ser feita por meio de agitação intensa (mistura rápida) e a floculação de agitação mais moderada (mistura lenta).

No processo de coagulação são anuladas as forças de repulsão entre as partículas coloidais, por meio de mecanismos de ligação e adsorção na superfície da partícula coloidal, pela adição de agentes químicos. De acordo com Nunes (2001) esse processo pode ser melhorado recorrendo-se aos auxiliares de coagulação, que são polieletrólitos que aumentam a velocidade de sedimentação dos flocos e a resistências às forças de cisalhamento.

Os polieletrólitos são polímeros originários de proteínas e polissacarídeos constituídos de grandes cadeias moleculares, dotadas de sítios com cargas positivas ou negativas, podendo na presença da água, se transformar em catiônicos ou aniônicos, dependendo do saldo das cargas elétricas (BORBA, 2001, apud VAZ et al., 2010).

A otimização do processo de coagulação é obtido através de ensaios de coagulação em *Jar Test*. Nesses ensaios deve ser observado a faixa de pH e temperatura, pois são parâmetros que podem interferir na eficiência do processo, e por isso pode haver a necessidade de correções. Outro cuidado muito importante é na escolha do gradiente de velocidade e no tempo, que são o que diferenciam a coagulação da floculação. A Tabela 1 apresenta valores de tempo e gradiente

recomendados por diversos autores para ensaios de coagulação, floculação e sedimentação realizados em Jar Test.

**Tabela 1 – Valores Recomendados para Jar Test.**

Autores	Tempo de coagulação	Gradiente de veloc. ou rotação	Tempo de floculação	Gradiente (rotação)	Tempo de sedimentação
WEF (s.d.)	Alguns segundos	300 – 1000 s <sup>-1</sup>	20 – 30 min		
METCALF & EDDY (1991)	5 – 20 s	250 – 1500 s <sup>-1</sup>	10 – 30 min		
ETE Pavuna/RJ	5 – 30 s	(120 rpm)	30 seg 4 min	(120 rpm) (30 rpm)	60 min
JORDÃO (s.d.)	5 – 30 s	(120 rpm)	30 seg 4 min 30 seg	(120 rpm) (30 rpm)	30 min
COSTA (1992)	5 s	700 s <sup>-1</sup>	40 min	10 s <sup>-1</sup>	
BRITO (1998)	5 – 15 s	400 s <sup>-1</sup>	20 min	20 – 35 s <sup>-1</sup>	
DI BERNARDO (2000)	10 s	1000 s <sup>-1</sup>	24 min	25 s <sup>-1</sup>	

**Fonte: Adaptado de Resende e Carvalho (2002) e de Pavanelli (2001)**

De acordo com Libânio (2008) a escolha do coagulante deve basear-se em alguns fatores, como:

- Adequabilidade a água/efluente: dosagens otimizadas conforme a natureza da água ou efluente a ser tratado;
- Tecnologia de tratamento: depende da eficiência que se deseja obter;
- Custo do coagulante e dos produtos químicos: o maior custo justifica uma melhor qualidade no tratamento e um maior volume de água tratada;
- Quantidade e característica do lodo: depende da composição do coagulante, e problemas com manuseio e disposição podem ser minimizados;

### 3.1.1 Mecanismos de Coagulação

As partículas coloidais, em função do tamanho reduzido, de 0,001µm e 1µm, não sedimentam a não ser dentro de um intervalo de tempo muito grande. Em um

meio sólido-líquido os coloides chocam-se entre si, devido ao movimento browniano, o qual é contínuo e desordenado, provocando uma atração devido a força de Van der Waals e uma repulsão devido a dupla camada elétrica (PAVANELLI, 2001).

Os coloides possuem uma carga elétrica, na maioria dos casos negativa, que produz uma força de repulsão mútua suficientemente grande para mantê-las separadas e em suspensão. Por isso, para que ocorra a sua aglomeração é preciso reduzir ou neutralizar sua carga (RICHTER, 2009).

Existem quatro mecanismos de coagulação, os quais são: compressão da camada difusa; adsorção e neutralização; varredura e, adsorção e formação de pontes.

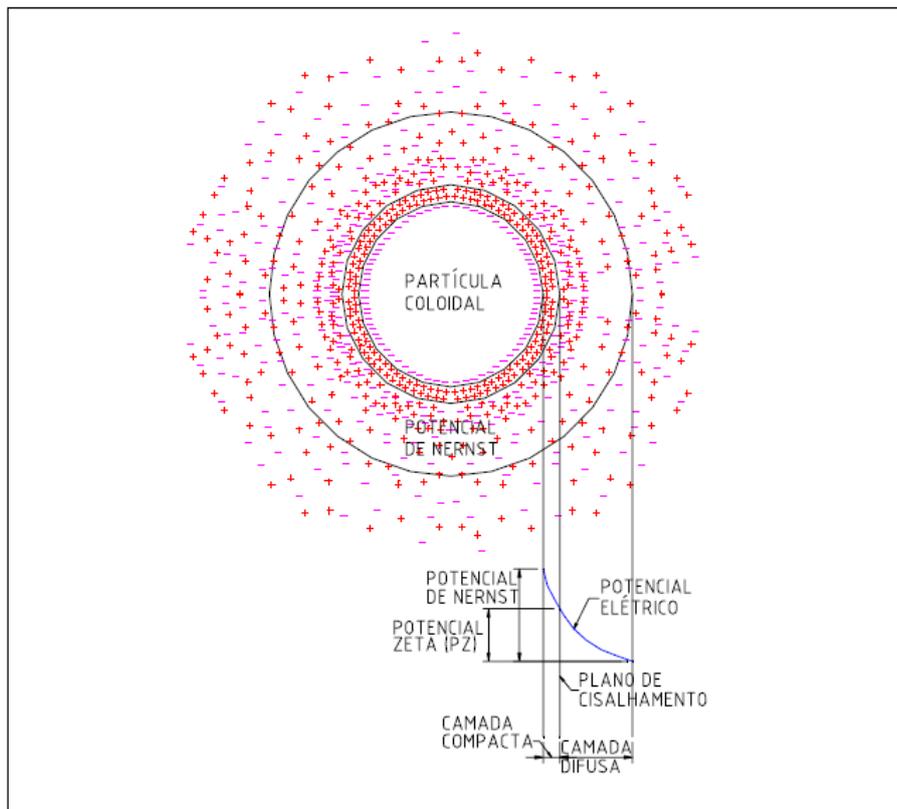
#### 3.1.1.1 Compressão da camada difusa ou por dupla camada

No mecanismo de compressão da camada difusa a desestabilização das partículas ocorre pela adição de íons de carga contrária à dos coloides, que são atraídas e adsorvidas, esse íons permanecem de maneira rígida na superfície da partícula, formando uma camada compacta.

A grande concentração de cargas positivas causa o excesso de íons na camada difusa, ocasionando assim a redução do volume de sua esfera para que consiga se manter eletricamente neutra, reduzindo o potencial elétrico, que é a última camada da partícula, e predominando as forças atrativas de Van der Waals (DI BERNARDO, 2002).

Segundo Zenatti (2011) a quantidade de eletrólitos para conseguir a coagulação é independente da concentração de coloides na água, sendo que não é possível causar a reversão de carga dos coloides, ou seja, a reestabilização das partículas coloidais.

A Figura 1 apresenta o esquema da dupla camada, onde o Potencial de *Nernst* é o potencial elétrico a partir da superfície do coloide; o Potencial Zeta é o potencial elétrico entre a superfície do coloide e os íons de carga contrária e o Plano de Cisalhamento é uma porção em torno da partícula que caminha junto com ela até o eletrodo positivo (DI BERNARDO, 2002).



**Figura 1 – Configuração Esquemática da Dupla Camada Elétrica.**  
**Fonte: Di Bernardo (1993) apud Pavanelli (2001).**

### 3.1.1.2 Adsorção e neutralização de carga

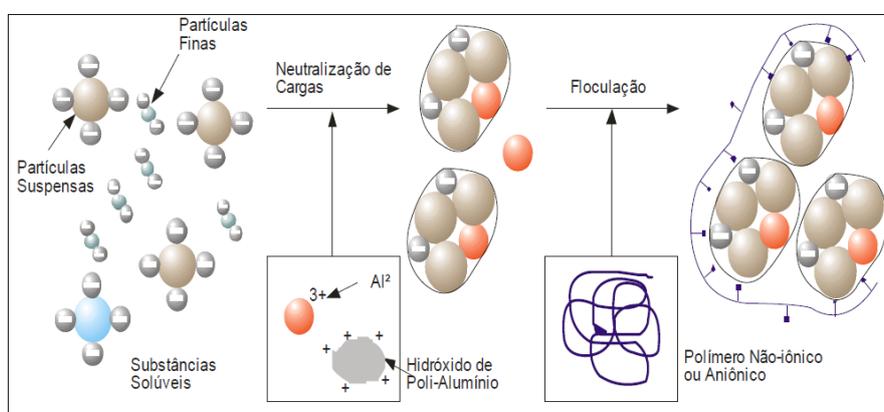
Algumas espécies químicas são capazes de serem adsorvidas na superfície das partículas coloidais. Esse processo provoca a desestabilização, pois as espécies são de carga contrária à da superfícies. Para o mecanismo de desestabilização é necessário dosagens inferiores às do mecanismo da camada difusa, pois há a possibilidade de reversão da carga superficial das partículas, caso haja superdosagem de coagulante (DI BERNARDO, 2002).

A dosagem deve ser baixa, pois a desestabilização da partícula ocorre imediatamente após a dispersão do coagulante na massa líquida, em um intervalo inferior a um segundo e com um elevado gradiente de velocidade (LIBÂNIO, 2008). Na desestabilização dos coloides, ao adicionar o coagulante, ocorrem interações coagulante-coloide, coagulante-solvente e coloide-solvente (PAVANELLI, 2001).

A neutralização é o mecanismo predominante da desestabilização, pois com a adsorção de um coagulante positivamente carregado na superfície do coloide com

carga negativa, resulta em carga líquida próxima a zero. Assim, é possível estabelecer relação estequiométrica entre a concentração de partículas e a dosagem ótima do coagulante, ou seja, para baixa concentração de partículas, será necessária baixa dosagem (LIMA, 2007).

A Figura 2 apresenta o mecanismo de adsorção e neutralização, onde inicialmente o produto da hidrólise do coagulante ( $Al^{+3}$ ) é adsorvido na superfície das partículas coloidais e depois neutraliza a carga dos colóides negativos.

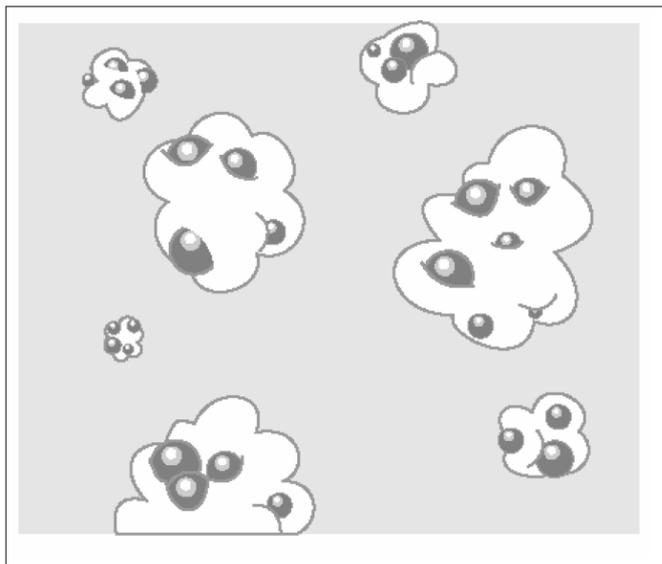


**Figura 2 - Coagulação de Partículas Coloidais por Neutralização de Cargas.**  
**Fonte: Kemira (2003) apud Lima (2007).**

### 3.1.1.3 Varredura

Esse mecanismo predomina quando há uma alta dosagem de coagulante e em função do pH de coagulação. As partículas coloidais são adsorvidas e as suspensas são envolvidas pelo precipitado, e depois são removidas por sedimentação (LIBÂNIO, 2008).

É o processo que desestabiliza os colóides através da saturação da água, devido a presença do gel hidróxido de alumínio ou de ferro, de carga positiva, provocando o arraste desses colóides que ficam aprisionados no gel (Figura 3), que funciona como pequenas vassouras peludas, que agarram as partículas, ou seja, elas são varridas da água, por isso o nome de varredura (VIANNA, 1997).



**Figura 3 – Coagulação por Agregação dos Colóides no Precipitado Formado.**

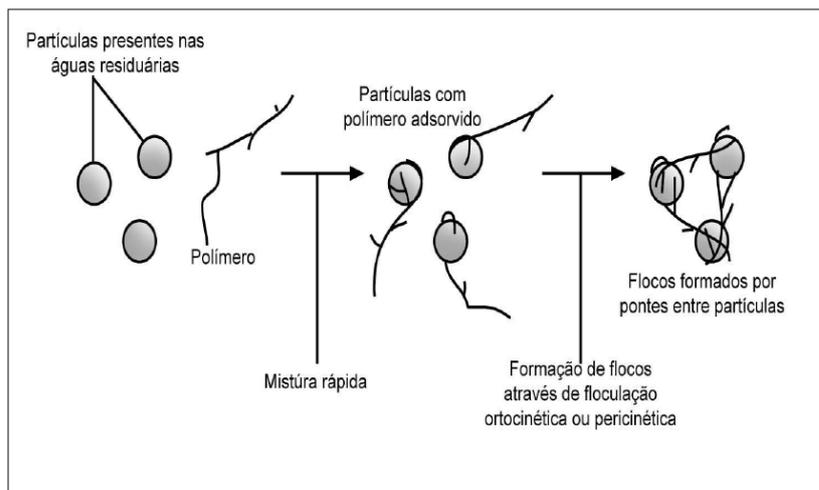
**Fonte: Ravina (1993) *apud* Lima (2007).**

Para Lima (2007), por esse processo formar um floco maior e com velocidade de sedimentação mais elevada que no mecanismo de adsorção e neutralização, é recomendado esse tipo de coagulação no tratamento completo ou convencional, que usa sedimentação ou flotação para a remoção dos flocos.

#### 3.1.1.4 Adsorção e formação de pontes

Para reduzir as dosagens de coagulante, são empregados auxiliares de coagulação, que são polímeros naturais ou sintéticos, caracterizados como compostos orgânicos de grande cadeia molecular. De acordo com Lima (2007) os polímeros podem ser catiônicos, aniônicos ou não-iônicos.

Na superfície das diversas cadeias dos polímeros as partículas são adsorvidas, formando pontes químicas (Figura 4). Podem ocorrer ligações devido a forças de atração eletrostática, como pontes de hidrogênio ou forças de van der Waals (LIBÂNIO, 2008).



**Figura 4 – Coagulação por Ligação Entre Partículas Através de Polímeros.**

**Fonte: Adaptada de Metcalf e Eddy (1999) apud Lima (2007).**

Segundo Lima (2007) a formação de pontes ocorre quando um coagulante faz a ligação entre as partículas, capturando-a e entrelaçando-a. Normalmente também ocorre a neutralização da carga, o que faz com que os flocos se tornem mais resistentes às forças de cisalhamento que provocam a ruptura.

### 3.1.2 Coagulantes Inorgânicos

Os principais coagulantes inorgânicos utilizados, no tratamento de águas e efluentes, são os sais à base de ferro ou alumínio. De acordo com Vaz (2009), isso devido à vantagem de apresentarem baixo custo. Contudo, esses agentes químicos, também apresentam riscos à saúde por não serem biodegradáveis, deixarem o alumínio e o ferro residual na água (SANTOS et al., 2010), produzirem uma grande quantidade de lodo e, exigirem o uso de produtos químicos para correção do pH.

Independente do mecanismo de coagulação, os coagulantes inorgânicos consomem a alcalinidade do meio e liberam  $\text{CO}_2$ , o que provoca a queda do pH, o qual normalmente se utiliza cal para o ajuste (LIBÂNIO, 2008).

### 3.1.2.1 Sulfato de alumínio

Os sais de alumínio são os agentes coagulantes mais utilizados no mundo, pois são de fácil transporte, baixo custo e muito eficientes. São substâncias inorgânicas, não biodegradáveis, que acrescentam elementos químicos à água e ao lodo. Além disso, esse lodo também possui alto teor de umidade e é de grande volume, o que dificulta a sua disposição final.

O sulfato de alumínio,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$ , atua na faixa de pH entre 5 e 7 (RICHTER, 2009). Estudos Conceição e Di Bernardo (1997) apud Lima (2007) mostraram que essa acidez é benéfica quando o mecanismo de coagulação é por adsorção e neutralização de cargas, já quando o pH é mais elevado, ocorre o mecanismo de varredura.

Em uma pesquisa para tratamento de efluente de galvanoplastia de Vaz et al. (2010), o sulfato de alumínio teve ótimos resultados, removendo 98,13% de cor e 98,78% de turbidez, quando aplicado uma concentração de 40 ppm e com uma sedimentação de 20 minutos.

O lodo de sulfato de alumínio, no tratamento de água, é um líquido não newtoniano, gelatinoso, composto por hidróxido de alumínio, partículas inorgânicas, portanto não biodegradável, com coloides de cor, bactérias e outros resíduos orgânicos, com pH próximo ao neutro (RICHTER, 2009). Sua composição está na faixa de 0,1 a 4% de sólidos totais, 15 a 40% de óxido de alumínio, 35 a 70% de inorgânicos, 15 a 25% de matéria orgânica, pH na faixa de 6 a 8, DBO de 30 a 300  $\text{mg.L}^{-1}$  e DQO de 30 a 5000  $\text{mg.L}^{-1}$  (MONTGOMERY, 1985 apud RICHTER, 2009).

### 3.1.2.2 Cloreto férrico

Os sais de ferro são, também, muito utilizados como agentes coagulantes, pois produzem bons flocos. Esses sais reagem de forma a neutralizar as cargas negativas dos coloides e proporcionam a formação de hidróxidos insolúveis de ferro. Devido à baixa solubilidade dos hidróxidos férricos formados, eles podem agir sobre ampla faixa de pH (PAVANELLI, 2001). De acordo com Richter (2009) esta faixa vai de 4 a 11.

No caso do coagulante inorgânico cloreto férrico,  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , Vaz et al. (2010) observou que a melhor remoção de cor e turbidez ocorreu no tempo de sedimentação de 30 minutos, com uma concentração de 30 ppm, sendo de 32,30% e 94,63%, respectivamente, para efluente de galvanoplastia.

No estudo de Resende e Carvalho (2002) no tratamento de esgoto, utilizando como coagulante o cloreto férrico e um polímero aniônico como auxiliar, apresentou para DBO remoção de 82% e para sólidos suspensos totais de 69%.

Os lodos provenientes da coagulação com sais de ferro, no tratamento de água, apresentam características semelhantes às do lodo de sulfato de alumínio, com 0,25 a 3,5% de sólidos totais, 4,6 a 20,6% de Fe, 5,1 a 1,41 de voláteis e com pH de 7,4 a 9,5 (RICHTER, 2009). Esse teor elevado de ferro no lodo, assim como no efluente tratado, impossibilita o seu reaproveitamento.

### 3.1.3 Coagulantes Orgânicos

Os polímeros catiônicos orgânicos podem ser utilizados como coagulantes primários, onde atuam por neutralização de carga. Por apresentarem alta viscosidade, devem ser diluídos antes de serem aplicados, em torno de 0,1 a 0,7% (RICHTER, 2009).

Há várias vantagens em se utilizar coagulantes orgânicos, as principais são em relação ao lodo gerado (MANGRICH et al., 2013; VAZ et al., 2010):

- É biodegradável o que possibilita sua compostagem e disposição final;
- A quantidade de lodo é reduzida, comparada com os coagulantes inorgânicos;
- Possui maior facilidade para a desidratação;
- Pode ser utilizado na produção de energia por combustão;
- Usado como fertilizantes orgânicos de solos, pois não possuem sais de alumínio e ferro;
- Apresenta baixo nível de toxicidade.

Compostos derivados de taninos vegetais têm se mostrado eficientes no tratamento de efluentes e águas para consumo humano. Taninos são moléculas fenólicas biodegradáveis com capacidade de formar complexos com proteínas e outras macromoléculas e minerais (CASTRO-SILVA et al., 2004 apud CORAL et al., 2009), presentes em árvores de grande e pequeno porte.

Segundo Macêdo (2004) a vantagem em se utilizar taninos vegetais é porque eles possuem a propriedade de adsorver metais dissolvidos em água, além de eliminar ou diminuir a toxicidade do meio. Possui um pH de 2,5 e atua numa faixa de pH de 4,5 a 8. Agem neutralizando as cargas e formando pontes entre essas partículas, originando os flocos.

Dentre os diversos polímeros naturais utilizados como coagulantes, tem-se: a Quitosana, a Acácia negra (SANTOS et al., 2010), a *Moringa oleifera* (DA SILVA et al., 2003), entre outros.

Vaz et al. (2010) afirmam que mesmo que o custo dos biopolímeros catiônicos seja maior que o custo dos sais de alumínio e ferro, as dosagens requeridas são menores, o que possibilita um custo total próximo ao dos coagulantes químicos.

### 3.1.3.1 Acácia negra

É um polímero catiônico orgânico preparado a partir do tanino extraído da *Acacia mearnsii* de Wildemann, ou acácia negra, planta de origem australiana.

No tratamento de efluentes industriais, o tanino da Acácia negra combinado com dietanolamina, cloreto de glicidiltrimetilamônio ou cloreto de amônio produz também eficientes coagulantes (BELTRAN-HEREDIA, 2010 apud MANGRICH et al., 2013).

Estudos de Sánchez-Martín et al. (2010) mostraram redução de cor em até 50%, remoção de surfactantes em até 75%, e remoção de matéria orgânica em 40% e de BDO<sub>5</sub> de 60%. Outros estudos mostram a capacidade desses coagulantes na remoção de fármacos em águas (MANGRICH et al., 2013).

Os agentes coagulantes Tanfloc SG® e Acquapol C1® são polímeros orgânico/ catiônico da casca da Acácia negra, obtidos por meio de um processo de

lixiviação, constituído basicamente por tanato quartenário de amônio (TANAC 2008; ACQUAPOL QUÍMICA, 2008; apud VAZ et al., 2010).

No tratamento de efluente de galvanoplastia feito por Vaz et al. (2010), o Tanfloc SG® apresentou bons resultados com uma concentração de 400ppm e um tempo de sedimentação de 40 minutos, removendo 95,90% de cor e 99,13% de turbidez. E para o coagulante Acquapol C1®, com uma concentração de 100 ppm e tempo de sedimentação de 20 minutos, a remoção foi de 96,69% de cor e 98,72% de turbidez.

Steinmetz et al. (s.d.) analisou a aplicação de um extrato de Acácia Negra modificado, como agente coagulante, combinado com uma solução de poliacrilamida (PAM), como auxiliar de coagulação, para separação sólido-líquido de contaminantes em dejetos de suínos. Seus resultados demonstraram eficiência para a remoção de material em suspensão com 94,8%, redução da DQO superior a 90% e da concentração dos metais acima de 86%, exceto Ca, Mg e Sr, que ficou em torno de 70%. A PAM foi bastante eficiente na separação do lodo gerado no processo de tratamento, provando reduzir o volume do mesmo.

No estudo de Bongiovani et al (2010), com o coagulante Tanfloc SS®, para tratamento de água, as melhores remoções ocorreram para a faixa de pH entre 6,0 e 9,0, com as dosagens de 10,0 a 60,0 mg.L<sup>-1</sup>.

### 3.1.3.2 Moringa oleífera

A *Moringa oleífera* é uma espécie vegetal da família *Moringaceae*, originária do nordeste indiano, de fácil cultivo e adaptação no Brasil, principalmente no Nordeste. Suas sementes são bastante utilizadas na clarificação de águas turvas em diversas regiões carentes do planeta, como no Sudão, outros países da África, no Nordeste brasileiro, entre outros (BORBA, 2001 apud ARANTES et al., 2012).

A ação do coagulante presente na *Moringa* se deve às proteínas que são polieletrólitos catiônicos de alto peso molecular presentes na semente da planta (NOGUEIRA et al., 2010).

No estudo de Vaz et al.(2010) com as sementes de *Moringa oleífera Lam*, a máxima remoção dos parâmetros cor e turbidez, foram de 90,30% e 92,90%,

respectivamente, para concentração de 200 ppm e tempo de sedimentação de 20 minutos, para efluente de galvanoplastia.

Lied et al. (2011) avaliou o tratamento de água residuária de fecularia e encontrou valores de redução de turbidez de 89,19% e de DQO de 70,98%, utilizando uma concentração de 2400 mg.L<sup>-1</sup> de extrato da semente da moringa, conseguida a partir da concentração molar de 1,0 mol/L de NaCl.

### 3.1.3.3 Quitosana

A quitosana é um produto de baixo custo, renovável e biodegradável, obtida a partir da quitina, extraídas das carcaças de crustáceos. É um biopolímero do tipo polissacarídeo, possui uma estrutura molecular similar à fibra vegetal (celulose). A quitosana é solúvel em meio ácido diluído e forma um polímero catiônico (VAZ et al., 2010).

No tratamento de efluente de galvanoplastia, realizado por Vaz et al. (2010), coagulante orgânico quitosana apresentou melhor eficiência para a concentração de 5 ppm e tempo de sedimentação de 20 minutos, na remoção de cor (98,68%) e de turbidez (99,44%). Segundo Vaz (2009) o lodo gerado pela quitosana é de fácil decomposição, pois apresenta um elevado teor de matéria orgânica.

### 3.1.4 Polímeros como Auxiliares de Floculação

Os polímeros, principalmente os não iônicos e os aniônicos, vem sendo usados como auxiliares de floculação em conjunto com o coagulante primário, substituindo a sílica ativada, sendo a maior vantagem do uso destes auxiliares o desenvolvimento dos flocos mais resistentes às forças de cisalhamento possibilitando floculação com gradientes mais elevados, com formação de flocos mais densos e com maior velocidade de sedimentação, sem alterar o pH e alcalinidade do meio (LIMA, 2007).

Eles são adicionados após a coagulação. Segundo Wagner e Pinheiro (2003) apud Lima (2007), recomenda-se que seja aplicado aproximadamente 4

minutos após o início do processo, que corresponde à etapa de floculação, mas esse tempo é muito variável, por isso, deve ser testado em Jar test, analisando a resistência, o tamanho e a velocidade de sedimentação dos flocos.

Entre os polímeros naturais utilizados como auxiliares de floculação estão: o alginato de sódio, que é extraído de ervas marinhas, eficiente em conjunto com sais de ferro e alumínio; o quiabo (*Abelmoschus esculentus*), usado na forma da mucilagem extraída da vagem (baba de quiabo) ou na forma de solução feita a partir do pó seco da vagem pulverizada; a mutamba ou “chico magro” (*Guazuma ulmifolia*), usada também na forma de solução da casca, do caule e do fruto; o cacau (*Theobroma cacao*), usado na forma e solução do pó da casca; entre outros (LIMA, 2007).

Os estudos com quiabo vêm apontando bons resultados, pois é facilmente cultivado, de baixo custo e não é concorrente do uso para alimentação, já que é adquirido o quiabo rejeitado pelo consumidor, que está seco e duro (SOUZA; LIMA, s.d.).

O quiabo é um polissacarídeo aniônico, biodegradável, não tóxico, é estável e tende a ser intensivamente usado no tratamento de águas de abastecimento, de esgoto doméstico e de efluentes de curtume (NOGUEIRA et al, 2010).

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi desenvolvido em duas etapas principais, a primeira *in loco* em uma agroindústria, abatedouro e frigorífico de suínos, localizado no oeste do Paraná à latitude sul 25°17'40" e longitude oeste 54°05'30", onde foi avaliada em escala real a viabilidade técnica e econômica da utilização de um polímero com base orgânica em substituição ao cloreto férrico, como agente no processo de coagulação/floculação, no tratamento dos efluentes líquidos.

O efluente líquido gerado é segregado em duas linhas de tratamento, verde e vermelha, ambas encaminhadas para o tratamento preliminar e primário composto por peneiras estáticas e decantadores, na sequência se unem seguindo para o tratamento secundário composto por lagoas de estabilização em série, sendo as duas primeiras lagoas anaeróbias seguidas por uma lagoa aerada de mistura completa e uma lagoa de decantação. Há ainda uma etapa de pós-tratamento físico-químico (coagulação, floculação e flotação), foco inicial do estudo, aplicado para remoção de carga orgânica remanescente e reuso externo à indústria.

A segunda parte do estudo foi em escala de bancada, no Laboratório de Águas, Efluentes e Emissões da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, campus Medianeira, onde foi avaliada a otimização do uso do coagulante com base orgânica e do auxiliar de coagulação e, a proposição do uso de um coagulante orgânico de origem vegetal.

Foram utilizados o coagulante com base orgânica NOVFLOC 1540 da NOVTEC®, o coagulante orgânico de semente de Moringa Olerífera e o auxiliar de coagulação polímero catiônico POLFLOC D150 também da NOVTEC®.

### 4.1 VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA

Para verificar a viabilidade econômica da substituição do coagulante inorgânico (cloreto férrico) pelo de base orgânica (NOVFLOC 1540) foi avaliado um histórico do consumo diário e de custo, num período de 6 meses anterior e posterior a troca, sendo o cloreto férrico e o floculante Kemira aplicado no ano de 2012 e o

NOVFLOC e o POLFLOC no ano de 2013. A substituição foi efetuada em março de 2013.

Para calcular o custo do metro cúbico tratado no processo físico-químico, utilizaram-se dados fornecidos pela indústria do volume total tratado em cada mês e o custo gasto com os coagulantes e auxiliares de coagulação.

Para avaliação da viabilidade técnica foi avaliado um histórico da eficiência do sistema de tratamento físico-químico utilizado pela empresa, com base no parâmetro de demanda química de oxigênio (DQO), durante o mesmo período.

## 4.2 COLETA E CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE

O efluente utilizado para os ensaios experimentais, em escala de bancada, foi coletado na entrada do tratamento físico-químico (coagulação/floculação/flotação) utilizado pela empresa como pós-tratamento do seu efluente final visando seu reuso externo.

Os parâmetros físico-químicos analisados foram pH, turbidez, sólidos dissolvidos totais (SDT), condutividade elétrica (CE) e demanda química de oxigênio (DQO), os quais foram feitos seguindo os protocolos e métodos descritos no Standard Methods for Examination of Water and Wastewater (APHA et al., 2012). Os métodos e protocolos seguidos estão na Tabela 2.

**Tabela 2 – Métodos e Protocolos Utilizados na Caracterização do Efluente.**

Parâmetros	Unidades	Método	Protocolo APHA (2012)
DQO	mg.L <sup>-1</sup>	Colorimétrico	5220-D
Turbidez	UNT	Nefelométrico	2130-B
pH	-	Potenciométrico	4500-H <sup>+</sup> - B
SDT	mg.L <sup>-1</sup>	Potenciométrico	Sonda multiparâmetros <i>Hanna Instruments</i>
CE	µs.cm <sup>-1</sup>	Potenciométrico	Sonda multiparâmetros <i>Hanna Instruments</i>

### 4.3 PREPARO DAS SOLUÇÕES

#### 4.3.1 NOVFLC 1540

O NOVFLC é um polieletrólito de pequeno tamanho molecular fortemente catiônico, é uma solução aquosa de polieletrólitos derivado das aminas, resinas poliquaternárias e sais inorgânicos. Pode ser utilizado diluído ou na concentração original. Possui um pH aproximado de 3 a 6 e viscosidade de 100 a 2000 mPa.s. Sua resistência a hidrólise permite sua ação em uma faixa ampla de pH (NOVTEC, s.d.).

Esse coagulante foi utilizado diluído a 1%, ou seja, em uma concentração de 10 g.L<sup>-1</sup>. Para fazer essa diluição pipetou-se 5 mL de coagulante em uma balão volumétrico de 500 mL e completou-se com água destilada. Essa solução foi preparada e imediatamente utilizada, sem ser armazenada.

#### 4.3.2 POLFLC D150

O POLFLC é um polieletrólito de longa cadeia molecular, medianamente catiônico, derivado de poliácridamida. Esse copolímero orgânico é fornecido granulado, por isso, precisa ser diluído (de 0,05 a 0,1%). Apresenta uma condutividade de 600  $\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ , um pH de 7 e atua em uma faixa de pH de 6 a 13 (NOVTEC, sd).

Preparou-se uma solução estoque com concentração de 0,5% (5 g.L<sup>-1</sup>). Pesou-se 2,5 g e adicionou-se em 500 mL de água destilada, essa solução foi agitada em *Jar test* a 150 rpm, por 60 minutos. Depois de finalizada pode ser armazenada por até 2 semanas, em condições ambientes.

A solução que foi utilizada foi na concentração de 0,1% (1 g.L<sup>-1</sup>), ela foi preparada a partir da solução estoque, pipetando 100 mL e colocando em um balão volumétrico completado com água destilada até 500 mL. Essa solução deve ser usada em até 3 dias. Nessas condições apresenta uma viscosidade de 600 mPa.s.

### 4.3.3 Moringa Oleífera

Para o preparo do extrato a base de Moringa, utilizou-se as sementes, pois é onde se encontra o princípio ativo coagulante. Inicialmente as sementes foram selecionadas conforme uniformidade, tamanho e coloração. Essas foram descascadas e maceradas manualmente com um pistilo, até se obter um material homogêneo, conforme recomendação de estudo que observou que quando as sementes são maceradas ou moídas, a solução coagulante se mostrou mais eficiente que quando trituradas em liquidificador ou *mixer* (ARANTES et al., 2012).

Utilizou-se esta torta produzida para o preparo da solução coagulante na proporção de 10 g de MO para 200 mL de solução salina. A concentração da solução extratora salina utilizada foi de  $0,9 \text{ mol.L}^{-1}$ , para isso foi adicionada 10,53 g de NaCl em 200 mL de água destilada.

Posteriormente a solução foi colocada sob agitação magnética por 30 minutos, para a solubilização da fase sólida com a fase aquosa (Figura 5). Ao término do tempo de extração a solução foi submetida a uma filtração a vácuo com o uso de papel filtro.



**Figura 5 – Extrato de MO sob Agitação Magnética.**

Por fim, o extrato apresentou uma concentração estimada de MO de 50 g.L<sup>-1</sup>.  
1. Para os ensaios de coagulação/floculação foi feita uma diluição de 20% (10 g.L<sup>-1</sup>), sendo utilizada logo após o seu preparo.

#### 4.4 ENSAIOS PRELIMINARES DE COAGULAÇÃO

Para simular o processo de coagulação foi utilizado o equipamento *Jart Test*, PoliControl, de 6 jarros (Figura 6). Com ele foi realizado os ensaios preliminares de dosagem mínima de coagulante e de determinação do pH ótimo de coagulação.



**Figura 6 – Jar Test Utilizado nos Ensaio.**

##### 4.4.1 Dosagem Mínima de Coagulante

Esse teste determina a dosagem mínima de produto coagulante em que inicia a formação de pequenos flocos, foi aplicado com o coagulante NOVFLCOC e MO.

No caso do NOVFLCOC, analisaram-se seis valores de concentrações 10, 20, 30, 40, 50 e 60 ppm, e para a MO as concentrações foram de 100, 125, 150, 175 e 200 ppm. Em béqueres com 500 mL de efluente aplicou-se as dosagens, para se obter essas concentrações, e foi submetida a agitação lenta (30 rpm) em Jar Test, até a visualização da formação de flocos.

A determinação da dosagem mínima foi referente ao ensaio que apresentou o início da formação de flocos, isso é percebido visualmente.

#### 4.4.2 Determinação do pH Ótimo

A dosagem mínima foi combinada a uma faixa de valores de pH: 6,0; 6,5; 7,0; 7,5; 8,0; 8,5. Esses valores variaram dentro da faixa recomendada para os coagulantes testados.

A correção de pH foi feita com a adição de HCL 1M e 0,1M, e NaOH 1M e 0,1M. A partir desses testes avaliou-se a faixa de pH que apresentou uma eficiente coagulação e, se o pH do efluente precisou ser ajustado antes de adicionar o coagulante.

#### 4.5 ENSAIOS DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO E DECANTAÇÃO

Os ensaios de coagulação, floculação e decantação foram realizados em bancada com uso do equipamento *Jar Test*, utilizando-se para os ensaios um volume de efluente de 1 L. As condições do equipamento foram as adotadas para ensaio padrão em água: para coagulação 100 rpm por 20 segundos, para floculação 30 rpm por 15 minutos e 30 minutos para sedimentação.

A metodologia empregada para a realização dos ensaios foi o planejamento experimental e otimização de processos. Primeiramente realizou-se dois planejamentos iniciais fatorial  $2^2$ , com 4 pontos fatoriais e 5 pontos centrais, mais 1 ensaio do branco (sem adição de coagulante e floculante).

As variáveis independentes foram a concentração de NOVFLC e POLFLC em um planejamento, e no outro foram a concentração de MO e de POLFLC. A variável resposta foi a remoção de turbidez (%), mas também se teve como resultados os parâmetros: DQO, sólidos dissolvidos totais, pH e condutividade elétrica.

As concentrações estudadas utilizando-se o coagulante NOVFLC encontram-se na Tabela 3, com os valores reais e codificados.

**Tabela 3 – Níveis Reais e Codificados das Variáveis Estudadas.**

Variáveis / Níveis	NOVFLOC (ppm)	POLFLOC (ppm)
-1	60	2
0	120	4
+1	180	6

Com o coagulante a base de MO foi estudado as concentrações apresentadas na Tabela 4.

**Tabela 4 – Níveis Reais e Codificados das Variáveis Estudadas.**

Variáveis / Níveis	MORINGA (ppm)	POLFLOC (ppm)
-1	150	2
0	200	4
+1	250	6

Foram realizadas análises estatísticas de variância e de superfície resposta para escolha do modelo com base na significância dos coeficientes de regressão, utilizando-se do teste t, a 5% de probabilidade, a partir dos resultados obtidos no processamento dos dados, no software STATISTICA, versão 7.0 (Statsoft TM).

Com o planejamento inicial, pôde-se avaliar os efeitos da variável resposta e a necessidade de ampliação das faixas de estudo testada.

Posterior a esse planejamento realizou-se um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) para cada coagulante em busca da otimização dos valores de concentração, para a melhor faixa de remoção de turbidez. O DCCR contou com 4 pontos fatoriais, 3 pontos centrais e 4 pontos axiais, mais o branco. Conforme a necessidade, pode-se realizar outro DCCR deslocando a faixa de estudo até conseguir obter a região otimizada na superfície resposta.

Para poder aplicar os resultados encontrados com os ensaios feitos em *Jar Test* para escala real, utiliza-se a expressão dada por EnvironQuip (s.d.), empresa fornecedora do equipamento de flotação (flotador) instalado na empresa foco do estudo (equação 1):

$$q = \frac{Q \times d}{C} \quad (1)$$

sendo as variáveis:

Q = volume de efluente a tratar no flotador, m<sup>3</sup>;

d = dosagem determinada, PPM ou g.m<sup>-3</sup>;

C = concentração da solução, g.L<sup>-1</sup> (C% x 10);

q = vazão de solução, L.hora<sup>-1</sup>

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA

Para a análise da viabilidade econômica, da substituição do coagulante inorgânico (cloreto férrico) pelo coagulante com base orgânica (NOVFLOC 1540) avaliou-se um histórico do consumo diário e de custo, por um período de 6 meses anterior e posterior a substituição que ocorreu em março de 2013.

A Tabela 5 apresenta o volume de efluente que foi tratado no flotador para cada mês e o total no período avaliado.

**Tabela 5 – Volume Mensal de Efluente Tratado no Flotador (em m<sup>3</sup>).**

<b>Mês</b>	<b>FeCl<sub>3</sub> + Kemira</b>	<b>NOVFLOC + POLFLOC</b>
1	43.100	58.000
2	56.810	51.174
3	23.500	46.977
4	34.625	51.157
5	44.405	47.302
6	44.300	37.449
<b>Total</b>	<b>246.740</b>	<b>292.059</b>

Além do volume também é necessário ter os valores de custos com os coagulantes. Os custos dos coagulantes e dos auxiliares de coagulação são: R\$ 0,82/kg de cloreto férrico 38%, R\$ 15,50/kg de Kemira, R\$ 6,67/kg de NOVLOC 1540 e R\$ 19,18/kg de POLFLOC D150. Assim, na Tabela 6 encontram-se os custos mensais que a empresa teve com a compra desses produtos.

**Tabela 6 – Custo Mensal com Coagulantes e Floculante no Flotador (em R\$).**

<b>Mês</b>	<b>FeCl<sub>3</sub> + Kemira</b>	<b>NOVFLOC + POLFLOC</b>
1	25.248,00	30.644,52
2	24.210,38	61.754,56
3	27.278,00	40.129,00
4	32.131,41	44.471,22
5	22.004,54	50.542,78
6	14.223,21	64.860,81
<b>Total</b>	<b>145.095,54</b>	<b>292.402,89</b>

A partir do conhecimento do volume tratado e do gasto de cada mês calculou-se o custo do tratamento por coagulação realizado no flotador, os valores estão apresentados na Tabela 7.

**Tabela 7 – Custo do m<sup>3</sup> de Efluente Tratado no Flotador (em R\$/m<sup>3</sup>).**

<b>Mês</b>	<b>FeCl<sub>3</sub> + Kemira</b>	<b>NOVFLOC + POLFLOC</b>
1	0,04	1,03
2	0,31	0,06
3	0,59	0,53
4	0,1	0,87
5	0,43	1,21
6	1,16	0,85
<b>Média</b>	<b>0,44</b>	<b>0,76</b>

A partir desses dados nota-se que no ano de 2012 o custo era mais baixo que no ano de 2013, sendo que anteriormente se utilizava cloreto férrico e polímero Kemira e no mês de março de 2013 passou-se a utilizar o NOVFLCOC e o POLFLCOC.

Assim, economicamente não seria viável a substituição, com o aumento de 72,7% nos custos. Porém, outros aspectos também pesaram nessa mudança de tratamento, como a viabilidade técnica e os ganhos ambientais.

Anteriormente o lodo gerado, com a aplicação do cloreto férrico e do Kemira, necessitava ser coletado em caminhão e levado até uma propriedade rural onde era

depositado no solo. Atualmente o lodo gerado é destinado para um biodigestor, juntamente com outros efluentes de alta carga orgânica, o que permite a sua utilização dentro da própria planta industrial. O biogás produzido é utilizado no processo produtivo, contribuindo para uma economia de gás GLP.

Segundo Vaz et al. (2010) quando se utiliza coagulante orgânicos, a produção de lodo é menor comparada com o uso dos inorgânicos. Além de ser biodegradável e apresentar baixa ou nenhuma toxicidade o que possibilita ser destinado para a biodigestão, diferente do lodo contendo ferro, pois inibe a reprodução microbológica e o efluente traz risco para a fauna aquática.

A presença de ferro no lodo, que segundo Richter (2009) varia de 4,6 a 20,6% impossibilita seu reaproveitamento. Outros problemas como corrosão de equipamentos (bombas, tanques e tubulações) também somam como desvantagem no uso do cloreto férrico.

O uso de coagulantes orgânicos também possibilita a aplicação de menores dosagens ao efluente. Com o cloreto férrico e o Kemira foram necessários nesse período dosar cerca de 100.990 kg nesses 6 meses, já com NOVFLC e POLFLOC foram utilizados 30.100 kg, no mesmo período.

Ainda é preciso considerar a variação da carga orgânica sofrida nesse período estudado, por isso analisou-se também a Tabela 8, que mostra os valores de DQO do afluente e do efluente do flotador, que possibilita compreender os valores apresentados anteriormente.

**Tabela 8 - Valores de DQO do Afluente e Efluente do Flotador.**

Mês	FeCl <sub>3</sub> + Kemira			Novfloc + Polfloc		
	Afluente (mg.L <sup>-1</sup> )	Efluente (mg.L <sup>-1</sup> )	Remoção (%)	Afluente (mg.L <sup>-1</sup> )	Efluente (mg.L <sup>-1</sup> )	Remoção (%)
1	166,3	78,3	52,92	189	109,4	42,12
2	178,2	113,85	36,11	177,4	100	43,63
3	183,8	140,3	23,67	169,1	77,92	53,92
4	194,3	53,4	72,52	136,2	86	36,86
5	190,38	125,25	34,21	137,8	79	42,67
6	184,3	120	34,89	199,7	90	54,93
Média	182,88	105,18	42,39	168,2	90,39	45,69

Analisando a eficiência de remoção de DQO nos dois cenários, percebe-se que a mudança do coagulante apresentou pouca alteração, pois passou de uma média de 42,39% para 45,69%.

A substituição do coagulante inorgânico por um com base orgânica possibilitou muitas melhorias, no tratamento físico-químico (coagulação/floculação e flotação), sem necessitar alterar equipamentos e acessórios do flotador.

Apesar de ter um custo maior, manteve a mesma faixa de eficiência, trouxe muitos ganhos ambientais, facilitando a destinação do lodo, contribuindo com a produção de biogás e reduzindo os riscos durante sua aplicação e manuseio.

Piantá (2008) estudou o uso dos coagulantes naturais Tanfloc SL e Tanfloc SG alternativos ao sulfato de alumínio no tratamento de água. Em relação a eficiência o sulfato de alumínio foi melhor, porém os coagulantes orgânicos atenderam os padrões de potabilidade, além de removerem a cor amarelada deixada pelo residual de ferro e sem a necessidade de ajuste de pH, com cal hidratada, por exemplo. Também calculou-se os custos de produtos químicos no tratamento de água em uma ETA e observou-se que o sulfato de alumínio teve um custo de 0,014475 R\$ por m<sup>3</sup>; já o Tanfloc SL, teve um custo de 0,0252 R\$ por m<sup>3</sup>; e o Tanfloc SG de 0,0332 R\$ por m<sup>3</sup>. Isso significa um gasto maior dos coagulantes orgânicos em torno de 42% e 56%, no entanto sem a necessidade de adição de outros produtos do processo.

## 5.2 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE

A Tabela 9 apresenta os valores da caracterização do efluente agroindustrial, assim como os dados de padrão de lançamento de efluente especificados na Resolução do CONAMA n. 430/2011 e os valores recomendados pelo manual de licenciamento do Instituto Ambiental do Paraná – IAP (1998).

**Tabela 9 – Caracterização do Efluente Agroindustrial na Entrada do Flotador, Padrão de Lançamento de Efluentes Especificados na Resolução do CONAMA 430/2011 e Recomendações do IAP (1998).**

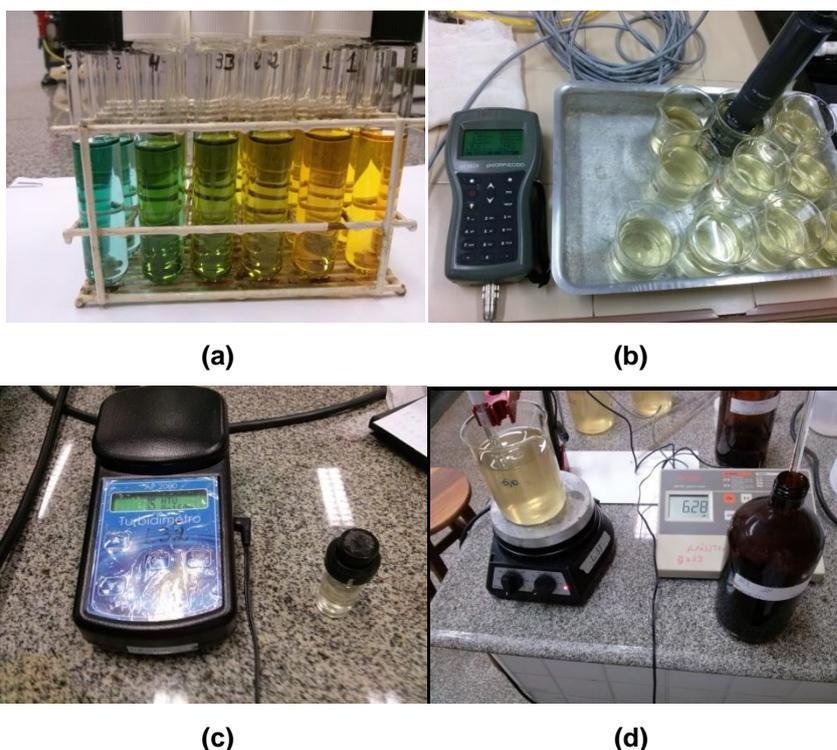
Parâmetros	Unidades	Valor*	Conama 430/2011	IAP (1998)
DQO	mg.L <sup>-1</sup>	157,67 ± 61,86	NE	Até 125 mg.L <sup>-1</sup>
SDT	mg.L <sup>-1</sup>	1754,33 ± 558,58	500 mg/L	NE
Turbidez	NTU	35,33 ± 7,02	NE	NE
pH	-	7,69 ± 0,41	5,0 – 9,0	5,0 – 9,0
CE	µs.cm <sup>-1</sup>	3508,67 ± 1119,79	NE	NE

NE – Não Especificado

\*Médias aritméticas obtidas a partir de 3 coletas/amostras ± desvio padrão

Como se observa na Tabela 9 os parâmetros DQO e SDT estão fora do padrão de lançamento especificado pela Resolução CONAMA n. 430/2011, por isso, justifica-se a necessidade de um tratamento complementar (pós-tratamento) para uma maior clarificação do efluente e para possibilitar seu lançamento no corpo hídrico de acordo com as legislações vigentes.

A Figura 7 ilustra o efluente sendo caracterizado nos parâmetros DQO (Figura 7a), SDT e condutividade elétrica (Figura 7b), turbidez (Figura 7c) e pH (Figura 7d).



**Figura 7 – Caracterização do Efluente.**

### 5.3 DOSAGEM MÍNIMA E PH ÓTIMO

A dosagem mínima quando se observou a formação dos primeiros flocos para o coagulante NOVFLCOC foi na concentração de 30 ppm. A Figura 8 traz o ensaio que apresentou a dosagem mínima de coagulante NOVFLCOC da NOVTEC®.



**Figura 8 – Início da Coagulação com Concentração de 30ppm de NOVFLCOC.**

Para o extrato de Moringa oleífera a dosagem mínima, observada visualmente, foi na concentração de 150 ppm (Figura 9).



**Figura 9 - Início da Coagulação com Concentração de 150 ppm de MO.**

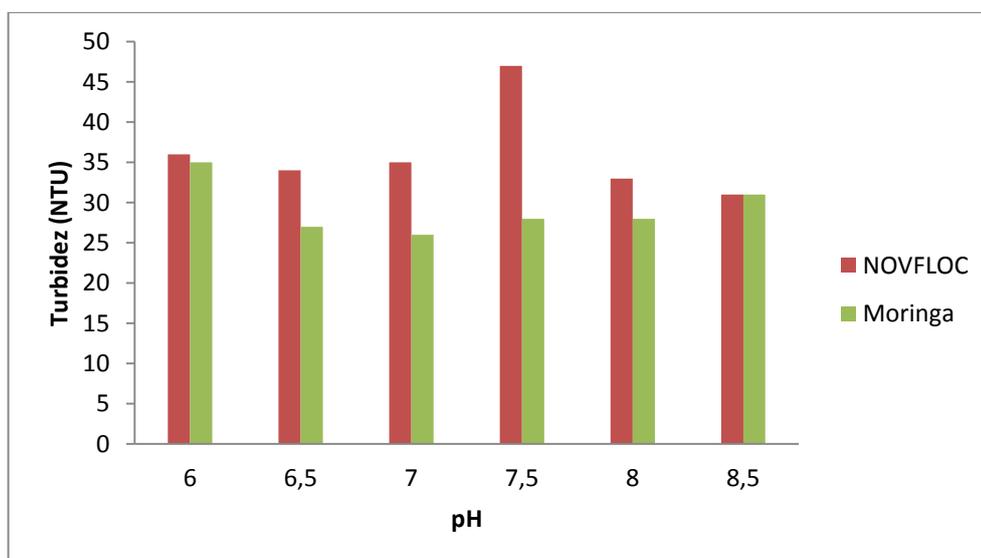
Destaca-se que este teste é qualitativo, sendo apenas avaliada visualmente a formação dos primeiros flocos com a adição crescente de coagulante.

As dosagens mínimas encontradas para os coagulantes NOVFLC e MORINGA foram utilizadas para avaliar o pH numa faixa entre 6,0 e 8,5, e estão listados na Tabela 10.

**Tabela 10 – Determinação de pH Ótimo (NOVFLOC e MORINGA).**

Ensaio	NOVFLOC (30 ppm)		MORINGA (150 ppm)
	pH	Turbidez	Turbidez
1	6,0	36 NTU	35 NTU
2	6,5	34 NTU	27 NTU
3	7,0	35 NTU	26 NTU
4	7,5	47 NTU	28 NTU
5	8,0	33 NTU	28 NTU
6	8,5	31 NTU	31 NTU
<b>Efluente</b>	<b>7,9</b>	<b>42 NTU</b>	

Na Figura 10 apresenta-se o gráfico dos resultados da turbidez remanescente com a variação do pH e a dosagem mínima de coagulante, 30 e 150 ppm, para NOVFLC e Moringa, respectivamente.



**Figura 10 – Resultados da influência do pH sobre a turbidez.**

Os ensaios que apresentaram melhor remoção de turbidez com a dosagem de NOVLFLOC foram os ensaios 5 e 6, com pH de 8,0 e 8,5 respectivamente. E com a dosagem de Moringa foram os ensaios do 2 ao 5, com pH de 6,5 a 8,0. Como essas faixas são muito próximas ao pH do efluente, de 7,9, não houve a necessidade de ajustar o pH em nenhum dos planejamentos experimentais.

## 5.4 OTIMIZAÇÃO DO NOVLFLOC E POLFLOC

### 5.4.1 Planejamento Inicial: Fatorial (2)<sup>2</sup>

A matriz experimental para o planejamento fatorial é ilustrada na Tabela 11, com os valores codificados dos 7 ensaios somados ao branco (sem adição de coagulante/floculante), com os respectivos resultados encontrados, sendo que a variável resposta foi a remoção da turbidez. O efluente bruto apresentou uma turbidez de 42 NTU, DQO de 184 mg.L<sup>-1</sup>, pH de 7,9, sólidos dissolvidos totais de 2236 mg.L<sup>-1</sup> e condutividade elétrica de 4474  $\mu\text{s.cm}^{-1}$ .

**Tabela 11 - Matriz do Planejamento Experimental Inicial com Níveis Reais e Codificados das Variáveis.**

Ensaio	NOVFLOC <sup>a</sup>	POLFLOC <sup>b</sup>	Rem. Turb <sup>c</sup>	Rem. DQO <sup>d</sup>	pH	SDT <sup>e</sup>	CE <sup>f</sup>
1	-1 (60)	-1 (2)	50	18,29	7,89	2196	4392
2	1 (180)	-1 (2)	73,81	44,04	7,79	2150	4301
3	-1 (60)	1 (6)	61,90	33,88	7,89	2180	4361
4	1 (180)	1 (6)	78,57	39,97	7,79	2157	4315
5	0 (120)	0 (4)	73,81	53,52	7,84	2173	4344
6	0 (120)	0 (4)	69,05	22,36	7,8	2182	4367
7	0 (120)	0 (4)	66,67	49,46	7,79	2184	4371
8	0 (120)	0 (4)	69,05	49,46	7,83	2187	4375
9	0 (120)	0 (4)	59,52	52,85	7,78	2193	4385
10	-	-	14,29	35,91	7,94	2210	4415

<sup>a</sup>concentração de coagulante NOVLFLOC (ppm); <sup>b</sup>concentração de auxiliar POLFLOC (ppm); <sup>c</sup>remoção da turbidez do efluente (%); <sup>d</sup>remoção de DQO do efluente (%); <sup>e</sup>sólidos dissolvidos totais (mg.L<sup>-1</sup>); <sup>f</sup>condutividade elétrica ( $\mu\text{s.cm}^{-1}$ ).

Pode-se observar na Tabela 11 que a remoção de turbidez variou de 50 a 78,57 %. Os pontos centrais apresentaram uma pequena variação (erro padrão  $\pm$  5,22 %). O branco (ensaio 10) mostra que sem a adição do coagulante e do floculante a remoção de turbidez foi reduzida em relação aos demais ensaios.

Tanto o pH, como os sólidos dissolvidos totais e a condutividade elétrica tiveram pouca variação com a adição dos coagulantes.

Analisando-se os resultados da tabela 12 foi possível calcular os efeitos estimados das duas variáveis estudadas.

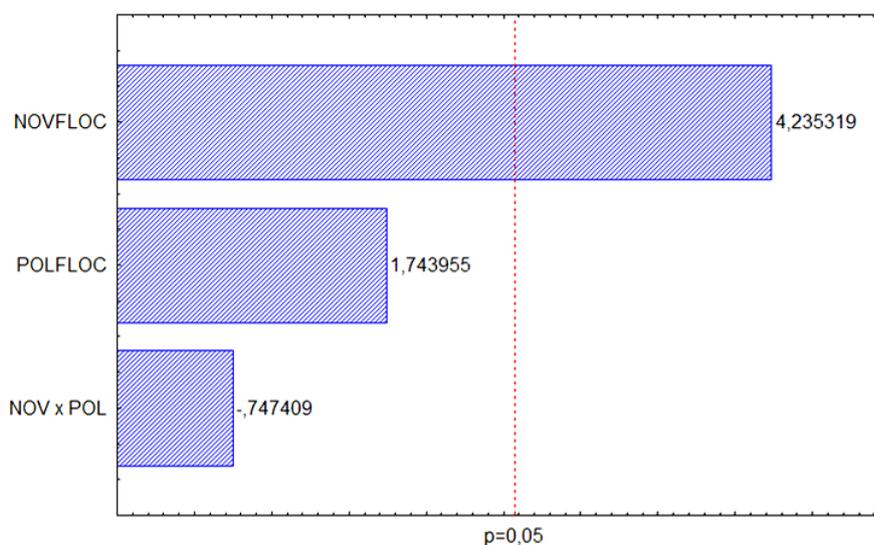
**Tabela 12 - Efeitos dos Fatores Estudados para Remoção de Turbidez em Efluente.**

Fatores	Efeito <sup>a</sup>	Erro padrão	t (5)	p
Média	66,9312	1,5928	42,0210	0,0000
NOVFLOC	20,2381	4,7784	4,2353	0,0082*
POLFLOC	8,3333	4,7784	1,7440	0,1416
NOV x POL	-3,5714	4,7784	-0,7474	0,4885

<sup>a</sup> Os efeitos são apresentados em %; \*  $p \leq 0,05$ .

Pode-se verificar que a única variável significativa foi a concentração do coagulante NOVFLC, que apresentou p-valor  $< 0,05$ , no intervalo de confiança de 95%, sendo que mostrou um efeito positivo sobre a resposta de remoção de turbidez.

Na Figura 11 está apresentado o Diagrama de Pareto, que ilustra a significância dos parâmetros avaliados em relação à eficiência de remoção de turbidez, considerando-se significativos para um intervalo de confiança de 95%, aquelas cujas colunas horizontais ultrapassam a linha tracejada ( $p$ -valor = 0,05).



**Figura 11 - Diagrama de Pareto para Remoção de Turbidez no Processo Coagulação/floculação.**

Os coeficientes de regressão foram calculados considerando-se apenas os termos estatisticamente significativos. E assim, obteve-se um modelo polinomial de primeira ordem (Equação 2).

$$RTURB = 66,93 + 10,12*[NOVFLOC] \quad (2)$$

Os parâmetros não significativos foram incorporados aos resíduos para o cálculo da análise de variância (ANOVA), apresentada na Tabela 13. É necessário a ANOVA para que se tenha uma avaliação da qualidade do ajuste do modelo aos dados.

**Tabela 13 - Análise de Variância (Intervalo de Confiança de 95%).**

Fonte de Variação	SQ <sup>a</sup>	GL <sup>b</sup>	QM <sup>c</sup>	F <sub>calculado</sub>	F <sub>tabelado</sub>	F <sub>cal</sub> /F <sub>tab</sub>	p-valor
Regressão	409,580	1	409,580	14,600	5,591	2,611	0,0065
Resíduos	196,366	7	28,052				
Total	605,946	8					

% variação explicada (R<sup>2</sup>) = 67,6 %; <sup>a</sup>soma de quadrados; <sup>b</sup>graus de liberdade; <sup>c</sup>quadrados médios.

Conforme a ANOVA o modelo é válido para o intervalo de 95% de confiança, pois o  $F_{\text{calculado}} = 14,6$  para a regressão foi significativo, com  $p < 0,05$ , e foi maior que o  $F_{1;7;0,05} = 5,59$ , sendo 5,6 vezes maior.

Com a construção da superfície de resposta, pode-se analisar que existe uma tendência de uma região com maiores concentrações do coagulante NOVFLOC promover resultados mais eficientes, como mostra a Figura 12.

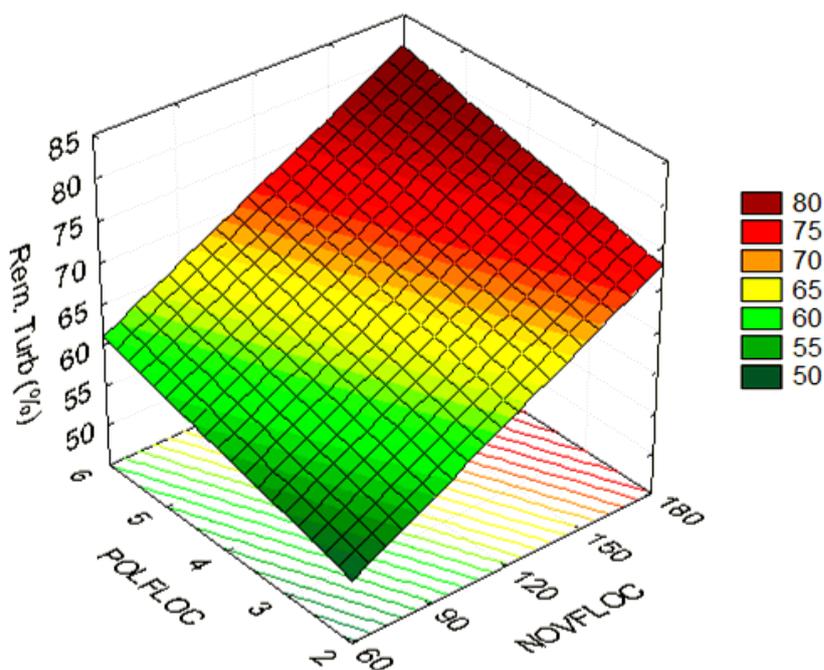


Figura 12 - Superfície Resposta na Remoção de Turbidez em Efluente.

Observa-se na Figura 12, que os melhores valores quanto à eficiência de remoção de turbidez foram obtidos com as concentrações  $180 \text{ mg.L}^{-1}$  de coagulante e  $6 \text{ mg.L}^{-1}$  de floculante.

A partir desse planejamento inicial, percebeu-se a necessidade do aumento da faixa de estudo para a variável concentração de NOVFLOC, a fim de encontrar uma resposta mais eficiente.

#### 5.4.2 Delineamento Composto Central Rotacional

Para a execução do DCCR a faixa de estudo da variável concentração de coagulante NOVFLCOC foi deslocada, tendo como o novo ponto central o anterior maior ponto fatorial. A matriz experimental para o DCCR é ilustrada na Tabela 14, com os níveis de cada fator e a variável resposta obtida, no decorrer dos 11 ensaios e o branco.

O efluente apresentou turbidez de 18 NTU, DQO de 202 mg.L<sup>-1</sup>, pH de 7,95, sólidos dissolvidos totais de 1885 mg.L<sup>-1</sup> e condutividade elétrica de 3771  $\mu\text{s.cm}^{-1}$ .

**Tabela 14 - Matriz do DCCR com Níveis Reais e Codificados das Variáveis.**

Ensaio	NOVFLOC <sup>a</sup>	POLFLOC <sup>b</sup>	Rem. Turb <sup>c</sup>	Rem. DQO <sup>d</sup>	pH	SDT <sup>e</sup>	CE <sup>f</sup>
1	-1 (120)	-1 (2)	61,11	43,73	7,71	1845	3693
2	1 (240)	-1 (2)	72,22	41,25	7,63	1852	3705
3	-1 (120)	1 (6)	61,11	56,93	7,64	1878	3757
4	1 (240)	1 (6)	72,22	56,11	7,62	1856	3713
5	0 (180)	0 (4)	66,67	54,46	7,71	1867	3733
6	0 (180)	0 (4)	66,67	54,46	7,71	1875	3752
7	0 (180)	0 (4)	66,67	54,46	7,71	1882	3764
8	-1,41 (95,2)	0 (4)	61,11	38,78	7,84	1819	3642
9	1,41 (264,84)	0 (4)	83,33	51,16	7,51	1856	3712
10	0 (180)	-1,41 (1,18)	72,22	18,15	7,65	1856	3730
11	0 (180)	1,41 (6,82)	66,67	41,25	7,64	1871	3743
12	-	-	0,00	14,03	7,96	1888	3779

<sup>a</sup>concentração de coagulante NOVFLCOC (ppm); <sup>b</sup>concentração de auxiliar POLFLOC (ppm); <sup>c</sup>remoção da turbidez do efluente (%); <sup>d</sup>remoção de DQO do efluente (%); <sup>e</sup>sólidos dissolvidos totais (mg.L<sup>-1</sup>); <sup>f</sup>condutividade elétrica ( $\mu\text{s.cm}^{-1}$ ).

Como esperado a remoção foi maior que no planejamento inicial, chegando a 83,33%, com uma concentração de 264,84 ppm de coagulante. Os pontos centrais ficaram muito bons e com valores iguais, o que indica uma ótima repetibilidade do processo.

A maior remoção de DQO foi de 56,9% no ensaio 3, com 120 ppm de NOVFLCOC e 6 ppm de POLFLOC. Os outros parâmetros avaliados novamente não

apresentaram significativas variações. Percebe-se pelo pH que as maiores dosagens de coagulante abaixam o pH do efluente, devido ao seu caráter ácido.

Com a tabela de efeitos estimados (Tabela 15) é possível observar que somente o termo linear do NOVFLC foi significativo ( $p < 0,05$ ), com um efeito novamente positivo.

**Tabela 15 - Efeitos dos Fatores Estudados para Remoção de Turbidez em Efluente.**

Fatores	Efeito <sup>a</sup>	Erro padrão	t (5)	p
Média	66,687	1,887	35,331	0,0000
NOVFLOC (L)	13,427	2,315	5,800	0,0021*
NOVFLOC (Q)	3,458	2,762	1,251	0,2660
POLFLOC (L)	-1,962	2,315	-0,847	0,4354
POLFLOC (Q)	0,666	2,762	0,241	0,8190
NOV x POL	0,000	3,269	0,000	1,0000

<sup>a</sup>Os efeitos são apresentados em %; \*  $p \leq 0,05$ ; L: linear; Q:quadrático

Os termos não significativos foram inseridos nos resíduos, e assim, os coeficientes de regressão foram calculados, obtendo-se um modelo polinomial de primeira ordem (Equação 3).

$$RTURB = 68,18 + 6,71*[NOVFLOC] \quad (3)$$

Para verificar a qualidade de ajuste do modelo, foi utilizada a análise de variância (ANOVA), avaliando o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o teste F (Tabela 16).

**Tabela 16 - Análise de Variância (Intervalo de Confiança de 95%).**

Fonte de Variação	SQ <sup>a</sup>	GL <sup>b</sup>	QM <sup>c</sup>	F <sub>calculado</sub>	F <sub>tabelado</sub>	F <sub>cal</sub> /F <sub>tab</sub>	p-valor
Regressão	359,594	1	359,594	41,4705	5,1173	8,1039	0,0001196
Resíduos	78,0398	9	8,6711				
Total	437,5624	10					

% variação explicada ( $R^2$ ) = 82,16%; <sup>a</sup>soma de quadrados; <sup>b</sup>graus de liberdade; <sup>c</sup>quadrados médios.

O valor de  $F_{\text{calculado}} = 48,235$  para a regressão foi significativo, com  $p < 0,05$ , e foi maior que o  $F_{2;9;0,05} = 4,26$ , ou seja, cerca de 11 vezes maior.

Novamente a partir da superfície de resposta, pode-se observar que existe uma tendência de uma região com maiores concentrações de NOVFLOC promover resultados mais eficientes, como mostra a Figura 13.

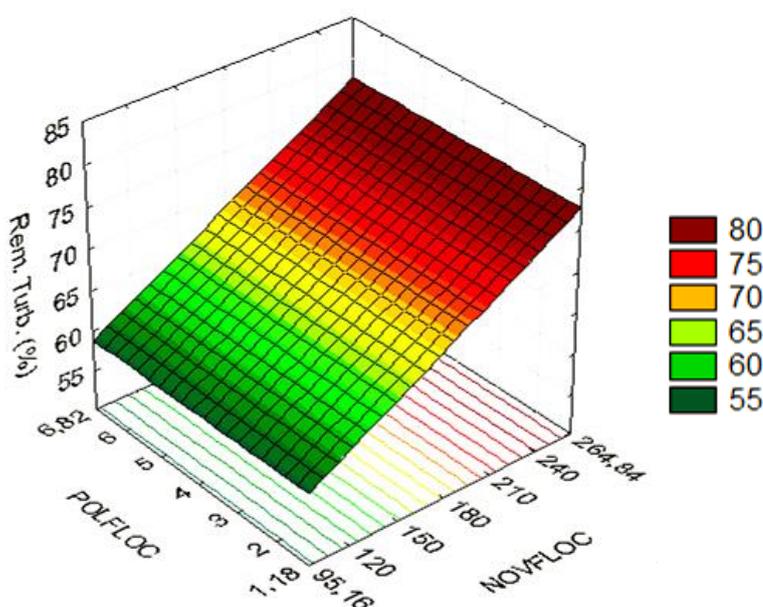


Figura 13 - Superfície Resposta na Remoção de Turbidez em Efluente.

Observa-se que na Figura 13 os melhores valores de remoção foram nas concentrações de 264,84 ppm de coagulante e 4 ppm de floculante, foi obtido 83,33 %.

#### 5.4.3 Delineamento Composto Central Rotacional deslocado

Buscando realizar a otimização do processo, realizou-se mais um DCCR (Tabela 17), com 11 ensaios, mais o branco. Este foi feito baseado em alguns ensaios que foram realizados com elevadas concentrações de NOVFLOC. Então os níveis foram ampliados e abrangeu-se uma faixa maior.

Tabela 17 - Matriz do DCCR com Níveis Reais e Codificados das Variáveis.

Ensaio	NOVFLOC <sup>a</sup>	POLFLOC <sup>b</sup>	Rem. Turb <sup>c</sup>	Rem. DQO <sup>d</sup>	pH	SDT <sup>e</sup>	CE <sup>f</sup>
1	-1 (400)	-1 (2)	77,78	0*	7,71	1845	3693
2	1 (800)	-1 (2)	94,44	45,46	7,63	1852	3705
3	-1 (400)	1 (6)	83,33	55,16	7,64	1878	3757
4	1 (800)	1 (6)	94,44	49,56	7,62	1856	3713
5	0 (600)	0 (4)	100,00	47,96	7,71	1867	3733
6	0 (600)	0 (4)	100,00	47,96	7,71	1875	3752
7	0 (600)	0 (4)	100,00	47,96	7,71	1882	3764
8	-1,41 (271,5)	0 (4)	83,33	7,19	7,84	1819	3642
9	1,41 (925,5)	0 (4)	94,44	34,37	7,51	1856	3712
10	0 (600)	-1,41 (1,18)	100,00	19,18	7,65	1856	3730
11	0 (600)	1,41 (6,82)	94,44	39,17	7,64	1871	3743
12	-	-	77,78	14,03	7,96	1888	3779

<sup>a</sup>concentração de coagulante NOVFLCOC (ppm); <sup>b</sup>concentração de auxiliar POLFLOC (ppm); <sup>c</sup>remoção da turbidez do efluente (%); <sup>d</sup>remoção de DQO do efluente (%); <sup>e</sup>sólidos dissolvidos totais (ppm); <sup>f</sup>condutividade elétrica ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ ); \*Valor não representativo.

Utilizando concentrações elevadas de coagulante, conseguiu-se remover até 100% da turbidez. Quanto a remoção de DQO não houve melhoras, manteve-se na mesma faixa, assim como os outros parâmetros, não mostraram diferença ao DCCR anterior.

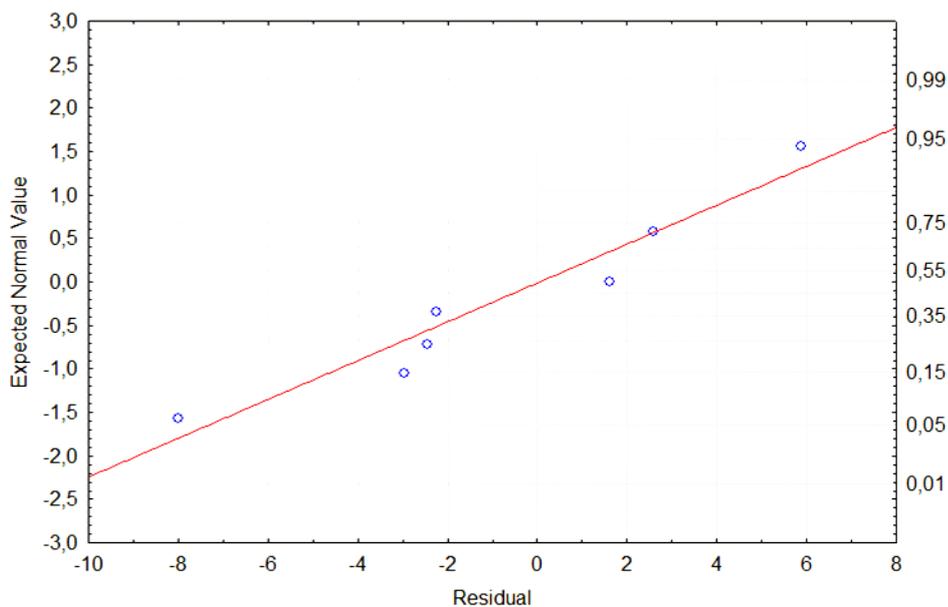
Analisando os a Tabela 18 dos efeitos, dois fatores se mostraram significativos com  $p < 0,05$ , o fator linear e o quadrático do NOVFLCOC.

Tabela 18 - Efeitos dos Fatores Estudados para Remoção de Turbidez em Efluente.

Fatores	Efeito <sup>a</sup>	Erro padrão	t (5)	p
Média	100,0219	2,5940	38,5580	0,0000
NOVFLOC (L)	10,8935	3,1818	3,4237	0,0188*
NOVFLOC (Q)	-13,9730	3,7968	-3,6802	0,0143*
POLFLOC (L)	-0,5711	3,1818	-0,1795	0,8646
POLFLOC (Q)	-5,5898	3,7968	-1,4722	0,2009
NOV x POL	-2,7778	4,4931	-0,6182	0,5635

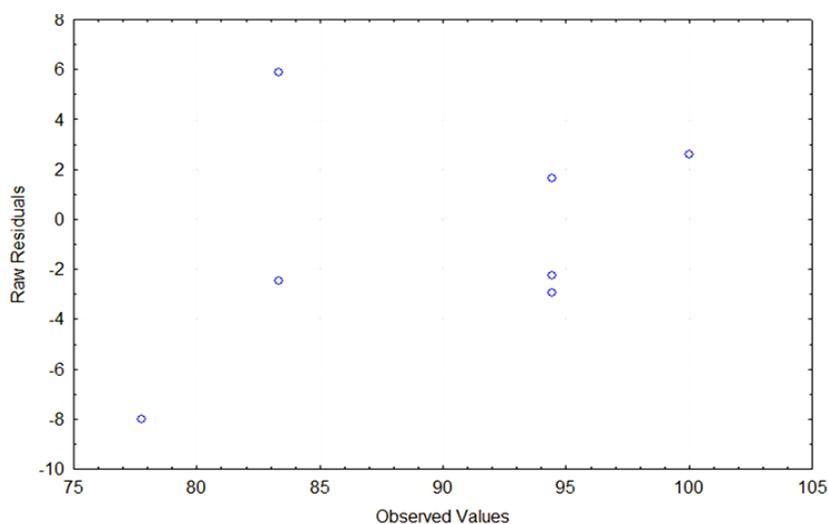
<sup>a</sup>Os efeitos são apresentados em %; \*  $p \leq 0,05$ ; L: linear; Q:quadrático

Os termos que não foram significativos são acrescentados aos resíduos. A Figura 14 ilustra o gráfico da probabilidade normal dos resíduos, o qual apresenta ajuste satisfatório, pois os resíduos estão distribuídos em torno da reta.



**Figura 14 – Gráfico da Probabilidade Normal dos Resíduos.**

Já a Figura 15, apresenta no gráfico dos resíduos pelos valores observados, valores de forma aleatória, sem tendências.



**Figura 15 – Gráfico dos Resíduos pelos Valores Observados.**

Para a obtenção do modelo, foi calculado os coeficientes de regressão, obtendo-se a Equação 4.

$$RTURB = 97,40 + 5,45*[NOVFLOC] - 6,17*[NOVFLOC]^2 \quad (4)$$

Esta equação explica em 76,427 % a variação na eficiência de remoção de turbidez ao nível de 5% de significância.

Com o cálculo da ANOVA (Tabela 19), o modelo encontrado é tido como válido, com  $p < 0,05$ .

**Tabela 19 - Análise de Variância (Intervalo de Confiança de 95%).**

Fonte de Variação	SQ <sup>a</sup>	GL <sup>b</sup>	QM <sup>c</sup>	F <sub>calculado</sub>	F <sub>tabelado</sub>	F <sub>cal</sub> /F <sub>tab</sub>	p-valor
Regressão	469,8315	2	234,9158	12,2780	4,4590	2,7536	0,0037
Resíduos	153,0641	8	19,1330				
Total	622,8956	10	62,2896				

% variação explicada ( $R^2$ ) = 76,43%; <sup>a</sup>soma de quadrados; <sup>b</sup>graus de liberdade; <sup>c</sup>quadrados médios.

O valor de  $F_{\text{calculado}}$  foi de 12,28, esse valor foi maior que o  $F_{2;8;0,05} = 2,75$ , sendo 4,5 vezes maior, o que torna o modelo passível de ser usado para estimar valores da eficiência de remoção de turbidez no efluente.

Na Figura 16a, observa-se a nova superfície resposta, onde nota-se a região otimizada no topo na inclinação, e na figura 16b da superfície de contorno verifica-se a região na faixa mais escura no centro.

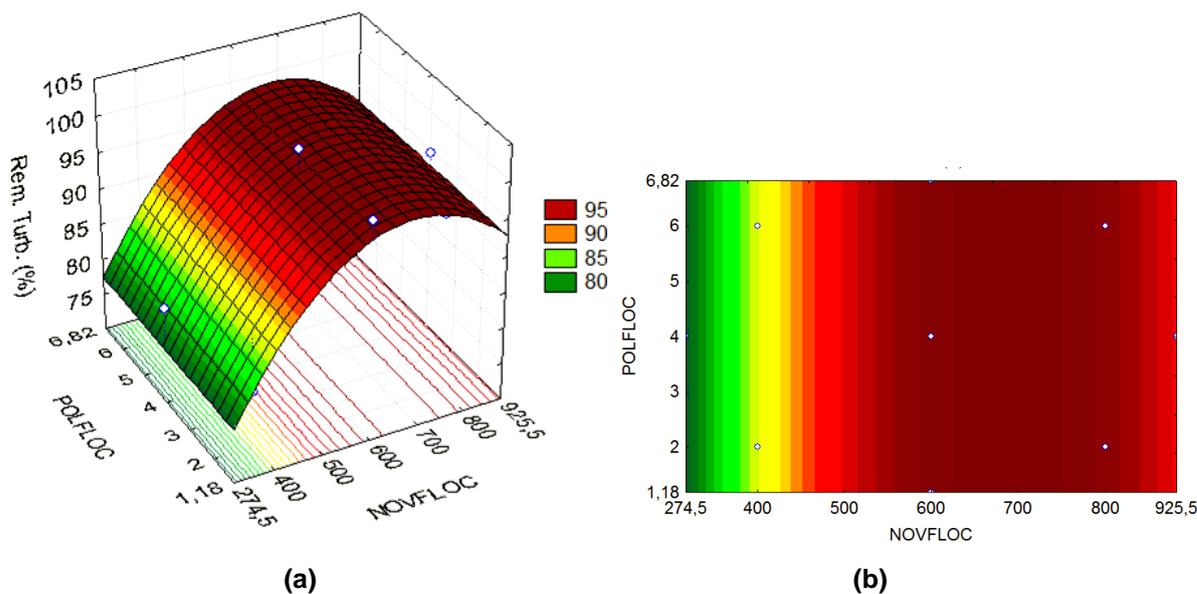


Figura 16 - (a) Superfície Resposta;

(b) Superfície de Contorno.

Os valores otimizados encontram-se na faixa em torno de -0,25 a +0,5, os quais respectivamente representam 550 a 700 ppm de NOVFLOC.

Steinmetz et al., (s.d) adicionaram o coagulante orgânico polifenólico Veta Organic®, de caráter catiônico, derivado de Acácia Negra, sob agitação de 200 rpm por 5 minutos, e em seguida o auxiliar de coagulação Ativador Q® sob agitação de 50 rpm por 10 minutos, depois permaneceu em decantação por 15 minutos. Dos resultados encontrados o que teve a melhor eficiência foi de 94,8% de remoção de turbidez no tratamento de efluente de suinocultura.

Coral et al. (2009) utilizaram o polímero natural (Tanfloc), o qual é de origem essencialmente vegetal. Ele mostrou-se um potencial substituto ao sulfato de alumínio para o tratamento de água, sendo mais eficiente quanto aos parâmetros pH e alcalinidade. Foram utilizadas concentrações variáveis entre 10 e 60 mg.L<sup>-1</sup>, com intervalos de 10 mg. As amostras permaneceram sob agitação rápida por 30 segundos a 100 rpm, 15 minutos a 25 rpm e 15 minutos de decantação.

No tratamento de efluente de galvanoplastia feito por Vaz et al. (2010), o Tanfloc SG® apresentou bons resultados com uma concentração de 400ppm e um tempo de sedimentação de 40 minutos, removendo 95,90% de cor e 99,13% de turbidez. E para o coagulante Acquapol C1®, com uma concentração de 100 ppm e

tempo de sedimentação de 20 minutos, a remoção foi de 96,69% de cor e 98,72% de turbidez.

## 5.5 OTIMIZAÇÃO MORINGA OLEÍFERA E POLFLOC

### 5.5.1 Planejamento Inicial: Fatorial (2)<sup>2</sup>

A Tabela 20 apresenta a matriz do delineamento, com os níveis de cada fator e as respostas obtidas no decorrer dos 9 ensaios realizados somados ao branco. A variável resposta avaliada foi a remoção de turbidez. O efluente bruto apresentou uma turbidez de 36 NTU, DQO de 87 mg.L<sup>-1</sup>, pH de 7,21, sólidos dissolvidos totais de 1142 mg.L<sup>-1</sup> e condutividade elétrica de 2281  $\mu\text{s.cm}^{-1}$ .

**Tabela 20 - Matriz do Planejamento Experimental Inicial com Níveis Reais e Codificados das Variáveis.**

Ensaio	MORINGA <sup>a</sup>	POLFLOC <sup>b</sup>	Rem. Turb <sup>c</sup>	Rem. DQO <sup>d</sup>	pH	SDT <sup>e</sup>	CE <sup>f</sup>
1	-1 (150)	-1 (2)	50,00	0*	7,23	2317	4633
2	1 (250)	-1 (2)	61,11	73,28	7,25	2489	4977
3	-1 (150)	1 (6)	44,44	81,90	7,25	2363	4724
4	1 (250)	1 (6)	61,11	83,33	7,25	2400	4800
5	0 (200)	0 (4)	61,11	44,54	7,24	2375	4751
6	0 (200)	0 (4)	61,11	33,05	7,27	2370	4735
7	0 (200)	0 (4)	61,11	47,41	7,27	2371	4732
8	0 (200)	0 (4)	58,33	4,31	7,25	2343	4684
9	0 (200)	0 (4)	61,11	21,55	7,29	2343	4692
10	-	-	25,00	0*	7,25	2210	4421

<sup>a</sup>concentração de coagulante MO (ppm); <sup>b</sup>concentração de auxiliar POLFLOC (ppm); <sup>c</sup>remoção da turbidez do efluente (%); <sup>d</sup>remoção de DQO do efluente (%); <sup>e</sup>sólidos dissolvidos totais (mg.L<sup>-1</sup>); <sup>f</sup>condutividade elétrica ( $\mu\text{s.cm}^{-1}$ ); \*valor inválido.

Pode-se observar na Tabela 20 que a remoção de turbidez variou de 50 a 61,11 %. Os pontos centrais apresentaram uma pequena variação (erro padrão =  $\pm$  6,17 %).

Somente o pH praticamente não foi alterado com a adição dos coagulantes, porém os sólidos dissolvidos totais e a condutividade elétrica tiveram um aumento significativo em todos os ensaios.

A partir desses resultados, foi possível calcular os efeitos das duas variáveis estudadas, os quais estão apresentados na Tabela 21.

**Tabela 21 - Efeitos dos Fatores Estudados para Remoção de Turbidez em Efluente.**

Fatores	Efeito <sup>a</sup>	Erro padrão	t (5)	p
Média	57,71605	1,4673	39,3357	0,0000
MORINGA	13,8889	4,4018	3,1553	0,0253*
POLFLOC	-2,7778	4,4018	-0,6310	0,5557
MO x POL	2,7778	4,4018	0,6310	0,5557

<sup>a</sup> Os efeitos são apresentados em %; \*  $p \leq 0,05$ .

Pode-se verificar que a única variável significativa ( $p < 0,05$ ), ou seja, no intervalo de confiança de 95%, foi a concentração de MO, sendo que mostrou um efeito positivo sobre a resposta de remoção de turbidez.

Na Figura 17 está apresentado o Gráfico de Pareto, que ilustra a significância dos parâmetros analisados em relação a remoção de turbidez, considerando-se significativos para um intervalo de confiança de 95%, aqueles cujas colunas horizontais ultrapassam a linha tracejada ( $p$ -valor=0,05).

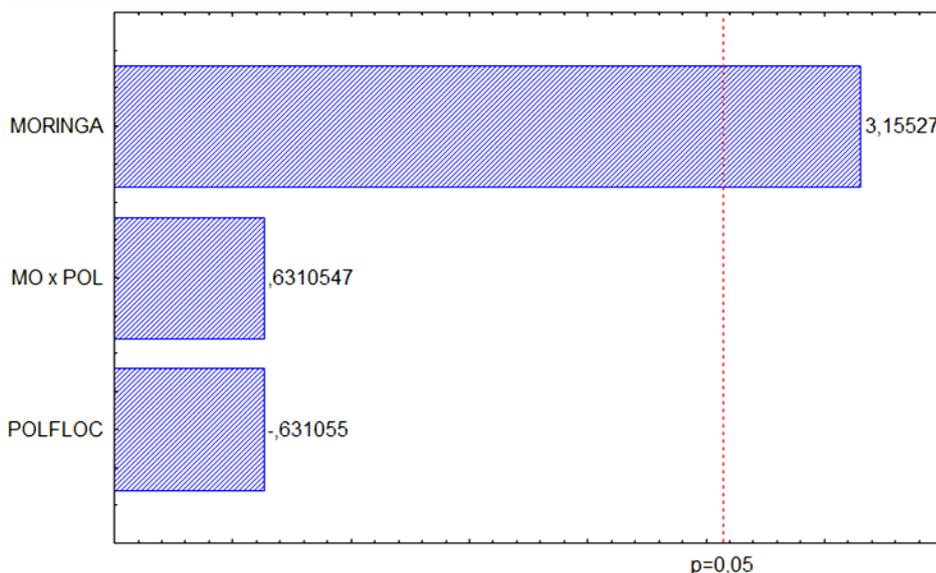


Figura 17 - Diagrama de Pareto para Remoção de Turbidez em Água Sintética.

Pelos dados apresentados na Tabela 21 e Figura 18, tem-se que, somente o fator MORINGA influencia de forma significativa a remoção de turbidez.

Os coeficientes de regressão foram calculados considerando-se apenas o termo estatisticamente significativo. E assim, obteve-se um modelo polinomial de primeira ordem (Equação 5).

$$RTURB = 57,72 + 6,94*[MO] \quad (5)$$

Esta equação explica em 68,26% a variação na eficiência de remoção de turbidez ao nível de 5% de significância.

Os parâmetros não significativos foram incorporados aos resíduos para o cálculo da análise de variância (ANOVA), apresentada na Tabela 22.

Tabela 22 - Análise de Variância (Intervalo de Confiança de 95%).

Fonte de Variação	SQ <sup>a</sup>	GL <sup>b</sup>	QM <sup>c</sup>	F <sub>calculado</sub>	F <sub>tabelado</sub>	F <sub>cal</sub> /F <sub>tab</sub>	p-valor
Regressão	192,9012	1	192,9012	12,0229	5,5914	2,1502	0,0104
Resíduos	112,3114	7	16,0445				
Total	305,2126	8					

% variação explicada (R<sup>2</sup>) = 68,26%; <sup>a</sup>soma de quadrados; <sup>b</sup>graus de liberdade; <sup>c</sup>quadrados médios.

Conforme a ANOVA o modelo é válido a 95% de confiança, pois o  $F_{\text{calculado}}$  ( $F_c=12,02$ ) para a regressão foi significativo, com  $p<0,05$ , e foi maior que o  $F_{2;8;0,05} = 5,59$ , sendo 2,1 vezes maior.

Com a construção da superfície de resposta, pôde-se analisar que existe uma tendência de uma região com maiores concentrações de MO, para promover resultados mais eficientes, como mostra a Figura 18.

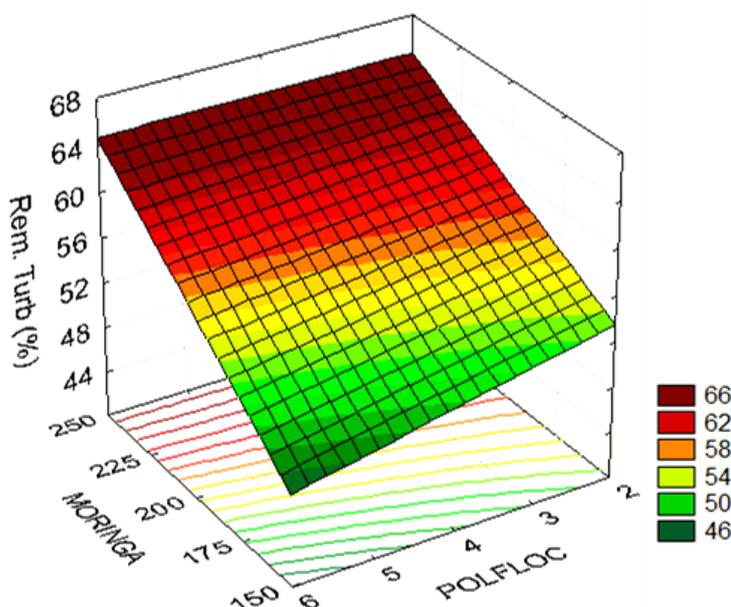


Figura 18 - Superfície Resposta na Remoção de Turbidez em Efluente.

A partir desse planejamento inicial, percebeu-se a necessidade de aumentar da faixa de estudo para a variável concentração de MO, a fim de encontrar uma remoção de turbidez mais eficiente.

### 5.5.2 Delineamento Composto Central Rotacional

Para a execução do DCCR a faixa de estudo da variável concentração de MO foi deslocada, tendo como o novo ponto central (0) o anterior ponto fatorial (+1). Assim, a matriz de ensaio apresenta 11 ensaios, mais o branco (Tabela 23).

O efluente apresentou turbidez de 20 NTU, DQO de 202 mg.L<sup>-1</sup>, pH de 7,93, sólidos dissolvidos totais de 2003 mg.L<sup>-1</sup> e condutividade elétrica de 4000  $\mu\text{s.cm}^{-1}$ .

**Tabela 23 - Matriz do DCCR com Níveis Reais e Codificados das Variáveis.**

Ensaio	MORINGA <sup>a</sup>	POLFLOC <sup>b</sup>	Rem. Turb <sup>c</sup>	Rem. DQO <sup>d</sup>	pH	SDT <sup>e</sup>	CE <sup>f</sup>
1	-1 (200)	-1 (2)	45,00	70,96	8	2064	4130
2	1 (300)	-1 (2)	50,00	3,30	8	2122	4248
3	-1 (200)	1 (6)	45,00	14,03	8,02	2054	4109
4	1 (300)	1 (6)	55,00	20,63	8,03	2126	4255
5	0 (250)	0 (4)	50,00	88,28	8,03	2109	4220
6	0 (250)	0 (4)	55,00	88,28	8,01	2113	4229
7	0 (250)	0 (4)	55,00	88,28	8,03	2122	4246
8	-1,41 (179,3)	0 (4)	40,00	99,01	7,93	2065	4131
9	1,41 (320,7)	0 (4)	50,00	58,58	7,95	2184	4368
10	0 (250)	-1,41 (1,18)	40,00	96,53	7,95	2151	4304
11	0 (250)	1,41 (6,82)	55,00	84,98	7,96	2214	4434
12	-	-	0,00	104,79	7,95	1990	3981

<sup>a</sup>concentração de coagulante NOVFLC (ppm); <sup>b</sup>concentração de auxiliar POLFLOC (ppm); <sup>c</sup>remoção da turbidez do efluente (%); <sup>d</sup>remoção de DQO do efluente (%); <sup>e</sup>sólidos dissolvidos totais (mg.L<sup>-1</sup>); <sup>f</sup>condutividade elétrica ( $\mu\text{s.cm}^{-1}$ ).

Os valores de remoção variaram entre 40% e 55%. Os pontos centrais apresentaram uma variação de  $\pm 2,89$  %. A maior remoção de DQO foi de 99% no ensaio 8 (179,3 ppm de coagulante). O pH praticamente não alterou, porém os sólidos dissolvidos totais e a condutividade elétrica tiveram um aumento significativo em todos os ensaios.

Com a tabela de efeitos (Tabela 24) é possível observar que os termos lineares da MORINGA e do POLFLOC foram significativos ( $p < 0,05$ ), ambos com um efeito positivo.

**Tabela 24 - Efeitos dos Fatores Estudados para Remoção de Turbidez em Efluente.**

Fatores	Efeito <sup>a</sup>	Erro padrão	t (5)	P
Média	53,323	2,0431	26,0989	0,000002
MORINGA (L)	7,297	2,5061	2,9116	0,0333*
MORINGA (Q)	-7,094	2,9904	-2,3724	0,0638
POLFLOC (L)	6,557	2,5061	2,6164	0,0473*
POLFLOC (Q)	-4,579	2,9904	-1,5314	0,1862
MO x POL	2,500	3,5388	0,7064	0,5115

<sup>a</sup>Os efeitos são apresentados em %; \* p≤0,05; L: linear; Q:quadrático

Os termos não significativos foram inseridos nos resíduos, e assim, os coeficientes de regressão foram calculados, obtendo-se um modelo polinomial de primeira ordem (Equação 6).

$$RTURB = 49,09 + 3,65*[MORINGA] + 3,28*[POLFLOC] \quad (6)$$

Para verificar a validade desse modelo foi calculada a ANOVA, apresentada na Tabela 25.

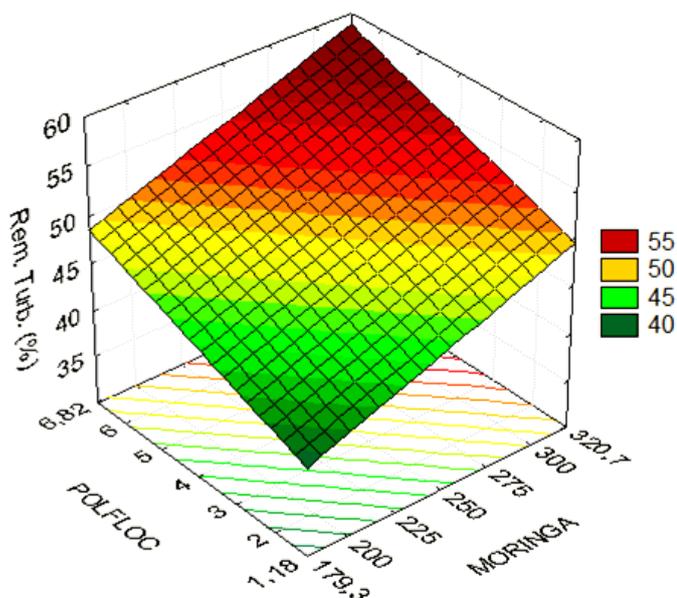
**Tabela 25 - Análise de Variância (Intervalo de Confiança de 95%).**

Fonte de Variação	SQ <sup>a</sup>	GL <sup>b</sup>	QM <sup>c</sup>	F <sub>calculado</sub>	F <sub>tabelado</sub>	F <sub>cal</sub> /F <sub>tab</sub>	p-valor
Regressão	191,9000	2	95,9500	5,1514	4,4590	1,1553	0,0365
Resíduos	149,0091	8	18,6261				
Total	340,9091	10					

% variação explicada (R<sup>2</sup>) = 56,29%; <sup>a</sup>soma de quadrados; <sup>b</sup>graus de liberdade; <sup>c</sup>quadrados médios.

O valor de F<sub>calculado</sub> (F<sub>c</sub>=5,15) para a regressão foi significativo, com p<0,05, e foi maior que o F<sub>2;8;0,05</sub> = 4,46, ou seja, 1,15 vezes maior. Logo o modelo é válido.

A partir da superfície de resposta, pode-se observar o gráfico continua com uma tendência de uma região com maiores concentrações de MORINGA, como mostra a Figura 19.



**Figura 19 - Superfície Resposta na Remoção de Turbidez em Efluente.**

Observa-se que na Figura 19 os melhores valores de remoção foram nas concentrações acima de 250 ppm de coagulante com uma remoção de 55 % da turbidez.

Neste caso, não foi encontrada uma região otimizada para a concentração de MO, na remoção de turbidez em efluente. Sugere-se novos ensaios com concentrações mais elevadas de coagulante, como indica o gráfico de superfície.

Nogueira et al. (2010) utilizaram o coagulante orgânico MO (3000 ppm) e o auxiliar de quiabo (250 ppm) no tratamento de efluente doméstico e industrial, com um pH de 6,58, nas condições de 95 rpm por 15 minutos, seguido de 10 rpm por 5 minutos, logo após esperou-se 10 minutos para a decantação. Como resultados obtiveram uma remoção de turbidez de até 88,3 % (578,7 UNT para 67,9 UNT).

Lied et al. (2011) utilizaram MO no tratamento de efluente de fecularia e encontrou uma remoção de DQO de 70,98%, com uma concentração de 2400 ppm, e de turbidez de 89,19%, com 2823 ppm.

No estudo de Schmitt (2011) no tratamento de efluente de laticínios com MO, os melhores resultados foram de uma remoção de 99,9% de cor aparente e turbidez e 98,5% de DQO, obtidos com a combinação da técnica de coagulação/ floculação/ sedimentação de 60 min utilizando 1500 ppm do coagulante de Moringa oleífera, combinada à técnica de ultrafiltração com pressão de 2 bar.

Vaz et al.(2010) obteve com as sementes de Moringa oleifera Lam, a máxima remoção dos parâmetros cor e turbidez, foram de 90,30% e 92,90%, respectivamente, para concentração de 200 ppm e tempo de sedimentação de 20 minutos, para efluente de galvanoplastia.

Estes estudos mostram que o coagulante a base de MO tem grande potencial de aplicação no tratamento físico-químico para diversos tipos de efluentes.

## 6 CONCLUSÃO

Economicamente a substituição dos coagulantes foi inviável, pois o custo por metro cúbico de efluente tratado com coagulante inorgânico cloreto férrico e Kemira em 6 meses do ano de 2012 foi de R\$ 0,44 e com a substituição em 2013 para o coagulante de base orgânica NOVFLC e o auxiliar POLFLC da NOVTEC® passou a custar R\$ 0,76.

Tecnicamente foi viável, pois não alterou a eficiência do processo, passou de uma média de 42,39% para 45,69% de remoção de DQO. E com a redução da carga orgânica no ano de 2013, passou a atender a legislação vigente Resolução do CONAMA n. 430/2011.

Outros ganhos com a troca foram: menor produção de lodo, passou a ser biodegradável, sem presença de ferro, o que permitiu sua destinação para biodigestor, contribuindo com a redução de gastos, pelo uso do biogás da indústria; aplicação de menores dosagens; evitou problemas com corrosão de equipamentos; além dos ganhos ambientais.

Com o uso do NOVFLC e do POLFLC, conseguiu-se remover até 100% de turbidez, com uma concentração de 600 ppm de coagulante e 4 ppm de floculante, e até 56,93% de DQO com uma concentração de 120 ppm de coagulante e 6 ppm de floculante.

Com a otimização chegou-se a uma região de ótimo na faixa de 550 a 700 ppm de NOVFLC, sendo o POLFLC não significativo, para a remoção de turbidez.

Essa concentração é inviável para ser aplicada na indústria, porém a turbidez não é um parâmetro especificado em legislação. Então neste caso, analisando-se pela DQO a concentração aplicável é a que houve a maior remoção do estudo.

Para a Moringa Oleífera e o POLFLC, os melhores resultados obtiveram uma remoção de turbidez de 61,11%, com 200 a 250 ppm de coagulantes e de 4 a 6 ppm de floculante, e uma remoção de DQO de 99%, com 95,2 ppm de coagulante e 4 ppm de floculante. Porém, em todos os ensaios houve um aumento considerável de sólidos dissolvidos totais.

Com relação ao uso da Moringa não foi possível alcançar a otimização na faixa de estudo.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION – APHA; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION – AWWA; WATER ENVIROMENT FEDERATION – WEF. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22 ed., Washington, DC: APHA, 2012.

ARANTES, Camila C.; RIBEIRO, Tulio A.; PATERNIANI, José E. S. Processamento de sementes de Moringa oleífera utilizando-se diferentes equipamentos para obtenção de solução coagulante. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. V.16, n.6, p.661–666, 2012.

BONGIOVANI, Milene C. et al. Os benefícios da utilização de coagulantes naturais para a obtenção de água potável. **Acta Scientiarum**. Technology. Maringá, v. 32, n. 2 p. 167-170, 2010.

CORAL, L. A. et al. Estudo da Viabilidade de Utilização do Polímero Natural (TANFLOC) em Substituição ao Sulfato de Alumínio no Tratamento de Águas para Consumo. In: 2<sup>nd</sup> International Workshop, Advances in Cleaner Production. São Paulo. 2009.

DA SILVA, F. J. A.; SOUZA, L. M. M.; MAGALHÃES, S. L. **Uso potencial de biopolímeros de origem vegetal na descolorização de efluente têxtil índigo**. In: XXII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2003. Joinville - SC.

DI BERNARDO, Luiz; DI BERNARDO, Angela; CENTURIONE FILHO, Paulo L. **Ensaio de Tratabilidade de Água e dos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água**. São Paulo: RiMa, 2002.

ENVIRONQUIP. Engenharia de Sistema Ambientais Ltda. Procedimento operacional flotador. Curitiba, PR. S.d.

IAP. Instituto Ambiental do Paraná. Manual de Licenciamento Ambiental. Empreendimentos Industriais. 16 p. 1998.

LIBÂNIO, Marcelo. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 2ª edição. Campinas/SP: Editora Átomo, 2008.

LIED, Eduardo Borges; FAGUNDES-KLEN, Marcia Regina; VEIT, Márcia Teresinha. Avaliação da eficiência do tratamento de água residuária de fecularia por coagulação/floculação utilizando extrato de Moringa oleifera. In: II Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. IBEAS – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais. 2011.

LIMA, G. J. de A. **Uso de polímero natural do quiabo como auxiliar de floculação e filtração em tratamento de água e esgoto.** 154 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, 2007.

MACÊDO, Jorge Antônio Barros de. **Águas & Águas.** 2ª Edição. Belo Horizonte/MG: CRQ-MG, 2004.

MANGRICH, A. S.; DOUMER, M. E.; MALLMANN, A. S.; WOLF, C. R. Química Verde no Tratamento de Águas: Uso de Coagulante Derivado de Tanino de *Acácia mearnsii*. **Revista Virtual de Química.** 2013.

NOGUEIRA, F. C. B. et al. Sementes de moringa oleifera e extrato de quiabo no tratamento de efluentes urbanos e industriais. In: II encontro nacional de moringa. Aracajú, Sergipe. 2010.

NOVTEC. Fichas técnicas e fichas de informação de segurança de produto químico POLFLOC D15 e NOVFLC1540. Biguaçu, SC. s.d.

NUNES, J. A. **Tratamento físico-químico de águas residuárias industriais.** 3. ed. Aracaju: Gráfica e Editora Trinfo Ltda, 2001.

PAVANELLI, G. **Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor e turbidez elevada.** 233 p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos/SP, 2001.

PIANTÁ, Cyro Antônio Vianna. **Emprego de coagulantes orgânicos naturais como alternativa ao uso do sulfato de alumínio no tratamento de água.** 78 p. Trabalho de Diplomação (Bacharelado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

RESENDE, Mercia Luccas; CARVALHO, Eraldo Henriques de. Ensaio de coagulação e floculação para utilização na estação de esgotos de Goiânia. In: XXVIII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, México. 2002.

RICHTER, Carlos A. **Água: métodos e tecnologia de tratamento**. São Paulo: Blucher. 2009.

SANTOS, T. Z. dos; ZARA, R. F; LOBO, V, S; WEBER, V; SHEIDT, W. V; DOTTO, F. **Estudo da utilização de flocculantes alternativos e naturais em tratamento de água**. Anais ExpoUT2010. Toledo. Paraná. 2010

SCHMITT, Dalila Maria Formentini. **Tratamento de águas residuárias da indústria de laticínios pelos processos combinados coagulação/floculação/adsorção/ultrafiltração utilizando semente de Moringa oleifera como coagulante**. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2011.

SOUZA, José Francisco de; LIMA, Guilherme M. A. Uso do quiabo como auxiliar de floculação. S.d.

STEINMETZ, Ricardo Luís Radis et al. Separação sólido-líquido em efluentes da suinocultura com uso de extratos tanantes modificados e aplicação de modelos de otimização multivariada. S.d.

VAZ, Luiz Gustavo de Lima et al. Avaliação da eficiência de diferentes agentes coagulantes na remoção de cor e turbidez em efluente de galvanoplastia. **Revista Eclética Química**. São Paulo. Volume 35, número 4, 2010.

\_\_\_\_\_. **Performance do Processo de Coagulação/Floculação no Tratamento do Efluente Líquido Gerado na Galvanoplastia**. 100 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo/PR, 2009.

VIANNA, Marcos Rocha. **Hidráulica aplicada às estações de tratamento de água**. 3ª edição. Belo Horizonte/MG: Imprimatur, 1997.

ZENNATI, Dilcemara Cristina. **Tratamento e aproveitamento de resíduos da produção do biodiesel: água residuária e glicerol**. 128 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel/PR, 2011.