



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS

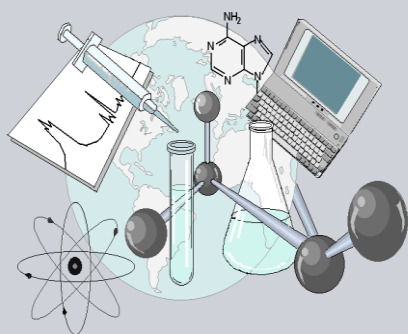
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUÍMICA

**“UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO VEGETAL DO CHUCHU
(*Sechium edule* SW.) COMO COAGULANTE NATURAL PARA
TRATAMENTO DE EFLUENTES TÊXTEIS”**

Dissertação apresentada por
CIBELE ANDRADE DE ALMEIDA ao
Programa de Pós-Graduação em
Química do Departamento de
Química do Centro de Ciências
Exatas da Universidade Estadual de
Maringá como parte dos requisitos
para a obtenção do título de Mestre
em Química

CE



**Centro de
Ciências Exatas**

MARINGÁ, MARÇO/2015

CIBELE ANDRADE DE ALMEIDA

**“UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO VEGETAL DO CHUCHU (*Sechium edule*
SW.) COMO COAGULANTE NATURAL PARA TRATAMENTO DE
EFLUENTES TÊXTEIS”**

Dissertação apresentada por **CIBELE ANDRADE DE ALMEIDA** ao Programa de Pós-Graduação em Química do Departamento de Química do Centro de Ciências Exatas da Universidade Estadual de Maringá como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Química sob orientação da Prof.^a Dr.^a Juliana Carla Garcia Moraes.

MARINGÁ, MARÇO DE 2015.

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

A498u Almeida, Cibele Andrade de
Utilização de resíduo vegetal do chuchu (*Secchium edule*
SW.) como coagulante natural para tratamento de efluentes
texteis / Cibele Andrade de Almeida. -- Maringá, 2015.
77 f. : il. color., figs., tabs.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Juliana Carla Garcia Moraes.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Maringá, Centro de Ciências Exatas, Departamento de
Química, Programa de Pós-Graduação em Química, 2015.

1. Efluentes texteis. 2. Coagulação 3. Floculação 4.
Coagulante natural. 4. Resíduo vegetal. 5. *Secchium edule*
SW. I. Moraes, Juliana Carla Garcia, orient. II.
Universidade Estadual de Maringá. Centro de Ciências
Exatas. Departamento de Química. Programa de Pós-Graduação
em Química. III. Título.

CDD 21.ed. 543.55

AHS-002817

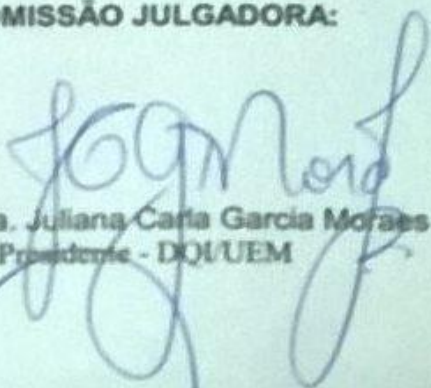


Universidade Estadual de Maringá

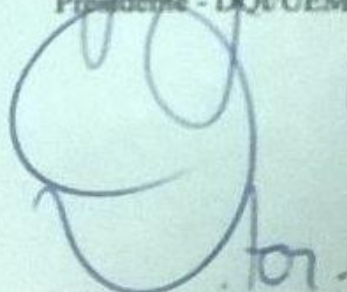
Centro de Ciências Exatas
Departamento de Química
Programa de Pós-Graduação em Química

Este é o exemplar definitivo da Dissertação apresentada por *Cibele Andrade de Almeida*, perante a Comissão Julgadora do Programa de Pós-Graduação em Química em 19 de março de 2015.

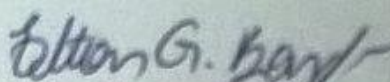
COMISSÃO JULGADORA:



Prof. Dra. Juliana Carla Garcia Moraes
Presidente - DQ/UEM



Prof. Dr. Vitor de Cinque Almeida
Membro - DQ/UEM



Prof. Dr. Elton Guntendorfer Bonafe
Membro - UTFPR

“Mas como está escrito: As coisas que o olho não viu, e o ouvido não ouviu, e não subiram ao coração do homem são as que Deus preparou para os que o amam.”

(1 Coríntios 2:9)

DEDICATÓRIA

Dedico a Deus, aos meus pais e a minha irmã por sempre estarem ao meu lado e por fazerem os meus dias mais felizes.

Em especial ao meu irmão, Wemerson (*in memoriam*) por ter me ensinado a nunca desistir dos meus sonhos e por todos os momentos especiais que vivemos.

AGRADECIMENTOS

- A **Deus**, pela sua fidelidade, pelo seu amor e cuidado para comigo. Por conceder-me graça e sabedoria, por guiar-me em cada decisão, por fazer-me forte nos momentos de fraqueza e trazer-me a paz para viver o que Ele planejou para mim.
- A minha orientadora Prof.^a Dr.^a **Juliana Carla Garcia Moraes**, pela oportunidade concedida, por acreditar nesse projeto, pelos incentivos, pela disposição em ensinar e ajudar. Ju, obrigada por ser mais que uma orientadora, obrigada pela sua amizade e por sempre querer o nosso bem.
- Aos professores das disciplinas que cursei e àqueles que mesmo não sendo mais meus professores, permaneceram ao meu lado sempre incentivando e ajudando no que era preciso. Cada um de vocês foi precioso a seu modo.
- A família do Laboratório **GPDMA-UEM**, em especial **Thábata Formicoli, Maísa Tatiane, Renata Padilha, Elizangela Ambrosio, Milena Keller, Lídia Brizola, Fernando Domingues, Lucas Dollis, Vinícius Masiero, Henrique Geraldino**, por cada momento, cada sorriso, cada ensinamento, cada informação e conhecimento compartilhado. **Thábata e Maísa**, muito obrigada por toda ajuda e pela paciência em ensinar-me, vocês foram preciosas.
- Aos meus amigos, **Jeann Landim, Diogo Fernandes, Marcio Bera, Keren Pardini, Filipe Pardini, Daniela Pardini e Emanuelle Magalhães**, por estarem sempre ao meu lado em cada momento de choro, de risadas, de ansiedade. Muito obrigada pelos incentivos e por acreditarem que no final valeria a pena. Vocês são mais que amigos, são irmãos, ter a amizade de vocês é um presente.

- Aos meus pastores e irmãos em Cristo, pelos conselhos, pelas orações e pelos momentos de comunhão.
- A família **Andrade**, aos meus **tios, tias, primos e primas**, por acreditarem e sonharem esse sonho comigo, por se orgulharem de quem eu me torno a cada dia, e por tornarem os meus dias mais felizes. Amo vocês!
- Aos meus avós, **José e Euleita**, por todos os ensinamentos, por acreditarem e valorizarem os meus sonhos, por sempre me incentivarem nos momentos difíceis e por me fazerem entender que Deus sempre está no controle de tudo. Vocês são meu orgulho, meu amor maior.
- A minha irmã, **Suelen** por tornar meus dias mais alegres, por passar horas e horas me ouvindo e sem querer aprender um pouco de química. GORDINHA, amo-te!
- Aos meus pais, **Adão e Araide**, por tudo o que fizeram e fazem por mim, por não medirem esforços para que eu pudesse viver e conquistar o que eles não puderam. Por serem minha base, meu referencial. Muito obrigada, por sempre cuidarem de mim, por se preocuparem comigo, pelas broncas, pelos conselhos e por sempre quererem a minha felicidade, são meu orgulho, meu amor sem medidas. Amo vocês!
- **Agradecimentos técnicos:**
 - ✓ CAPES, CNPq e Fundação Araucária – pelo apoio financeiro.
 - ✓ Lavanderia Dinâmica, representada pela Eng.^a Têxtil Gil – pelo fornecimento de efluente e aprendizado dos processos de lavanderia industrial.
 - ✓ Ivânia Teresinha Albrecht Schuquel – Departamento de Química (UEM) – pelos espectros de RMN¹³C/CPMAS e todos os auxílios.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	xii
LISTA DE TABELAS.....	xiv
RESUMO.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. INDÚSTRIA TÊXTIL.....	4
2.2. PROCESSO DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO.....	8
2.3. COAGULANTES.....	9
2.3.1. COAGULANTES INORGÂNICOS.....	9
2.3.1.1. CLORETO FÉRRICO.....	10
2.3.2. COAGULANTES ORGÂNICOS.....	12
2.3.2.1. POLÍMEROS SINTÉTICOS.....	12
2.3.2.2. BIOPOLÍMEROS.....	13
2.4. CHUCHU (<i>Sechium edule</i> SW.).....	14
2.5. LEGISLAÇÃO AMBIENTAL BRASILEIRA.....	15
2.6. PLANEJAMENTO FATORIAL.....	17
2.6.1. PLANEJAMENTO BOX-BEHNKEN.....	18
3. OBJETIVOS.....	20
3.1. OBJETIVO GERAL.....	20
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	21
4.1. EFLUENTE TÊXTIL.....	21
4.2. CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE.....	21

4.2.1. pH.....	21
4.2.2. Turbidez.....	22
4.2.3. Demanda Química de Oxigênio (DQO).....	22
4.3. PREPARO DO EXTRATO AQUOSO A PARTIR DO RESÍDUO VEGETAL (CASCA) DO CHUCHU (<i>Sechium edule</i> SW.).....	24
4.4. CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO VEGETAL (CASCA) DO CHUCHU (<i>Sechium edule</i> SW.).....	25
4.4.1. Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR).....	25
4.4.2. Ressonância magnética nuclear do ¹³ C no estado sólido (RMN ¹³ C/CPMAS).....	25
4.5. PROCESSO DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO – Teste de jarros.....	25
4.5.1. EFEITO DO pH DO EFLUENTE.....	26
4.5.2. EFEITO DA DOSAGEM DE FeCl ₃ E DA DOSAGEM DO EXTRATO DO RESÍDUO VEGETAL (CASCA) DO CHUCHU.....	26
4.6. TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS RESULTADOS.....	26
4.7. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	27
4.7.1. TESTE DE JARROS.....	27
4.7.2. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	27
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
5.1. CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE DE LAVANDERIA JEANS <i>in natura</i>	29
5.2. PROCESSO DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO.....	30

5.2.1. EFEITO DO pH UTILIZANDO FeCl ₃ COMO COAGULANTE.....	30
5.2.2. EFEITO DA DOSAGEM DO FeCl ₃	31
5.2.3. EFEITO DO pH UTILIZANDO O EXTRATO DO RESÍDUO VEGETAL (CASCA) DO CHUCHU COMO COAGULANTE.....	32
5.2.4. EFEITO DA DOSAGEM DO EXTRATO DO RESÍDUO VEGETAL (CASCA) DO CHUCHU.....	34
5.2.5. EFEITO DO pH UTILIZANDO A COMBINAÇÃO FeCl ₃ + EXTRATO DO RESÍDUO VEGETAL (CASCA) DO CHUCHU.....	36
5.3. CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO VEGETAL (CASCA) DO CHUCHU.....	37
5.4. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	40
5.4.1. AVALIAÇÃO DOS MODELOS E ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA).....	41
5.4.2. ANÁLISES DAS SUPERFÍCIES DE RESPOSTA.....	45
5.4.3. OTIMIZAÇÃO – DETERMINAÇÃO DO PONTO ÓTIMO.....	46
5.5. CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE DE LAVANDERIA DE JEANS APÓS O TRATAMENTO.....	48
6. CONCLUSÃO.....	49
REFERÊNCIAS.....	50

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma das principais etapas de uma indústria têxtil para beneficiamento de tecido.....	6
Figura 2. Estrutura química do corante índigo.....	7
Figura 3. Reação de redução química do corante índigo a leucoíndigo pelo diotionito.....	8
Figura 4. Processo de coagulação/floculação	8
Figura 5. Concentrações dos monômeros dos produtos da hidrólise do Fe (III) em equilíbrio com hidróxidos amorfos em função do pH.....	11
Figura 6. Representação esquemática da interação intermolecular entre a ligação π -elêtron da molécula do corante e o grupo hidroxila do polissacarídeo.....	13
Figura 7. Variedades de chuchu (<i>Sechium edule</i> SW.)	14
Figura 8. Planejamento Box-Behnken para três variáveis.....	18
Figura 9. Estação de tratamento da ETE da lavanderia industrial: (a) lagoa de equalização e (b) peneira estática.....	21
Figura 10. Curva de calibração para determinação de DQO via método colorimétrico empregando refluxo fechado.....	23
Figura 11. Chuchu negro (<i>Sechium edule</i> SW.).....	24
Figura 12. Esquema da obtenção do extrato do resíduo vegetal (casca) do chuchu (<i>Sechium edule</i> SW.).....	24
Figura 13. Espectro de FTIR do resíduo vegetal (casca) do chuchu (<i>Sechium edule</i> SW.).....	38

Figura 14. Espectro de RMN ^{13}C /CPMAS do resíduo vegetal (casca) do chuchu (*Sechium edule* SW.).....39

Figura 15. Diagrama da superfície de resposta que mostra o efeito da dosagem do extrato e a dosagem de FeCl_3 (a), o efeito do pH e a dosagem do extrato (b), o efeito do pH e a dosagem de FeCl_3 (c) para a remoção de turbidez e o efeito da dosagem do extrato e a dosagem do FeCl_3 (d), o efeito do pH e a dosagem do extrato (e), o efeito do pH e a dosagem de FeCl_3 (f) para remoção de DQO.....45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros físico-químicos experimentais do efluente <i>in natura</i> e limites padrões para a emissão do efluente em corpos d'água determinados na legislação ambiental brasileira.....	29
Tabela 2. Efeito do pH utilizando FeCl ₃ como coagulante na remoção de turbidez e DQO.....	30
Tabela 3. Efeito da dosagem de FeCl ₃ na remoção de turbidez e DQO.....	31
Tabela 4. Efeito do pH utilizando o extrato do resíduo vegetal (casca) do chuchu como coagulante na remoção de turbidez e DQO.....	33
Tabela 5. Efeito da dosagem do extrato do resíduo vegetal (casca) do chuchu na remoção de turbidez e DQO.....	35
Tabela 6. Efeito do pH utilizando a combinação FeCl ₃ + extrato do resíduo vegetal (casca) do chuchu na remoção de turbidez e DQO.....	36
Tabela 7. Fatores e seus valores codificados e reais aplicados para a otimização do efluente de lavanderia de jeans.....	40
Tabela 8. Matriz do planejamento para o efluente de lavanderia de jeans e suas respectivas respostas investigadas.....	41
Tabela 9. Análise de Variância (ANOVA) da equação da remoção de turbidez.....	43
Tabela 10. Análise de Variância (ANOVA) da equação da remoção de DQO.....	44
Tabela 11. Parâmetros físico-químicos do efluente de após os processos de coagulação/floculação utilizando coagulante inorgânico, coagulante natural e tratamento	

combinado de coagulante inorgânico e natural nas condições otimizadas determinadas experimentalmente e os limites ambientais determinados na legislação brasileira.....48

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência do extrato aquoso do resíduo vegetal do chuchu (*Sechium edule* SW.) como coagulante natural no tratamento de efluentes têxteis, empregando-se a técnica de coagulação/floculação. O efeito do pH, da dosagem de FeCl_3 e da dosagem do extrato aquoso do resíduo vegetal do chuchu na remoção de turbidez e demanda química de oxigênio (DQO) foram investigados através de ensaios pelo método padrão de teste de jarros. O processo de otimização do tratamento do efluente têxtil foi realizado através da metodologia de superfície de resposta (RSM) baseada no planejamento experimental Box-Behnken, sendo as variáveis em estudo: dosagem de FeCl_3 , dosagem do extrato do resíduo vegetal do chuchu e pH, tendo como resposta a porcentagem de remoção de turbidez e DQO. A caracterização do resíduo vegetal do chuchu através de análises de Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) e Ressonância Magnética Nuclear de ^{13}C no estado sólido (RMN ^{13}C /CPMAS) indicaram que o resíduo apresentou bandas de absorção e sinais típicos de polissacarídeos, no caso característico de polieletrólitos aniônicos. As condições estabelecidas como ótimas através do planejamento experimental foram: dosagem de $\text{FeCl}_3 = 47,40 \text{ mg L}^{-1}$, dosagem de extrato aquoso de resíduo vegetal do chuchu = $15,00 \text{ mg L}^{-1}$ e $\text{pH} = 6,14$ obtendo porcentagem de remoção de turbidez e DQO de 97,95% e 83,84% respectivamente. Os resultados obtidos indicaram que o extrato aquoso do chuchu mostrou ser um potencial coagulante natural, porém esse possui maior eficiência quando associado a uma baixa dosagem de FeCl_3 , tendo melhor desempenho como auxiliar de floculação. Através dessa associação observou-se uma redução de 75% da dosagem de FeCl_3 , indicando que a adição do extrato melhorou a eficiência do processo utilizando uma dosagem mínima de FeCl_3 .

Palavras-chave: Efluentes têxteis, coagulação/floculação, coagulante natural, resíduo vegetal, *Sechium edule* SW.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the efficiency of aqueous extract of plant residue of chayote (*Sechium edule* SW.) As a natural coagulant in the treatment of textile effluents, using coagulation / flocculation technique. The effect of pH, FeCl₃ dosage and dosage of the aqueous extract of the vegetable residue at chayote turbidity and chemical oxygen demand (COD) were investigated by testing jars by the standard test method. The optimization process of the treatment of textile effluent was conducted by response surface methodology (RSM) based on experimental design Box-Behnken, and the variables under study: FeCl₃ dosage, dosage of plant residue extract chayote and pH, having as a percentage of the response to turbidity and COD. The characterization of the vegetable residue by chayote spectroscopy analysis by Fourier Transform Infrared (FTIR) spectra and ¹³C nuclear magnetic resonance solid (¹³C NMR / CPMAS) indicated that the residue showed absorption bands and typical signs of polysaccharides in case characteristic of anionic polyelectrolytes. As satisfying the conditions set by the experimental design were dosage FeCl₃ = 47.40 mg L⁻¹ dosage aqueous extract of plant residue chayote = 15.00 mg L⁻¹ and pH = 6.14 obtaining removing percentage Turbidity and COD of 97.95% and 83.84% respectively. The results showed that the aqueous extract of chayote proved to be a natural coagulant potential, but this has greater efficiency when associated with a low dosage of FeCl₃, with better performance as flocculation aid. Through this association was observed a 75% reduction of the FeCl₃ dosage, indicating that the addition of the extract has improved the process efficiency by using a minimum dosage of FeCl₃.

Keywords: Textile Wastewater, coagulation / flocculation, natural coagulant, plant residue, *Sechium edule* SW.

1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural essencial a vida, é a substância mais abundante no planeta Terra. Do total de água existente 97,5% é água salgada e 2,5% água doce. A água doce está distribuída em seis diferentes fontes: geleiras e calotas polares, águas subterrâneas, rios e lagos, umidade do solo e umidade atmosférica, sendo disponível ao homem 0,3%, representado por água de rios e lagos. Do total de água disponível para o consumo mundial 70% são utilizados na agricultura, 22% na indústria e 8% para uso doméstico (Lenzi et al., 2012).

As atividades industriais são uma das maiores causadoras da poluição dos recursos hídricos, pois a maioria dos processos utiliza um grande volume de água, tendo como consequência a produção de rejeitos líquidos contendo espécies tóxicas ou difíceis de serem degradadas (Garcia et al., 2007). Dentre os processos industriais responsáveis pela geração de rejeitos líquidos destaca-se o setor têxtil, cujos efluentes são caracterizados por serem altamente coloridos, devido à presença de corantes que não se fixam na fibra durante o processo de tingimento (O'Neill et al., 1999). Esses contêm também alta concentração de sais, sólidos suspensos, demanda química de oxigênio (DQO) e compostos tóxicos ao homem e ao meio ambiente, pois estudos têm mostrado que muitos corantes têxteis e seus subprodutos apresentam-se carcinogênicos¹ e/ou mutagênicos². A poluição de corpos d'água com esses compostos provocam, além da poluição visual, alterações nos ciclos biológicos afetando principalmente processos de fotossíntese (Senthilkumar et al., 2011; Pinheiro et al., 2004).

A técnica de coagulação/floculação, seguida pela sedimentação, é utilizada mundialmente no processo de tratamento de águas residuais (Khayet et al., 2011; Aber et al., 2010; Prasad, 2009). A coagulação é o processo em que o agente coagulante é adicionado à

¹Carcinogênico: Substância com potencial cancerígeno, isto é, que tem como propriedade o potencial de desenvolvimento de câncer.

água, reduzindo as forças que tendem a manter separadas as partículas em suspensão, e a floculação é a aglomeração dessas partículas por meio de transporte de fluido, de modo a formar partículas maiores que possam sedimentar (Ritcher e Netto, 2003). A eficiência do processo de coagulação/floculação e o custo da operação são influenciados pelo tipo de coagulante usado, dosagem, pH, força iônica e pelo teor e natureza dos compostos orgânicos presentes no efluente, sendo necessário estabelecer experimentalmente as melhores condições operacionais para cada tipo de efluente (Delgado et al., 2003; Duan e Gregory, 2003).

Os sais de ferro e alumínio são os coagulantes mais utilizados no tratamento de águas e efluentes, sendo $AlCl_3$, $Al_2(SO_4)_3$, $FeCl_3$ e $Fe_2(SO_4)_3$ os mais utilizados, pelo baixo custo e maior eficácia no processo de coagulação (Yang et al., 2010). No entanto, a utilização de sais de alumínio nos últimos anos tem sido questionada devido ao impacto ambiental gerado pela grande quantidade de lodo produzido e elevado nível de concentração de alumínio remanescente na água tratada, pois, vários estudos, associam a elevada ingestão de alumínio à doença de Alzheimer (Yang et al., 2010; Divakaran e Pillai, 2002; Stephenson e Duff, 1996), sendo os coagulantes à base de ferro comparativamente mais seguros para o ambiente.

A fim de minimizar os impactos causados ao utilizar coagulantes inorgânicos, têm-se como alternativa a utilização de coagulantes naturais provenientes de microrganismos, animais ou plantas. De fato, alguns estudos têm demonstrado que resíduos vegetais podem ser aplicados como coagulantes naturais (Bongiovani et al., 2010). Os principais coagulantes naturais estudados em pesquisas referentes ao tratamento de água são os taninos, que podem ser usados como auxiliares de coagulação e floculação (Heredia et al., 2010) bem como coagulantes, como a moringa *Oleifera Lam* (Pritchard et al., 2010), a quitosana que é extraída da carapaça de frutos do mar (camarão e lagostas) como auxiliar de floculação (NG et al., 2013), e o extrato de cactos (Souza, 2014), e da babosa (Borri et al., 2014). Todos os

² Mutagênico: é todo agente físico, químico ou biológico que, em exposição às células, pode causar mutação (Düsman et al., 2012; Loureiro et al., 2002).

auxiliares de floculação são usados em conjunto com coagulante metálico. Os biopolímeros não são nocivos à saúde e são biodegradáveis, por serem produtos naturais são de baixo custo, reduzem o volume de lodo gerado e dependendo da fonte do qual são extraídos, podendo ser colhidos e processados localmente (Prasad, 2009; Bhatia et al., 2007; Sanghi et al., 2006; Zhang et al., 2006).

Dessa forma, este trabalho teve o objetivo de otimizar o processo de extração do coagulante natural a partir do resíduo vegetal (casca) do chuchu (*Sechium edule* SW.), para ser utilizado como coagulante e auxiliar de floculação associado ao FeCl_3 no tratamento de efluentes têxteis via processo de coagulação/floculação utilizando a metodologia de superfície de resposta (MSR) para determinar a influência do pH e dosagem dos coagulantes, bem como a interação entre eles.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. INDÚSTRIA TÊXTIL

Em razão da urbanização e industrialização progressiva nas últimas décadas, a contaminação dos recursos hídricos com diversos poluentes químicos traz enormes riscos tanto para o meio ambiente quanto para a saúde pública (Lima, 2010; Kunz et al., 2002). A indústria têxtil representa um importante setor da economia brasileira e mundial, tendo apresentado considerável crescimento nos últimos anos. No entanto, como consequência dessa expansão, efluentes industriais potencialmente tóxicos também são gerados de maneira elevada, sendo isso um potencial contribuinte à degradação do meio-ambiente (Mattar et al., 2013).

O Brasil ocupa a quarta posição entre os maiores produtores mundiais de artigos de vestuário e a quinta posição entre os maiores produtores de manufaturas têxteis, e é um dos maiores produtores de denim³ do mundo, posição que divide com China, Índia, e Paquistão, com capacidade de produção de 3,4 bilhões de metros lineares de tecido por ano, em torno de 1,5 bilhão de calças (IEMI, 2014). Segundo dados da Associação Brasileira da Indústria Têxtil (Abit, 2013), o Brasil é o segundo maior produtor de jeans do mundo e movimenta mais de R\$ 8 bilhões por ano no país. O Paraná é o quarto maior estado produtor do país, respondendo por 8,74% do PIB do setor têxtil. São aproximadamente 6 mil indústrias instaladas no Estado, responsáveis por mais de 150 milhões de peças produzidas e um faturamento que ultrapassa R\$ 4 bilhões por ano. O polo industrial do setor encontra-se nas regiões Norte e Noroeste o chamado “corredor da moda”, que engloba as cidades de Londrina, Apucarana, Maringá e Cianorte que concentram cerca de 60% das unidades industriais do setor (SENAI, 2014).

³ Denim: tecido de algodão com tingimento índigo, utilizado como matéria prima para o segmento jeanswear.

De acordo com estudos divulgados pelo Instituto de Estudos e Marketing Industrial (IEMI), realizados entre 2008 e 2012, a indústria de jeanswear cresceu, se destacou e se segmentou em um mundo próprio. Para termos uma dimensão de sua representatividade, em 2012 foram produzidas 349,8 milhões de peças, apresentando um crescimento de 27% quando comparado a 2008 (IEMI, 2014). O segmento caracteriza-se pela versatilidade de criação e de complexos processos em lavanderias industriais responsáveis pela finalização dos produtos (Mendes e Lima, 2011).

As indústrias têxteis e as lavanderias têm a água como um de seus principais insumos, utilizada em grandes volumes. Estima-se que, para produzir 1 kg de tecido, sejam necessários 80 L de água. Nessas indústrias, grande parte da água consumida não é incorporada ao produto final e cerca de 80% se torna efluente altamente heterogêneo e poluente (Lotito et al., 2012; Hydro, 2011). As têxteis geram em média 50 m³ de resíduos por hora na produção de 4,25 milhões de metros de tecido em um mês. Já uma lavanderia de jeans, por exemplo, consome de 50 mil a 300 mil litros de água em 30 dias. Se considerarmos que há 6200 lavanderias no país, pode-se calcular o impacto ambiental que elas representam (Hydro, 2011).

O processo de beneficiamento têxtil inclui as etapas de preparação e fiação, tingimento dos fios, engomagem, tecelagem, chamuscagem, desengomagem, cozimento, mercerização⁴, secagem, estamparia⁵, tinturaria, lavagem, alvejamento⁶ e acabamento, sendo as etapas de tinturaria, lavagem, alvejamento e acabamento as que mais geram efluentes com elevada carga poluidora e alto teor de compostos orgânicos, como amido, gomas, pectinas, corantes,

⁴ Mercerização: técnica aplicada especificamente em tecidos de algodão e que conferem maior brilho, maciez, resistência e afinidade pelos corantes. A fibra é tratada a frio em solução de soda cáustica concentrada.

⁵ Estamparia: A base de pigmentos (orgânicos ou inorgânicos), que misturados a vernizes e resinas, fazem uma camada superficial sobre a fibra.

⁶ Alvejamento: Retirada de impurezas e coloração amarelada dos tecidos celulósicos através do tratamento com hipoclorito de sódio, peróxido de hidrogênio ou clorito de sódio.

sabões e detergentes e compostos inorgânicos como hidróxido de sódio, carbonatos, sulfetos e cloretos resultantes desses processos como é mostrado na Figura 1 (Garcia, 2006).

Dentre os compostos presentes no efluente os corantes são identificados como os mais problemáticos devido a sua alta solubilidade na água e baixa degradabilidade (Peixoto et al., 2013). Uma vez no ambiente, esses além da poluição visual de rios e lagos podem apresentar toxicidade e efeitos genotóxicos⁷ nos organismos (Yesilada et al., 2003). A produção total de corantes no mundo é estimada em 800.000 ton/ano e pelo menos 10-15% destes entram no meio ambiente através dos efluentes (Peixoto, Marinho & Rodrigues 2013; Revankar e Lele, 2007).

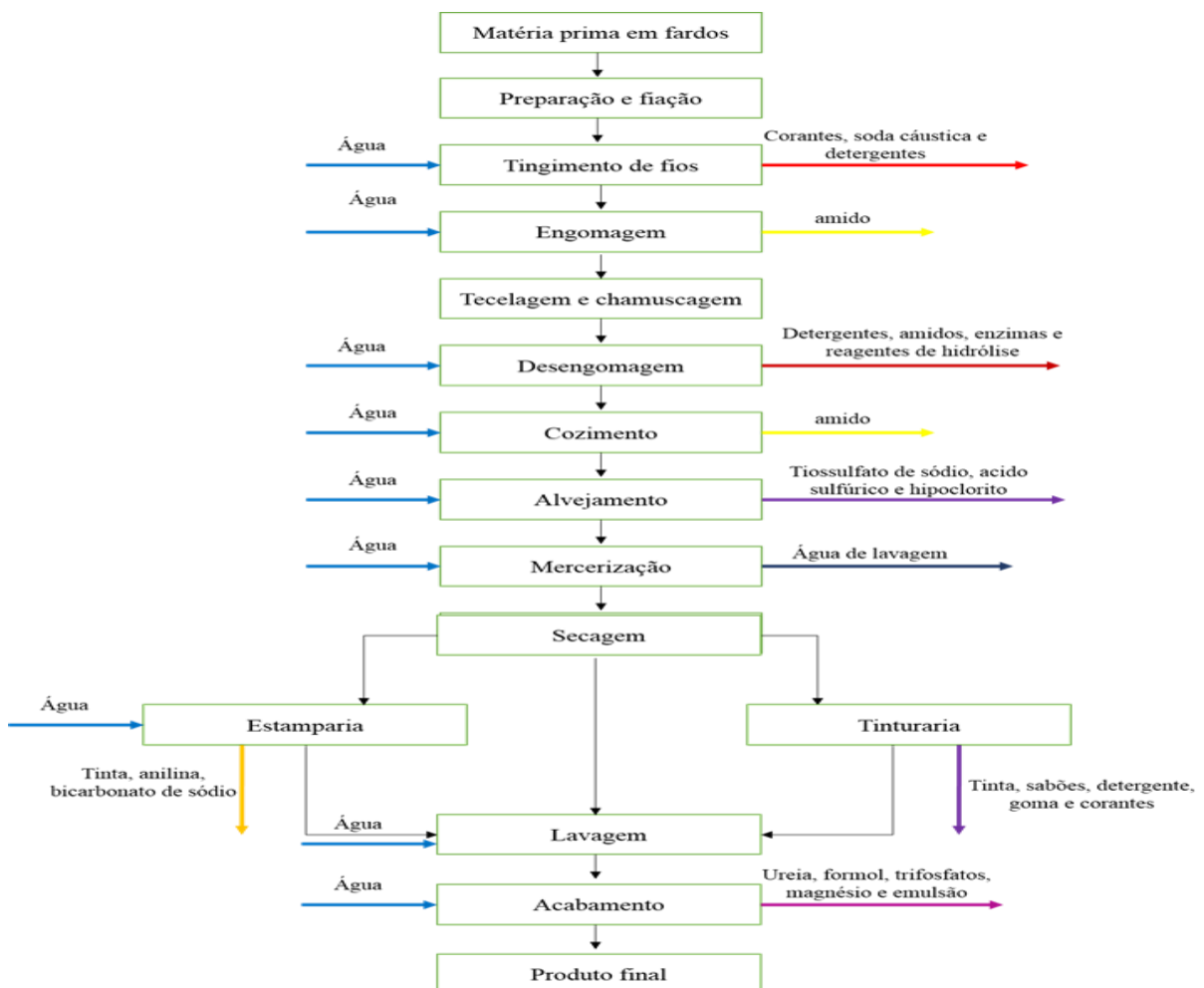


Figura 1. Fluxograma das principais etapas de uma indústria têxtil para beneficiamento de tecido (Garcia, 2006).

⁷ Genotóxico: substância que altera os genes, causando doenças hereditárias.

Os corantes têxteis são compostos orgânicos cuja finalidade é conferir a uma certa fibra (substrato) determinada cor, sob condições de processo preestabelecidas. Para cada tipo de fibra existe uma determinada categoria de corante. Para as fibras celulósicas, como o algodão e o rayon, são aplicados os corantes reativos, diretos, azóicos e sulfurosos (Corantes e pigmentos, 2011). A molécula do corante utilizada para tingimento da fibra têxtil pode ser dividida em duas partes principais, os grupos cromóforos, os quais consistem de ligações duplas e triplas, como: $-C=C-$, $-N=N-$, $-C\equiv N$ e grupos funcionais que são responsáveis pelo aumento da intensidade da cor e da afinidade com as fibras, tais como: $-NH_2$, $-OH$, $-COOH$, $-SO_3H$ (Freitas, 2014; Kunz et al., 2002). O corante índigo (Figura 2) é usado no tingimento de fios de algodão empregados na manufatura do tecido conhecido como denim (Rebelo et al., 2014).

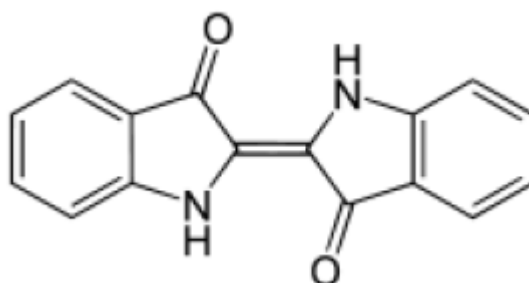


Figura 2. Estrutura química do corante índigo (Adaptado de Rebelo et al., 2014).

O corante índigo se classifica quanto a sua fixação à fibra como corante à cuba, eles são insolúveis em água. A característica química desse composto é a presença do grupo cetônico ($C = O$), que é insolúvel em água, mas, quando se altera na forma reduzida ($C - OH$), torna-se solúvel e o corante passa a ter afinidade química pela fibra celulósica (Paschoal e Tremiliosi - Filho, 2005).

Na indústria têxtil, o corante índigo é reduzido pelo ditonito de sódio, em meio alcalino, para a forma leucoíndigo - substância solúvel e que tem afinidade com a fibra celulósica (Figura 3). Essa substância apresenta uma tonalidade mais clara que o corante original, mas por oxidação que pode ocorrer de maneira lenta com o ar ou rápida com adição de um oxidante – geralmente peróxido de hidrogênio – regenera-se a forma original do corante (azul) sobre a fibra (Paschoal e Tremiliosi - Filho, 2005; Komorsky-Lovric, 2000).

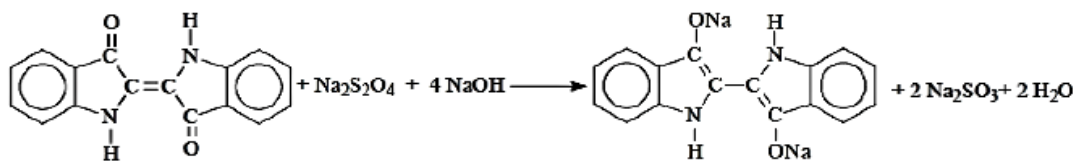


Figura 3. Reação de redução química do corante índigo a leucoíndigo pelo ditonito de sódio (Paschoal e Tremiliosi - Filho, 2005).

2.2. PROCESSO DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO

A técnica de coagulação/floculação seguida pela sedimentação é utilizada mundialmente no processo de tratamento de águas residuais, tem por finalidade a remoção de substâncias coloidais, ou seja, material sólido em suspensão e/ou dissolvido (Khayet et al., 2011; Aber et al., 2010; Prasad, 2009).

A coagulação é o processo em que o agente coagulante é adicionado à água, reduzindo as forças que tendem a manter separadas as partículas em suspensão. A floculação é a aglomeração dessas partículas por meio de transporte de fluido, de modo a formar partículas maiores que possam sedimentar (Ritcher e Netto, 2003) como mostrado na Figura 4.

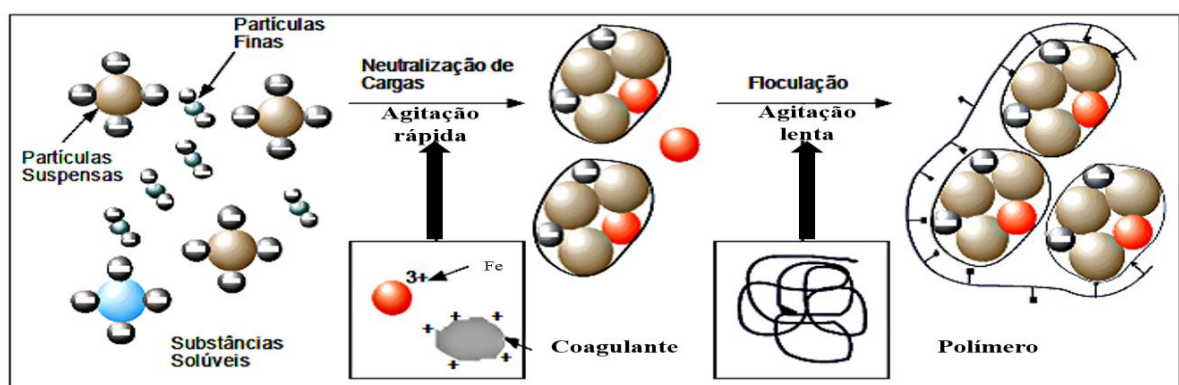


Figura 4. Processo de coagulação/floculação (Adaptado de LIMA, 2007).

Na unidade de mistura rápida ocorrem interações entre o coagulante e a água, formando espécies hidrolisadas, sendo geralmente necessária agitação intensa para que o processo de coagulação seja eficiente (Di Bernardo e Dantas, 2005). Na floculação ocorre a agregação das partículas em suspensão. Essa aglomeração se dá em função das forças de Van Der Waals. A formação dos flocos pode ocorrer de maneira espontânea, apenas pelos sucessivos choques entre as várias partículas presentes, desde que o sistema possua energia disponível para tal, decorrente da agitação dele. No entanto, uma agitação muito intensa pode fazer com que os flocos formados se desagreguem espontaneamente (Carvalho, 2008; Paula, 2004).

A eficiência do processo de coagulação/floculação e o custo da operação são influenciados pelo tipo de coagulante usado, dosagem do coagulante, pelo pH e força iônica do efluente, bem como pelo teor e natureza dos compostos orgânicos presentes. Portanto, é necessário estabelecer experimentalmente as melhores condições operacionais para cada tipo de efluente (Delgado et al., 2003; Duan e Gregory, 2003).

2.3. COAGULANTES

Um dos fatores que contribui para a eficiência do processo de coagulação/floculação é o tipo de coagulante usado e sua dosagem. Segundo Metcalf & Eddy (2003, coagulantes são substâncias que quando adicionadas em água tem a finalidade de reduzir as forças eletrostáticas de repulsão, que mantém separadas as partículas em suspensão, as coloidais e parcela das dissolvidas, criando condições para que haja aglutinação das mesmas, facilitando sua posterior remoção por sedimentação e/ou filtração. Os coagulantes podem ser divididos em dois grupos: coagulantes inorgânicos e coagulantes orgânicos.

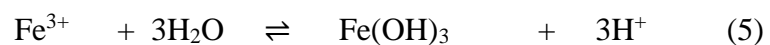
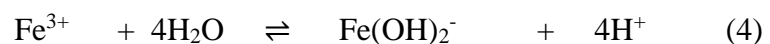
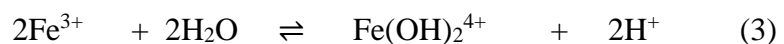
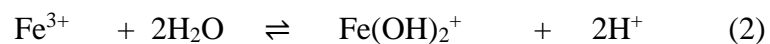
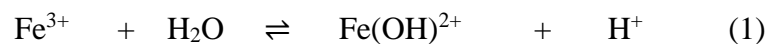
2.3.1. Coagulantes inorgânicos

Os coagulantes inorgânicos são representados pelos sais de ferro e alumínio, sendo AlCl_3 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, FeCl_3 e $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ os mais utilizados, pelo baixo custo e maior eficácia no processo de coagulação (Yang et al., 2010). No entanto, a utilização de sais de alumínio nos últimos anos tem sido questionada devido ao impacto ambiental gerado pela grande quantidade de lodo produzido e elevado nível de concentração de alumínio remanescente na água tratada, pois, vários estudos, associam a elevada ingestão de alumínio à doença de Alzheimer (Yang et al., 2010; Divakaran e Pillai, 2002; Stephenson e Duff, 1996), sendo os coagulantes à base de ferro comparativamente mais seguros para o ambiente.

2.3.1.1. Cloreto férrico

O cloreto férrico (FeCl_3) é um reagente grandemente empregado para o tratamento de águas e águas residuais como coagulante pelo fato de diminuir drasticamente a turbidez e a DQO e eliminar fosfatos e boa parte de metais pesados principalmente em condições de pH elevado (Pavanelli, 2001).

Em soluções aquosas a hidrólise íons de metais trivalentes como o Fe^{3+} , geralmente formam espécies monoméricas e poliméricas, dependendo da concentração e do pH (Stephenson e Duff, 1996). A seguir são apresentadas algumas reações de hidrólise, conforme Pavanelli (2001):



De forma geral, a reação de hidrólise do ferro pode ser escrita como:



Em condições otimizadas de pH (neutro a ligeiramente ácido) e de agente coagulante, as moléculas de hidróxidos de ferro possuem área superficial grande, estrutura amorfa, com carga positiva ou neutra. Por serem hidrofóbicos, eles são adsorvidos na superfície de partículas orgânicas aniônicas (colóides) e tornando-as instáveis pela neutralização das cargas, levando a precipitação da matéria orgânica, especialmente de moléculas polares contendo grupos funcionais, tais como grupos carboxílicos e hidroxílicos (Stephenson e Duff, 1996). A Figura 5 apresenta o diagrama das espécies hidrolisadas de ferro em função do pH.

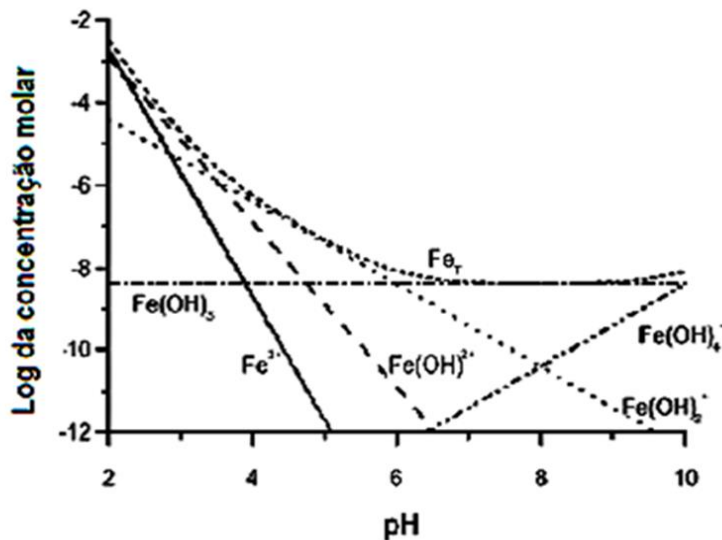


Figura 5. Concentrações dos monômeros dos produtos da hidrólise do Fe (III) em equilíbrio com hidróxidos amorfos em função do pH (Freitas, 2014).

De acordo com o diagrama apresentado na Figura 5, em valores de pH abaixo de 8,0 a hidrólise ocorre para formar hidróxidos de ferro como o Fe(OH)_2^+ e Fe(OH)^{2+} . Para valores de pH mais alcalinos (acima de 7,0) ocorre a formação de hidróxidos de ferro aniônicos, ou seja Fe(OH)_4^- e a sua predominância a valores de pH acima de 8,0 (Turchiuli e Fargues, 2004; Gebelich *et al.*, 2002).

2.3.2. Coagulantes orgânicos

Os coagulantes orgânicos são representados pelos polímeros, que de acordo com sua obtenção são denominados polímeros naturais (biopolímeros) ou polímeros sintéticos. São denominados universalmente como polieletrólitos, constituídos de grandes cadeias moleculares, dotadas de sítios com cargas positivas ou negativas, sendo classificados em catiônicos, aniônicos ou não iônicos, usados como coagulantes primários ou auxiliares de floculação (Fayad, 2010; Borba, 2001).

2.3.2.1. Polímeros sintéticos

Subentende-se os polímeros obtidos por processos químicos (polimerização) desenvolvidos em reator a partir de moléculas menores (monômeros). Um exemplo típico de polímero sintético é a poliacrilamida obtida a partir do seu monômero (acrilamida) por polimerização em solução ou em emulsão. Os polímeros sintéticos catiônicos podem funcionar como coagulantes por neutralização de cargas ou adsorção e formação de pontes, ou uma combinação dos dois mecanismos.

A utilização de polímeros sintéticos tem como vantagem a redução no volume de lodo gerado e a utilização de menor dosagem de floculante no processo de coagulação/floculação, porém apresentam custo elevado (pelo menos, dez vezes mais elevado comparado com coagulantes químicos), além de apresentarem risco à saúde dos consumidores, pois não são biodegradáveis (Bolto e Gregory, 2007; Brostow et al., 2009) podendo gerar subprodutos (monômeros) ou ser contaminados no processo de produção (Wu et al, 2012; Lima, 2007). Assim, os mesmos veem sendo substituídos por polieletrólitos naturais, que apresentam menor custo, e não representam risco de danos à saúde humana quando utilizados a longo prazo, visto que muitos destes produtos naturais fazem parte da alimentação humana ou animal.

2.3.2.2. Biopolímeros

Geralmente, os biopolímeros apresentam maior complexidade em sua estrutura química quando comparados com os polímeros sintéticos. Também possuem menor estabilidade à elevação de temperatura e são mais biodegradáveis que os sintéticos (Julião, 2011; Fayad, 2010). A rapidez da deterioração confere aos polímeros naturais caráter mais ecológico, tornando-os significativamente mais importantes quando o objetivo é a diminuição do impacto ambiental provocado pelos polímeros sintéticos. Embora o mecanismo da coagulação com coagulantes naturais não tenha sido amplamente investigado, estudos indicam que a presença de hidroxilas ao longo da cadeia de polissacarídeo proporciona um grande número de sítios de adsorção disponíveis que poderiam levar à interação do polissacarídeo com a molécula de corante (Verma et al., 2012) como mostrado na Figura 6.

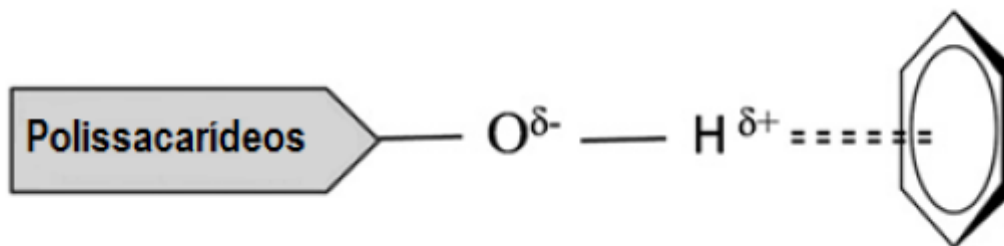


Figura 6. Representação esquemática da interação intermolecular entre a ligação π -elétron da molécula do corante e o grupo hidroxila do polissacarídeo (Freitas, 2014).

Dentre os diversos polímeros naturais utilizados como auxiliares de floculação, verifica-se o emprego de algumas espécies, tais como: o quiabo (*Abelmoschus esculentus*), usado na forma de solução feita a partir do pó seco da vagem pulverizada, ou na forma da mucilagem extraída da vagem (baba de quiabo) (Nogueira et al., 2010; Abreu, 2007); a mutamba ou “chico magro” (*Guazuma ulmifolia*), usada também na forma de solução da casca, do fruto e do caule e cacau (*Theobroma cacao*), usado na forma e solução do pó da casca (Abreu de Lima et al., 1996). De acordo com Ramos et al., (2010), o pó das sementes da

árvore *Moringa Oleifera*, apresenta-se como um potente clarificador de água por filtração direta. Já Souza et al., (2014) avaliou a eficiência de diferentes concentrações do cactus *Opuntia ficus-indica* como auxiliar de floculação na redução de poluentes de efluentes têxteis.

2.4. CHUCHU (*Sechium edule* SW.)

O chuchu recebe o nome científico de *Sechium edule* (Jacq.) SW., pertencente à família *Cucurbitáceae* (Saade, 1996). O chuchu é uma hortaliça fruto do chuchuzeiro, uma planta trepadeira originário da América Central e México. Existem diversas variedades, com colorações distintas (branco ou creme, verde claro e verde escuro), além de variações no tamanho, forma, textura e espinhos (Figura 7) (PBMH, 2008).



Figura 7. Variedades de chuchu (*Sechium edule* SW.) (Chuchu são muitos, 2010).

De acordo com a Embrapa Hortaliças, o chuchu está entre as dez hortaliças mais consumidas pelos brasileiros. O fruto, que tem a forma de uma pêra grande e a parte de fora rugosa e sulcada, pode ser consumido verde ou maduro (Hortaliças na Web, 2014).

Entre os maiores estados produtores nacionais destacam-se Rio de Janeiro, São Paulo, Pernambuco, Minas Gerais e Paraná. Estima-se que sejam cultivados 5.000 hectares com chuchuzeiros no Brasil (Diagnóstico da cultura do chuchu, 2010; CEAGESP, 2009).

Segundo estudos realizados por Solís et al., (2013) o extrato enzimático obtido da casca do chuchu descoloriu em 70% uma solução de corante índigo carmim (100 ppm) sob agitação a 800 rpm em 36 h. O chuchu contém em sua casca a enzima peroxidase. As peroxidases de planta são glicoproteínas⁸ que contêm um grupamento heme em sua estrutura e possuem a função básica de catalisar a oxidação do peróxido de hidrogênio a partir de numerosas espécies de substratos orgânicos e inorgânicos, incluindo corantes (Zámocky et al., 2001). Exemplos de peroxidases utilizadas para a descoloração de corantes são encontradas na couve-flor (Jamal et al., 2011), nabo (Silva et al., 2012; Matto e Husain, 2007), raiz forte (Forgiarini et al., 2007; Dellamatrice e Monteiro, 2006) e chuchu (Villegas-Rosas et al., 2003).

2.5. LEGISLAÇÃO AMBIENTAL BRASILEIRA

No Brasil o Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, é o órgão consultivo e deliberativo do Sistema Nacional do Meio Ambiente-SISNAMA, instituído pela Lei 6.938/81, que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, regulamentada pelo Decreto 99.274/90. Esse órgão tem por finalidade assessorar, estudar e propor ao conselho do governo, diretrizes de políticas governamentais para o meio ambiente e os recursos naturais e deliberar sobre normas e padrões.

O CONAMA por meio da Resolução n° 430/2011: “Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes.” Essa Resolução complementa e altera a Resolução n° 357/2005 (CONAMA, 2011).

De acordo com o art. 5° da Seção I - Das Condições e Padrões de Lançamento de Efluentes - Das Disposições Gerais da Resolução n° 430/2011: “Os efluentes não poderão

⁸ Glicoproteínas: são proteínas que tem um ou mais açúcares ligados covalentemente a estrutura peptídica da mesma, sem repetição de unidades em série, sendo os açúcares grupos prostéticos dessa, ou seja, são moléculas compostas por uma proteína ligada a um ou mais carboidratos, simples ou compostos.

conferir ao corpo receptor características de qualidade em desacordo com as metas obrigatórias progressivas, intermediárias e final, do seu enquadramento:”

Art. 5º, § 1º As metas obrigatórias para corpos receptores serão estabelecidas por parâmetros específicos.

Art. 5º, § 2º Para os parâmetros não incluídos nas metas obrigatórias e na ausência de metas intermediárias progressivas, os padrões de qualidade a serem obedecidos no corpo receptor são os que constam na classe na qual o corpo receptor estiver enquadrado.

Segundo O art. 16 da Seção II - Das Condições e Padrões de Lançamento de Efluentes da Resolução nº 430/2011: “Os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados diretamente no corpo receptor desde que obedeçam as condições e padrões previstos neste artigo, resguardadas outras exigências cabíveis:”

Art. 16 sec. II. I - condições de lançamento de efluentes:

- a) pH entre 5 a 9;
- b) temperatura: inferior a 40°C, sendo que a variação de temperatura do corpo receptor não deverá exceder a 3°C no limite da zona de mistura;
- c) materiais sedimentáveis: até 1 mL L⁻¹ em teste de 1 hora em cone *Inmhoff*. Para o lançamento em lagos e lagoas, cuja velocidade de circulação seja praticamente nula, os materiais sedimentáveis deverão estar virtualmente ausentes;
- d) regime de lançamento com vazão máxima de até 1,5 vezes a vazão média do período de atividade diária do agente poluidor, exceto nos casos permitidos pela autoridade competente;
- e) óleos e graxas:
 - 1 óleos minerais: até 20 mg L⁻¹;
 - 2 óleos vegetais e gorduras animais: até 50 mg L⁻¹;
- f) ausência de materiais flutuantes;
- g) demanda bioquímica de oxigênio (DBO_{5,20}): remoção mínima de 60% de DBO sendo que este limite só poderá ser reduzido no caso de existência de estudo de autodepuração do corpo hídrico que comprove atendimento às metas do enquadramento do corpo receptor.

Das condições de lançamentos de efluentes no art. 16 da Seção II não estão estabelecidos padrões limites para os parâmetros de cor e turbidez, sendo assim de acordo com o art. 5º, § 2º da Seção I esses parâmetros devem ser avaliados de acordo com os padrões de qualidade a serem obedecidos no corpo receptor, ou seja, de acordo com a classe do corpo receptor. A maioria dos rios do noroeste do Paraná são classificados como de água doce de

classe 2 e para essa classificação a Resolução n° 357/2005 estabelece um limite de cor verdadeira: até 75 mg Pt L⁻¹ e turbidez: até 100 UNT.

De acordo com o art. 7° da Resolução n°430/2011:

Art. 7° O órgão ambiental competente deverá, por meio de norma específica ou no licenciamento da atividade ou empreendimento, estabelecer a carga poluidora máxima para o lançamento de substâncias passíveis de estarem presentes ou serem formadas nos processos produtivos, listadas ou não no art. 16 da Resolução, de modo a não comprometer as metas progressivas obrigatórias, intermediárias e final, estabelecidas para enquadramento do corpo receptor.

Portanto, o CONSELHO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (CEMA), dispõe do Anexo 7 da Resolução n° 70/2009, que retrata as condições e padrões de lançamento de efluentes líquidos industriais. No qual o item I traz os parâmetros DBO_{5,20}, DQO e outros inerentes à atividade ou empreendimento que deverão ser atendidos. Para a atividade de tinturaria, têxteis e lavanderia industrial (Item I.6.) os limites máximos para o lançamento de efluentes líquidos em corpos receptores são:

a) DBO_{5,20} = 50 mg L⁻¹; b) DQO = 200 mg L⁻¹.

2.6. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O planejamento experimental, também denominado delineamento experimental, representa um conjunto de ensaios estabelecido com critérios científicos e estatísticos, com o objetivo de determinar a influência de diversas variáveis nos resultados de um dado sistema ou processo. A utilização das técnicas estatísticas de planejamento experimental fornecem alguns benefícios: redução do número de ensaios sem prejuízo da qualidade da informação; estudo simultâneo de diversas variáveis, separando seus efeitos; determinação da confiabilidade dos resultados; realização da pesquisa em etapas, num processo iterativo de acréscimo de novos ensaios; seleção das variáveis que influem num processo com número reduzido de ensaios; representação do processo estudado através de expressões matemáticas e

elaboração de conclusões a partir de resultados qualitativos (Bezerra et al., 2008; Button, 2005).

A metodologia de superfície de resposta (MSR) é uma técnica de otimização que consiste em um grupo de técnicas matemáticas e estatísticas utilizada para análise e modelagem de problemas, onde uma resposta particular é função de diversas variáveis e o principal objetivo é otimizar esta resposta. A técnica constitui de duas etapas: modelagem e deslocamento. A modelagem normalmente é feita ajustando-se modelos simples (lineares ou quadráticos) as respostas obtidas com planejamentos fatoriais ou fatoriais ampliados e o deslocamento se dá sempre ao longo do caminho de máxima inclinação de um determinado modelo, que é a trajetória na qual a resposta varia de forma mais pronunciada (Barros Neto et al., 2007)

2.6.1. Planejamento Box-Behnken

Os modelos Box-Behnken são uma classe de modelos rotacionais de segunda ordem baseados nos modelos fatoriais incompletos de três níveis. Neste planejamento, no caso de três variáveis, fixa-se uma das variáveis em zero e um fatorial 2^2 é executado com as outras duas variáveis, considerando os pontos dos experimentos no centro das arestas do cubo, como pode ser visto na Figura 8.

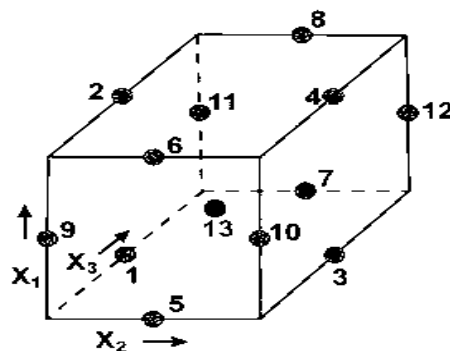


Figura 8. Planejamento Box-Behnken para três variáveis.

Recomenda-se a utilização do planejamento Box-Behnken quando é necessário avaliar três níveis (alto, médio e baixo) dos fatores. Uma outra característica peculiar é que esse planejamento evita situações experimentais extremas, por exemplo, os três fatores no nível máximo ou no nível mínimo (R- para químicos, 2014; Barros Neto et al., 2007), isso faz desse planejamento ideal para ser utilizado em situações em que não é possível utilizar condições experimentais extremas (Amenaghawon et al., 2013; Mishra et al., 2008; Ferreira et al., 2007; Souza et al., 2005).

O número de experimento (N) requerido para o desenvolvimento do modelo Box-Behnken é definido como $N = K^2 + K + C_p$, em que, K é o número de fatores e C_p é o número de repetições no ponto central (Souza et al., 2014; Kousha et al., 2012).

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar a eficiência do extrato do resíduo vegetal (casca) do chuchu (*Sechium edule* SW.) como coagulante natural, no tratamento de efluentes têxteis empregando-se a técnica de coagulação/floculação.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ❖ Utilizar o extrato do resíduo vegetal (casca) do chuchu (*Sechium edule* SW.) como coagulante natural;
- ❖ Realizar a caracterização do resíduo vegetal (casca) do chuchu em pó através da espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) e ressonância magnética nuclear de sólidos (RMN¹³C/CPMAS);
- ❖ Melhorar a qualidade do efluente proveniente de lavanderia de jeans através do processo de coagulação/floculação, utilizando sais de ferro como coagulante e o extrato do resíduo vegetal (casca) do chuchu (*Sechium edule* SW.) como auxiliar de floculação;
- ❖ Monitorar a qualidade das amostras do efluente testado através de análises físico-químicas como turbidez e DQO;
- ❖ Através do planejamento experimental otimizar a dosagem do FeCl₃, dosagem do extrato do resíduo vegetal (casca) do chuchu e pH;

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1. EFLUENTE TÊXTIL

As amostras de efluente foram obtidas de uma lavanderia de jeans em Maringá, sendo coletadas da lagoa de equalização (Figura 9a) após passar por peneira estática (Figura 9b) para retirada de fibras e argilas (provenientes do processo de lavagem), antes do tratamento biológico, ao fim do processo industrial de lavagem do jeans. O efluente foi caracterizado logo após a coleta visando um número maior de informações relevantes sobre a sua composição *in natura*.



Figura 9. Estação de tratamento da ETE da lavanderia industrial: (a) lagoa de equalização e (b) peneira estática.

4.2. CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE

A caracterização físico-química do efluente têxtil foi realizada segundo os parâmetros: pH, turbidez e DQO segundo as metodologias escritas em APHA (1999). Todas as análises foram realizadas em triplicatas tomando-se o valor médio com seus respectivos desvios padrão.

4.2.1. pH

O pH das amostras foi determinado em um pHmetro digital (Hanna Instruments).

4.2.2. Turbidez

A turbidez foi determinada pelo método nefelométrico descrito na seção 2130 B (APHA, 1999), a partir de uma pré-agitação da amostra, para a dispersão e homogeneização dos materiais em suspensão. Foi utilizado turbidímetro (MAXLABOR TB 1000) com os resultados expressos em Unidade Nefelométrica de Turbidez (UNT).

4.2.3. DQO

A DQO foi determinada pelo método colorimétrico empregando refluxo fechado descrito na seção 5220 D (APHA, 1999).

Preparo das soluções:

Solução padrão: dissolveu-se em água destilada 0,4250g de biftalato ácido de potássio ($\text{HOCOC}_6\text{H}_4\text{COOK}$), completando-se o volume a 1000 mL com água destilada em balão volumétrico.

Solução digestora: dissolveram-se 10,216 g de dicromato de potássio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), previamente seco à 105°C por 2 h em 500 mL de água destilada, seguido da adição de 167,0 mL de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4), e 33,3 g de sulfato de mercúrio (HgSO_4), sendo então completado o volume para 1000 mL com água destilada em balão volumétrico.

Solução de ácido sulfúrico com sulfato de prata: dissolveram-se 9,50 g de sulfato de prata (AgSO_4), em 1000 mL de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4), deixando em repouso por 1 ou 2 dias para completa dissolução.

Metodologia

Realizaram-se diluições da solução padrão para obtenção de concentrações de 100,0 a 900,0 mg L⁻¹, com variação de 100,0 mg L⁻¹. Em triplicata, transferiram-se 2,50 mL das soluções preparadas a partir do padrão a tubos de ensaio e adicionaram-se, em banho de gelo, 1,50 mL da solução digestora e 3,50 mL do reagente ácido sulfúrico com sulfato de prata. Os

tubos foram vedados e levados à digestão em bloco digestor (Marconi-MA 4004) a 150°C por 2 h. Para o branco adicionou-se, em triplicata, 2,50 mL de água destilada em tubos de ensaio, utilizando a mesma técnica que a empregada no preparo da curva analítica. Após o arrefecimento, mediu-se a absorvância em 600 nm em espectrofotômetro UV-Vis (Perkin Elmer modelo Lambda 25).

Para a aplicação na amostra transferiram-se 2,50 mL da mesma em triplicata, a tubos de ensaio e procedeu-se utilizando a mesma técnica descrita para a preparação da curva analítica.

A curva de calibração obtida no processo foi (Figura 10): $Y = 2,09946 \times 10^{-4} X - 0,00275$ com $R^2 = 0,9992$.

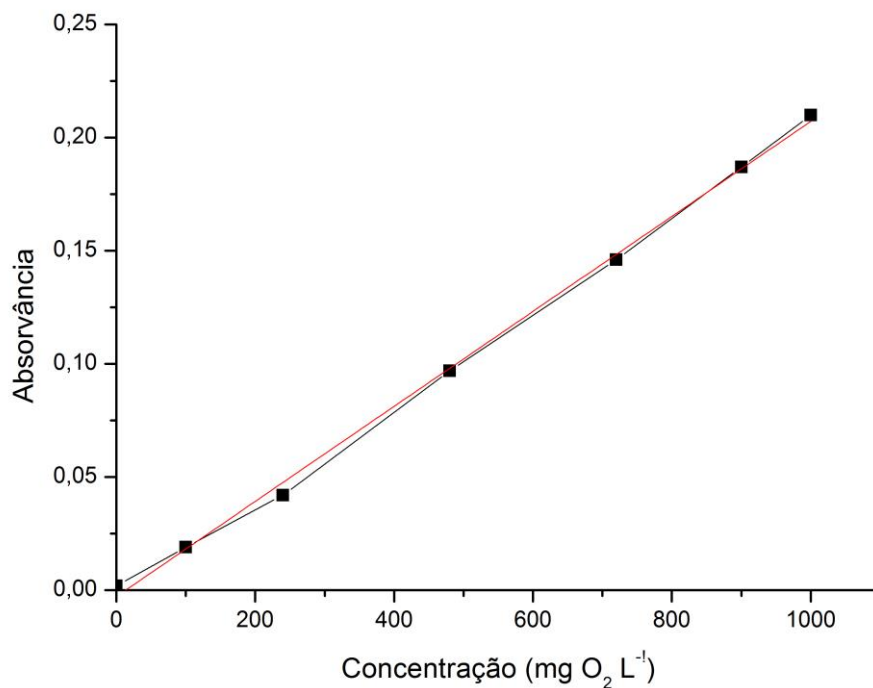


Figura 10. Curva de calibração para determinação de DQO via método colorimétrico empregando refluxo fechado.

4.3. PREPARO DO EXTRATO AQUOSO A PARTIR DO RESÍDUO VEGETAL (CASCA) DO CHUCHU (*Sechium edule* SW.)

As amostras de chuchu (*Sechium edule* SW.) (Figura 11) foram obtidas de um supermercado atacadista de Maringá, essas foram lavadas e descascadas.



Figura 11. Chuchu negro (*Sechium edule* SW.) (Autor, 2014).

Para obtenção do extrato foram colocadas em um processador de alimentos, 2,0 g de casca *in natura* para 100,0 mL de água sendo trituradas por 2 min e em seguida filtradas obtendo-se o extrato líquido (filtrado) (Figura 12).

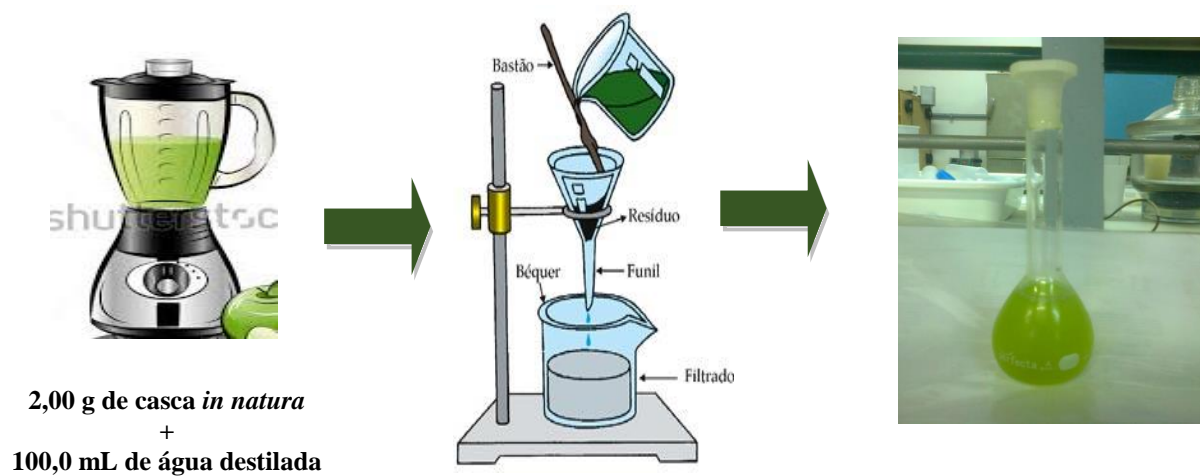


Figura 12. Esquema da obtenção do extrato do resíduo vegetal (casca) do chuchu (*Sechium edule* SW.).

4.4. CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO VEGETAL (CASCA) DO CHUCHU (*Sechium edule* SW.)

As cascas do chuchu foram liofilizadas por 72 h e em seguida moídas.

4.4.1. Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

O espectro de FTIR foi obtido utilizando um espectrômetro de infravermelho com transformada de Fourier Bruker modelo Vertex 70V, com intervalo variando entre 4000 e 400 cm^{-1} , com 64 scans de acumulação e resolução de 4 cm^{-1} . As amostras foram pulverizadas antes da prensagem em pastilhas de brometo de potássio (KBr).

4.4.2. Ressonância magnética nuclear do ^{13}C no estado sólido (RMN ^{13}C /CPMAS)

O espectro de RMN ^{13}C /CPMAS foi obtido utilizando um espectrômetro de RMN Varian modelo Mercury plus 300, com sonda de sólidos CP/MAS 7 mm. A frequência de ressonância do núcleo ^1H foi 300,06 MHz e de ^{13}C foi 75,458 MHz. Os principais parâmetros de análise foram: tempo de espera para reciclagem de 1s, o tempo de contato de 1 ms e 3072 repetições. As amostras secas e moídas foram empacotadas em rotor de nitreto de silício com tampa kel-F de 7 mm. A velocidade de giro do rotor foi de 4,5 KHz e foi utilizado como referência externa o espectro do hexametilbenzeno (HMB), com sinal metílico em 17,3 ppm.

4.5. PROCESSO DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO – Teste de jarros

Os testes de coagulação/floculação foram realizados segundo Eckenfelder (1996) no aparelho Jar test (modelo Millan - JT 203/6 micro controlado) utilizando béqueres contendo 250,0 mL de amostra, sendo essas submetidas a 30 s de agitação rápida (120 rpm) seguidas de 15 min de agitação lenta (20 rpm). Transcorridos 15 min de agitação lenta de todos os testes de jarros realizados, desligou-se o aparelho, aguardando a sedimentação dos flocos por 30 min e coletando o sobrenadante para a realização das leituras de turbidez e análises de demanda

química de oxigênio (DQO). Através destas medidas, otimizou-se o pH, a dosagem do coagulante e do extrato.

4.5.1. Efeito do pH do efluente

O pH do efluente foi ajustado para valores na faixa de 3,00 a 8,00 com intervalos de 1,0 unidade de pH através da adição de HCl (1,0 mol L⁻¹) e/ou NaOH (1,0 mol L⁻¹) e medido em um pHmetro (HANNA instruments).

Ensaio com o FeCl₃: 0,40 mL da solução de FeCl₃ 10% (m/v) = 160,0 mg L⁻¹ para cada jarro;

Ensaio com o extrato do resíduo vegetal do chuchu: 0,10 mL da solução do extrato 2% (m/v) = 8,00 mg L⁻¹ para cada jarro.

4.5.2. Efeito da dosagem de FeCl₃ e da dosagem do extrato do resíduo vegetal (casca) do chuchu

O pH do efluente foi ajustado para o valor ótimo obtido em 4.5.1 para cada coagulante.

Ensaio com o FeCl₃: 40,00; 80,00; 160,0; 240,0; 320,0 e 400,0 mg L⁻¹ de solução FeCl₃ adicionados em cada jarro;

Ensaio com o extrato do resíduo vegetal do chuchu: 8,00; 12,0; 16,0; 20,0; 24,0 e 28,0 mg L⁻¹ de solução do extrato do resíduo vegetal (casca) do chuchu adicionados em cada jarro.

4.6. TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS RESULTADOS

Os resultados das análises físico-químicas, realizadas em triplicata, foram analisados pelo programa Action 2.6, utilizando o teste de Tukey. O programa indica se as médias dos resultados comparados são significativamente iguais ou diferentes (com $p < 0,05$). Os

resultados que se mostraram estatisticamente iguais entre si foram indicados com letras iguais na mesma coluna e os resultados estatisticamente diferentes foram indicados com letras diferentes.

4.7. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

4.7.1. Teste de jarros

O pH do efluente foi ajustado para 3,00; 6,00; 9,00 através de um pHmetro (HANNA instruments). Levaram-se estas amostras contendo 250,0 mL do efluente ao aparelho Jar Test e, sob rápida agitação, adicionou-se o agente coagulante e o auxiliar de floculação (extrato da casca do chuchu). As amostras foram submetidas a 30 s de agitação rápida (120rpm), seguidas de 15 min de agitação lenta (20rpm).

Para os ensaios de otimização foram preparadas soluções de FeCl_3 10% (m/v), e extrato do resíduo vegetal (casca) do chuchu 2% (m/v).

4.7.2. Planejamento experimental

O primeiro passo para a realização de um planejamento fatorial é avaliação das variáveis do sistema. Neste caso, as variáveis estudadas foram dosagem de cloreto férrico (mg L^{-1}), dosagem do extrato do resíduo vegetal (casca) do chuchu (mg L^{-1}) e pH, tendo como variáveis respostas remoção de turbidez e DQO (%).

A fim de se avaliar a influência das variáveis nas respostas, foi utilizado um planejamento fatorial Box-Behnken. Este planejamento avalia cada fator a partir de três níveis, descritos como sendo inferiores (-1), centrais (0) e superiores (+1). Os dados obtidos foram ajustados a um modelo quadrático de acordo com a equação 1:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i \leq j}^k \sum_j^k \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad \text{Eq. (1)}$$

Em que, y é a resposta dos valores previstos pelo modelo, no caso remoção de turbidez e DQO (%), β_0 é o intercepto, β_i é o coeficiente linear, β_{ii} é o coeficiente quadrático, β_{ij} é o

coeficiente da interação e ε corresponde ao resíduo deixado pelo modelo (Morioka et al., 2014).

A significância estatística do modelo e dos termos da regressão foi avaliada pela análise da variância ANOVA. Todos os dados experimentais foram compilados pelo software Design Expert 7.1.3, desde a elaboração matriz planejamento, elaboração do modelo matemático, análise de variância e os parâmetros de otimização.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE DE LAVANDERIA JEANS *in natura*

Na Tabela 1 apresentam-se os resultados das análises físico-químicas realizadas no efluente *in natura* e os parâmetros da legislação ambiental brasileira para descarte dos mesmos.

Tabela 1. Parâmetros físico-químicos experimentais do efluente *in natura* e limites padrões para a emissão do efluente em corpos d'água determinados na legislação ambiental brasileira.

Parâmetros físico-químicos	Unidades	Efluente <i>in natura</i>	Limites**
pH*	-----	6,75 ± 0,03	5,00 – 9,00
Turbidez*	UNT	130 ± 3,04	≤ 100
DQO*	mg O ₂ L ⁻¹	629,2 ± 8,07	≤ 200,0

* Resultados expressos como média ± desvio padrão relativo;

* DQO: Demanda química de oxigênio, UNT: Unidade nefelométrica de turbidez;

**Limites padrões de lançamento de efluente estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 430/2011 e pela Resolução CEMA nº 70/2009.

Conforme observado na Tabela 1 o efluente apresentou um pH próximo da neutralidade, turbidez moderada e elevada quantidade de matéria orgânica (MO) expressa por altos valores de DQO. O excesso de matéria orgânica em um corpo hídrico causa o decréscimo do oxigênio dissolvido o que prejudica a biota aquática e também causa diminuição da taxa de radiação solar absorvida interferindo no processo de fotossíntese (CETESB, 2006).

Considerando as condições e padrões de lançamento de efluentes exigidos pela Resolução CONAMA nº 430/2011 e pela Resolução CEMA nº 70/2009, o efluente *in natura* não atende aos critérios para ser descartado, sendo necessário o tratamento desse antes de sua emissão no corpo hídrico para que os parâmetros analisados estejam dentro dos limites exigidos por essas resoluções.

5.2. PROCESSO DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO

5.2.1. Efeito do pH utilizando FeCl₃ como coagulante

A Tabela 2 apresenta as medidas experimentais de remoção percentual de turbidez e DQO, nos valores de pH estudados para a otimização da coagulação, utilizando cloreto férrico (FeCl₃), como coagulante.

Tabela 2. Efeito do pH utilizando FeCl₃ como coagulante na remoção de turbidez e DQO.

pH	Remoção (%)	
	Turbidez	DQO
3,00	30,10 ± 4,00 ^a	32,08 ± 1,42 ^a
4,00	57,00 ± 2,83 ^b	54,13 ± 1,42 ^b
5,00	86,23 ± 1,02 ^c	49,62 ± 9,21 ^b
6,00	97,53 ± 0,175 ^d	71,78 ± 2,88 ^c
7,00	78,37 ± 1,58 ^e	71,23 ± 2,02 ^c
8,00	75,05 ± 1,43 ^e	27,07 ± 0,001 ^a

* Resultados expressos como média ± desvio padrão relativo, onde as letras diferentes na mesma coluna indicam diferenças ($p < 0,05$) pelo Teste de Tukey;

* DQO: Demanda química de oxigênio;

* Resultados dos testes realizados para a otimização do pH no tratamento do efluente por coagulação utilizando 160,0 mg L⁻¹ de FeCl₃ como coagulante.

Na Tabela 2, as letras na mesma coluna indicam os resultados da análise estatística realizada pelo teste de Tukey, onde se observa que os valores percentuais de remoção de turbidez apresentaram-se estatisticamente diferentes para a maioria dos pH estudados, com exceção do pH 7,00 e 8,00. Para os valores percentuais de remoção de DQO observa-se que existe uma concordância estatística entre os pH estudados, sendo pH 3,00 e 8,00; pH 4,00 e 5,00 e pH 6,00 e 7,00 estatisticamente iguais dentro do erro.

De acordo com a Tabela 2 temos que na faixa de pH estudados de 3,00 a 8,00, o valor de pH 6,00 apresenta a maior remoção de turbidez (97,53%) e DQO (71,78%), portanto a máxima eficiência de coagulação foi alcançada neste valor de pH.

Pelos padrões de descarte de efluente, segundo a resolução CONAMA n°430/2011 o valor de pH deve estar entre 5,00 e 9,00, pois a maioria dos peixes não sobrevive em ambientes com pH inferior a 5,00 e poucos são os que suportam um pH superior a 9,00 (Piscicultura, 2014).

Considerando todos os fatores expostos anteriormente o valor de pH 6,00 foi escolhido como ótimo para se trabalhar com o FeCl₃ como coagulante no tratamento do efluente através do processo de coagulação/floculação.

5.2.2. Efeito da dosagem de FeCl₃

A Tabela 3 mostra a remoção percentual de turbidez e DQO para diferentes doses de coagulante inorgânico em pH 6,00.

Tabela 3. Efeito da dosagem de FeCl₃ na remoção de turbidez e DQO.

Dosagem de FeCl ₃ (mg L ⁻¹)	Remoção (%)	
	Turbidez	DQO
40,00	56,54 ± 1,06 ^a	67,91 ± 2,04 ^a
80,00	77,65 ± 4,05 ^b	63,01 ± 7,47 ^a
160,0	97,53 ± 0,175 ^c	71,78 ± 2,88 ^a
240,0	96,98 ± 0,280 ^c	70,14 ± 8,30 ^a
320,0	96,58 ± 0,0547 ^c	64,65 ± 6,69 ^a
400,0	83,60 ± 1,84 ^d	58,07 ± 1,99 ^a

* Resultados expressos como média ± desvio padrão relativo, onde as letras diferentes na mesma coluna indicam diferenças ($p < 0,05$) pelo Teste de Tukey;

* DQO: Demanda química de oxigênio;

* Resultados dos testes realizados para a otimização da dosagem de FeCl₃ na coagulação em pH 6,00.

Na Tabela 3, as letras na mesma coluna indicam os resultados da análise estatística realizada pelo teste de Tukey, onde se observa que os valores percentuais de remoção de turbidez apresentaram-se estatisticamente diferente para algumas das dosagens estudadas, com exceção das dosagens 160,0; 240,0 e 320,0 mg L⁻¹. Para os valores percentuais de remoção de DQO todos os valores estão dentro do erro e são estatisticamente iguais. Por isso pode-se dizer que a concentração do coagulante interfere mais na remoção da turbidez do que na remoção da DQO.

Portanto, se levarmos em consideração somente a porcentagem de remoção de DQO seria possível trabalhar com qualquer uma das dosagens que não haveria diferença estatística entre os resultados. Porém o intuito do experimento é utilizar uma quantidade mínima de coagulante inorgânico que proporcione uma remoção tanto de turbidez como de DQO consideráveis, dessa forma a dosagem de 160,0 mg L⁻¹ foi a escolhida como valor ótimo para se trabalhar com o FeCl₃ em pH 6,00, apresentando porcentagem de remoção de turbidez e DQO de 97,53% e 71,78%, respectivamente. Acima da dosagem ideal, uma inversão de carga pode ocorrer e as partículas se tornarão novamente dispersas, mas com uma carga positiva ao invés de negativa. Dosagens inferiores a ideal podem não ter cargas suficientes para ocorrer uma remoção de eficácia similar (Eckenfelder, 1966).

5.2.3. Efeito do pH utilizando o extrato do resíduo vegetal (casca) do chuchu como coagulante

O efeito do pH do efluente na remoção de turbidez e DQO mantendo-se fixa a dosagem do extrato do resíduo vegetal (casca) do chuchu em 8,00 mg L⁻¹ está apresentado na Tabela 4.

Tabela 4. Efeito do pH utilizando o extrato do resíduo vegetal (casca) do chuchu como coagulante na remoção de turbidez e DQO.

pH	Remoção (%)	
	Turbidez	DQO
3,00	49,65 ± 0,493 ^a	46,83 ± 1,28 ^a
4,00	13,80 ± 2,24 ^b	18,92 ± 3,03 ^b
5,00	6,195 ± 0,767 ^c	8,482 ± 1,96 ^b
6,00	6,975 ± 0,612 ^c	9,461 ± 1,52 ^b
7,00	4,651 ± 0,0310 ^{cd}	10,76 ± 2,46 ^b
8,00	3,280 ± 0,598 ^d	12,07 ± 3,40 ^b

* Resultados expressos como média ± desvio padrão relativo, onde as letras diferentes na mesma coluna indicam diferenças ($p < 0,05$) pelo Teste de Tukey;

* DQO: Demanda química de oxigênio;

* Resultados dos testes realizados para a otimização do pH no tratamento do efluente por coagulação utilizando 8,00 mg L⁻¹ de extrato do resíduo vegetal (casca) do chuchu como coagulante.

Na Tabela 4 as letras na mesma coluna indicam os resultados da análise estatística realizada pelo teste de Tukey, onde se observa que os valores percentuais de remoção de turbidez apresentaram-se estatisticamente iguais para alguns pares de pH estudados, exceto para o pH 3,00. Para os valores percentuais de remoção de DQO observa-se que todos os valores estão dentro do erro e são estatisticamente iguais, exceto para o pH 3,00.

O valor de pH 3,00 além de apresentar resultados estatisticamente diferente dos demais pH, também apresentou o maior valor de remoção de turbidez (49,65%) e DQO (46,83%), portanto, a máxima eficiência de coagulação foi alcançada nesse valor de pH.

Segundo (Kulkarnu, 2011; You et al., 2010; Aguilar et al., 2007) alguns polímeros são capazes de sofrer mudanças bruscas em suas propriedades em função da variação do pH do meio onde estão localizados. Geralmente são polímeros ionizáveis com valores de pKa variando entre 3 e 10 (You et al., 2010). Ácidos e bases fracas como ácidos carboxílicos,

ácidos fosfóricos e aminas também exibem mudanças no estado de ionização em função da variação do pH, geralmente, grupos carboxílicos e amina apresentam-se negativos para valores de pH maiores que 4,00 (Di Bernardo, 2005). Os grupos carboxílicos característicos de polissacarídeos em meio ácido apresentam-se protonados e em meio neutro ou básico sofrem desprotonação parcial, proporcionando o grupo ($-\text{COO}^-$) que atua como um sítio de adsorção química para cátions, sendo esse tipo de polissacarídeo considerado um polieletrólito aniônico.

No caso do extrato do resíduo vegetal do chuchu em valores de pH acima de 3,00 esse está a princípio atuando como um polieletrólito aniônico, sabe-se que os biopolímeros aniônicos são incapazes de remover contaminantes aniônicos das águas residuais sem a assistência de um coagulante catiônico (Lee et al., 2014), isso pode explicar a baixa eficiência de remoção nesses valores. Em valor de pH 3,00 ocorre uma remoção considerada desses contaminantes, podendo a princípio considerar que neste valor de pH o extrato está atuando como um coagulante primário, não sendo necessária a adição de coagulantes inorgânicos ao meio, como acontecem em valores de pH acima de 3,00.

Assim, o valor de pH 3,00 foi escolhido como valor ótimo para se trabalhar com o extrato da casca do chuchu como coagulante.

5.2.4. Efeito da dosagem do extrato do resíduo vegetal (casca) do chuchu

O efeito da dosagem do coagulante natural obtido a partir do extrato do resíduo vegetal (casca) do chuchu na remoção de turbidez e DQO, mantendo-se fixo o pH do efluente em 3,00 está apresentado na Tabela 5.

Tabela 5. Efeito da dosagem do extrato do resíduo vegetal (casca) do chuchu na remoção de turbidez e DQO.

Dosagem do extrato da casca do chuchu (mg L ⁻¹)	Remoção (%)	
	Turbidez	DQO
8,00	49,65 ± 0,493 ^a	46,83 ± 1,28 ^a
12,0	68,83 ± 1,16 ^b	48,44 ± 1,62 ^{ab}
16,0	64,56 ± 1,60 ^c	49,60 ± 1,95 ^{ab}
20,0	71,70 ± 0,144 ^d	50,53 ± 2,61 ^{ab}
24,0	70,56 ± 0,162 ^{de}	54,44 ± 2,97 ^b
28,0	68,67 ± 0,561 ^e	53,28 ± 2,63 ^b

* Resultados expressos como média ± desvio padrão relativo, onde as letras diferentes na mesma coluna indicam diferenças ($p < 0,05$) pelo Teste de Tukey;

* DQO: Demanda química de oxigênio;

* Resultados dos testes realizados para a otimização da dosagem do extrato do resíduo vegetal (casca) do chuchu na coagulação em pH 3,0.

Na Tabela 5, as letras na mesma coluna indicam os resultados da análise estatística realizada pelo teste de Tukey, onde se observa que os valores percentuais de remoção de turbidez apresentaram-se estatisticamente diferente para a maioria das dosagens estudadas, com exceção das dosagens de 20,0 e 24,0; 24,0 e 28,0 mg L⁻¹. Para os valores percentuais de remoção de DQO observa-se que alguns pares estão dentro do erro e são estatisticamente iguais.

Observa-se que os maiores valores de remoção de turbidez e DQO encontram-se nas dosagens de 20,0, 24,0 e 28,0 mg L⁻¹. Entretanto optou-se pelo valor de 20,0 mg L⁻¹ como melhor dosagem do extrato, pois adiciona-se menos matéria orgânica proveniente do extrato ao sistema, uma vez que a dosagem de 24,00 mg L⁻¹ apresentou valores iguais estatisticamente falando.

5.2.5. Efeito do pH utilizando a combinação FeCl₃ + extrato do resíduo vegetal (casca) do chuchu

Com os resultados obtidos e apresentados nas seções 5.2.1 e 5.2.3, temos que para o FeCl₃ o valor ótimo de pH é 6,00 e para o extrato o valor ótimo de pH é 3,00. No momento em que se quer trabalhar com os dois coagulantes, fica inviável alterar o pH cada vez que se adiciona um dos coagulantes. Então foi realizado um ensaio de variação de pH, mantendo-se as dosagens dos coagulantes fixadas no seu valor ótimo, porém como o valor ótimo da dosagem de FeCl₃ reduz 97,53% de turbidez e 71,73 % de DQO esse foi reduzido para a dosagem de 40,0 mg L⁻¹, para ser comprovado que o extrato mesmo na presença de FeCl₃, influência de algum modo o processo de coagulação e floculação. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6. Efeito do pH utilizando a combinação FeCl₃ + extrato do resíduo vegetal (casca) do chuchu na remoção de turbidez e DQO.

pH	Remoção (%)	
	Turbidez	DQO
3,00	91,64 ± 0,345 ^a	81,63 ± 8,80 ^a
4,00	88,84 ± 1,02 ^a	72,71 ± 8,02 ^a
5,00	83,35 ± 2,60 ^b	78,56 ± 9,46 ^a
6,00	93,26 ± 1,17 ^a	83,74 ± 8,91 ^a
7,00	91,05 ± 1,20 ^a	83,30 ± 8,81 ^a
8,00	89,66 ± 3,20 ^a	83,74 ± 8,83 ^a

* Resultados expressos como média ± desvio padrão relativo, onde as letras diferentes na mesma coluna indicam diferenças ($p < 0,05$) pelo Teste de Tukey;

* DQO: Demanda química de oxigênio;

* Resultados dos testes realizados para a otimização do pH no tratamento do efluente por coagulação utilizando 20,0 mg L⁻¹ do extrato do resíduo vegetal (casca) do chuchu e 40,0 mg L⁻¹ de FeCl₃.

Na Tabela 6 as letras na mesma coluna indicam os resultados da análise estatística realizada pelo teste de Tukey, onde se pode observar que os valores de porcentagem de remoção de turbidez apresentaram-se estatisticamente iguais, exceto para o pH 5,0. Para a porcentagem de remoção DQO todos os valores estão dentro do erro e são estatisticamente iguais.

De acordo com a Tabela 6 temos que na faixa de pH estudados de 3,0 a 8,0, o valor de pH 6,0 apresentou a maior remoção de turbidez (93,26%) e DQO (83,74%), portanto a máxima eficiência de coagulação foi alcançada nesse valor de pH. É observado que nesse valor de pH a remoção de turbidez e DQO foi relativamente maior quando comparada com o resultado mostrado na Tabela 3 quando se utiliza somente o FeCl_3 como coagulante, foi observado um aumento de 35,72% para a remoção de turbidez e 15,83% para a remoção de DQO. Com isso pode-se dizer que a adição do extrato do resíduo vegetal do chuchu ao processo contribuiu para uma melhora no processo de coagulação/floculação quando associado ao FeCl_3 , considerando que a dosagem de FeCl_3 utilizada foi 4 vezes menor que nas condições otimizadas utilizando FeCl_3 puro.

Com isso pode-se inferir que o extrato do resíduo vegetal do chuchu atua como um polieletrólito aniônico e que associado ao FeCl_3 (coagulante primário) aumenta consideravelmente a eficiência do processo de coagulação/floculação.

5.3. CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO VEGETAL (CASCA) DO CHUCHU

Os principais grupos funcionais característicos presentes na casca do chuchu foram identificados utilizando as técnicas de FTIR e RMN ^{13}C /CPMAS. A Figura 13 mostra o espectro de FTIR do resíduo vegetal (casca) do chuchu e a Figura 14 apresenta o espectro de RMN de sólidos do resíduo vegetal (casca) do chuchu, esses espectros permitem atribuir características compatíveis com polissacarídeos.

No espectro de infravermelho (Figura 13) foram identificadas as seguintes bandas de absorção: 1) $\bar{\nu}$ O-H = 3400 cm^{-1} , 2) $\bar{\nu}$ C-H (sp^3) $\approx 2900\text{ cm}^{-1}$, 3) $\bar{\nu}$ C=O $\approx 1700\text{ cm}^{-1}$ e 4) $\bar{\nu}$ C-O $\approx 1000\text{ cm}^{-1}$. As bandas observadas indicam a possível existência de grupo O-H de ácido carboxílico, de grupo C-H de alcanos, de grupo C=O de ácido carboxílico e ligação simples C-O (Silverstein et al., 2005).

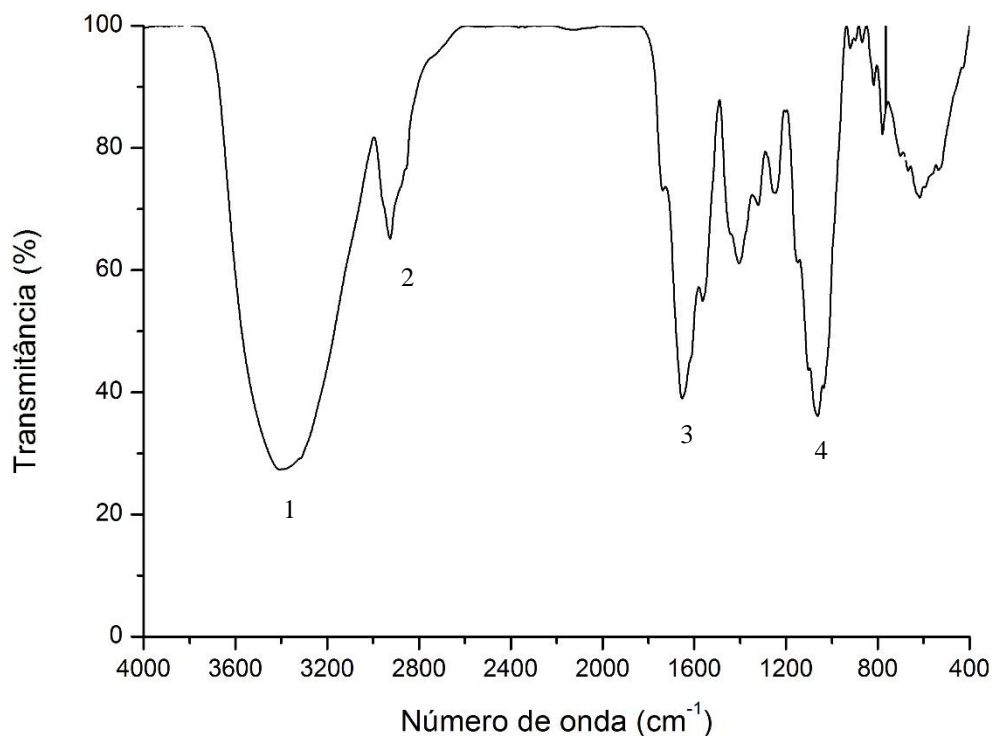


Figura 13. Espectro de FTIR do resíduo vegetal (casca) do chuchu (*Sechium edule* SW.).

A partir do RMN ^{13}C /CPMAS (Figura 14) foi observado a presença de 6 picos, como no RMN ^{13}C cada pico corresponde a um único carbono quando a molécula não é simétrica, a princípio considera-se que a amostra possui 6 carbonos em sua estrutura.

Foram detectados sinais na faixa de 30-54 ppm correspondentes a carbonos alifáticos, sinais largos na região de 73 ppm correspondentes a C-OH, na região de 105 ppm correspondentes a C-O-C e na região de 173 ppm de carbonila (possivelmente proveniente do ácido carboxílico), todos esses sinais indicam a presença de polissacarídeos. Esses resultados

nos mostram que a identificação dos compostos formadores do extrato é muito importante, tendo em vista sua aplicação como polímero natural, que devido as suas características estruturais, promove uma maior adsorção das partículas coloidais (Silverstein et al., 2005).

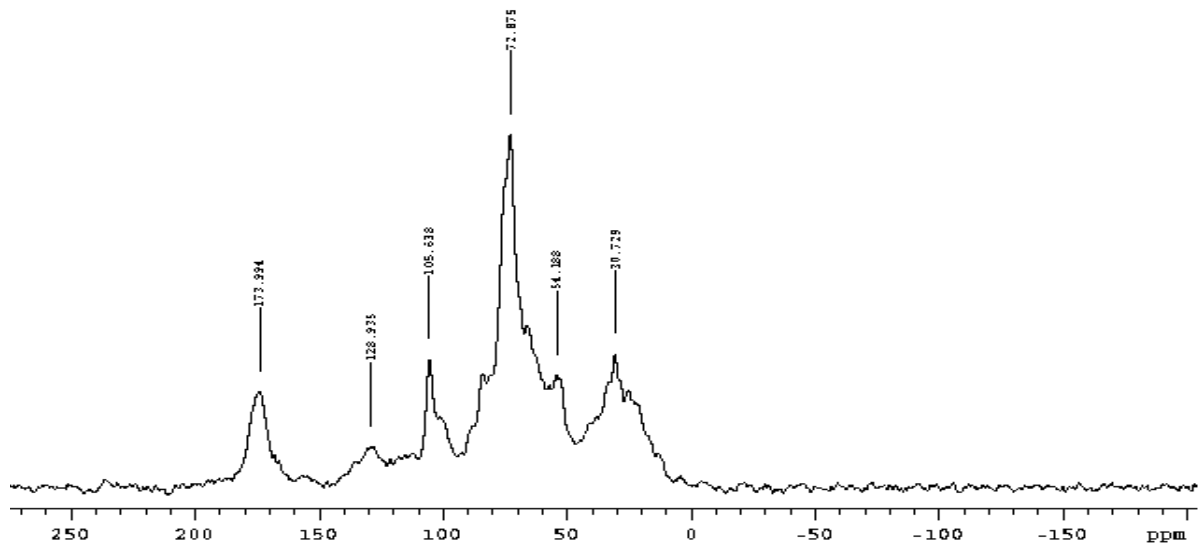


Figura 14. Espectro de RMN ^{13}C /CPMAS do resíduo vegetal (casca) do chuchu (*Sechium edule* SW.).

Nas seções 5.2.3 e 5.2.5 foram feitas considerações a respeito do extrato do resíduo vegetal do chuchu considerando que esse estava atuando como um polieletrólito aniônico. A partir dos resultados obtidos com a caracterização desse resíduo pode-se afirmar que o extrato realmente é um polieletrólito aniônico, mesmo não se sabendo a estrutura molecular desse polieletrólito, pela presença dos grupamentos como C=O e -OH de ácido carboxílico essa afirmação é aceita, com isso se explica o funcionamento do extrato no meio em que está atuando, tanto associado ao FeCl_3 como individualmente.

5.4. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Na Tabela 7 temos os valores codificados e os níveis dos valores reais. A faixa de variação utilizada foi determinada através de estudos preliminares.

Tabela 7. Fatores e seus valores codificados e reais aplicados para a otimização do tratamento do efluente de lavanderia de jeans.

Fator		Valores codificados		
		-1	0	1
		Valores reais		
[FeCl ₃] (mg L ⁻¹)	X ₁	20,0	40,0	60,0
[Extrato] (mg L ⁻¹)	X ₂	8,00	20,0	32,0
pH	X ₃	3,00	6,00	9,00

O número total de experimentos foi calculado pela equação 2:

$$N = K^2 + K + C_p \quad \text{Eq. (2)}$$

Em que, N é o número de experimentos, K é o número de variáveis independentes e C_p é o número de replicatas no ponto central (K=3 e C_p=3) totalizando desta maneira, 15 experimentos. As respostas dos planejamentos foram porcentagem de remoção de turbidez e porcentagem de remoção de DQO. Os ensaios foram realizados de forma aleatória para minimizar o efeito de variáveis incontroláveis, ou seja, para impedir que desvios atípicos sejam associados a combinações de níveis que não existam. Sem fazer a aleatorização, os erros podem parecer menores do que são na realidade (Barros Neto et. al., 2007).

A matriz do planejamento fatorial obtida através do software Design Expert 7.1.3 e as respostas experimentais dos coeficientes angulares obtidos encontram-se na Tabela 8.

Tabela 8. Matriz do planejamento para o efluente de lavanderia de jeans e suas respectivas respostas investigadas.

Ensaio	Dosagem de FeCl ₃ (mg L ⁻¹)	Dosagem do extrato (mg L ⁻¹)	pH	Remoção turbidez (%)	Remoção DQO (%)
1	20.0 (-1)	8.00 (-1)	6.00 (0)	94.09	75.72
2	60.0 (1)	8.00 (-1)	6.00 (0)	97.61	78.48
3	20.0 (-1)	32.0 (1)	6.00 (0)	93.48	72.95
4	60.0 (1)	32.0 (1)	6.00 (0)	97.17	70.88
5	20.0 (-1)	20.0 (0)	3.00 (-1)	94.67	63.27
6	60.0 (1)	20.0 (0)	3.00 (-1)	95.29	69.49
7	20.0 (-1)	20.0 (0)	9.00 (1)	90.49	68.80
8	60.0 (1)	20.0 (0)	9.00 (1)	94.32	73.99
9	40.0 (0)	8.00 (-1)	3.00 (-1)	93.36	69.84
10	40.0 (0)	32.0 (1)	3.00 (-1)	96.13	66.38
11	40.0 (0)	8.00 (-1)	9.00 (1)	97.18	74.95
12	40.0 (0)	32.0 (1)	9.00 (1)	92.03	62.92
13	40.0 (0)	20.0 (0)	6.00 (0)	97.14	80.21
14	40.0 (0)	20.0 (0)	6.00 (0)	98.18	87.13
15	40.0 (0)	20.0 (0)	6.00 (0)	97.18	81.59

De acordo com os resultados da Tabela 8, temos que os valores para porcentagem de remoção de turbidez variaram de 90,50 a 98,20% e para porcentagem de remoção de DQO de 62,92 a 87,13%.

5.4.1. Avaliação dos modelos e análise de variância (ANOVA)

Os modelos matemáticos empíricos, codificados e de 2^a ordem com os seus respectivos coeficientes estatísticos estão apresentados nas Equações 3 e 4. Esses modelos

foram obtidos a partir da regressão não linear (modelo quadrático) dos dados experimentais, utilizando o software Design Expert 7.1.3

$$Y_1 = +97.50 + 1.46X_1 - 0.43X_2 - 0.68X_3 + 0.043X_1X_2 + 0.80X_1X_3 - 1.98X_2X_3 - 1.45X_1^2 - 0.46X_2^2 - 2.36X_3^2$$

Eq. (3)

$$Y_2 = +82.98 + 1.51X_1 - 3.23X_2 + 1.46X_3 - 1.21X_1X_2 - 0.26X_1X_3 - 2.14X_2X_3 - 4.05X_1^2 - 4.42X_2^2 - 10.04X_3^2$$

Eq. (4)

Os valores dos coeficientes de determinação total (R^2), observados para as respostas Y_1 (remoção de turbidez %) e Y_2 (remoção de DQO %) foram de 0,9327 e 0,9184, respectivamente, sugerindo um bom ajuste do modelo aos dados experimentais.

A análise de variância do modelo quadrático indicou que o termo linear e quadrático da dosagem de FeCl_3 , o termo quadrático do pH do efluente, bem como a interação entre a dosagem do extrato do resíduo vegetal (casca) do chuchu e o pH do efluente foram os fatores que mais influenciaram ($p < 0,05$) a remoção de turbidez. A falta de ajuste foi não significativa ($F_{\text{calc}} < F_{\text{tab}}$ e $p > 0,05$ em nível de 95% de confiança), ou seja, o modelo se ajusta aos dados experimentais e a equação preditiva pode ser utilizada para qualquer combinação dos valores das variáveis estudadas (Tabela 9). Enquanto que a resposta remoção de DQO (%) os termos linear e quadrático da dosagem do extrato do resíduo vegetal (casca) do chuchu e o termo quadrático do pH do efluente foram os fatores que mais influenciaram ($p < 0,05$). A falta de ajuste, para a equação da resposta da remoção de DQO, foi não significativa (Tabela 10), indicando que a equação preditiva pode ser utilizada para qualquer combinação dos valores das variáveis estudadas. Os termos lineares e quadráticos da dosagem do FeCl_3 não foram significativos ($p > 0,05$), indicando que a dosagem de FeCl_3 estabelecida para o limite central do delineamento ($40,0 \text{ mg L}^{-1}$) mostrou-se suficiente para o processo, na resposta de remoção de DQO.

Tabela 9. Análise de Variância (ANOVA) da equação da remoção de turbidez

	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F _{cal}	F _{tab}	p-valor
Modelo	66,97	9	7,44	7,70	4,77	0,0184*
X_1	16,6	1	16,96	17,56	6,61	0,0086*
X_2	1,47	1	1,47	1,53	6,61	0,2715
X_3	3,69	1	3,69	3,82	6,61	0,1080
X_1X_2	0,007444	1	0,007444	0,007707	6,61	0,9334
X_1X_3	2,57	1	2,57	2,66	6,61	0,1637
X_2X_3	15,65	1	15,65	16,20	6,61	0,0101*
X_1^2	7,72	1	7,72	7,99	6,61	0,0368*
X_2^2	0,80	1	0,80	0,83	6,61	0,4052
X_3^2	20,54	1	20,54	21,27	6,61	0,0058*
Resíduos	4,83	5	0,97	-	-	-
Falta de ajuste	4,14	3	1,38	4,01	19,16	0,2062
Erro puro	0,69	2	0,34	-	-	-
Total	71,80	14	-	-	-	-

* = significativo $p < 0,05$

X_1 = dosagem de FeCl_3 (mg L^{-1}), X_2 = dosagem de extrato do resíduo vegetal (casca) do chuchu (mg L^{-1}) e X_3 = pH do efluente.

Tabela 10. Análise de Variância (ANOVA) da equação da remoção de DQO

	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F _{cal}	F _{tab}	p-valor
Modelo	598,79	9	66,53	6,26	4,77	0,0287*
X_1	18,31	1	18,31	1,72	6,61	0,2465
X_2	83,59	1	83,59	7,86	6,61	0,0378*
X_3	17,06	1	17,06	1,60	6,61	0,2610
X_1X_2	5,86	1	5,86	0,55	6,61	0,4913
X_1X_3	0,27	1	0,27	0,025	6,61	0,8799
X_2X_3	18,37	1	18,37	1,73	6,61	0,2458
X_1^2	60,67	1	60,67	5,71	6,61	0,0625
X_2^2	72,05	1	72,05	6,78	6,61	0,0481*
X_3^2	371,90	1	371,90	34,98	6,61	0,0020*
Resíduos	53,16	5	10,63	-	-	-
Falta de ajuste	26,39	3	8,80	0,66	19,16	0,6504
Erro puro	26,78	2	13,39	-	-	-
Total	651,96	14	-	-	-	-

* = significativo $p < 0,05$

X_1 = dosagem de FeCl_3 (mg L^{-1}), X_2 = dosagem de extrato do resíduo vegetal (casca) do chuchu (mg L^{-1}) e X_3 = pH do efluente.

5.4.2. Análises das superfícies de resposta

Os diagramas de superfície de resposta são apresentados a seguir na Figura 15.

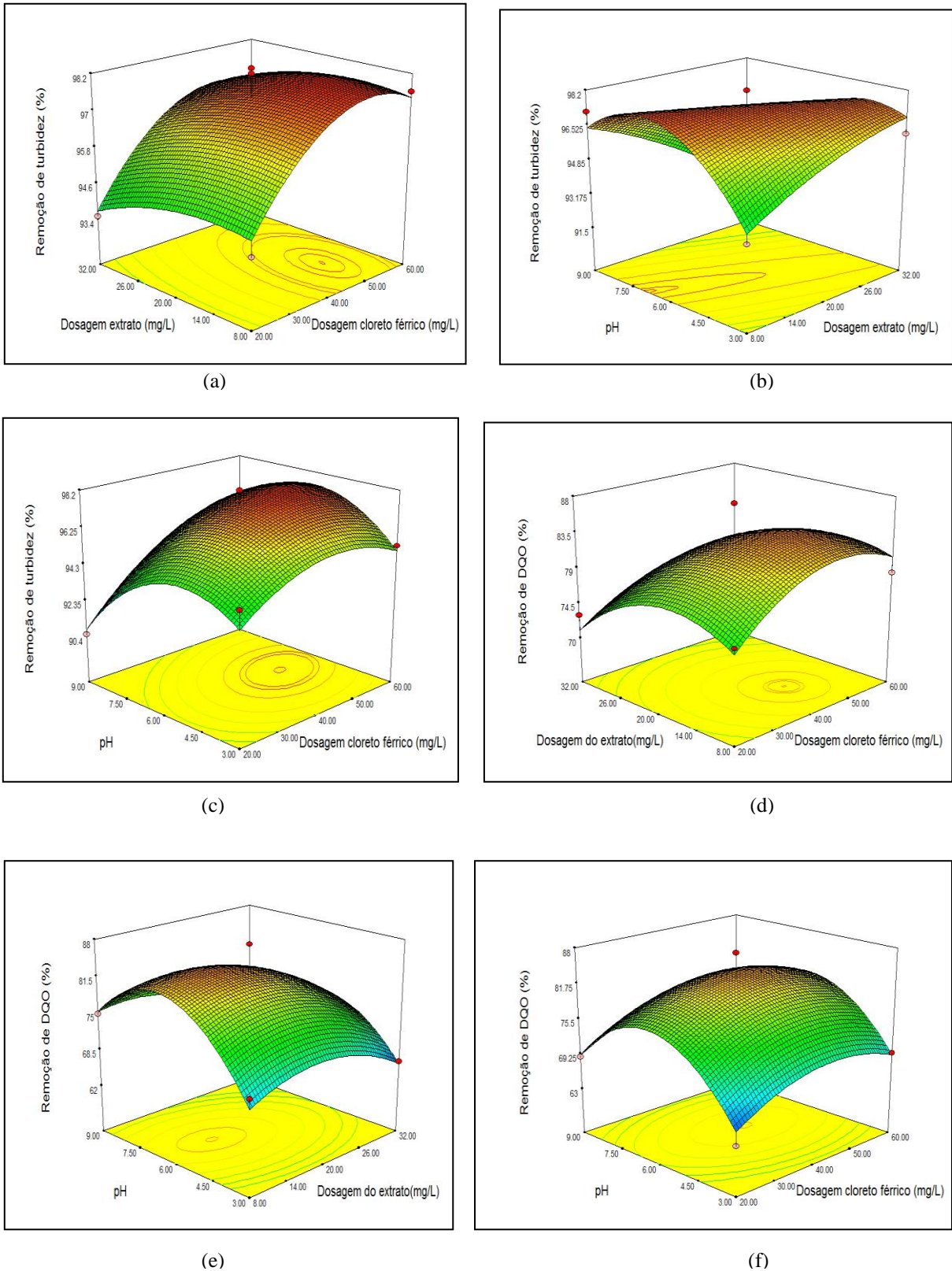


Figura 15. Diagrama da superfície de resposta que mostra o efeito da dosagem do extrato e a dosagem de FeCl_3 (a), o efeito do pH e a dosagem do extrato (b), o efeito do pH e a dosagem de FeCl_3 (c) para a remoção de turbidez e o efeito da dosagem do extrato e a dosagem do FeCl_3 (d), o efeito do pH e a dosagem do extrato (e), o efeito do pH e a dosagem de FeCl_3 (f) para remoção de DQO.

De acordo com a Figura 15 (a), quando a dosagem de extrato encontra-se em 14,00 mg L⁻¹ e a dosagem de FeCl₃ entre 50,00 e 55,00 mg L⁻¹, ocorre a máxima remoção de turbidez. Para o efeito entre a dosagem do extrato e o pH, Figura 15 (b), as melhores respostas ocorreram entre pH 6,00 e 7,50 e na mínima dosagem de extrato.

Para o efeito entre a dosagem de FeCl₃ e o pH, Figura 15 (c), as melhores respostas para a remoção de turbidez ocorreram em pH 6,00 e dosagem de FeCl₃ entre 40,00 e 50,00 mg L⁻¹.

Em relação às respostas para a remoção de DQO, observamos que para o efeito da dosagem do extrato e dosagem de FeCl₃ (Figura 15 d) quando se trabalha nas dosagens entre 14,00 e 20,00 mg L⁻¹ e 40,00 e 50,00 mg L⁻¹ para o extrato e FeCl₃, respectivamente, ocorrem os melhores resultados.

Para o efeito do pH e dosagem do extrato, Figura 15 (e), as melhores respostas ocorreram entre pH 6,00 e 7,50 e na dosagem de 14,00 mg L⁻¹. Foi observado também que quando se trabalha com concentrações de extrato acima de 20,00 mg L⁻¹ a resposta de remoção de DQO (soma de matéria orgânica suspensa e dissolvida) tende a diminuir, isso pode ser a princípio explicado pela presença de matéria orgânica proveniente do extrato (fração dissolvida) adicionada ao sistema, porém vale lembrar que esse incremento é proveniente de uma espécie vegetal biodegradável.

Na Figura 15 (f), observamos que a máxima remoção encontra-se em pH 6,00 e dosagem de FeCl₃ de 40,00 mg L⁻¹, é observado também que em dosagens acima e abaixo de 40,00 mg L⁻¹ os valores de remoção tendem a diminuir.

5.4.3. Otimização – Determinação do ponto ótimo

O ponto crítico (ótimo) para cada modelo de superfície de resposta foi encontrado resolvendo as derivadas parciais das Equações 3 e 4:

$$\frac{\delta Y_1}{\delta X_1} = 0, \frac{\delta Y_1}{\delta X_2} = 0, \frac{\delta Y_1}{\delta X_3} = 0, \frac{\delta Y_2}{\delta X_1} = 0, \frac{\delta Y_2}{\delta X_2} = 0, \frac{\delta Y_2}{\delta X_3} = 0$$

Os valores obtidos para o ponto crítico foram os seguintes: dosagem de $\text{FeCl}_3 = 49,86 \text{ mg L}^{-1}$, dosagem do extrato = $15,12 \text{ mg L}^{-1}$ e $\text{pH} = 5,95$ para a remoção de turbidez e dosagem de $\text{FeCl}_3 = 44,93 \text{ mg L}^{-1}$ dosagem do extrato = $14,88 \text{ mg L}^{-1}$ e $\text{pH} = 6,33$ para remoção de DQO.

As condições de trabalho foram estabelecidas como uma média entre os valores ótimos que foram encontrados para cada remoção. Estes valores foram: dosagem $\text{FeCl}_3 = 47,40 \text{ mg L}^{-1}$, dosagem de extrato = $15,0 \text{ mg L}^{-1}$ e $\text{pH} = 6,14$ tendo como resposta 97,95% remoção de turbidez e 83,84% de DQO.

5.5. CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE DE LAVANDERIA DE JEANS APÓS O TRATAMENTO

Os resultados das análises físico-químicas realizadas no efluente *in natura* e após o processo de coagulação/floculação em condições otimizadas estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11. Parâmetros físico-químicos do efluente de após os processos de coagulação/floculação utilizando coagulante inorgânico (pH 6,00; 160,0 mg L⁻¹) coagulante natural (pH 3,00; 8,00 mg L⁻¹) e tratamento combinado de coagulante inorgânico e natural nas condições otimizadas (pH 6,14; 47,40 e 15,00 mg L⁻¹) determinadas experimentalmente e os limites ambientais determinados na legislação brasileira.

Parâmetros físico-químicos	Efluente <i>in natura</i>	Efluente (FeCl ₃)	Efluente (extrato)	Efluente tratado (extrato + FeCl ₃)	Limites**
pH *	6,75 ± 0,03	6,00 ± 0,02	3,00 ± 0,02	6,14 ± 0,26	5,00 – 9,00
Turbidez (UNT) *	130 ± 3,04	3,21 ± 0,08	36,8 ± 0,86	2,67 ± 0,20	≤ 100
DQO (mg O ₂ L ⁻¹)*	629,2 ± 8,07	183,7 ± 8,03	311,3 ± 2,52	101,1 ± 1,32	≤ 200,0

* Resultados expressos como média ± desvio padrão relativo;

* DQO: demanda química de oxigênio, UNT: Unidade nefelométrica de turbidez;

** Limites padrões de lançamento de efluente de LJ estabelecidos pela Resolução CONAMA n° 430/2011 e pela Resolução CEMA n° 70/2009

Na Tabela 11 se observa que o efluente tratado com FeCl₃ e o efluente tratado com extrato e FeCl₃, podem ser descartados em meio aquático pois os valores apresentados para os parâmetros em estudo estão de acordo com os limites exigidos pela legislação ambiental brasileira. Em relação ao efluente tratado só com o extrato, esse não pode ser descartado pois, os valores de pH e DQO não se enquadram nos valores limites.

6. CONCLUSÃO

O extrato aquoso do resíduo vegetal (casca) do chuchu mostrou ser um potencial coagulante natural. A caracterização por FTIR e RMN ^{13}C /CPMAS desse resíduo apresentou bandas de absorção e sinais típicos de polissacarídeos, indicando que o mecanismo em “ponte” entre o efluente e o extrato acontece devido à presença de grupos hidroxilas e carbonilas. Além do que a presença desses grupamentos e o comportamento apresentado pelo extrato durante o estudo foi típico de polieletrólitos aniônicos, que são utilizados como auxiliares de floculação quando associados a coagulantes primários.

A associação do extrato ao FeCl_3 (coagulante primário) mostrou-se eficiente, visto que ocorreu uma redução de quase 75% da dosagem de FeCl_3 utilizada no processo de coagulação/floculação, sendo possível utilizar uma dosagem mínima de coagulante inorgânico obtendo bons resultados.

Através do planejamento experimental foi possível prever as melhores condições para se trabalhar com a associação dos coagulantes, obtendo como valores ótimos: dosagem $\text{FeCl}_3 = 47,40 \text{ mg L}^{-1}$, dosagem de extrato = $15,00 \text{ mg L}^{-1}$ e $\text{pH} = 6,14$.

De acordo com os parâmetros estudados o efluente tratado com a associação dos coagulantes, mostrou-se adequado para ser descartado em ambiente aquático, pois esses apresentaram-se de acordo com os limites impostos pela legislação.

Conclui-se então que o biopolímero obtido a partir do extrato do resíduo vegetal do chuchu mostrou-se como um potencial coagulante. Os polímeros naturais não apresentam riscos à saúde humana, são baratos, de fontes renováveis, não são tóxicos, são altamente biodegradáveis e estão totalmente disponíveis para o tratamento de efluente de maneira ecológica e eficiente.

REFERÊNCIAS

ABER, S.; SALARI, D.; PARSA, M. R. Employing the Taguchi method to obtain the optimum conditions of coagulation-flocculation process in tannery wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal* v. 162, n. 1, p. 127-134, 2010.

ABREU L. G. J. Uso de Polímero Natural do Quiabo como Auxiliar de Flocculação e Filtração em Tratamento de Água e Esgoto. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

ABREU DE LIMA, G. J. M.; SANTOS, M. F.; SOUZA, J.F. de. Uso do Chico-magro e do cacau como auxiliares de flocculação. In: Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 25, México, D.F, 1996. AIDIS. Consolidación para el desarrollo. México, D.F, AIDIS, 1996. p. 1-8.

ABIT- Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção. Brasília, Junho 2013.

AGUILAR, M. R.; ELVIRA, C.; GALLARDO, A.; VÁZQUEZ, B.; ROMÁN, J. S. Smart polymers and their applications as biomaterials. *Topics in Tissue Engineering* v. 3, c. 6 p. 1-27, 2007.

AMENAGHAWON, N. A.; NWARU, K. I.; AISIEN, F. A.; OGBEIDE, S. E.; OKIEIMEN, C. O. Application of Box-Behnken Design for the Optimization of Citric Acid Production from Corn Starch Using *Aspergillus niger*. *British Biotechnology Journal* v. 3, n. 3, p. 236-245, 2013.

APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION STANDARD. Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th ed. American Water Works Association, Water Environment Federation, Washington, D.C., 1999.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I.S.; BRUNS, R.E. Como fazer experimentos. 3^a ed. Editora da UNICAMP, Campinas, 2007.

BEZERRA, A.M.; SANTELLI, R.E.; OLIVEIRA, E.P.; VILLAR, L.S.; ESCALEIRA, L.A. Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. *Talanta* v. 76, n. 5, p. 965-977, 2008.

BHATIA, S.; OTHMAN, Z.; AHMAD, A. L. Pretreatment of palm oil mill effluent (POME) using *Moringa oleifera* seeds as natural coagulant. *Journal of Hazardous Materials* v.145, n. 1, p. 120-126, 2007.

BOLTO, B.; GREGORY, J. Organic polyelectrolytes in water treatment. *Water Research* v. 41, n. 11, p. 2301–2324, 2007.

BONGIOVANI, M. C.; KONRADT-MORAES, L. C.; BERGAMASCO, R.; LOURENÇO, B. S. S.; TAVARES, C. R. G. Os benefícios da utilização de coagulantes naturais para a obtenção de água potável. *Acta Scientiarum Technology* v. 32, n. 2, p. 167-170, 2010.

BORBA, L. R. Viabilidade do Uso da *Moringa oleifera Lam* no Tratamento Simplificado de Água para Pequenas Comunidades. Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Federal da Paraíba – UFPB, Paraíba, 2001.

BORRI, A. B.; FREIRE, R.; BOINA, W. L. O. Remoção de turbidez da água usando *Aloe vera* como coagulante natural. *X Fórum Ambiental da Alta Paulista* v. 10, n. 12, p. 01-11, 2014.

BROSTOW, W.; PAL, S.; SINGH, R. P. A model of flocculation. *Materials Letters* v. 61, n. 22, p. 4381–4384, 2007.

BUTTON, S. T. (2005). Metodologia para planejamento experimental e análise de resultado. São Paulo, Universidade Estadual de Campinas. Apostila. Disponível em: <http://www.fem.unicamp.br/~sergio1/pos-graduacao/IM317/apostila.pdf> . Acesso em: 10 jun. 2014.

CARVALHO, M. J. H. Uso de coagulantes naturais no processo de obtenção de água potável. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil, 2008.

CEAGESP 2009 - Centro de Qualidade em Horticultura. Disponível em: <http://www.ceagesp.gov.br/> Acesso em: 10 jan. 2015

CEMA (CONSELHO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE,) – Resolução nº 70/2009. Disponível em:

http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Legislacao_ambiental/Legislacao_estadual/RESOLUCOES/resolucao_cema_70_2009.pdf . Acesso em: 14 jun. 2014.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. Alterações físico-químicas. Disponível em: http://www.cetesb.sp.gov.br/mortandade/causas_materia.php . Acesso em: 02 fev. 2015.

CHUCHU SÃO MUITOS. Disponível em: <http://come-se.blogspot.com.br/2010/08/chuchus-sao-muitos.html> . Acesso em: 19 jun. 2104.

CONAMA (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE) – Resolução nº 357/2005. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf> . Acesso em: 14 jun. 2014.

CONAMA (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE) – Resolução nº 430/2011. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res11/res43011.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2014.

CORANTES E PIGMENTOS (2011). Disponível em: http://crq4.org.br/default.php?p=texto.php&c=quimicaviva_corantespigmentos . Acesso em: 10 jan. 2015.

DELGADO, S.; DIAZ, F.; GARCIA, D.; OTERO, N. Behavior of inorganic coagulants in secondary effluents from a conventional wastewater treatment plant. *Filtration & Separation* v. 40, n. 7, p. 42-46, 2003.

DELLAMATRICE, P. M.; MONTEIRO, R. T. R. Decolorization and toxicity of municipal waste by horseradish (*Cochlearia armoracia*). *Química Nova* v. 29, n. 3, p. 419-421, 2006.

DIAGNÓSTICO DA CULTURA DO CHUCHU (2010). Disponível em: http://www.biologico.sp.gov.br/artigos_ok.php?id_artigo=126 . Acesso em: 18 jul. 2104.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. Métodos e Técnicas de Tratamento de Água. 2ª ed. v. 1. São Carlos: RiMa. 2005.

DIVAKARAN, R.; PILLAI, V. N. Flocculation of river silt using chitosan. *Water Research* v. 36, n. 9, p. 2414-2418, 2002.

DUAN, J.; GREGORY, J.; Coagulation by hydrolyzing metal salts. *Advances in Colloid and Interface Science* v. 100-102, n. 2 p. 475–502, 2003.

DÜSMAN E.; BERTIL, A. P.; SOARES, L. C.; VICENTINI, V. E. P. Principais agentes mutagênicos e carcinogênicos de exposição humana. *SaBios: Revista Saúde e Biologia* v.7, n.2, p.66-81, 2012.

ECKENFELDER, W. W.; *Industrial Water Pollution Control*, Mc Graw-Hill, New York, 1966.

FAYAD, S. J. Obtenção e caracterização de micro e nanopartículas a base de proteína isolada de soja. 2010. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2010.

FERREIRA, S. L. C.; BRUNS, R. E.; FERREIRA, H. S.; MATOS, G. D.; DAVID, J. M.; BRANDÃO, G. C.; DA SILVA, E. G. P.; PORTUGUAL, L. A.; DOS REIS, P. S.; SOUZA, A. S.; DOS SANTOS, W. N. L. Box-Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods. *Analytica Chimica Acta* v. 597, n. 2, p. 179–186, 2007.

FREITAS, T. K. F. S. Eficiência do quiabo (*A. esculentus*) como coagulante natural no tratamento de efluentes têxteis. 2014. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil, 2014.

FORGIARINI, E.; ULSON DE SOUZA, S. M. A. G.; ULSON DE SOUZA, A. A. Toxicity of textile dyes and their degradation by the enzyme horseradish peroxidase (HRP). *Journal of Hazardous Materials* v. 147, n. 3, p. 1073–1078, 2007.

GARCIA, J. C. Degradação fotocatalítica artificial e solar de efluentes têxteis por processos oxidativos avançados utilizando TiO₂. 2006. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2006.

GARCIA, J. C.; OLIVEIRA, J. L.; SILVA, A. E. C.; OLIVEIRA, C. C.; NOZAKI, J.; SOUZA, N. E. Comparative study of the degradation of real textile effluents by photocatalytic

reactions involving UV/TiO₂/H₂O₂ and UV/Fe²⁺/H₂O₂ systems. *Journal of Hazardous Materials* v. 147, n. 1-2, p. 105-110, 2007.

GEBELICH, C. J.; YUN, T. I.; COFFEY, B. M.; SUFFET, I. H. Effects of aluminum sulfate and ferric chloride coagulant residuals on polyamide membrane performance. *Desalination* v.150, n. 1, p.15-30, 2002.

HEREDIA, J.B., SÁNCHEZ-MARTÍN, J., GÓMEZ-MUÑOZ, M.C. New coagulant agents from tannin extracts: preliminary optimisation studies. *Chemical Engineering Journal* v. 162, n. 3, p. 1019-1025, 2010.

HORTALIÇAS NA WEB. Disponível em: <http://www.cnph.embrapa.br/hortalicasnaweb/chuchu.html> . Acesso em: 13 jun. 2014.

HYDRO (2011) – Revista. Disponível em: <http://www.arandanet.com.br/midiaonline/hydro/2011/janeiro/index.html>. Acesso em: 09 fev. 2015.

IEMI - Instituto de Estudos e Marketing Industrial. Disponível em: <http://www.valor.com.br/empresas/3356572/jeans-cresce-mais-que-total-de-vestuario>. Acesso em: 12 jun. 2014.

JAMAL F., QIDWAI T., PANDEI P. K., and Singh D. Catalytic potential of cauliflower (*Brassica oleracea*) bud peroxidase in decolorization of synthetic recalcitrant dyes using redox mediator. *Catalysis Communication* v. 15, n. 1, p. 93-98, 2011.

JULIÃO, G. J. A. Polímeros usados nas atividades de perfuração e completção. Apostila (2011). Disponível em: <http://files.quimicodohorario.webnode.com.br/200000032-6ee0f6fdb4/polimeros.doc>. Acesso em: 02 fev. 2015.

KHAJEH, M. Multivariate optimization of microwave-assisted digestion of copper and zinc from powder milk. *Journal of Brazilian Chemical Society* v. 23, n. 9, p. 1704-1710, 2012.

KHAYET, M.; ZAHRIM, A. Y.; HILAL, N. Modelling and optimization of coagulation of highly concentrated industrial grade leather dye by response surface methodology. *Chemical Engineering Journal* v. 167, n. 1, p. 77-83, 2011.

KOMORSKY-LOVRIC, S. Adsorption and Reduction of Berberine at a Mercury Electrode. *Journal Electroanalytical Chemistry* v. 12, n. 8, p. 549-604, 2000.

KOUSHA, M.; DANESHVAR, E. ; DOPEIKAR, H.; TAGHAVI, D.; BHATNAGAR, A. Box-Behnken design optimization of acid Black 1 dye biosorption by different brown macroalgae. *Chemical Engineering Journal* v. 179, n. 1, p. 158-168, 2012.

KULKARNI, S. S.; ALLORKAR, N. H. Smart polymers in drug delivery: An overview. *Journal of Pharmacy Research* v. 3, n. 1, p. 100-108, 2010.

KUNZ, A. et al. Novas Tendências no Tratamento de Efluentes Têxteis. *Química Nova* v. 25, n. 1, p. 78-82, 2002.

LEE, S.; ROBINSON, J.; CHONG, M. F. A review on application of flocculants in wastewater treatment. *Process Safety and Environmental Protection* v. 92, n. 6, p. 489-508, 2014.

LENZI, E.; FAVERO, L. O. B.; LUCHESE, E. B. *Introdução à Química da Água: Ciência, vida e sobrevivência*. Reimpressão. Rio de Janeiro -RJ: LTC, 2012.

LIMA, G. J. A. *Uso de Polímero Natural do Quiabo como Auxiliar de Flocculação e Filtração em Tratamento de Água e Esgoto*. Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental - Controle da poluição Urbana e Industrial) Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. 2007.

LIMA, R. A. *Tratamento de Efluentes Líquidos de Unidades Produtoras de Farinha de Mandioca*. 2010. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais) - Universidade Católica de Pernambuco, Recife, Brasil. 2010.

LOUREIRO, A. P. M.; MASCIO, P.; MEDEIROS, M. H.G. Formação de adutos exocíclicos com bases de DNA: implicações em mutagênese e carcinogênese. *Química Nova* v. 25, n.5, p. 777-793, 2002.

LOTITO, A. M.; FRATINO, U.; BERGNA, G.; LACONI, C. Integrated biological and ozone treatment of printing textile wastewater. *Chemical Engineering Journal* v. 195, n. 1, p. 261-269, 2012.

MATTAR, M. S.; COSTA, H. B.; BELISÁRIO, M. Bioadsorbents utilization in dyes removal from textile industry effluents. *Revista Analytica* n. 64, Abril/Maio 2013.

MATTO, M. and HUSAIN, Q. Decolorization of direct dyes by salt fractionated turnip proteins enhanced in the presence of hydrogen peroxide and redox mediators. *Chemosphere* v. 69, n. 2, p. 338–345, 2007.

MENDES, F. D.; LIMA, F. D. M. Vestuário de Moda – Beneficiamentos do jeanswear e os resíduos da lavanderia. 2011. Disponível em: http://www.coloquiomoda.com.br/anais/anais/8-Coloquio-de-Moda_2012/GT11/COMUNICACAO-ORAL/103532_Vestuario_de_Moda_Beneficiamentos_do_Jeanswear_e_os_Residuos_da_Lavanderia.pdf . Acesso em: 06 fev. 2015.

METCALF & EDDY. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. 4th Edition. 2003.

MISHRA, I. M.; KUMAR, A.; PRASAD, B. Optimization of process parameters for acrylonitrile removal by a low-cost adsorbent using Box–Behnken design. *Journal of Hazardous Materials* v. 150, n. 1, p. 174-182, 2008.

MORIOKA, L. R. I.; MATOS, A. P.; OLIVO, G.; SANT'ANNA, E. S. Floculação de *Chlorella* sp. produzida em concentrado de dessalinização e estudo de método de extração de lipídeos intracelulares. *Química Nova* v. 37, n. 1, p. 44-49, 2014.

NG, M., LIU, S., CHOW, C.W., DRIKAS, M.; AMAL, R.; LIM, M. Understanding effects of water characteristics on natural organic matter treatability by PACl and a novel PACl chitosan coagulants. *Journal of Hazard Materials* v.263, n. 2, p. 718-725, 2013.

NOGUEIRA, F.C.B.; CUNHA NETO, F.R.; ZAMPERO, R.; SABINO, P. H. Sementes de moringa oleífera e extrato de quiabo no tratamento de efluentes urbanos e industriais. Universidade José do Rosário Vellano- UNIFENAS- Alfenas, MG, 2010.

O'NEILL, C.; HAWKES, F.R.; HAWKES, D.L., LOURENÇO, N.D.; PINHEIRO, H.M.; DELLE, W.; Colour in textile effluents – sources, measurement, discharge consents and simulation: a review. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* v. 74, n. 11, p. 1009-1018, 1999.

PASCHOAL, F. M. M., TREMILIOSI-FILHO, G. Aplicação da tecnologia de eletrofloculação na recuperação do corante índigo blue a partir de efluentes industriais. *Química Nova* v. 2, n. 5, p.766-772, 2005.

PAULA, S. L. Clarificação do extrato aquoso de *Stevia rebaudiana* (Bert.) *bertoni*, utilizando polímeros naturais. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2004.

PAVANELLI, G. Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada. 2001. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, USP, São Carlos, 2001.

PBMH - PROGRAMA BRASILEIRO PARA MODERNIZAÇÃO DA HORTICULTURA. Normas de Classificação de Chuchu. São Paulo: CEAGESP, 2008.

PEIXOTO, F.; MARINHO, G.; RODRIGUES, K. Corantes têxteis: uma revisão. *Hollos* v. 5, n. 29, p. 98-106, 2013.

PINHEIRO H. M.; TOURAUD, E.; THOMAS, O. Aromatic amines from azo dye reduction: status review with emphasis on direct UV spectrophotometric detection in textile industry wastewater. *Dyes and pigments* v. 61, n. 2, p. 121-139, 2004.

PISCICULTURA (2014) – Disponível em: <http://www.alevinosecia.com.br/piscicultura.html>
Acesso em: 09 fev. 2015.

PRASAD, R. K. Color removal from distillery spent wash through coagulation using *Moringa oleifera* seeds: Use of optimum response methodology. *Journal of Hazardous Materials* v. 165, n. 1-3, p. 804-811, 2009.

PRITCHARD, M., CRAVEN, T., MKANDAWIRE, T., EDMONDSON, A.S., O'NEILL, J.G.A. Comparison between *Moringa oleifera* and chemical coagulants in the purification of drinking water – an alternative sustainable solution for developing countries. *Physics and Chemistry of the Earth* v. 35, n. 13 – 14, p. 798-805, 2010.

R-para químicos – Box-Behnken. Disponível em: <https://sites.google.com/site/rparaquimicos/superficie-de-resposta/box-be> . Acesso em: 18 nov. 2014.

RAMOS, C. S.; PEREIRA, D. F.; ARAÚJO, N. A.; CAVALCANTI, E. B.; SILVA, G. F. Caracterização físico-química da moringa (*Moringa Oleifera lam*). Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais Campina Grande v. 12, n. 1, p.55-60, 2010.

REBELO, S. L. H., LINHARES, M., SIMÕES, M. M. Q., SILVA, A. M. S., NEVES, M. G. P. M. S., CAVALEIRO, J. A. S., FREIRE, C. Indigo dye production by enzymatic mimicking based on an iron(III)porphyrin. Journal of Catalysis v. 315, n. 1, p. 33–40, 2014.

REVANKAR, M.S., LELE, S.S., Synthetic dye decolorization by white rot fungus, *Ganoderma sp.* WR-1 Bioresource Technology v. 98, n. 4, p. 775-780, 2007.

RITCHER, C. A., AZEVEDO NETTO, J. M. Tratamento de água – tecnologia atualizada, São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 2003.

SAADE, R. L. Chayote. *Sechium edule* (Jacq.) Sw. Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops. 8. Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research, Gatersleben/International Plant Genetic Resources Institute, Rome, Italy.1996.

SANGHI, R., DIXIT, A., GUHA, S. Sequential batch culture studies for the decolorization of reactive dye by *Coriolus versicolor*. Bioresource Technology v. 97, n. 3, p. 396-400, 2006.

SENAI - SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL. Serviços para o setor têxtil e vestuário. Disponível em: <http://www.senaipr.org.br/para-empresas/servicos-para-o-setor-textil-e-vestuario-3-9861-150971.shtml> . Acesso em: 05 fev. 2015.

SENTHILKUMAR, M. et al. Treatment of textile dyeing wastewater using two-phase pilot plant UASB with sago wastewater as co-substrate. Chemical Engineering Journal v. 166, n. 1, p. 10-14, 2011.

SILVERSTEIN, R.M., WEBSTER, F.X., KIEMLE, D. 2005. Spectrometric Identification of Organic Compounds, 7th ed.

STEPHENSON, R. J.; DUFF, S. J. B.; Coagulation and precipitation of a mechanical pulping effluent—I. Removal of carbon, color and turbidity. *Water Research* v. 30, n. 4, p. 781-792, 1996.

SILVA, M.C.; CORRÊA, A. G.; TORRES, J.A.; AMORIM, M.T.S.P. Descoloração de corantes industriais e efluentes têxteis simulados por peroxidase de nabo (*Brassica campestris*). *Química Nova* v. 35, n. 5, p. 889-894, 2012.

SOLÍS, A.; PEREA, F.; SOLÍS, M.; MANJARREZ, N.; PÉREZ, H. I.; and CASSANI, J. Discoloration of Indigo Carmine Using Aqueous Extracts from Vegetables and Vegetable Residues as Enzyme Sources. *BioMed Research International* 2013.

SOUZA, A. S.; SANTOS, W. N. L.; FERREIRA, S. L. C. Application of Box–Behnken design in the optimization of an on-line pre-concentration system using knotted reactor for cadmium determination by flame atomic absorption spectrometry *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* v. 60, n. 5, p. 734-742, 2005.

SOUZA, M. T. F.; AMBROSIO, E.; ALMEIDA, C. A.; FREITAS, T. K. S.; SANTOS, L. B.; ALMEIDA, V. C.; GARCIA, J. C. The use of a natural coagulant (*Opuntia ficus-indica*) in the removal for organic materials of textile effluents. *Environmental Monitoring Assessment* v.186, n. 8, p. 5261-5271, 2014.

TURCHIULI, C.; FARGUES, C. Influence of structural properties of alum and ferric flocs on sludge dewaterability. *Chemical Engineering Journal* v.103, n. 1-3, p. 123-131, 2004.

VERMA, A. K.; DASH, R. R.; BHUNIA, P. A review on chemical coagulation/flocculation Technologies for removal of color from textile wastewaters. *Journal of Environmental Management* v. 93, n. 1, p. 54-168, 2012.

VILLEGAS, M. L. O. R.; GEISSLER, G.; HANDAL, A. S.; GONZÁLEZ, E. V. Inmovilización de una peroxidasa de chayote [*Sechium edule* (Jacq.) Sw] y su potencial aplicación em a remoción de sustâncias fenólicas em aguas contaminadas. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* v. 19, n. 2, p. 73-81, 2003.

WU, C.; WANG, Y.; GAO, B.; ZHAO, Y.; YUE, Q. Coagulation performance and floc characteristics of aluminum sulfate using sodium alginate as coagulant aid for synthetic dyeing wastewater treatment. *Separation and Purification Technology* v. 95, n. 1, p.180–187, 2012.

YANG, Z., GAO, B., E YUE, Q. Coagulation performance and residual aluminum speciation of $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ and polyaluminum chloride (PAC) in Yellow River water treatment. *Chemical Engineering Journal* v. 165, n. 1, p. 122-132, 2010.

YESILADA, O., ASMA, D., CING, S. Decolorization of textile dyes by fungal pellets. *Process Biochemistry* v. 38, n. 6, p. 933-938, 2003.

YOU, J.; ALMEDA, D.; YE, G.J.C.; AUGUSTE, D. T. Bioresponsive matrices in drug delivery. *Journal of Biological Engineering* v. 4, n. 15, p. 426-432, 2010.

ZÁMOCKY, M., REGELSBERGER, G., JAKOPITSCH, C. & OBINGER, C. The molecular peculiarities of catalase-peroxidases. *FEBS Letters* v. 492, n. 3, p. 177-182. 2001.

ZHANG, J.; ZHANG, F.; LUO, Y.; YANG, H. A preliminary study on cactus coagulant in water treatment. *Process Biochemistry* v. 41, n. 1, p. 730-733, 2006.