



ISABELLA JUNQUEIRA RODRIGUES FUESS

**ADEQUAÇÃO DA VINHAÇA DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA  
REUSO AGRÍCOLA: AVALIAÇÃO DE DIFERENTES  
TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO E POTENCIAIS  
IMPACTOS AMBIENTAIS**

*Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.*

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Loureiro Garcia

Rio Claro – SP  
2016

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“Júlio de Mesquita Filho”

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Campus de Rio Claro

ISABELLA JUNQUEIRA RODRIGUES

ADEQUAÇÃO DA VINHAÇA DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA  
REUSO AGRÍCOLA: AVALIAÇÃO DE DIFERENTES  
TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO E POTENCIAIS IMPACTOS  
AMBIENTAIS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Loureiro Garcia

Rio Claro - SP

2016

628.092 Rodrigues, Isabella Junqueira  
R696a Adequação da vinhaça de cana-de-açúcar para reuso agrícola :  
avaliação de diferentes tecnologias de tratamento e potenciais impactos  
ambientais / Isabella Junqueira Rodrigues. - Rio Claro, 2016  
71 f. : il., figs., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de  
Geociências e Ciências Exatas  
Orientador: Marcelo Loureiro Garcia

1. Engenharia ambiental. 2. Reuso de vinhaça. 3. Digestão anaeróbia.  
4. Coagulação-floculação. 5. Reuso. I. Título.

ISABELLA JUNQUEIRA RODRIGUES

ADEQUAÇÃO DA VINHAÇA DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA  
REUSO AGRÍCOLA: AVALIAÇÃO DE DIFERENTES  
TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO E POTENCIAIS IMPACTOS  
AMBIENTAIS

Dissertação de Mestrado apresentada ao  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas do  
Câmpus de Rio Claro, da Universidade  
Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”,  
como parte dos requisitos para obtenção do  
título de Mestre em

Comissão  
Examinadora

Prof. Dr. Marcelo Loureiro Garcia  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas (ICGE/Unesp)

Dra. Adriana Ferreira Maluf Braga  
Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP)

Dra. Bruna de Souza Moraes  
Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético (NIPE/Unicamp)

Rio Claro, 22 de julho de 2016

Resultado: Aprovado

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Ana e Wilson, e a minha irmã, Juliana, pelo carinho, amor e dedicação e por serem os responsáveis pela minha formação e educação.

À Vó Maria (*In memoriam*) por ser a pessoa que mais desejou a concretização deste momento, pela ajuda espiritual ao longo dos últimos anos.

Ao meu orientador, Marcelo, pelo apoio, paciência e dedicação a este projeto. Também pelo apoio e compreensão das minhas escolhas profissionais

Ao meu marido, Lucas, pelo amor, carinho, paciência (principalmente) e pelo apoio incondicional.

Aos meus dogs Spike e Kiara por me amarem do jeito que eu sou e por fazerem dos meus dias mais felizes.

À equipe do CEA pelo auxílio na realização deste projeto.

À equipe do LATAR por se disponibilizar para me auxiliar na condução dos ensaios.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de São Paulo (FAPESP) processos 2014/04636-0 e 2009/15984-0 pelo apoio financeiro para realização deste projeto.

## RESUMO

Os processos de coagulação-floculação surgem como uma alternativa para o pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios, normalmente caracterizados pela presença de matéria orgânica e cor residual. O presente trabalho buscou ajustar os melhores parâmetros de coagulação, mistura rápida, floculação e sedimentação para vinhaça anaerobicamente tratada e, dessa forma, verificar se o efluente final admite reuso, com ênfase na aplicação agrícola. Os coagulantes testados foram: solução de amido 2% (m/v) e cloreto férrico 40% sendo que as faixas das dosagens de coagulante testadas foram, respectivamente, 1 a 120 mg.L<sup>-1</sup> e 1 a 25 g.L<sup>-1</sup>. Para as condições testadas, os resultados obtidos mostraram a ineficiência da solução de amido como coagulante para esse efluente. Para os ensaios realizados utilizando-se cloreto férrico como coagulante, os parâmetros otimizados foram: dosagem de solução de cloreto férrico 40% (1,6 g.L<sup>-1</sup>), gradiente e tempo de mistura rápida (325 rpm; 10 s), gradiente e tempo de floculação (65 rpm; 20min) e tempo de sedimentação (20 min). Dentre os parâmetros, apenas a dosagem de coagulante e o tempo de sedimentação influenciaram significativamente ( $\alpha=5\%$ ) o desempenho do processo. A correção do pH do afluente não se mostrou satisfatória para o desempenho do tratamento. Os resultados indicaram que os processos de coagulação/floculação são mais eficazes quando aplicados à vinhaça metanizada em comparação às vinhaças acidificada e bruta. A partir dos resultados obtidos foi realizada analisada a possibilidade de reuso do efluente tratado na ferti-irrigação, constatando-se que maiores volumes de vinhaça tratada podem ser aplicados ao solo, quando comparados à vinhaça bruta.

Palavras-chave: digestão anaeróbia, coagulação-floculação, reuso.

## ABSTRACT

Coagulation-flocculation processes emerge as an alternative to the post-treatment of effluent streams from anaerobic reactors, usually characterized by residual organic matter and color. This study aimed to adjust the best coagulation, rapid mixing, flocculation and sedimentation parameters applied to anaerobically treated vinasse and thus check whether the final effluent allows reuse, with emphasis on agricultural application. Solutions of starch 2% (m/v) and ferric chloride 40% were tested as coagulants, with dosages ranging from 1 to 120 mg.L<sup>-1</sup> and 1 to 25 g.L<sup>-1</sup>, respectively. For the conditions tested, the results indicated the ineffectiveness of the starch solution as a coagulant for this effluent. For the tests performed with ferric chloride as coagulant, the optimal parameters were: ferric chloride solution dosage 40% (1.6 g.L<sup>-1</sup>), rapid mixing gradient and time (325 rpm, 10 s), flocculation gradient and time (65 rpm; 20 min) and settling time (20 min). Among the parameters, only coagulant dosage and settling time significantly ( $\alpha=5\%$ ) impacted the performance of the process. The correction of the influent pH was not satisfactory for the performance of treatment. The results indicated that the coagulation/flocculation processes are most effective when applied to methanized compared to acidified and raw vinasses. From the results obtained, analyses were performed to verify the possibility of reuse of treated effluent in fertigation, observing that higher volumes of treated vinasse can be applied to the soil, as compared to raw vinasse.

Keywords: anaerobic digestion, coagulation-flocculation, reuse

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Etapas da produção de etanol de cana-de-açúcar.....	17
<b>Figura 2</b> – Representação esquemática da dupla camada elétrica nas vizinhanças de uma interface sólido-líquido (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).....	24
<b>Figura 3</b> – Configuração esquemática da dupla camada elétrica (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).....	25
<b>Figura 4</b> – Ilustração esquemática dos dois tipos de floculação: (a) microfloculação e (b) macrofloculação devido a (i) indução de gradientes de velocidade e (ii) sedimentação diferencial (Modificado de METCALF & EDDY, 2003). ....	27
<b>Figura 5</b> – Formação de flocos devido a pontes formadas pela ação de polímeros (METCALF & EDDY, 2003).....	28
<b>Figura 6</b> – Esquema do equipamento Jarteste utilizado nos ensaios de laboratório. (a: Jarros em acrílico; b: haste rotativa; c: paletas giratórias; d: trava) .....	32
<b>Figura 7</b> – Resultados finais obtidos nos EA 1 (I), 2 (II) e 3 (III).....	39
<b>Figura 8</b> – Eficiências de remoção de DQO [◆], cor [■] e turbidez [▲] nos ensaios de otimização dos parâmetros de: (A) dosagem de coagulante(ECF <sub>3</sub> ), (B) tempo de sedimentação (ECF <sub>4</sub> ), (C) tempo de floculação (ECF <sub>5</sub> ), (D) gradiente de floculação (ECF <sub>6</sub> ), (E) tempo de mistura rápida (ECF <sub>7</sub> ) e (F) gradiente de mistura rápida (ECF <sub>8</sub> )...	40
<b>Figura 9</b> – Resultados visuais obtidos no ECF 6.....	42
<b>Figura 10</b> – Resultados visuais obtidos no ECF 10 .....	45
<b>Figura 11</b> – Eficiências de remoção de DQO [◆], cor [■] e turbidez [▲] nos ensaios ECF <sub>11</sub> (A: vinhaça acidificada), ECF <sub>12</sub> (B: vinhaça metanizada) e ECF <sub>13</sub> (C: vinhaça bruta).....	47
<b>Figura 12</b> – Resultados visuais obtidos no ECF <sub>12</sub> (A:vinhaça metanizada como afluente; B: efluente final).....	48

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – População equivalente com mesmo potencial poluidor da vinhaça (WILLINGTON; MARTEN, 1982) <sup>1</sup> .....	18
<b>Tabela 2</b> – Vantagens e desvantagens dos processos anaeróbios (LETTINGA et al., 1984; MOHANA et al., 2009) .....	20
<b>Tabela 3</b> – Resultados obtidos em diversos trabalhos utilizando sistemas de tratamento aeróbio, anaeróbio e físico-químico para o tratamento de vinhaça de diferentes matérias-primas .....	21
<b>Tabela 4</b> – Eficiências de tratamento obtida a partir do emprego de diferentes coagulantes ao tratamento físico-químico da vinhaça. ....	29
<b>Tabela 5</b> – Métodos de análise utilizados para a determinação dos parâmetros. ....	33
<b>Tabela 6</b> – Parâmetros utilizados nos ensaios utilizando-se solução de amido.....	34
<b>Tabela 7</b> – Parâmetros da amostra de cloreto férrico utilizada.....	34
<b>Tabela 8</b> – Parâmetros utilizados nos ensaios utilizando-se cloreto férrico 40 % .....	35
<b>Tabela 9</b> – Características dos solos utilizados para o cálculo de dosagem máxima de vinhaça a ser aplicada conforme orientações da CETESB.....	37
<b>Tabela 10</b> – Comparação entre os resultados obtidos no EA <sub>1</sub> e EA <sub>2</sub> .....	38
<b>Tabela 11</b> – Faixas de eficiências de remoção dos parâmetros de cor, turbidez e DQO obtidas nos ensaios ECF <sub>1</sub> – ECF <sub>9</sub> .....	41
<b>Tabela 12</b> – Caracterização físico-química das amostras de vinhaça afluyente (amostra inicial) e efluente após aplicação dos processos de coagulação e floculação (amostra final) e eficiência de remoção associada ao tratamento – referência: ECF <sub>9</sub> .....	43
<b>Tabela 13</b> – Resultados obtidos no ECF <sub>10</sub> e Eficiência de Remoção dos parâmetros. .	45
<b>Tabela 14</b> – Faixas de eficiência de remoção obtidas nos ECF <sub>11-13</sub> .....	46
<b>Tabela 15</b> – Dosagem máxima de vinhaça a ser aplicada nos solos referenciados nos trabalhos de Pires e Ferreira(2008), Zolin et al., 2011 e Rolin et al., 2013.....	51

## ANEXOS

ANEXO 1– Concentrações das substâncias no solo após aplicação de dosagem máxima de vinhaça segundo orientações da CETESB em solo do tipo 1 <sup>a</sup> (Referência: Pires e Ferreira, 2008) para vinhaça bruta e vinhaça bruta diluída (composição média) e efluentes inicial e final estudados neste trabalho e sua relação com os valores máximos permitidos pela CETESB .....	62
ANEXO 2 - Concentrações das substâncias no solo após aplicação de dosagem máxima de vinhaça segundo orientações da CETESB em solo do tipo 2 <sup>a</sup> (Referência: Pires e Ferreira, 2008) para vinhaça bruta e vinhaça bruta diluída (composição média) e efluentes inicial e final estudados neste trabalho e sua relação com os valores máximos permitidos pela CETESB .....	63
ANEXO 3 – Concentrações das substâncias no solo após aplicação de dosagem máxima de vinhaça segundo orientações da CETESB em solo do tipo 3 <sup>a</sup> (Referência: Pires e Ferreira, 2008) para vinhaça bruta e vinhaça bruta diluída (composição média) e efluentes inicial e final estudados neste trabalho e sua relação com os valores máximos permitidos pela CETESB .....	64
ANEXO 4 – Concentrações das substâncias no solo após aplicação de dosagem máxima de vinhaça segundo orientações da CETESB em solo do tipo 4 Horizonte AP (Referência: Rolim et al., 2013) para vinhaça bruta e vinhaça bruta diluída (composição média) e efluentes inicial e final estudados neste trabalho e sua relação com os valores máximos permitidos pela CETESB.....	65
ANEXO 5 - Concentrações das substâncias no solo após aplicação de dosagem máxima de vinhaça segundo orientações da CETESB em solo do tipo 4 Horizonte A2 (Referência: Rolim et al., 2013) para vinhaça bruta e vinhaça bruta diluída (composição média) e efluentes inicial e final estudados neste trabalho e sua relação com os valores máximos permitidos pela CETESB.....	66
ANEXO 6 – Concentrações das substâncias no solo após aplicação de dosagem máxima de vinhaça segundo orientações da CETESB em solo do tipo 4 Horizonte E (Referência: Rolim et al., 2013) para vinhaça bruta e vinhaça bruta diluída (composição média) e efluentes inicial e final estudados neste trabalho e sua relação com os valores máximos permitidos pela CETESB.....	67

ANEXO 7 – Concentrações das substâncias no solo após aplicação de dosagem máxima de vinhaça segundo orientações da CETESB em solo do tipo 4 Horizonte Bh (Referência: Rolim et al., 2013) para vinhaça bruta e vinhaça bruta diluída (composição média) e efluentes inicial e final estudados neste trabalho e sua relação com os valores máximos permitidos pela CETESB .....	68
ANEXO 8 – Concentrações das substâncias no solo após aplicação de dosagem máxima de vinhaça segundo orientações da CETESB em solo do tipo 4 Horizonte Bsh (Referência: Rolim et al., 2013) para vinhaça bruta e vinhaça bruta diluída (composição média) e efluentes inicial e final estudados neste trabalho e sua relação com os valores máximos permitidos pela CETESB .....	69
ANEXO 9 – Concentrações das substâncias no solo após aplicação de dosagem máxima de vinhaça segundo orientações da CETESB em solo do tipo 5 testemunho (Referência: Zolin et al., 2011) para vinhaça bruta e vinhaça bruta diluída (composição média) e efluentes inicial e final estudados neste trabalho e sua relação com os valores máximos permitidos pela CETESB .....	70
ANEXO 10 – Concentrações das substâncias no solo após aplicação de dosagem máxima de vinhaça segundo orientações da CETESB em solo do tipo 5 após 20 aplicações de vinhaça (Referência: Zolin et al., 2011) para vinhaça bruta e vinhaça bruta diluída (composição média) e efluentes inicial e final estudados neste trabalho e sua relação com os valores máximos permitidos pela CETESB .....	71

## **LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS**

AGV – Ácidos Graxos Voláteis

Al – Alumínio

Ba – Bário

B – Boro

Ca – Cálcio

Cd – Cádmi

CH<sub>4</sub> – Gás Metano

Cl – Cloro

CO<sub>2</sub> – Gás Carbônico

Cu – Cobre

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

COV – Carga Orgânica Volumétrica

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

Dc – Dosagem da solução de cloreto férrico a 40%

DCE – Dupla Camada Elétrica

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO – Demanda Química de Oxigênio

EA<sub>1</sub> – Ensaio utilizando-se Amido como coagulante 1

EA<sub>2</sub> – Ensaio utilizando-se Amido como coagulante 2

EA<sub>3</sub> – Ensaio utilizando-se Amido como coagulante 3

ECF<sub>1</sub> – Ensaio utilizando-se Cloreto Férrico como coagulante 1

ECF<sub>2</sub> – Ensaio utilizando-se Cloreto Férrico como coagulante 2

ECF<sub>3</sub> – Ensaio utilizando-se Cloreto Férrico como coagulante 3

ECF<sub>4</sub> – Ensaio utilizando-se Cloreto Férrico como coagulante 4

ECF<sub>5</sub> – Ensaio utilizando-se Cloreto Férrico como coagulante 5

ECF<sub>6</sub> – Ensaio utilizando-se Cloreto Férrico como coagulante 6

ECF<sub>7</sub> – Ensaio utilizando-se Cloreto Férrico como coagulante 7

ECF<sub>8</sub> – Ensaio utilizando-se Cloreto Férrico como coagulante 8

ECF<sub>9</sub> – Ensaio utilizando-se Cloreto Férrico como coagulante 9

ECF<sub>10</sub> – Ensaio utilizando-se Cloreto Férrico como coagulante 10

ECF<sub>11</sub> – Ensaio utilizando-se Cloreto Férrico como coagulante 11

ECF<sub>12</sub> – Ensaio utilizando-se Cloreto Férrico como coagulante 12

ECF<sub>13</sub> – Ensaio utilizando-se Cloreto Férrico como coagulante 13

ETE – Estação de Tratamento de Esgoto

Fe – Ferro

G<sub>f</sub> – Gradiente de Floculação

G<sub>mr</sub> – Gradiente de Mistura Rápida

K – Potássio

LPB – Laboratório de Processos Biológicos

Mg – Magnésio

Mn – Manganês

Mo – Molibidênio

N - Nitrogênio

NH<sub>3</sub> – Nitrogênio Amoniacal

Na – Sódio

Ni – Níquel

NO<sub>2</sub><sup>-</sup> - Nitrito

NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - Nitrato

OD – Oxigênio Dissolvido

Pb - Chumbo

P<sub>total</sub> – Fósforo Total

PZ – Potencial Zeta

RAFA - Reator anaeróbio de fluxo ascendente

S - Enxofre

SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> - Sulfato

Sr - Estrôncio

SSF – Sólidos Suspensos Fixos

SST – Sólidos Suspensos Totais

SSV – Sólidos Suspensos Voláteis

T<sub>f</sub> – Tempo de Floculação

T<sub>mr</sub> – Tempo de Mistura Rápida

UASB - Upflow anaerobic sludge blanket

V – Vanádio

# SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. OBJETIVOS.....	15
3. REVISÃO DE LITERATURA .....	16
3.1 Produção de Etanol e geração de Vinhaça.....	16
3.2 Opções de tratamento e manejo da vinhaça.....	18
3.3 Fundamentos de coagulação-floculação .....	23
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	31
4.1 Coleta do efluente .....	31
4.2 Análises experimentais .....	31
4.3 Ensaios .....	33
4.3.1 Solução de Amido como Coagulante .....	33
4.3.2 Cloreto Férrico como Coagulante .....	34
4.4 Metodologia para análise de reuso da vinhaça na agricultura .....	35
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	38
5.1 Ensaios utilizando-se solução de amido como coagulante .....	38
5.2 Ensaios utilizando-se cloreto férrico como coagulante .....	39
5.3 Análise do efluente tratado para reuso na agricultura.....	48
5.4 Análise da adequabilidade da aplicação das normativas brasileiras ao reuso de vinhaça na ferti-irrigação.....	49
6. CONCLUSÕES.....	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	54

## 1. INTRODUÇÃO

A presente pesquisa está inserida no contexto da indústria do etanol. A produção deste combustível possui diversas vantagens ambientais, entre elas, o seu caráter renovável, a redução da emissão de gases de efeito estufa e a redução da pressão sobre combustíveis fósseis. Porém, a sustentabilidade ainda não pode ser considerada como uma realidade da indústria sucroalcooleira. Um dos aspectos que limitam a classificação do etanol como um biocombustível sustentável compreende o gerenciamento da vinhaça, principal efluente gerado em sua produção.

A taxa de geração da vinhaça atinge uma média de 10 a 15 litros por litro de etanol produzido (BNDES; CGEE, 2008). Além do alto volume de efluente gerado, o elevado potencial poluidor desta água residuária torna-se o alvo central na busca de alternativas para o seu tratamento e disposição. A concentração de matéria orgânica da vinhaça, em termos de demanda química de oxigênio (DQO), pode atingir valores superiores a 100 vezes a DQO do esgoto sanitário, que varia entre 250 e 1000 mg.L<sup>-1</sup> (AISSE *et al.*, 2001; METCALF & EDDY, 2003). Por ser um efluente rico em macro e micronutrientes, em especial potássio, cálcio e magnésio, o reuso da vinhaça na fertirrigação torna-se uma alternativa interessante do ponto de vista ambiental e econômico, pois possui elevada quantidade de água em sua composição e disponibiliza nutrientes necessários à recomposição dos solos agrícolas.

Apesar das características favoráveis da vinhaça para disposição nas lavouras, sua aplicação inadequada e a falta de controle desta prática podem acarretar a obstrução e super-fertilização dos solos, comprometendo sua capacidade produtiva, além de prejudicar os corpos d'água que eventualmente possam ser atingidos. Os potenciais impactos ocasionados pela aplicação inadequada de vinhaça no solo consistem em: salinização do solo, obstrução dos poros, redução da atividade microbiana no meio, consumo de oxigênio dissolvido em corpos d'água, desestabilização da estrutura do solo, alteração permanente do pH no meio, além de eventuais riscos à saúde humana e culturas agrícolas (FUESS E GARCIA, 2014).

Devido à elevada quantidade de matéria orgânica presente em sua composição, a vinhaça apresenta forte potencial para produção de biogás, mistura gasosa rica em metano, a partir da aplicação de processos anaeróbios. Embora estes processos sejam

eficientes para o controle da poluição e, sobretudo para a recuperação de energia, ainda geram efluentes com aspecto e odor desagradável. Diante desse cenário, considerando as diversas opções de tratamento disponíveis, é possível adequar o efluente de reatores anaeróbios por meio de processos físico-químicos convencionais, especialmente a coagulação-floculação, de modo a promover o reuso da vinhaça de forma ambientalmente segura, especialmente no que se diz respeito à ferti-irrigação.

Nesta pesquisa, buscou-se avaliar o pós-tratamento de vinhaça digerida anaerobicamente por meio de coagulação-floculação como uma alternativa viável para o tratamento desta água residuária, visando a melhora no padrão de ferti-irrigação da vinhaça, ou mesmo a utilização deste efluente para fins não potáveis.

## 2. OBJETIVOS

Esta pesquisa teve por objetivo geral verificar a adequabilidade da vinhaça de cana-de-açúcar para a ferti-irrigação após o seu tratamento em sistema anaeróbio seguido de coagulação-floculação, com ênfase na otimização da etapa físico-química.

Os objetivos específicos consistem em:

- Avaliar e otimizar os processos de coagulação (dosagem de coagulante  $D_c$ ), mistura rápida (tempo  $-T_{mr}$  - e gradiente -  $G_{mr}$  - de mistura rápida), floculação (tempo  $-T_f$  - e gradiente -  $G_f$  - de floculação) e sedimentação (tempo de sedimentação  $T_s$ ) em efluente de reator anaeróbio aplicado ao tratamento de vinhaça, comparando os resultados obtidos neste trabalho com outras tecnologias de tratamento aplicadas à vinhaça;
- Avaliar o potencial de reuso agrícola de vinhaça submetida aos processos de tratamento aplicados; e,
- Delimitar os potenciais impactos ambientais que podem ser causados desde o processo de geração até o reuso da vinhaça.

### 3. REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 Produção de Etanol e geração de Vinhaça

O bioetanol pode ser produzido a partir de qualquer biomassa que contenha quantidade significativa de amido ou açúcares (BNDES; CGEE, 2008). As matérias-primas amiláceas mais comumente utilizadas englobam os grãos e cereais (milho, trigo, cevada). Dentre as matérias-primas açucaradas é destacado o uso de beterraba e cana-de-açúcar, sendo que esta é de ampla importância na produção brasileira de etanol.

A produção do etanol de cana-de-açúcar é composta em várias etapas, iniciando-se com a separação do colmo em caldo e fibra. Após a sua extração, o caldo é encaminhado a uma etapa de tratamento, ocorrendo a calagem, aquecimento e decantação. Após tratado, o caldo é, eventualmente, misturado com o melaço (solução residual da produção de açúcar), o que dá origem ao mosto. O mosto é encaminhado para a fermentação, etapa que dá origem ao vinho, que é encaminhado para a etapa de destilação. Nesta etapa, o bioetanol é recuperado na forma hidratada, tendo como resíduo a vinhaça, que é gerada numa ordem de 10 a 15 litros por litro de etanol produzido. Após todas essas etapas, o bioetanol pode ser enviado para desidratação (BNDES; CGEE, 2008). A Figura 1 mostra as etapas da produção de etanol.

Com relação ao consumo de água no processo de produção de etanol, estima-se que sejam utilizados 21m<sup>3</sup> de água por tonelada de cana processada, porém, como 70% do peso dos colmos é constituído por água, o volume captado atinge valores bastante inferiores (BNDES; CGEE, 2008). Elia Neto (2005) relata que, a partir de levantamentos realizados entre os anos de 1997 a 2005, constatou-se uma utilização média de 1,83m<sup>3</sup> de água por tonelada de cana processada. Todavia, a partir da racionalização do uso da água, espera-se atingir o valor de 1m<sup>3</sup> em médio prazo. Além da vinhaça, a produção de etanol gera uma série de resíduos sólidos e líquidos, sendo os últimos: água de lavagem de cana, água de resfriamento dos equipamentos, efluente dos multijatos e condensadores, efluente do resfriamento da destilaria, efluente do tratamento dos gases de combustão da caldeira a bagaço, condensados dos vapores de escape e vegetais, água de lavagem de pisos e equipamentos.

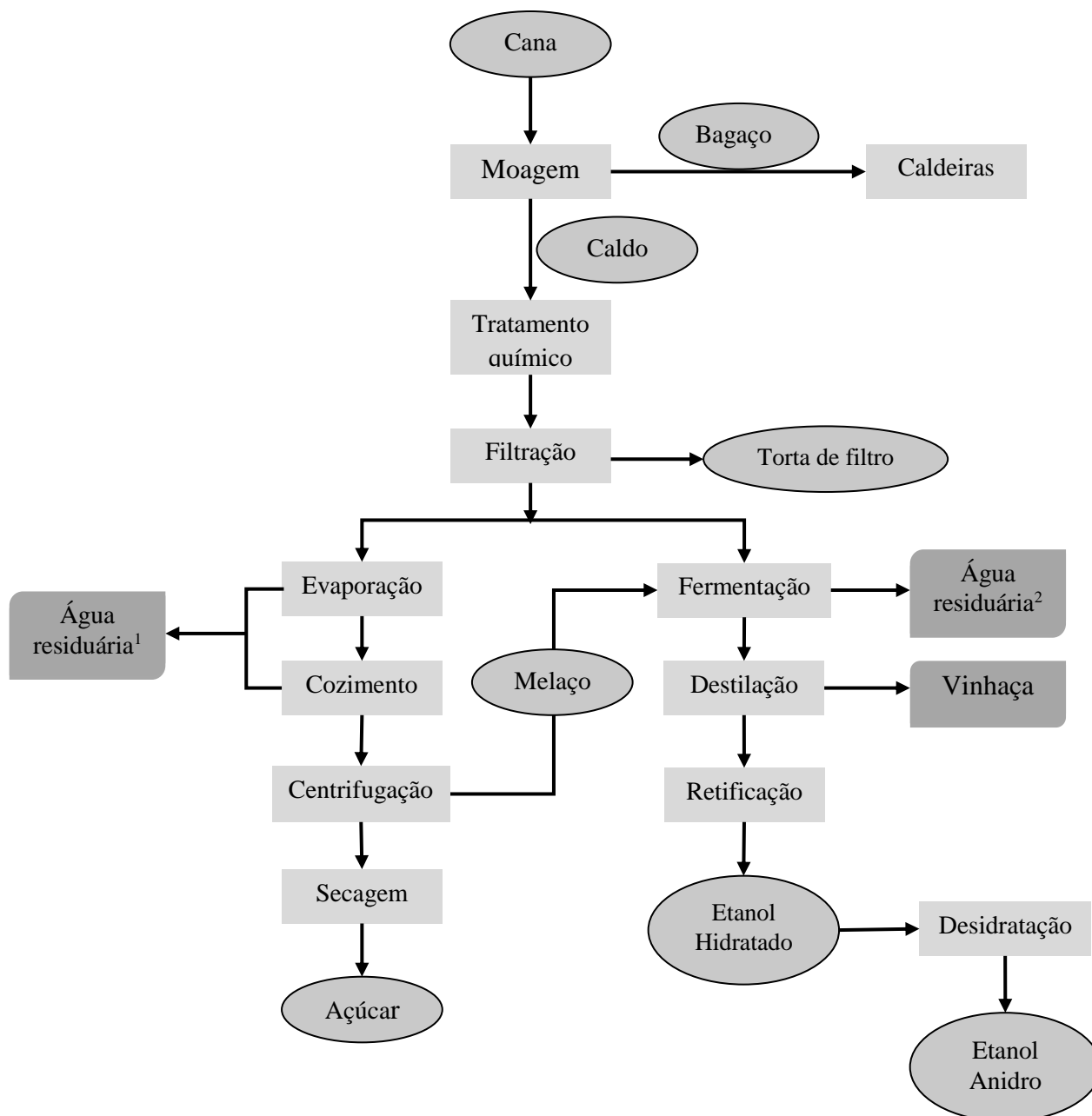


Figura 1. Etapas da produção de etanol de cana-de-açúcar.

<sup>1</sup> Água residuária proveniente dos condensadores/multijatos; <sup>2</sup> Água residuária proveniente do resfriamento do caldo/dornas (Adaptado de BNDES; CGEE, 2008 e ELIA NETO, 2005)

A vinhaça, efluente gerado no processo de destilação do etanol, possui alta concentração de matéria orgânica biodegradável e não-biodegradável, e de nutrientes como potássio e enxofre. Também possui, porém em menor concentração, os micronutrientes: cálcio, cobre, manganês e zinco (MOHANA *et al.*, 2009). A vinhaça também apresenta elevada acidez ( $\text{pH} \approx 4 - 5$ ) devido ao emprego de ácido sulfúrico

nas dornas de fermentação como agente bactericida. Ácidos orgânicos formados por rotas metabólicas paralelas também na etapa fermentativa contribuem para o baixo pH.

Um dos grandes inconvenientes na geração da vinhaça consiste nos altos valores de demanda bioquímica (DBO) e química (DQO) de oxigênio, sendo que esta pode chegar a 100 g.L<sup>-1</sup>, valor muito superior à DQO dos esgotos sanitários (WILLINGTON; MARTEN, 1982; WILKIE *et al.*, 2000; KAPARAJU *et al.*, 2010). Na Tabela 1 é apresentada a população equivalente em produção de esgoto sanitário com mesmo potencial poluidor da vinhaça. Além da alta carga orgânica, o baixo pH da vinhaça (entre 3,5 – 4,5) e a alta temperatura com que sai da coluna de destilação (em torno de 90°C) são fatores problemáticos quando se trata da sua disposição (TBW, 2000).

Tabela 1. População equivalente com mesmo potencial poluidor da vinhaça (WILLINGTON; MARTEN, 1982)<sup>1</sup>

<b>Produção de etanol (m<sup>3</sup>/dia)</b>	<b>População equivalente (hab)</b>
30	250.000
60	500.000
120	1.000.000
150	1.200.000
200	1.600.000
250	2.000.000

<sup>1</sup> Para o estudo, foi considerada uma DBO per capita de 75g/hab.dia. A taxa de geração considerada foi de 13,3 litros de vinhaça por litro de etanol produzido a partir do melaço da cana-de-açúcar.

### 3.2 Opções de tratamento e manejo da vinhaça

Considerando-se as características da vinhaça, diversas são as possibilidades de tratamento. Dessa forma, é possível a diminuição do seu potencial poluidor previamente ao seu manejo e disposição final. Alguns destes sistemas de tratamento são descritos nos próximos parágrafos.

Os processos biológicos, por consistirem numa tecnologia consolidada de tratamento de efluentes, são amplamente aplicados em pesquisas envolvendo o tratamento da vinhaça, porém, seu potencial é subexplorado em plantas de larga escala.

Sua aplicação visa, principalmente, (1) transformar partículas biodegradáveis em produtos simples, (2) incorporar sólidos coloidais na forma de flocos ou biofilme, (3) transformar nutrientes como o nitrogênio e (4) remover constituintes orgânicos específicos de algum tipo de água residuária (METCALF & EDDY, 2003). Dentre as opções de tratamento biológico disponíveis, destacam-se os sistemas anaeróbios e os sistemas aeróbios de tratamento.

A digestão anaeróbia caracteriza-se como um processo de transformação de materiais orgânicos em uma mistura gasosa (biogás) por um conjunto de populações de microrganismos na ausência de oxigênio. O biogás produzido consiste em uma mistura composta, principalmente, por  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$ . Este processo é eficiente tanto para a produção de energia limpa quanto para o tratamento de rejeitos (ANNACHHATRE, 1996; WILKIE, 2008). Em princípio, a degradação por via anaeróbia pode ser aplicada a todos os compostos orgânicos, sendo mais eficiente e econômica quando os dejetos apresentam elevada biodegradabilidade.

Alguns dos sistemas de tratamento anaeróbios utilizados e reportados em diversos trabalhos da literatura para o tratamento de vinhaça consistem nos: (1) Reatores anaeróbios de fluxo ascendente (RAFA ou UASB), (2) Reatores de leito fixo, (3) Reatores de leito fluidizado, (4) Reatores híbridos e (5) Lagoas anaeróbias. (SATYAWALI, 2007; MOHANA et al, 2009).

A digestão aeróbia consiste num processo biológico de transformação de materiais orgânicos em uma mistura gasosa realizado por populações de microrganismos na presença de oxigênio. Após a realização deste processo, pode-se recuperar, principalmente,  $\text{CO}_2$ .

Segundo Mohana *et al.* (2009), o tratamento de vinhaça por via aeróbia tem sido usado, principalmente, após o tratamento anaeróbio com a finalidade de promover a diminuição da concentração de matéria orgânica (DBO e DQO) e cor. Dentre os sistemas aeróbios empregados para o tratamento de vinhaça, pode-se citar as wetlands, e também sistemas utilizando-se fungos, bactérias, algas e cianobactérias como biocatalisadores (MOHANA *et al.*, 2009).

A digestão anaeróbia possui uma série de vantagens sobre a digestão aeróbia. O principal aspecto refere-se à maior produção de lodo em processos aeróbios (CHERNICHARO, 1997). Ademais, o consumo de energia é mais significativo na

digestão aeróbia. Na Tabela 2 é listada uma série de vantagens e desvantagens dos processos anaeróbios.

Tabela 2. Vantagens e desvantagens dos processos anaeróbios (LETTINGA et al., 1984; MOHANA et al., 2009).

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixa produção de sólidos;</li> <li>• Baixo consumo de energia;</li> <li>• Baixos custos operacionais;</li> <li>• Produção de metano;</li> <li>• Tolerância a elevadas cargas orgânicas;</li> <li>• Aplicabilidade em pequena e grande escala;</li> <li>• Baixo consumo de nutrientes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Remoção de nitrogênio, fósforo e patógenos insatisfatória;</li> <li>• Produção de efluente com aspecto desagradável, sendo necessário algum tipo de pós-tratamento;</li> <li>• Possibilidade de geração de maus odores e problemas de corrosão.</li> </ul>

O tratamento biológico permite a redução da carga orgânica da vinhaça, porém, o parâmetro de cor normalmente não tem seu valor reduzido e pode, inclusive, aumentar, devido à repolimerização de compostos coloridos presentes no citado efluente (MOHANA *et al.*, 2009). Dessa forma, é necessário o estudo de sistemas complementares, que permitam a remoção de cor da vinhaça, para prevenir uma série de problemas ambientais que podem ser causados devido a esta característica. Também é desejável que estes sistemas complementares reduzam a carga orgânica residual na vinhaça, bem como alguns nutrientes.

Os sistemas físico-químicos de tratamento permitem a remoção de melanoidinas, que consistem em polímeros de alto peso molecular responsáveis pelo aspecto marrom da vinhaça (MOHANA *et al.*, 2009). Estes processos também são eficazes para a remoção de matéria orgânica e alguns nutrientes do efluente tratado. Alguns dos processos físico-químicos passíveis de serem empregados para o tratamento da vinhaça são: (1) Adsorção, (2) Oxidação, (3) Coagulação-Floculação, (4) Filtração por membranas.

Na Tabela 3 são apresentados resultados obtidos em trabalhos de diversos autores que aplicaram os tratamentos anaeróbio, aeróbio e físico-químico (separadamente ou em conjunto) no tratamento da vinhaça.

Tabela 3. Resultados obtidos em diversos trabalhos utilizando sistemas de tratamento aeróbio, anaeróbio e físico-químico para o tratamento de vinhaças de diferentes matérias-primas.

	Tecnologia de tratamento	DQO afluente (mg.L <sup>-1</sup> )	ER (%)			Referência	
			DQO	DBO	Cor Turbidez		
Digestão Aeróbia	<i>Pleurotus sajor-caju</i> CCB020 (fungo)	42000	82,8	73,5 ± 99	± 99	Ferreira et al. (2011)	
	<i>Aspergillus terreus</i> + <i>Geotrichum candidum</i> (fungos)	75000	29	nd	nd	García García et al. (1997)	
	<i>Pseudomonas putida</i> + <i>Aeromonas sp</i> (bactérias)	2250	68,8	nd	60	nd	Ghosh et al. (2002)
	<i>Bacillus sp.</i>	126700	85,37 <sup>1</sup>	nd	nd	Ryznar-Luty et al. (2007)	
Digestão Anergia	Reator anaeróbio de manta de lodo e fluxo ascendente	68900	44 - 58	Nd	Nd	Espinosa et al. (1995)	
	Reator anaeróbio de leito fluidificado	60000 - 70000	60 - 70	nd	nd	de Bázua et al. (1991)	
	Reator anaeróbio de leito fluidificado	130000	> 88	nd	nd	Andalib et al. (2012)	
	Reator de mistura operado em modo semi contínuo	82000 - 101500	73 <sup>1</sup>	nd	nd	Banu et al. (2006)	
	Reator compartimentado híbrido anaeróbio	13533	88 <sup>1</sup>	nd	nd	Boopathy e Tilche (1991)	
	Reator de leito fixo	47800	73 <sup>1</sup>	97 <sup>1</sup>	nd	Bories et al. (1998)	
Processos físico-químicos	Ultrasom <sup>3</sup> + digestão aeróbia	100000 - 110000	60 <sup>1</sup>	nd	nd	Sangave e Pandit (2004)	
	Ozonização + Oxidação aeróbia + Ozonização	59000 - 62000	≈ 79	nd	nd	Sangave et al. (2006)	
		Oxidação aeróbia	≈ 39	nd	nd		
	Pré-tratamento termal + Ozonização + digestão aeróbia <sup>2</sup>	87000 - 90000	45,6	nd	nd	Sangave et al. (2007)	
	Pré-tratamento termal + Ultrasom + digestão aeróbia <sup>2</sup>		13	nd	nd		
	Fotocatálise (TiO <sub>2</sub> / Uv <sub>solar</sub> ) + lodos ativados <sup>3</sup>	40185,1	71	86,4	nd	Carrocci et al. (2012)	
	Ozonização + Eletrocoagulação	2500	83	nd	≈ 100	nd	Asaithambi et al (2012)
		Eletrofonton	4985	92,6	nd	nd	Yavus (2007)
	Coagulação-floculação (Tanino) + fotocatalise	51540	59 - 68	nd	nd	nd	Souza (2010)

(nd: não determinado; <sup>1</sup> Máxima eficiência de remoção encontrada; <sup>2</sup> Os processos físico-químicos consistem na principal etapa do sistema de tratamento; <sup>3</sup> O processo físico-químico consiste na etapa de pré-tratamento estudado)

Dentre os usos mais frequentes da vinhaça encontra-se a ferti-irrigação, que consiste em destinar a vinhaça gerada na produção de etanol para a fertilização de culturas. Devido ao alto conteúdo de macro e micronutrientes (N, P, K, S, Ca, Cu, Mn, Zn) e matéria orgânica presente na vinhaça (SATYAWALI, 2007; MOHANA *et al.*, 2009), ela possui alto potencial fertilizante, sendo assim, a ferti-irrigação torna-se um uso muito atrativo para este efluente.

Porém, existem alguns inconvenientes relacionados à ferti-irrigação com vinhaça. Dentre eles, Sheehan e Greenfield, (1980) citam que é necessária a existência de campos de aplicação adjacentes à destilaria, e esta área deve ter um volume médio-baixo de chuvas. Mohana *et al.* (2009) relatam que o alto teor de matéria orgânica, nitrogênio e fosfato presente na vinhaça, pode levar a eutrofização de corpos d'água se o seu manejo for realizado de forma inadequada. Estes mesmos autores afirmam que a cor da vinhaça pode provocar uma alteração da entrada de raios solares nos corpos d'água atingidos, diminuindo a atividade fotossintética e oxigênio dissolvido (OD), afetando a vida aquática.

Segundo Jain *et al.* (2005), a aplicação de vinhaça no solo sem o devido monitoramento pode afetar a qualidade da água subterrânea, na medida em que suas propriedades físico-químicas como pH, cor e condutividade elétrica são alteradas. Os autores Kannan e Upreti (2008) relatam altos efeitos tóxicos da vinhaça quando usada, mesmo em baixa concentração (5% v/v), ao crescimento e germinação de sementes de feijão-mungo (*Vigna radiata*).

Os autores Juwarkar e Dutta (1989) avaliaram os impactos decorrentes da aplicação da vinhaça no solo a sua microflora. Alguns dos impactos relatados foram: (1) diminuição da atividade bacteriana, (2) aumento na população de fungos, (3) as bactérias fixadoras de nitrogênio do gênero *Rhizobium* e *Azotobacter* tiveram sua atividade diminuída, (4) a aplicação de vinhaça tratada anaerobicamente gerou resultados similares, porém, menos intensos do que quando utilizada a vinhaça pura.

Ramana *et al.* (2002) avaliaram o efeito da aplicação de vinhaça pura (VP), vinhaça biodigerida (VB) e lodo de lagoas tratando vinhaça (L) em culturas de amendoim. Eles constataram que todos os estes efluentes aumentaram a quantidade total de clorofila, taxa de crescimento da cultura, matéria seca total, absorção de nutrientes (N, P e K). Porém, houve inibição da nodulação e fixação de nitrogênio como resultados negativos.

No estudo conduzido por Pathak *et al.* (1998), a utilização de vinhaça biometanizada diluída aumentou a produção de trigo e arroz. Como efeitos positivos da sua aplicação pode-se destacar o aumento do carbono orgânico e teor de potássio disponível nos solos, bem como a melhora na condutividade hidráulica, densidade aparente e conteúdo de água disponível no solo. Porém, o aumento da condutividade elétrica no solo indica que, com aplicações de grandes volumes deste efluente em longo prazo, pode haver salinização do solo.

Os efeitos da aplicação de vinhaça ao solo também foram estudados por Mahimairaja e Bolan (2004), constatando-se que a aplicação de vinhaça no solo em altas doses ( $> 250\text{m}^3\text{ha}^{-1}$ ) pode ser prejudicial ao crescimento das culturas e à fertilidade do solo. Já o seu uso em doses menores ( $125\text{m}^3\text{ha}^{-1}$ ) promove a melhora na germinação e crescimento das culturas. A aplicação da vinhaça também resultou numa melhora na atividade enzimática e bacteriana dos solos. Porém, também foi constatado que sua alta carga orgânica tende a diminuir o seu potencial nutritivo, além disso, a contaminação de água superficial e subterrânea e a acumulação de sal nos solos podem gerar diversos problemas ambientais.

Em uma revisão crítica sobre os impactos gerados a partir da ferti-irrigação com vinhaça, Fuess e Garcia (2014) constataam alguns dos problemas relacionados à utilização da vinhaça *in natura* para ferti-irrigação: (1) salinização dos solos, (2) obstrução dos poros, (3) redução da atividade microbiana e depleção de oxigênio dissolvido em corpos d'água; (4) contaminação de corpos d'água devido à concentração de nitratos, levando a sua eutrofização, (5) desestabilização da estrutura dos solos devido às altas concentrações de sódio e potássio e (6) possível acidificação do solo e recursos hídricos devido ao baixo pH da vinhaça. Os autores, por fim, destacam a necessidade de tratamento da vinhaça para que sua utilização na ferti-irrigação torne-se adequada ao meio-ambiente.

### **3.3 Fundamentos de coagulação-floculação**

O termo “coagulação química” inclui as reações e mecanismos que desestabilizam as partículas coloidais, formando partículas maiores através da floculação pericinetica. Os coagulantes são as substâncias químicas que permitem a

formação dos flocos<sup>1</sup> (METCALF & EDDY, 2003), sendo que os mais utilizados são os sais de ferro e alumínio.

A coagulação resulta de dois fenômenos: o primeiro é essencialmente químico e consiste nas reações do coagulante com a água residuária e na formação de espécies hidrolisadas com carga positiva. Já o segundo é fundamentalmente físico, consistindo no transporte das espécies hidrolisadas a fim de que haja contato entre as impurezas presentes na água residuária. Este processo depende, fundamentalmente, das características do efluente e das impurezas presentes (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

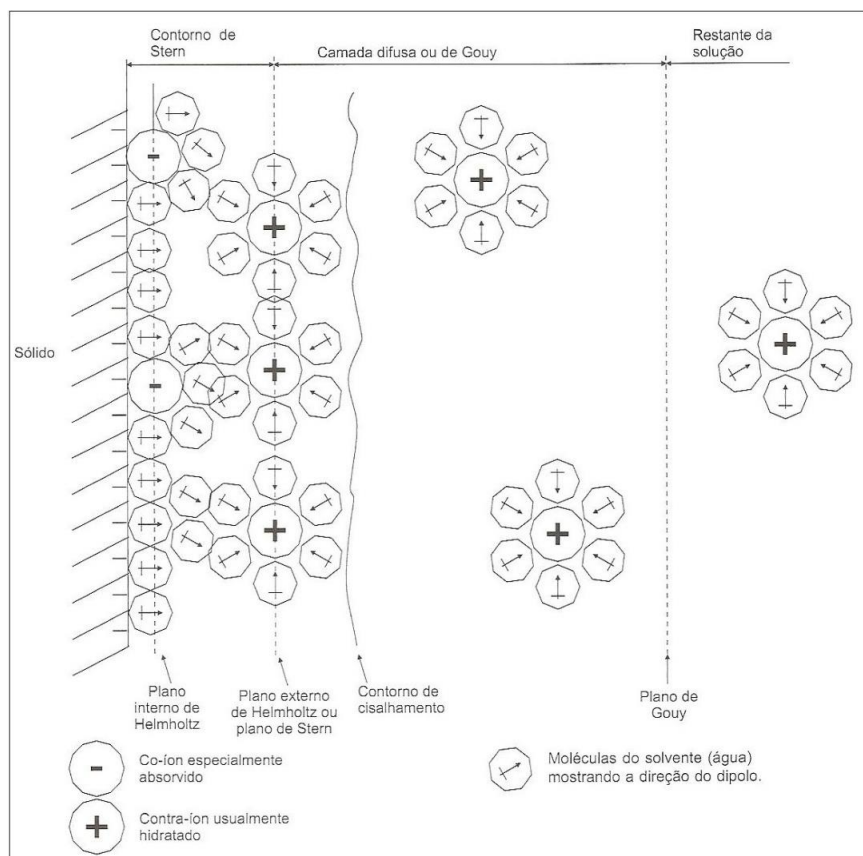


Figura 2. Representação esquemática da dupla camada elétrica nas vizinhanças de uma interface sólido-líquido (DI BERNARDO; DANTAS, 2005)

Em geral, os colóides se apresentam com carga superficial negativa, ocorrendo um balanço com íons de carga oposta presentes na água, fazendo com que o sistema não apresente carga elétrica “líquida”. Sendo negativa a superfície da partícula coloidal, íons positivos se acumulam na interface sólido-líquido. Íons de carga oposta aos últimos se acumulam na interface e, juntamente com a carga primária formam a Dupla Camada

<sup>1</sup> Diferentemente do floculante, que é uma substância geralmente orgânica, utilizada para melhorar o processo de floculação. (METCALF & EDDY, 2003)

Elétrica (DCE). Desse modo, a formação da DCE resulta da atração eletrostática de íons de carga oposta aos da partícula, repulsão eletrostática de íons de mesma carga, e difusão térmica. A DCE consiste de uma camada compacta e uma camada difusa, esta divisão ocorre devido à agitação térmica, que impede a formação de uma só camada (AWWA, 1999; DI BERNARDO; DANTAS, 2005). Na Figura 2 é apresentada a representação esquemática da DCE.

A elevada concentração de íons positivos ao redor do colóide é chamada Camada de Stern. O potencial elétrico criado pela presença do colóide na água é chamado Potencial de Nernst e diminui com a distância. Segundo Stern, há uma distância mínima entre a superfície do colóide e os contra-íons, na qual o potencial elétrico decresce linearmente. Ao passar pela fronteira das camadas compacta e difusa, esta diminuição é exponencial, sendo que o potencial elétrico passa a se chamar Potencial Zeta (PZ). (Figura 3) (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

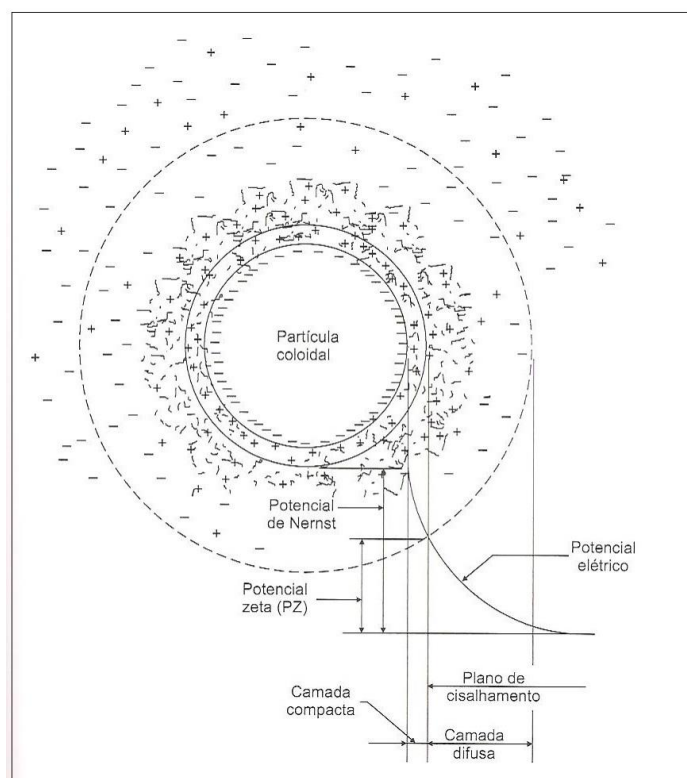


Figura 3. Configuração esquemática da dupla camada elétrica (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

A coagulação pode ocorrer por ação individual ou combinada de quatro mecanismos:

- **Compressão da Dupla Camada Elétrica:** A adição de colóides de carga oposta à carga líquida da superfície das partículas faz com que aqueles entrem na camada difusa, circundando estas. Se a quantidade de contra-íons adicionada for suficiente, a camada

difusa é comprimida, reduzindo a energia requerida para mover duas partículas de mesma carga em contato próximo, ocorrendo coagulação (AWWA, 1999).

- **Adsorção e neutralização de carga:** Compostos de coagulantes com carga oposta à carga líquida das partículas suspensas são adsorvidos (aderidos) às mesmas, neutralizando e/ou diminuindo a sua carga. Os coagulantes utilizados para efetuar este processo devem ter uma grande tendência de se adsorverem a superfícies. Como exemplo, tem-se os polieletrólitos naturais e sintéticos, bem como os produtos de hidrólise de sais metálicos. (AWWA, 1999; METCALF & EDDY, 2003).
- **Varredura:** Dependendo das variáveis utilizadas no processo (quantidade de coagulante, pH da mistura, concentração de alguns íons na água), é favorecida a formação de precipitados do tipo  $\text{Al}(\text{OH})_3$  ou  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . Os flocos formados por este mecanismo são maiores e sedimentam mais rapidamente (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).
- **Adsorção e formação de pontes:** Ocorre quando segmentos de um polímero de alto peso molecular se adsorvem em mais de uma partícula, fazendo com que as partículas se agrupem (AWWA, 1999).

A mistura rápida tem a finalidade de dispersar o coagulante no efluente de forma a obter o maior grau possível de homogeneização, buscando a distribuição uniforme do coagulante para que todas as partículas tenham contato com ele. A mistura rápida considera movimentos com tempo menor do que 30s.

Esta operação é importante em várias fases do tratamento de efluentes, incluindo: mistura completa de substâncias, mistura de líquidos miscíveis, floculação das partículas do efluente, mistura contínua de suspensões líquidas e transferência de calor (METCALF & EDDY, 2003).

O termo “floculação” é utilizado para descrever o processo de aumento do tamanho das partículas em decorrência das colisões. Conforme abordado anteriormente, o “coagulante” permite a formação dos flocos e o “floculante”, substância geralmente orgânica, é adicionado para melhorar o processo de floculação. O intuito da floculação é a agregação de partículas a fim de que possam ser removidas por processos de separação não onerosos, como sedimentação e filtração (METCALF & EDDY, 2003).

Há dois tipos de floculação (Figura 4):

- I. **Microfloculação:** Também chamada de floculação pericinética, consiste na agregação promovida pelo movimento termal aleatório de moléculas fluidas (Movimentação

Browniana). Este tipo de floculação é significativa para partículas com tamanho entre 0,001 e 1  $\mu\text{m}$  (METCALF & EDDY, 2003).

**II. Macrofloculação:** Também chamada de floculação ortocinética, é promovida pela ação de gradientes de velocidade e mistura do fluido. Pode ocorrer por:

1. Indução de gradientes de velocidade: Nesta operação, as partículas mais rápidas ultrapassam as mais lentas num campo de velocidade. Com a colisão das partículas, elas permanecem juntas, facilitando a remoção por gravidade (METCALF & EDDY, 2003).
2. Sedimentação diferencial: Ocorre quando as partículas maiores ultrapassam as menores durante a sedimentação gravitacional. Ocorrendo agregação das partículas, forma-se uma partícula maior, que sedimenta numa taxa maior do que as separadas (METCALF & EDDY, 2003).

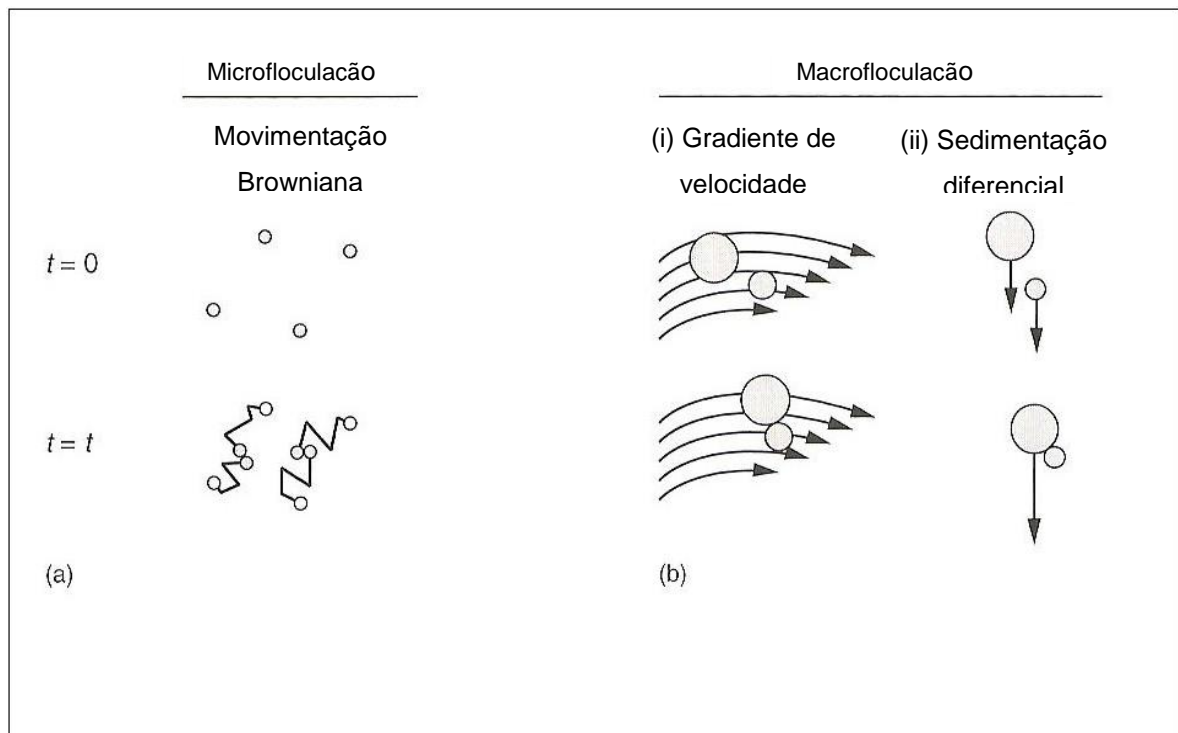


Figura 4. Ilustração esquemática dos dois tipos de floculação: (a) microfloculação e (b) macrofloculação devido a (i) indução de gradientes de velocidade e (ii) sedimentação diferencial (Modificado de METCALF & EDDY, 2003).

A utilização de polímeros como auxiliares de floculação é amplamente considerada por diminuir a necessidade de coagulante primário utilizada. Estes polímeros são empregados com o objetivo de aumentar a velocidade de sedimentação dos flocos e reduzir a ação das forças de cisalhamento nos flocos. (DI BERNARDO; DANTAS, 2005). Os polímeros utilizados podem ser sintéticos ou naturais (amidos, em

geral) sendo importantes por não oferecerem risco ao meio ambiente nem à população. Na Figura 5 apresenta-se a formação de flocos devido a pontes formadas pela ação de polímeros.

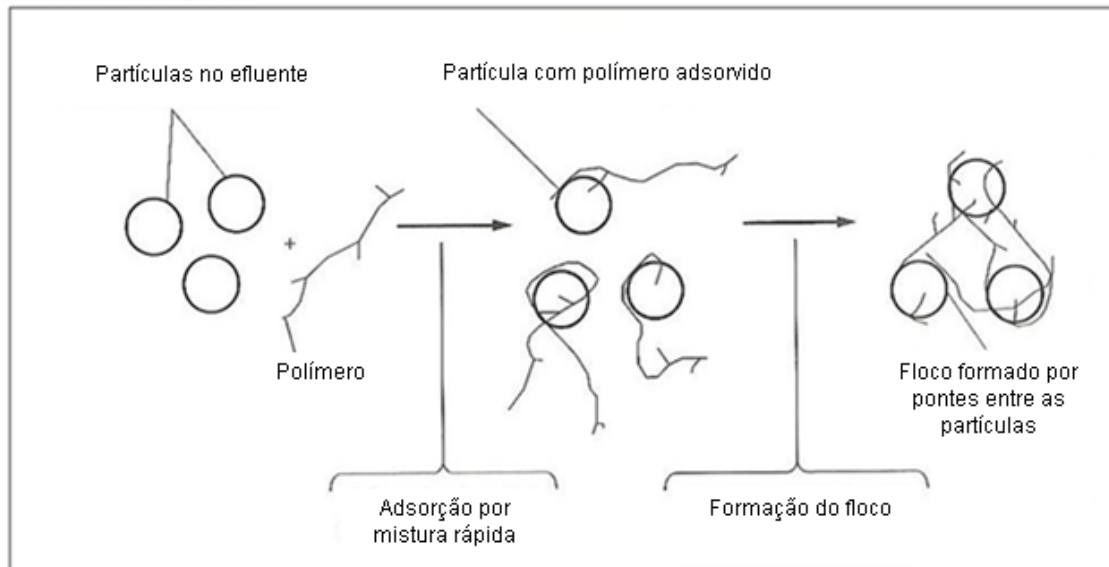


Figura 5. Formação de flocos devido a pontes formadas pela ação de polímeros (METCALF & EDDY, 2003).

A sedimentação consiste na remoção de partículas sólidas de uma corrente líquida por sedimentação gravitacional. Esta operação unitária é dividida em (CHEREMISINOFF, 2002):

- Espessamento: Aumento na concentração da corrente de alimentação;
- Clarificação: Remoção de sólidos de uma corrente relativamente diluída.

A literatura apresenta alguns trabalhos baseados no emprego de processos físico-químicos no tratamento da vinhaça, utilizando-se diferentes coagulantes. Na Tabela 4 são compilados alguns trabalhos e as eficiências de remoção obtidas a partir do tratamento físico-químico da vinhaça.

Gonçalves e Silva (2000) realizaram tratamento físico químico de vinhaça bruta utilizando óxido de cálcio e sulfato ferroso como coagulantes. Após os experimentos, foram ajustadas funções que relacionaram as variáveis de pH,  $G_{mr}$ ,  $T_{mr}$ ,  $G_f$  e  $T_f$  para obter-se a otimização da remoção de DQO. Tal prática demonstrou a pouca significância da variação dos parâmetros de  $G_f$  e  $T_f$  para remoção do parâmetro estudado. Os melhores resultados obtidos foram para óxido de cálcio e sulfato ferroso,

com valores de pH próximos de 12,41, cuja remoção de DQO foi de 52% e 44% respectivamente.

Tabela 4. Eficiências de tratamento obtida a partir do emprego de diferentes coagulantes ao tratamento físico-químico da vinhaça

Água residuária <sup>a</sup>		Coagulante	Dosagem (g·L <sup>-1</sup> )	Eficiência de Remoção (%)			Referência
DQO (g·L <sup>-1</sup> )	pH			DQO	Cor	Turbidez	
nd	6	Cloreto férrico	1,7	53	60	nd	Arturo et al. (1996)
		Sulfato de alumínio	2,5 - 3,3	30	70	nd	
nd	3,0 - 4,5	Cloreto férrico	3,2	nd	96,55	nd	Migo et al. (1997)
8520	8,4	Cloreto férrico	20	84	98,4	99,2	Zayas et al. (2007)
4500	7,4	Cloreto férrico	2,4 - 3,2	80	88	nd	Ryan et al. (2008)
		Sulfato de alumínio	1,1 - 1,5	50	89	nd	
1750 - 1800	8,0 - 8,2	Cloreto férrico	6,5	89	98	nd	Liang et al. (2009)
		Sulfato de alumínio	8	66	86	nd	
950 - 1000	7,9 - 8,1	Cloreto férrico	3,5	85	96	nd	Liang et al. (2010)
		Sulfato de alumínio	5	64	89	nd	
35150 - 58390	4,65 - 4,78	Cloreto férrico	3 - 12	14 - 37	10 - 62	76 - 78	Souza (2010)
nd	9,59 - 12,41	Óxido de cálcio	1,18 - 6,82	30 - 44	nd	87 - 99	Gonçalves e Silva (2000)
	9,59 - 12,41	Sulfato ferroso	1,18 - 6,82	31 - 52	nd	85 - 98	

<sup>a</sup> Características antes do processo de coagulação-floculação

nd: não determinado

Arturo *et al.* (1996) realizaram tratamento físico-químico de efluente de reator anaeróbio tratando vinhaça proveniente da produção de tequila. Os coagulantes utilizados (de maneira isolada ou mesclados) foram sulfato de alumínio, sulfato férrico, cloreto férrico, permanganato de potássio, e coagulante comercial da marca 'COLFLOC'. Considerando-se os aspectos econômicos, os resultados mais atrativos foram obtidos para sulfato de alumínio (2 g.L<sup>-1</sup>), com eficiências de remoção de 70% para cor e 37% para DQO e sulfato de alumínio combinado com cloreto férrico (1,5 – 1 g.L<sup>-1</sup>), com eficiências de remoção de 82% para cor e 41% para DQO.

Zayas *et al.* (2007) investigaram os processos de coagulação e floculação (CF) seguidos por oxidação eletroquímica (OE) de efluentes de reatores anaeróbios tratando vinhaça; o coagulante utilizado foi cloreto férrico. Os experimentos mostraram que, os processos físico-químicos para uma concentração de coagulante de 20 g.L<sup>-1</sup>, a um pH

8,4 obtiveram eficiência de remoção de 84% para DQO e ~99% para cor e turbidez. A etapa subsequente (OE) mostrou-se satisfatória, removendo mais de 95% de DQO e aproximadamente 100% de cor e turbidez.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Coleta do efluente

O estudo aqui apresentado, consiste no primeiro trabalho de pós-tratamento de vinhaça do grupo de pesquisa “Auditoria, Certificação e Gerenciamento Socioambiental (ACert)” lotado no Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE) – Unesp *Campus* Rio Claro. As amostras utilizadas compreenderam o efluente de reator anaeróbico de leito fixo aplicado no tratamento de vinhaça bruta, operado em escala de bancada, em fluxo contínuo, no Laboratório de Processos Biológicos da Escola de Engenharia de São Carlos (LPB/EESC/USP). A amostragem foi realizada durante períodos de operação estável do reator, que continha todos os parâmetros operacionais fixados em condições acidogênicas. O programa de amostragem consistiu em três coletas, de acordo com a disponibilidade de vinhaça oriunda do reator e do uso da mesma nos ensaios de coagulação e floculação. A coleta foi realizada em recipientes com capacidade volumétrica de 10 ou 20L, buscando-se a homogeneização das amostras. Adianta-se a necessidade de diluição (1:10) das amostras para realização dos ensaios, tendo em vista limitações relacionadas à disponibilidade do efluente do reator, ao elevado volume de amostras requerido durante a realização dos ensaios e à interrupção na geração de vinhaça devido à entressafra da cana-de-açúcar.

Após a realização dos ensaios com vinhaça acidificada, ou seja, submetida a tratamento em reator anaeróbico fixado em condições acidogênicas, optou-se por realizar ensaios testando vinhaça bruta, acidificada e metanizada, buscando-se avaliar as diferenças nas eficiências de remoção de parâmetros físico-químicos obtidas a partir do tratamento dos diferentes tipos de vinhaça.

### 4.2 Análises experimentais

O equipamento do tipo Jarteste (Figura 6) foi utilizado na realização dos ensaios. Este equipamento possui paletas giratórias com ajuste de rotação com mostrador digital, capazes de imprimir gradientes de velocidade entre 10 e 2000  $s^{-1}$ , possibilitando que a unidade seja empregada nas etapas de mistura rápida, mistura lenta (floculação) e sedimentação. Os ensaios EA<sub>1-3</sub> (Ensaio utilizando-se Amido como coagulante 1 a 3)

e os ECF<sub>1-10</sub> (Ensaio utilizando-se Cloreto Férrico como coagulante 1 a 10) foram realizados no Laboratório de Tratamento e Reuso de Água e Resíduos (LATARE), localizado no Centro de Estudos Ambientais (CEA) da Unesp – *Campus* de Rio Claro. Os ensaios ECF<sub>11-13</sub> (Ensaio utilizando-se Cloreto Férrico como coagulante 11 a 13) foram realizados no Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Águas (LATAR), localizado no Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP).

As amostras iniciais e finais dos ensaios em Jarreste foram analisadas a partir de alguns parâmetros físico-químicos, buscando-se avaliar o desempenho dos processos de coagulação e floculação aplicados no efluente do reator anaeróbio. Os seguintes parâmetros foram analisados: pH, cor, turbidez e DQO, de acordo com as metodologias descritas no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA/AWWA/WEF, 2012).

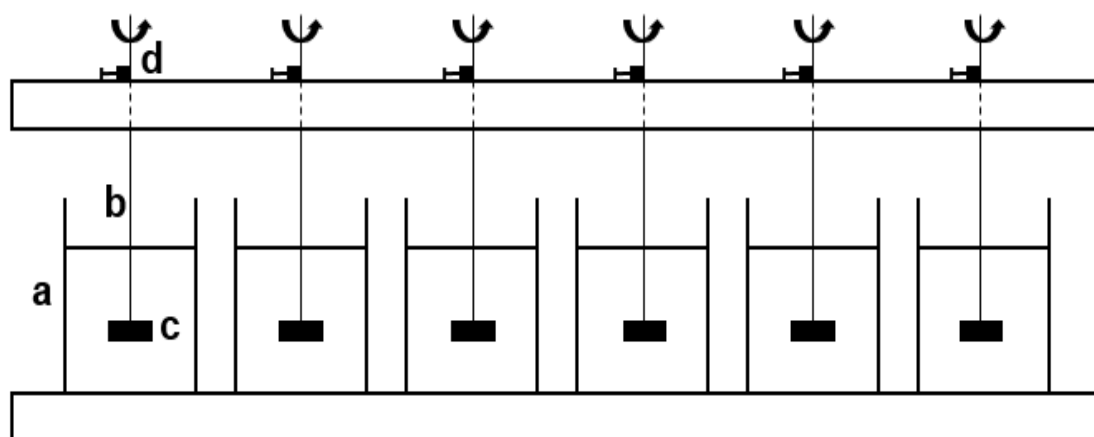


Figura 6. Esquema do equipamento Jarreste utilizado nos ensaios de laboratório. (a: Jarros em acrílico; b: haste rotativa; c: paletas giratórias; d: trava).

No ECF<sub>9</sub>, realizado a partir do emprego das condições experimentais ajustadas, a caracterização das amostras incluiu, além dos parâmetros citados anteriormente, a determinação das concentrações de potássio (K); nitrogênio amoniacal (NH<sub>3</sub>); nitrito (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>); nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>); sulfato (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>); alcalinidade; condutividade; Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO); e, série de sólidos – sólidos suspensos totais, voláteis e fixos (SST, SSV e SSF); Alumínio (Al); Boro (B); Bário (Ba); Cálcio(Ca); Cádmi(Cd); Cobalto(Co); Cromo(Cr); Cobre(Cu); Fe(Ferro); Magnésio(Mg); Manganês(Mn); Molibidênio(Mo); Sódio(Na); Níquel(Ni); Chumbo(Pb); Estrôncio(Sr);

Vanádio(V); Zinco(Zn) e Cloro(Cl). A Tabela 5 apresenta os métodos de análise utilizados para a determinação dos parâmetros mencionados.

Tabela 5 . Métodos de análise utilizados para a determinação dos parâmetros

<b>Parâmetro</b>	<b>Método</b>
Alcalinidade total	Titulometria potenciométrica
Condutividade Elétrica	Potenciometria
Cor Aparente	Espectrofotometria
DBO	Inoculação/Diferença de pressão
DQO	Digestão/Espectrofotometria
Nitrito	Diazotação/Espectrofotometria
Nitrato	Redução de cádmio/Espectrofotometria
Nitrogênio Total	Kjeldahl + Nitrito + Nitrato
Potássio	Espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado
Sulfato	Espectrofotometria
pH	Potenciometria
Sólidos Dissolvidos Totais	Potenciometria
Sólidos Suspensos Totais	Gravimetria
Sólidos Suspensos Voláteis	Gravimetria/Calcinação
Sólidos Suspensos Fixos	Gravimetria/Calcinação
Metais (Al, Ba, B, Cd, Ca, Pb, Co, Cu, Cr, Sr, Fe, Mg, Mn, Mo, Ni, Na, V e Zn)	Espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado
Turbidez	Nefelometria

<sup>a</sup>Nitrogênio Kjeldahl corresponde à soma das concentrações de nitrogênio nas formas orgânica (N<sub>org</sub>) e amoniacal (NH<sub>3</sub>) (ABNT, 1997).

### 4.3 Ensaios

#### 4.3.1 Solução de Amido como Coagulante

Foram realizados três ensaios (EA<sub>1</sub>, 2 e 3) utilizando-se solução de amido 0,2% (m/v) como coagulante. Dada a ineficiência constatada nestes ensaios - a qual será abordada na seção de Resultados e Discussão -, optou-se por cessar com estes ensaios. Os parâmetros utilizados nos três ensaios são apresentados na Tabela 6. Nos EA<sub>2</sub> e EA<sub>3</sub> o pH inicial foi ajustado para 7 utilizando-se NaOH 0,1 M. Este ajuste foi realizado buscando-se melhorar os resultados obtidos.

Tabela 6. Parâmetros utilizados nos ensaios utilizando-se solução de amido.

Parâmetro	Ensaio		
	EA <sub>1</sub>	EA <sub>2</sub>	EA <sub>3</sub>
Coagulante (mg.L <sup>-1</sup> )	1-6 <sup>a</sup>	1-6 <sup>a</sup>	20-120 <sup>b</sup>
T <sub>mr</sub> (s)	10	10	10
G <sub>mr</sub> (rpm)	500	500	500
T <sub>f</sub> (min)	30	30	30
G <sub>f</sub> (rpm)	50	50	50
T <sub>s</sub> (min)	20	20	20

Intervalos de variação: <sup>a</sup> 1mg.L<sup>-1</sup>; <sup>b</sup> 20mg.L<sup>-1</sup>.

#### 4.3.2 Cloreto Férrico como Coagulante

O cloreto férrico utilizado nos ensaios foi cedido pela empresa Nheel Química LTDA., localizada na cidade de Rio Claro – SP. A Tabela 7 apresenta os valores de densidade e porcentagem de FeCl<sub>3</sub> da amostra de cloreto férrico utilizada.

Tabela 7. Parâmetros da amostra de cloreto férrico utilizada.

Parâmetros	Resultado
Densidade (g/ml)	1,414
% FeCl <sub>3</sub>	39,32%

Os parâmetros do processo de coagulação-floculação utilizados nos ensaios utilizando-se cloreto férrico como coagulante, buscando-se a adequação dos parâmetros dos processos físico-químicos (ECF<sub>1</sub> – ECF<sub>9</sub>) são apresentados na Tabela 8. Também foi realizado um ensaio para avaliar a influência da variação do pH inicial para os processos de coagulação-floculação, o qual (ECF<sub>10</sub>) será detalhado posteriormente Resultados e Discussão. Já os ensaios ECF<sub>11</sub> – 13, buscaram comparar a diferença nas eficiências de tratamento das vinhaças bruta, acidificada e metanizada.

Tabela 8. Parâmetros utilizados nos ensaios utilizando-se cloreto férrico 40 %

Parâmetros	Ensaio								
	ECF <sub>1</sub>	ECF <sub>2</sub>	ECF <sub>3</sub>	ECF <sub>4</sub>	ECF <sub>5</sub>	ECF <sub>6</sub>	ECF <sub>7</sub>	ECF <sub>8</sub>	ECF <sub>9</sub>
<b>Dc (g.L<sup>-1</sup>)</b>	1-25 <sup>a</sup>	0,5-3 <sup>b</sup>	1-2 <sup>c</sup>	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
<b>Concentração Fe<sup>3+</sup> (mg.L<sup>-1</sup>)</b>	0,14-3,54	0,07-0,41	0,14-0,27	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
<b>T<sub>mr</sub> (s)</b>	10	10	10	10	10	10	6-14 <sup>f</sup>	10	10
<b>G<sub>mr</sub> (rpm)</b>	200	200	200	200	200	200	200	150-400 <sup>g</sup>	325
<b>T<sub>f</sub> (min)</b>	30	30	30	30	10-35 <sup>d</sup>	20	30	30	20
<b>G<sub>f</sub> (rpm)</b>	50	50	50	50	50	25-70 <sup>e</sup>	50	50	65
<b>T<sub>s</sub> (min)</b>	20	20	20	5-30 <sup>d</sup>	20	20	20	20	20

Intervalos de variação: <sup>a</sup> 5 g.L<sup>-1</sup>; <sup>b</sup> 0,5 g.L<sup>-1</sup>; <sup>c</sup> 0,2 g.L<sup>-1</sup>; <sup>d</sup> 5 min; <sup>e</sup> 25-35-50-60-65-70; <sup>f</sup> 2s; <sup>g</sup> 150-175-200-225-250-275-325-400 rpm; <sup>h</sup> 4,3-4,8-5,3-5,0-5,0-5,0.

#### 4.4 Metodologia para análise de reuso da vinhaça na agricultura

Este trabalho teve, como objetivo específico, a análise do reuso da vinhaça após tratamento anaeróbio seguido por processo de coagulação-floculação. A metodologia utilizada para a análise da potencialidade de reuso da vinhaça na agricultura envolveu a comparação dos dados obtidos nesta pesquisa com instruções normativas e recomendações nacionais e internacionais, as quais são listadas a seguir:

- CETESB – Norma técnica P4.230 – Aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas - critérios para projeto e operação;
- CETESB - Decisão da diretoria no. 195-2005-E, de 23 de novembro de 2005;
- CETESB Norma técnica P4.231 – Vinhaça: critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola Dez/2006;
- U.S Environmental Protection Agency – Guidelines for water reuse. 2012;
- World Health Organization – Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. Volume II: wastewater use in agriculture, 2006.

A Portaria no. 323 do Ministério do Interior publicada em 23 de novembro de 1978 determinou a proibição do lançamento direto ou de vinhaça em corpos hídricos,

consequentemente, novas alternativas deveriam surgir para possibilitar a disposição correta deste efluente. A Norma técnica P4.231 da CETESB determina a dosagem máxima de vinhaça (Equação 1) a ser aplicada em solos agrícolas baseando-se na Capacidade de Troca Catiônica (CTC) do solo e na concentração de potássio na vinhaça aplicada.

$$m^3 \text{ de vinhaça/ha} = \frac{[(0,05 \text{ CTC} - ks)3744 + 185]}{kvi} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

- 0,05 = 5% da CTC;
- CTC = Capacidade de Troca Catiônica, expressa em  $\text{cmolc.dm}^{-3}$ ;
- ks = concentração de potássio no solo, expresso em  $\text{cmolc.dm}^{-3}$ , à profundidade de 0 a 0,80 metros;
- 3744 = constante para transformar os resultados da análise de fertilidade, expressos em  $\text{cmolc.dm}^{-3}$  ou  $\text{meq.100cm}^{-3}$ , para kg de potássio em um volume de 1 (um) hectare por 0,80 metros de profundidade;
- 185 = massa, em kg, de  $\text{K}_2\text{O}$  extraído pela cultura por hectare, por corte;
- kvi = concentração de potássio na vinhaça, expressa em  $\text{kg de K}_2\text{O.m}^{-3}$ .

Nesta metodologia, foi calculada a dosagem máxima de vinhaça passível de aplicação em solos cujas características são reportadas em diversos trabalhos da literatura. Dessa forma, buscou-se analisar a adequabilidade da vinhaça para o solo, não somente em termos da concentração de potássio, mas também relativamente ao seu conteúdo em metais e outros compostos, admitindo-se que estas características poderiam tornar o efluente danoso ao solo e às culturas.

Para efeito de simplificação dos cálculos realizados, considerou-se que a concentração de potássio encontrada na vinhaça corresponde à concentração de  $\text{K}_2\text{O}$ . Considerou-se também uma profundidade de 0,8m de solo, conforme solicitado pela Equação 1.

Foi realizado o cálculo de dosagem máxima de vinhaça a ser aplicado nos solos reportados em trabalhos da literatura para quatro condições: vinhaça bruta, vinhaça bruta diluída e efluentes inicial e final apresentados neste trabalho. Considerando que, todo o conteúdo de metais do efluente seria transferido ao solo após a aplicação dos efluentes, não ocorrendo perdas ou transformações, confrontou-se a concentração de

metais (Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Zn) que seria encontrada nestes solos com os valores orientadores reportados na Decisão da diretoria no. 195-2005-E, de 23 de novembro de 2005 (CETESB). Os solos utilizados para a realização dos cálculos e suas características, são indicados na Tabela 9.

Dessa forma, verificou-se qual efluente seria o mais adequado para a aplicação em solo agrícola: vinhaça bruta, vinhaça bruta diluída e efluentes inicial (vinhaça após tratamento biológico) e final (vinhaça após tratamento biológico e físico químico) obtidos a partir do tratamento realizado nesta pesquisa.

Tabela 9. Características dos solos utilizados para o cálculo de dosagem máxima de vinhaça a ser aplicada conforme orientações da CETESB

<b>Solo</b>	<b>K<sub>solo</sub>(cmolc.dm<sup>-3</sup>)</b>	<b>CTC<sub>solo</sub>(cmolc.dm<sup>-3</sup>)</b>	<b>Referência</b>
<b>Solo 1</b>	0,13	2,24	Pires e Ferreira,2008
<b>Solo 2</b>	0,17	3,98	Pires e Ferreira,2008
<b>Solo 3</b>	0,36	4,77	Pires e Ferreira,2008
<b>Solo 4 Hor AP</b>	2,25	10,91	Rolim <i>et al</i> , 2010
<b>Solo 4 Hor A2</b>	1,78	8,08	Rolim <i>et al</i> , 2010
<b>Solo 4 Hor E</b>	0,15	4,38	Rolim <i>et al</i> , 2010
<b>Solo 4 Hor Bh</b>	0,61	5,23	Rolim <i>et al</i> , 2010
<b>Solo 4 Hor Bsh</b>	0,66	5,26	Rolim <i>et al.</i> , 2010
<b>Solo 5 Testemunho<sup>1</sup></b>	0,05	3,23	Zolin <i>et al.</i> , 2011
<b>Solo 5 20 apl. <sup>2</sup></b>	0,14	4,19	Zolin <i>et al.</i> , 2011

Hor: Horizonte do solo analisado. <sup>1</sup>: Solo sem nenhum tipo de aplicação de fertilizantes.  
<sup>2</sup>: Solo após 20 aplicações de vinhaça.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Ensaio utilizando-se solução de amido como coagulante

Os ensaios utilizando-se solução de amido como coagulante resultaram em eficiências de remoção consideravelmente instáveis. Conforme observado na Figura 7 e na Tabela 10, para as dosagens de coagulante de 1,0 mg.L<sup>-1</sup> e 4,0mg.L<sup>-1</sup>, as eficiências de remoção de DQO variaram entre 0 – 72,8% e 27,7% e 96,6%, respectivamente. O mesmo padrão instável pode ser observado para as outras dosagens de coagulante. Somente as eficiências de remoção de cor resultaram em valores semelhantes, porém, pouco satisfatórios, assim como as eficiências de remoção de turbidez.

No EA<sub>3</sub>, em que foram testadas dosagens de coagulante na faixa de 20-120 mg.L<sup>-1</sup>, as remoções máximas de DQO e turbidez foram de 47,1 e 22,9 respectivamente. Porém, não observou-se remoção de cor. Os resultados visuais dos EA<sub>1-3</sub> podem ser observados na Figura 7.

Tabela 10. Comparação entre os resultados obtidos no EA<sub>1</sub> e EA<sub>2</sub>

Dosagem da solução de amido (mg.L <sup>-1</sup> )		1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	
ER (%)	DQO	EA <sub>1</sub>	72,8	61,4	68,7	27,7	0	20,5
		EA <sub>2</sub>	0	26,4	7,9	96,6	34,1	79,5
	Cor	EA <sub>1</sub>	30,0	25	25,0	30,0	22,5	10,0
		EA <sub>2</sub>	46,5	44,4	46,5	43,4	44,4	45,4
	Turbidez	EA <sub>1</sub>	0	0	0	13,7	0	0
		EA <sub>2</sub>	19,4	21,2	14,7	0	0	10,6

A baixa eficiência obtida no processo de coagulação utilizando-se solução de amido pode estar associada ao caráter não iônico do polímero testado, já que o mecanismo de pontes entre as partículas pode ter sido incapaz de desestabilizar as partículas coloidais presentes nas amostras de vinhaça. A ineficiência deste processo também pode estar relacionada à aplicação de velocidades de mistura insuficientes, visto que esta condição tende a impedir o contato entre as cadeias de polímero e as partículas coloidais. A melhora na eficiência de tratamento poderia ser obtida ativando-se a solução de amido previamente aos testes de coagulação, por exemplo pela adição de pequenos grupos iônicos ou hidrofóbicos nas cadeias já separadas devido ao

aquecimento (XING *et al.*, 2005). Por consistir em uma alternativa interessante do ponto de vista econômico e ambiental, novos ensaios utilizando-se solução de amido como coagulante e/ou auxiliar de coagulação deveriam ser realizados em pesquisas posteriores a esta.

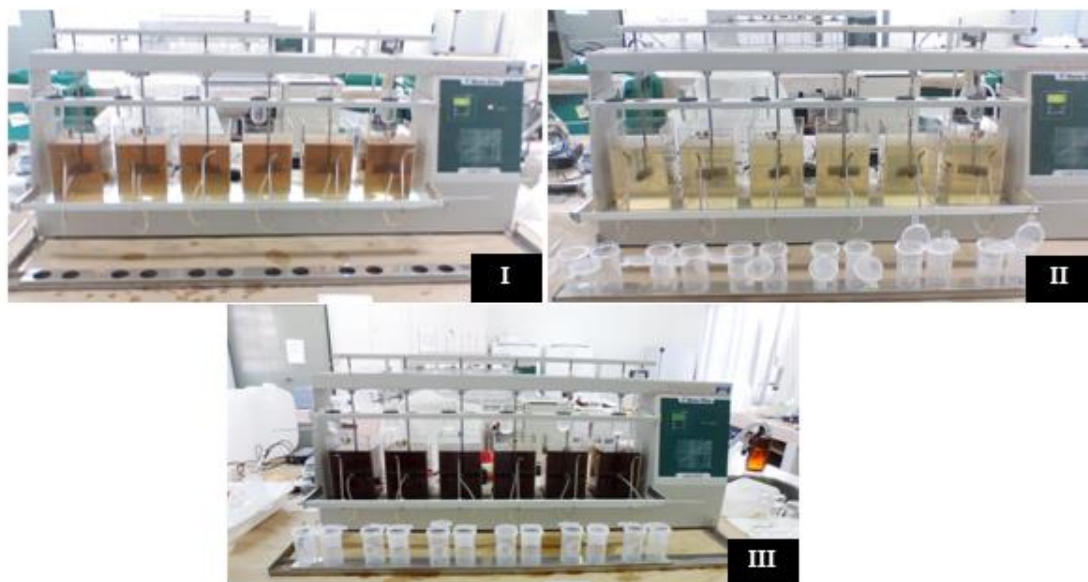


Figura 7. Resultados finais obtidos nos EA 1 (I), 2 (II) e 3 (III).

## 5.2 Ensaio utilizando-se cloreto férrico como coagulante

Utilizando-se cloreto férrico como coagulante, obteve-se eficiências médias de cor, turbidez e DQO de 81,5; 87,2 e 42,7 respectivamente. A Figura 8 apresenta outros valores relativos ao desempenho do tratamento. As faixas de eficiência de remoção de cor, turbidez e DQO para cada ensaio, bem como as condições ajustadas de coagulação-floculação são apresentadas na Tabela 11.

A partir da análise dos gráficos apresentados na Figura 8, nota-se um efeito significativo das concentrações de cloreto férrico para o desempenho do processo, conforme será discutido posteriormente. A utilização de baixas concentrações deste coagulante não foi suficiente para desestabilizar as partículas presentes no efluente, não sendo efetivas para o seu tratamento. Já o seu excesso, possibilita a estabilização elétrica (re-polimerização) das melanoidinas, resultando na elevação do parâmetro de cor. (LIANG *et al.*, 2009; LIANG *et al.*, 2010; SOUZA, 2010). Observa-se que, as

melhores eficiências de remoção ocorrem com a utilização da dosagem de  $1,6 \text{ g.L}^{-1}$  de cloreto férrico (Tabela 11).

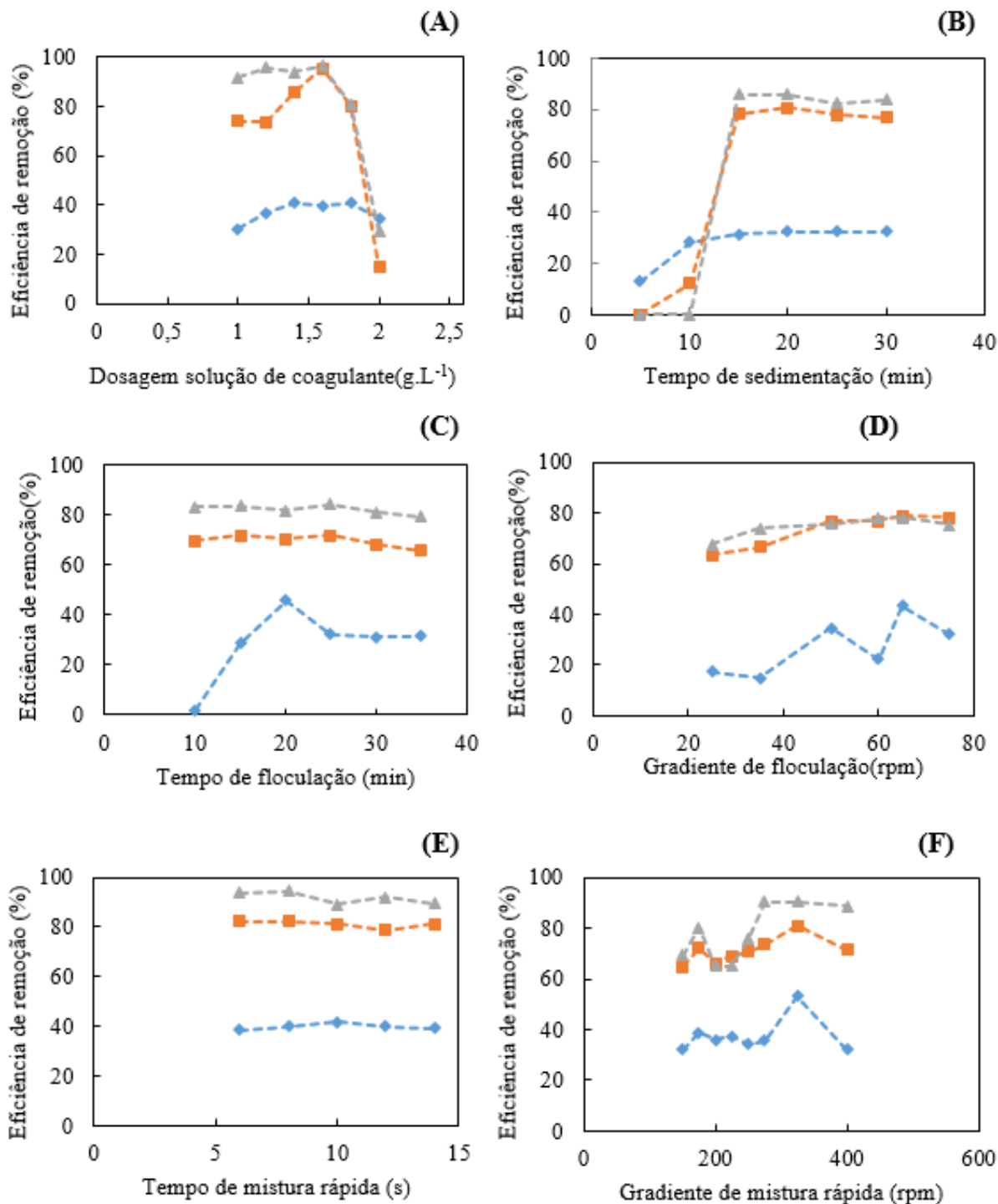


Figura 8. Eficiências de remoção de DQO [◆], cor [■] e turbidez [▲] nos ensaios de otimização dos parâmetros de: (A) dosagem de coagulante ( $\text{ECF}_3$ ), (B) tempo de sedimentação ( $\text{ECF}_4$ ), (C) tempo de floculação ( $\text{ECF}_5$ ), (D) gradiente de floculação ( $\text{ECF}_6$ ), (E) tempo de mistura rápida ( $\text{ECF}_7$ ) e (F) gradiente de mistura rápida ( $\text{ECF}_8$ ).

Ainda observando-se a Tabela 11 e a Figura 8, nota-se que as eficiências de remoção dos parâmetros analisados param de aumentar após 20 minutos de tempo de sedimentação. As eficiências de remoção de cor e turbidez também não são muito afetadas com a variação do tempo de floculação, no entanto, as eficiências de remoção de DQO atingem seus valores máximos com tempo de floculação igual a 20 minutos. Com relação ao gradiente de floculação, sua variação tampouco ocasionou efeitos significativos para a remoção de cor e turbidez da vinhaça, porém, no valor de 65 rpm, observa-se a melhor eficiência para remoção de DQO.

Baseando-se em análises estatísticas (ANOVA, nível de significância de 5%), observou-se, dentre os parâmetros testados, que apenas a concentração de coagulante e o tempo de sedimentação exerceram influência significativa sobre o desempenho do processo em termos dos parâmetros avaliados. No caso da concentração de coagulante, considerando-se os dados dos ensaios ECF<sub>1</sub>, ECF<sub>2</sub> e ECF<sub>3</sub>, nos quais as dosagens de cloreto férrico foram variadas na faixa de 0,5 a 25 g.L<sup>-1</sup> (Tabela 8), o valor p obtido foi de  $5,6 \cdot 10^{-7}$ , para um valor de F igual a 8,50 ( $F_{\text{crítico}} = 2,04$ ). Entretanto, ao considerar-se apenas os dados do ECF<sub>3</sub> (dosagem de coagulante variando de 1 a 2 g.L<sup>-1</sup> de cloreto férrico), não foram observadas diferenças significativas na eficiência do tratamento. Com relação ao tempo de sedimentação (ECF<sub>4</sub>, 5-30 minutos), o valor de p obtido foi de 0,017, para um valor de F igual a 4,32 ( $F_{\text{crítico}} = 3,10$ ), demonstrando que a eficiência do tratamento foi significativamente afetada pelos diferentes tempos de sedimentação testados.

Tabela 11. Faixas de eficiências de remoção dos parâmetros de cor, turbidez e DQO obtidas nos ensaios ECF<sub>1</sub> – ECF<sub>9</sub>

Ensaio	ECF <sub>1</sub>	ECF <sub>2</sub>	ECF <sub>3</sub>	ECF <sub>4</sub>	ECF <sub>5</sub>	ECF <sub>6</sub>	ECF <sub>7</sub>	ECF <sub>8</sub>	ECF <sub>9</sub>
Parâmetro	Dc (g·L <sup>-1</sup> )	Dc (g·L <sup>-1</sup> )	Dc (g·L <sup>-1</sup> )	t <sub>s</sub> (min)	t <sub>f</sub> (min)	G <sub>f</sub> (rpm)	t <sub>rm</sub> (s)	G <sub>rm</sub> (rpm)	-
	0-5.0	1.0-2.0	1.6	20	20	65	10	325	
DQO	12.3- 36.9	0-59.5	30.2- 40.7	12.9- 32.6	1.8- 46.0	14.9- 43.3	38.4- 41.7	32.0- 53.3	64.6 ± 2.5
ER (%)	Cor	0-79.0	14.6- 95.1	36.1- 80.7	65.9- 72.0	63.3- 78.9	78.8- 82.4	64.7- 80.9	51.2 ± 3.4
	Turbidez	0-83.7	29.3- 96.5	0- 85.8	79.2- 84.4	67.7- 78.2	89.0- 94.6	65.0- 90.3	70.3 ± 3.6

Tal como verificado em estudos semelhantes (LIANG *et al.*, 2009; RYAN *et al.*, 2008), a variação dos parâmetros de mistura rápida não demonstrou efeito significativo para o processo de coagulação-floculação. Porém, o desempenho de tratamento é ligeiramente superior a partir da utilização de valores maiores de gradiente de mistura rápida, apontando-se o valor de 325 rpm como o mais adequado. O efeito relativamente significativo do gradiente de mistura rápida para o desempenho do processo ocorre devido à alteração das propriedades de sedimentação dos flocos e, conseqüentemente, das eficiências de remoção de turbidez (LIANG *et al.*, 2009).

É importante ressaltar que a característica (composição físico-química) da vinhaça a ser tratada é fator determinante para o ajuste da quantidade de coagulante utilizado e, conseqüentemente, para a obtenção de valores ótimos de eficiências de remoção. O ensaio ECF9 (Figura 9) foi realizado com a aplicação de todos os parâmetros ajustados ( $T_{mr}=10s$ ;  $G_{mr}=325$  rpm;  $D_c=1,6g.L^{-1}$ ;  $T_f=20$  min;  $G_f=65$  rpm e  $T_s=20$  min). Os resultados referentes à caracterização físico-química das amostras antes e após o tratamento, bem como as eficiências de remoção dos parâmetros analisados, são apresentados na Tabela 12.



Figura 9. Resultados visuais obtidos no ECF 6.

Tabela 12. Caracterização físico-química das amostras de vinhaça afluente (amostra inicial) e efluente após aplicação dos processos de coagulação e floculação (amostra final) e eficiência de remoção associada ao tratamento – referência: ECF<sub>9</sub>.

Parâmetro	Vinhaça bruta <sup>a</sup>	Amostra				ER (%)		
		Inicial	Final					
pH	3,70-5,00	5,61	4,58	±	0,03	nsa		
Cor (uC)	3.000,00 <sup>b</sup>	820,00	400,00	±	28,28	51,22	±	3,45
Turbidez (UT)	515,00 <sup>b</sup>	37,20	11,05	±	1,34	70,30	±	3,61
DQO (mg.L <sup>-1</sup> )	1.500,00- 8.490,00	1.400	495,00	±	35,36	64,64	±	2,53
DBO (mg.L <sup>-1</sup> )	600,00- 3.900,00	1.080,00	890,00	±	42,43	17,59	±	3,93
N (mg.L <sup>-1</sup> )	70	nd			nd	nsa		
K (mg.L <sup>-1</sup> )	120,00- 783,00	342,40	364,50	±	0,20	-6,51	±	0,08
NH <sub>3</sub> (mg.L <sup>-1</sup> )	8,50- 16,50 <sup>b</sup>	13,20	9,35	±	0,07	29,17	±	0,54
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg.L <sup>-1</sup> )	0,16- 0,40 <sup>b</sup>	0,07	0,02	±	0,00	71,43	±	0,00
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg.L <sup>-1</sup> )	4,50- 7,50 <sup>b</sup>	2,00	2,00	±	0,00	0,00	±	0,00
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg.L <sup>-1</sup> )	60,00- 640,00	190,00	160,00	±	0,00	15,79	±	0,00
Al (mg.L <sup>-1</sup> )	≈7,150	0,860	0,560	±	0,010	34,880	±	1,640
B (mg.L <sup>-1</sup> )	0,500	0,074	0,019	±	0,001	74,320	±	1,910
Ba (mg.L <sup>-1</sup> )	≈0,061	0,055	0,045	±	0,001	18,180	±	2,570
Ca (mg.L <sup>-1</sup> )	≈106,650	40,600	38,600	±	0,400	4,930	±	1,390
Cd (mg.L <sup>-1</sup> )	0,106	< 0,001	< 0,001					nsa
Co (mg.L <sup>-1</sup> )	nd	0,002	0,003	±	0,001	-50,000	±	70,710
Cr (mg.L <sup>-1</sup> )	0,015	0,011	0,011	±	0,001	0,000	±	12,860
Cu (mg.L <sup>-1</sup> )	0,059	0,006	0,009	±	0,001	-50,000	±	23,570
Fe (mg.L <sup>-1</sup> )	≈7,900	0,730	16,750	±	0,010	-2194	±	1,940
Mg (mg.L <sup>-1</sup> )	≈43,000	24,400	24,700	±	0,500	-1,230	±	2,900
Mn (mg.L <sup>-1</sup> )	0,781	0,379	0,542	±	0,003	-43,010	±	1,120
Mo (mg.L <sup>-1</sup> )	0,200	< 0,001	< 0,001					nsa
Na (mg.L <sup>-1</sup> )	5,730	64,100	64,180	±	0,010	-0,120	±	0,020
Ni (mg.L <sup>-1</sup> )	0,026	0,007	0,009	±	0,001	-28,570	±	20,200
Pb (mg.L <sup>-1</sup> )	nd	0,003	0,006	±	0,001	-100,00	±	47,14
Sr (mg.L <sup>-1</sup> )	0,444	0,151	0,150	±	0,004	0,660	±	3,450
V (mg.L <sup>-1</sup> )	0,012	0,0023	0,003	±	0,001	-30,430	±	61,490
Zn (mg.L <sup>-1</sup> )	0,439	0,104	0,049	±	0,001	52,880	±	1,360
Cl (mg.L <sup>-1</sup> )	nd	< 0,010	0,040			>-300,000		
SST (g.L <sup>-1</sup> )	0,20-1,50	0,036	0,028	±	0,00	22,22	±	0,00
SSF (g.L <sup>-1</sup> )	nd	0,008	0,007	±	0,00	12,50	±	17,68
SSV (g.L <sup>-1</sup> )	nd	0,028	0,021	±	0,00	25,00	±	5,05
SDT (g.L <sup>-1</sup> )	nd	1,03	0,66			35,93		

Tabela 12. Caracterização físico-química das amostras de vinhaça afluyente (amostra inicial) e efluente após aplicação dos processos de coagulação e floculação (amostra final) e eficiência de remoção associada ao tratamento – referência: ECF 9. (Continuação)

<b>Condutividade (dS/m)</b>	nd	1,05	1,20	-14,28
<b>Alcalinidade(mgCaCO<sub>3</sub>.L<sup>-1</sup>)</b>	6,30 <sup>b</sup>	68,50	146,25 ± 1,77	-113,50 ± 2,58

<sup>a</sup> Valores de referência para vinhaça bruta em diluição 1:10. Fonte: Goyal *et al.*, (1996); Prada *et al.*, (1998); Bianchi, (2008); Mohana *et al.*, (2009); Ferraz Jr. *et al* (2015). <sup>b</sup> Valores determinados em vinhaça bruta para referência. nd = Não determinado. nsa = Não se aplica. Valores negativos indicam aumento da concentração final em relação à inicial, ou seja, ER = 0.

A composição dos efluentes nos diferentes estágios de tratamento pode ser observada na Tabela 12. As eficiências de remoção de DQO, cor e turbidez foram de 65, 51, e 70% respectivamente. Ressalta-se que a remoção de DBO após coagulação-floculação foi baixa (~18%). Os valores da relação DQO/DBO obtidos para a vinhaça tratada anaerobicamente e o efluente final foram de 1,3 e 0,56 respectivamente. Primeiramente, associam-se esses valores a uma remoção mais acentuada de matéria orgânica não biodegradável no processo físico-químico quando comparado ao processo biológico de tratamento, porém, a relação DQO/DBO inferior a 1 observada para o efluente final indica a ocorrência de possíveis erros experimentais, uma vez que, a matéria orgânica biodegradável (DBO) está inserida na DQO.

Com relação à análise de série de sólidos apresentada na Tabela 12, destaca-se a remoção dos valores de SST, SSF e SSV em 22,2, 12,5 e 25% respectivamente, indicando a eficiência dos processos físico-químicos analisados.

Visando-se à investigação dos efeitos da variação do pH inicial para a remoção dos parâmetros estudados, foi realizado o ECF<sub>10</sub>. A Tabela 13 e a Figura 10 apresentam a dosagem e concentração de coagulante utilizada, além dos resultados obtidos no ECF<sub>10</sub>. Os parâmetros de coagulação-floculação utilizados são os ajustados e obtidos no ECF<sub>9</sub>: Dc=1,6g.L<sup>-1</sup>, Tmr=10s, Gmr=325 rpm, Tf=20min, Gf=65rpm, Ts=20min.

O pH inicial do afluyente (5,4) foi modificado para os valores de 7; 8,3; 8,9; 10 e 10,6 utilizando-se solução de NaOH 0,1 M. O ensaio foi realizado com dosagem de 1,6 g.L<sup>-1</sup> de cloreto férrico 40% para todos os jarros. A faixa dos valores de pH após a adição de coagulante foi de 4,3 a 5,0 (Tabela 13), indicando que a alteração do pH inicial (5,4) não causou grandes alterações no valor do pH de coagulação. Conforme observado na Tabela 13, para as condições analisadas, a elevação do pH de coagulação não foi satisfatória para a remoção de DQO, cor e turbidez, sendo o melhor resultado

obtido no jarro no qual não houve modificação do pH inicial (Jarro 1). É possível que a utilização de outra base para elevação do pH e em outras condições faça surtir efeito positivo, considerando o papel determinante do pH do meio no processo de coagulação-floculação.

Tabela 13. Resultados obtidos no ECF<sub>10</sub> e Eficiência de Remoção dos parâmetros.

Parâmetros	Inicial	Final					
		Jarro 1	Jarro 2	Jarro 3	Jarro 4	Jarro 5	Jarro 6
Dc (g.L <sup>-1</sup> )	-	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
pH inicial	5,4	5,4	7,0	8,3	8,9	10,0	10,6
pH <sub>pós coagulante</sub>		4,3	4,8	5,3	5,0	5,0	5,0
DQO(mg.L <sup>-1</sup> )	1210	1000	1090	990	1060	1170	1170
Cor Ap. (uC)	660	210	410	510	1090	2780	3020
Turbidez (UT)	20,7	5,7	19	16,1	57,3	176	203
ER DQO (%)	-	17,36	9,92	18,18	12,40	3,31	3,31
ER cor (%)	-	68,18	37,88	22,73	-	-	-
ER turbidez (%)	-	72,46	8,21	22,22	-	-	-

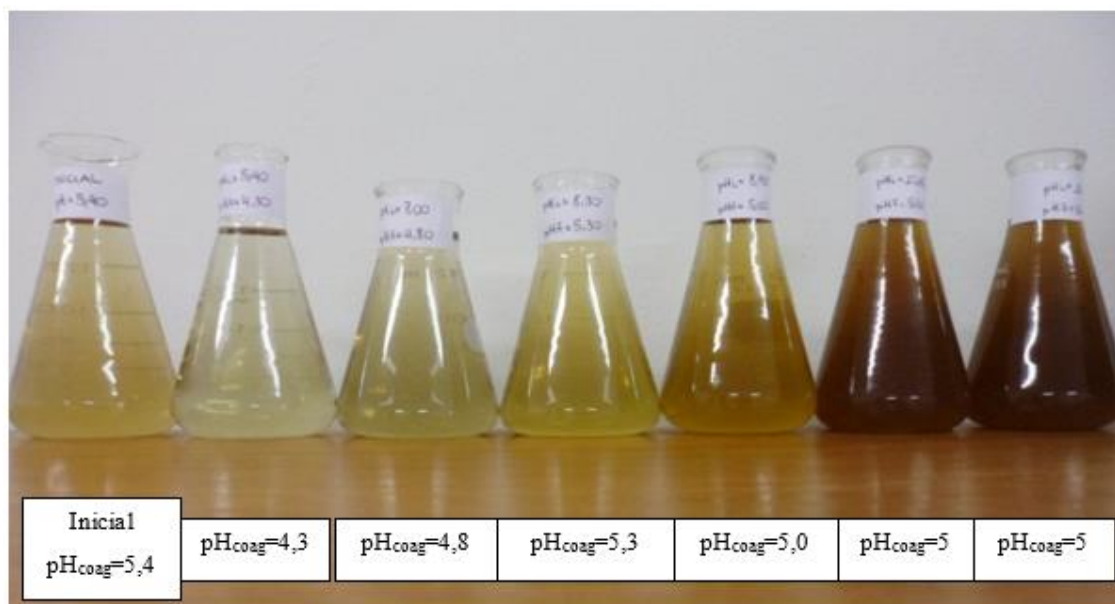


Figura 10. Resultados visuais obtidos no ECF<sub>10</sub>.

Após a determinação dos parâmetros ótimos para os processos de coagulação, mistura rápida, floculação e sedimentação, foram realizados os ECF<sub>11-13</sub> a fim de determinar a eficácia de aplicação destes processos para três tipos de vinhaça: acidificada (ECF<sub>11</sub>), metanizada (ECF<sub>12</sub>) e bruta (ECF<sub>13</sub>). A vinhaça acidificada compreende o efluente de reator anaeróbio operando em condições acidogênicas, já a vinhaça metanizada compreende o efluente de reator anaeróbio operando em condições metanogênicas.

As faixas de eficiência de remoção dos parâmetros físico-químicos analisados são apresentadas na Tabela 14 e os resultados obtidos são apresentados na Figura 11.

As eficiências de remoção dos parâmetros de cor, turbidez e DQO obtidas a partir da realização dos ensaios ECF<sub>11</sub> e <sub>12</sub> corroboram os resultados obtidos anteriormente a respeito da otimização dos parâmetros de coagulação/floculação, já que a dosagem de coagulante ótima foi de 1,6g.L<sup>-1</sup> de cloreto férrico. A partir da análise dos resultados obtidos, é possível perceber que as eficiências de remoção dos parâmetros analisados foram mais elevadas utilizando-se vinhaça metanizada como afluente, em comparação com a utilização da vinhaça acidificada. Tal condição pode ser fundamentada na diferença de pH inicial, já que a vinhaça metanizada possui pH inicial mais próximo ao pH ótimo de coagulação do cloreto férrico. Os resultados visuais obtidos na realização do ECF<sub>12</sub> são apresentados na Figura 12.

Tabela 14. Faixas de eficiência de remoção obtidas nos ECF<sub>11-13</sub>

<b>Ensaio</b>	<b>ECF<sub>11</sub></b>	<b>ECF<sub>12</sub></b>	<b>ECF<sub>13</sub></b>
<b>Parâmetro</b>	<b>Dc (g·L<sup>-1</sup>)</b>	<b>Dc (g·L<sup>-1</sup>)</b>	<b>Dc (g·L<sup>-1</sup>)</b>
	1,0-2,0	1,0-2,0	1,0-2,0
<b>pH de coagulação</b>	3,19-4,49	4,32-6,49	2,93-3,90
	<b>DQO</b>	13,1-44,4	39,4-65,2
	<b>Cor</b>	10,2-19,8	41,7-79,9
<b>ER (%)</b>	<b>Cor</b>	22,8-97,8	0-3,9
	<b>Turbidez</b>	4,2-97	97,3-97,8
		5,7-55,7	

Já os resultados obtidos no ECF<sub>13</sub> mostram que a utilização dos processos de coagulação/floculação, nas condições testadas, para o tratamento da vinhaça bruta não se mostra tão adequada quando comparada à sua aplicação em vinhaça previamente tratada por processos anaeróbios. Uma das interpretações plausíveis seria em relação ao pH, já que o seu valor afluente não se mostra compatível com o pH ótimo de coagulação com cloreto férrico. Outra interpretação possível considera a característica do afluente em comparação com a dosagem necessária de coagulante para promover a

desestabilização das suas partículas e, assim, realizar os processos de coagulação/floculação com resultados satisfatórios de eficiências de remoção dos parâmetros físico-químicos analisados.

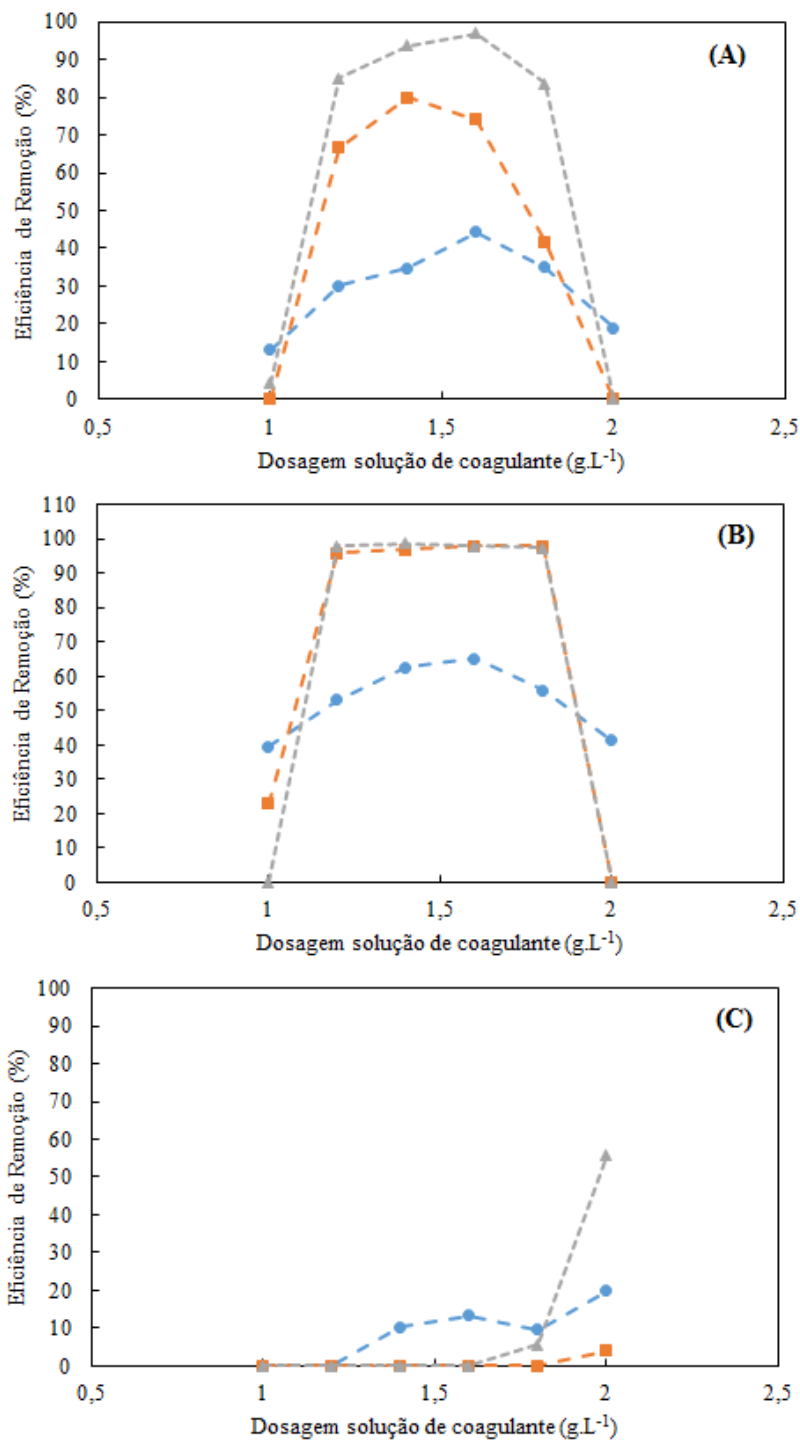


Figura 11. Eficiências de remoção de DQO [●], cor [■] e turbidez [▲] nos ensaios ECF<sub>11</sub> (A: vinhaça acidificada), ECF<sub>12</sub> (B: vinhaça metanizada) e ECF<sub>13</sub> (C: vinhaça bruta)

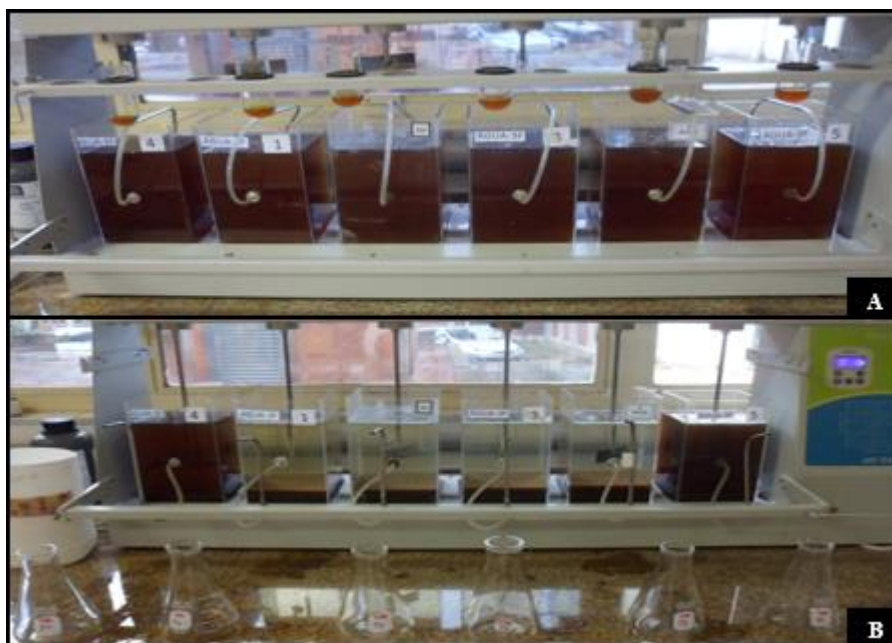


Figura 12. Resultados visuais obtidos no ECF<sub>12</sub> (A:vinhaça metanizada como afluente; B: efluente final)

### 5.3 Análise do efluente tratado para reuso na agricultura

Considerando as características finais da vinhaça após tratamento biológico e físico-químico, analisou-se as possibilidades de reuso do efluente, principalmente quanto à ferti-irrigação. Este processo é comumente realizado - sem controle adequado - nas lavouras de cana-de-açúcar com a vinhaça bruta, porém, esta prática pode acarretar a obstrução e superfertilização dos solos devido aos altos níveis de nutrientes e baixo pH do efluente.

Comparando-se os valores apresentados na Tabela 12 com dados reportados no Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater (WHO, 2006), constatou-se que os valores de alcalinidade, SST, SDT e condutividade estariam adequados para reuso agrícola. Quanto ao teor de metais, todos os analisados, exceto manganês e ferro, encontram-se abaixo do limite máximo recomendado para reuso agrícola (Tabela 12).

A máxima concentração recomendada para manganês é de  $0,2 \text{ mg.L}^{-1}$  (WHO, 2006), sendo que, conforme apresentado na Tabela 12, a concentração obtida para o efluente final foi de  $0,542 \pm 0,003 \text{ mg.L}^{-1}$ . Concentrações de manganês variando de

alguns décimos a poucos  $\text{mg.L}^{-1}$  podem ser tóxicos para algumas culturas, usualmente em solos ácidos. Com relação ao ferro, a máxima concentração recomendada é de  $5 \text{ mg.L}^{-1}$  (WHO, 2006). Entretanto, conforme apresentado na Tabela 12, a concentração para o efluente final foi de  $16,75 \pm 0,01 \text{ mg.L}^{-1}$ , valor ainda elevado mesmo com a diluição da vinhaça. Concentrações de ferro acima da máxima recomendada podem contribuir para a acidificação do solo, além de ocasionar perda de fósforo e molibdênio, caracterizados como nutrientes essenciais. A irrigação superficial pode ocasionar depósito de ferro em plantas e equipamentos, causando impacto visual negativo.

Conforme apresentado na Tabela 12, o teor de DBO constatado nas análises foi de  $890 \text{ mg.L}^{-1}$  porém, como ressaltado anteriormente, pode ter ocorrido erro na realização deste ensaio, tendo em vista que o valor de DBO deveria ser menor que o valor da DQO ( $495 \text{ mg.L}^{-1}$ ). Os valores de DBO recomendados (WHO, 2006) para aumento de produtividade dos solos estão entre  $110\text{-}400 \text{ mg.L}^{-1}$ , sendo que valores acima deste podem ocasionar obstrução dos poros e favorecer populações anaeróbias na zona da raiz. Além disso, altas concentrações de matéria orgânica combinados com altos níveis de nitrogênio podem ocasionar perda de nitrogênio por desnitrificação.

Os valores recomendados para o parâmetro pH estão entre  $6,5\text{-}8,5$  (WHO, 2006). Valores de pH abaixo de  $6,5$  combinados com alto teor de matéria orgânica ocasionam o consumo desta e a saturação do solo. Nestas condições, os metais podem adquirir mobilidade e serem absorvidos por culturas ou ocasionarem a contaminação de corpos d'água.

#### **5.4 Análise da adequabilidade da aplicação das normativas brasileiras ao reuso de vinhaça na ferti-irrigação**

A análise de reuso da vinhaça para ferti-irrigação foi realizada conforme metodologia descrita no item 4.4. Utilizando dados dos solos apresentados nos trabalhos de Pires e Ferreira (2008), Zolin *et al.*, 2011 e Rolim *et al.*, 2013, obteve-se a dosagem máxima de vinhaça a ser aplicada no solo conforme orientação da CETESB P4.231. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 15.

A partir da dosagem de cada efluente estimada para cada solo estudado, calculou-se a concentração de metais em  $\text{mg}_{\text{metal}}.\text{kg}_{\text{solo}}^{-1}$  e confrontou-se com os valores orientadores de concentração destes metais no solo considerando-se os limites de

intervenção. Deve-se ressaltar que, os elementos analisados neste trabalho (incluindo metais, macro e micronutrientes e parâmetros físico-químicos) foram: DQO, DBO, N, K, NH<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Al, B, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, Pb, Sr, V, Zn, Cl, SST, SSF, SSV, SDT, condutividade e alcalinidade. Porém, dentre os parâmetros citados, os contemplados na Decisão de Diretoria da CETESB no. 195-2005 sobre valores orientadores para solos e água subterrâneas consistem somente em: Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb e Zn. Os resultados detalhados das concentrações hipotéticas de cada metal no solo após a aplicação de cada efluente encontra-se nos anexos de 1 a 10. Em resumo, a aplicação de todos os efluentes em qualquer um dos solos apresentados não faria com que as concentrações dos metais excedessem os valores limites de intervenção determinados pela CETESB, considerando efeitos da diluição da vinhaça. De acordo com a literatura de referência, verifica-se que vinhaças menos concentradas, tais como as de caldo de cana, apresentam baixas concentrações de metais tóxicos. Entretanto, considerando-se vinhaças de melaço de cana, elevados valores de metais tóxicos foram reportados em diversos trabalhos. Nandan et al. (1990) detectaram concentrações de 8,8; 11,8 e 15,7 mg.L<sup>-1</sup> para Pb, Zn e Cu respectivamente em vinhaça de melaço de cana. Chandra et al. (2008) também reportaram altas concentrações de Pb, Zn e Cd em vinhaças de melaço, atingindo valores de 4,4; 4,6 e 2,3 mg.L<sup>-1</sup> respectivamente. Elevadas concentrações de Cu, Cd, Zn e Cr também foram identificadas no trabalho de Chandra et al. (2009), alcançando concentrações de 3,12; 2,37; 14,11 e 3,03 mg.L<sup>-1</sup> respectivamente. No trabalho de Previna e Saravanan (2013), altas concentrações de Zn e Cu também foram encontradas em vinhaça de melaço, atingindo valores de 11 e 65 mg.L<sup>-1</sup> respectivamente. Dessa forma, pode-se inferir que a utilização na ferti-irrigação de vinhaças com alto teor de metais tóxicos pode acarretar danos ao solo e às culturas atingidas.

De acordo com um levantamento realizado por Oliveira (2015), que englobou diversas plantas produtivas de etanol, a quantidade média de vinhaça aplicada no solo varia entre valores de 30 a 400m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>, sendo que a maioria das usinas aplica, anualmente, em torno de 100m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup> de vinhaça. Já no trabalho de Mahimairaja e Bolan (2004), constatou-se que a aplicação de vinhaça ao solo em altas doses (> 250m<sup>3</sup>/ha) pode ser prejudicial ao crescimento das culturas e à fertilidade do solo. Já o seu uso em doses menores (125 m<sup>3</sup>/ha) promove a melhora na germinação e crescimento das culturas.

Tabela 15. Dosagem máxima de vinhaça a ser aplicada nos solos referenciados nos trabalhos de Pires e Ferreira(2008), Zolin et al., 2011 e Rolin et al., 2013.

Solos referenciados		Dosagem máxima de vinhaça a ser aplicada (m <sup>3</sup> /ha)			
		Vinhaça média <sup>d</sup>	Vinhaça média diluída <sup>e</sup>	Efluente inicial	Efluente final
<b>Solo 1</b>	<sup>a</sup>	41,11	411,11	540,30	507,54
<b>Solo 2</b>	<sup>a</sup>	65,24	652,39	857,41	805,42
<b>Solo 3</b>	<sup>a</sup>	41,11	411,11	540,30	507,54
<b>Solo 4</b>	<sup>b</sup> Hor AP	41,11	411,11	540,30	507,54
<b>Solo 4</b>	<sup>b</sup> Hor A2	41,11	411,11	540,30	507,54
<b>Solo 4</b>	<sup>b</sup> Hor E	98,52	985,19	1294,79	1216,29
<b>Solo 4</b>	<sup>b</sup> Hor Bh	41,11	411,11	540,30	507,54
<b>Solo 4</b>	<sup>b</sup> Hor Bsh	41,11	411,11	540,30	507,54
<b>Solo 5</b>	<sup>c</sup> Testemunho	133,88	1338,79	1759,51	1652,83
<b>Solo 5</b>	<sup>c</sup> Após 20 aplicações de vinhaça	98,94	989,35	1300,26	1221,42

<sup>a</sup>: Referente à Pires e Ferreira (2008) considerando uma densidade hipotética de 1,2g/cm<sup>3</sup> para estes solos; <sup>b</sup>: Referente à Rolin et al, 2013; <sup>c</sup>: Referente à Zolin et al., 2011; <sup>d</sup>: média da composição da vinhaça conforme Goyal et al. (1996), Prada et al. (1998), Bianchi (2008) e Mohana et al. (2009). <sup>e</sup>: vinhaça referenciada em “d” com diluição 1:10.

Os volumes adequados de vinhaça que poderiam ser aplicados na ferti-irrigação estimados neste trabalho (41,1 – 133,48 m<sup>3</sup>/ha) mostraram-se semelhantes ao recomendado nas bibliografias citadas. Porém, em alguns casos percebe-se que há a aplicação excessiva de vinhaça ao solo, o que pode ocasionar problemas de médio a longo prazo para o solo. Dentre estes problemas pode-se citar: (1) salinização dos solos, (2) obstrução dos poros, (3) redução da atividade microbiana e depleção de oxigênio dissolvido em corpos d’água; (4) contaminação de corpos d’água devido à concentração de nitratos, levando a sua eutrofização, (5) desestabilização da estrutura dos solos devido às altas concentrações de sódio e potássio e (6) possível acidificação do solo e recursos hídricos devido ao baixo pH da vinhaça (FUESS e GARCIA, 2014)

Quanto ao tratamento da vinhaça realizado neste trabalho, ainda observando-se a Tabela 15, é possível perceber que o volume de vinhaça passível de ser utilizada para a ferti-irrigação é maior quando esta é submetida a tratamento anaeróbio seguido de tratamento físico-químico. Tais resultados refletem diretamente o menor potencial poluente da vinhaça após as etapas sequenciais de tratamento, contudo, é necessária a condução de um balanço que considere, principalmente, aspectos econômicos para verificar a eventual viabilidade deste cenário em escala plena. A menor carga poluente da vinhaça também permitiria sua aplicação numa área de maior raio a partir da usina, entretanto, esta condição também afeta diretamente o aspecto financeiro, uma vez que, o raio econômico definido para aplicação aumentaria consideravelmente.

## 6. CONCLUSÕES

Considerando-se o aumento previsto para a produção de etanol e consequente geração de vinhaça, aliado ao elevado consumo de água para irrigação na agricultura, o tratamento deste efluente mostra-se como uma alternativa interessante do ponto de vista ambiental, dado que sua adequação permite a redução do potencial poluidor e o reaproveitamento dos nutrientes presentes.

A análise dos resultados obtidos neste trabalho permite concluir que:

(i) Nas condições em que os ensaios foram realizados, a utilização da solução de amido como coagulante não se mostrou adequada para o tratamento, em específico, da vinhaça.

(ii) Os melhores resultados de remoção dos parâmetros observados (cor, turbidez e DQO) foram obtidos com a aplicação de cloreto férrico como coagulante na dosagem (Dc) de 1,6 g.L<sup>-1</sup>. Concentrações muito baixas não são suficientes para a desestabilização das partículas, e consequente coagulação. Bem como, concentrações muito elevadas promovem o aumento nos parâmetros de cor e turbidez principalmente.

(iii) Os parâmetros otimizados obtidos para os demais processos físico-químicos foram: Gradiente e Tempo de Mistura Rápida (325 rpm; 10 s), Gradiente e Tempo de Floculação (65 rpm; 20 min) e Tempo de Sedimentação (20 min).

(iv) O ajuste de pH para a realização do ensaio com cloreto férrico não se mostrou satisfatório, observado que não alcançou melhoras significativas nos padrões de remoção dos parâmetros estudados e consumiu uma quantidade maior de reagentes químicos.

(v) Alguns parâmetros tenderam a limitar o reuso agrícola do efluente final, porém, a vinhaça bruta, quando aplicada in natura ao solo, pode potencializar os impactos negativos apresentados anteriormente. Dessa forma, o reuso do efluente final na ferti-irrigação ocasionaria impactos menos significativos do que aqueles decorrentes da aplicação da vinhaça bruta no solo.

(vi) Para trabalhos futuros, sugere-se a utilização de diferentes coagulantes, incluindo os naturais, para o tratamento de vinhaça.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDALIB, M.; HAFEZ, H.; ELBESHISHY, E.; NAKHLA, G.; ZHU, J. Treatment of thin stillage in a high-rate anaerobic fluidized bed reactor (AFBR). **Bioresour. Technol.** 121, 411-418. 2012
- ANNACHHATRE, A.P. Anaerobic treatment of industrial wastewaters, *Resources, Conservation and Recycling*, v.16, p. 161-166. 1996.
- APHA-AWWA-WEF, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22th ed. American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, Washington, DC, USA (2012).
- ARTURO, M.P.; ROBERTO, B.M; KUPPUSAMY, I. Floculação-coagulação como pos tratamento del efluente de un reactor anaerobio que trata vinazas tequileras. **In: Proceedings of the XXV Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Anais...**Cidade do México, México. 1996.
- ASAITHAMBI, P.; SUSREE, M.; SARAVANATHAMIZHAN, R.; MATHESWARAN, M. Ozone assisted electrocoagulation for the treatment of distillery effluent. **Desalination** 297, 1-7. 2012
- AWWA - AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. **Water Quality and Treatment: A Handbook of Community Water Supplies.** 5 ed. New York, N.Y.: McGraw Hill Co. 1999.
- BANU, J.R.; KALIAPPAN, S.; RAJKUMAR, M.; BECK, D. Treatment of spent wash in anaerobic mesophilic suspended growth reactor. **J. Environ. Biol.** 27, 111-117. 2006.
- BIANCHI, S.R. **Avaliação química de solos tratados com vinhaça e cultivados com alfafa.** 2008. 108 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2008.
- BNDES - BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL; CGEE – CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável.** Rio de Janeiro, 2008. 316 p.

- BOOPATHY, R.; TILCHE, A. Anaerobic digestion of high strength molasses wastewater using hybrid anaerobic baffled reactor. **Water Res.** 25, 785-790. 1991.
- BORIES, A.; RAYNAL, J.; BAZILE, F. Anaerobic digestion of high-strength distillery wastewater (cane molasses stillage) in a fixed-film reactor. **Biol. Waste** 23, 251-267. 1998.
- CARROCI, J.S.; MORI, R.Y.; GUIMARÃES, O.L.C.; SALAZAR, R.F.S.; de OLIVEIRA, M.F.; PEIXOTO, A.L.C.; IZÁRIO FILHO, H.J. Application of heterogenous catalysis with TiO<sub>2</sub> Photo irradiated by sunlight and latter activated aludge system for reduction of vinasse organic load. **Engineering**, 4, 746-760. 2012.
- CETESB - **Decisão da diretoria no. 195-2005-E**, de 23 de novembro de 2005.
- CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo; **Norma técnica P4.230** – Aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas - critérios para projeto e operação. Agosto de 1999.
- CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo; **Norma P4.231** Vinhaça – critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola. Dezembro de 2006.
- CHANDRA, R.; YADAV, S.; BHARAGAVA, R.N.; MURTHY, R.C. (2008) Bacterial pretreatment enhances removal of heavy metals during treatment of post-methanated distillery effluent by *Typha angustata* L. **Journal of Environmental Management**, v. 88, p. 1016-24.
- CHANDRA, R; BRARAGAVA, R.N.; YADAV, S.; MOHAN, D. Accumulation and distribution of toxic metals in wheat (*Triticum aestivum* L.) and Indian mustard (*Brassica campestris* L.) irrigated with distillery and tannery effluents. *Journal of Hazardous Materials*. v. 162. 1514-1521. 2009
- CHEREMISINOFF, N.P.; **Handbook of water and wastewater treatment technologies**. Boston: Butterworth Heinemann, 2002. 636p.
- CHERNICHARO C. A. L. **Reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 1997, 246 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, 5).

- DE BAZÚA, C.D.; CABRERO, M.A.; POGGI, H.M. Vinasses biological treatment by anaerobic and aerobic processes: laboratory and pilot-plant tests. **Bioresour. Technol.** 35, 87-93. 1991.
- DI BERNARDO, L.; DANTAS, A.B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. São Carlos : RiMa, 2005. 2 v.
- ELIA NETO, A. Captação e Uso de Água no Processamento da Cana-de-Açúcar, in: MACEDO, I. C. et al. **A Energia da Cana-de-Açúcar: Doze estudos sobre a Agroindústria da Cana-de-Açúcar no Brasil e a sua Sustentabilidade**. UNICA, 2005.
- ESPINOSA, A.; ROSAS, L.; ILANGOVA, K.; NOYOLA, A. Effect of trace metals on the anaerobic degradation of volatile fatty acids in molasses stillage. **Water Sci. Technol.** 32, 121-129. 1995.
- FERRAZ JR., A.D.N; ETCHEBEHERE, C.; ZAIAT, M.; Mesophilic hydrogen production in acidogenic packed-bed reactors (APBR) using raw sugarcane vinasse as substrate: Influence of support materials. **Anaerobe.** 34, 94-105. 2015
- FERREIRA, L.F.R.; AGUIAR, M.M.; MESSIAS, T.G.; POMPEU, G.B.; LOPEZ, A.M.Q.; SILVA, D.P.,R.T. Evaluation of sugar-cane vinasse treated with *Pleurotus sajor-caju* utilizing aquatic organisms as toxicological indicators. **Ecotox. Environ. Safe** 74, 132-137 . 2011.
- FUESS, L.T.; GARCIA, M.L.. Anaerobic digestion of stillage to produce bioenergy in the sugarcane-to-ethanol industry. **Environ. Technol.** 35, 333-339. 2014.
- GARCÍA GARCÍA, I.; BONILLA VENCESLADA, J.L.; JIMÉNES PEÑA, P.R.; RAMOS GÓMEZ, E. Biodegradation of phenol compounds in vinasse using *Aspergillus terreus* and *Geotrichum candidum*. **Wat. Res.** Vol. 31, No. 8, p 2005-2011. 1997.
- GHOSH, M.; GANGULI, A.; TRIPATHI, A.K. Treatment of anaerobically digested distillery spentwash in a two-stage bioreactor using *Pseudomonas putida* and *Aeromonas sp.* **Process Biochem.** 37, 857-862. 2002.
- GONÇALVES, C.A.S.; SILVA, E.L. Tratamento Físico-Químico da Vinhaça. In: XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, Porto Alegre. **Anais...**, Ref. I-021. 2000.

- GOYAL, S.K.; SETH, R.; HANDA, B.K. Diphasic fixed-film biomethanation of distillery spentwash. **Bioresource Technology**, v. 56, p. 239-244. 1996.
- JAIN, N.; BHATIA, A.; KAUSHIK, R.; KUMAR, S.; JOSHI, H.C.; PATHAK, H. Impact of post-methanation distillery effluent irrigation on groundwater quality. **Environ. Monit. Assess.** 110, 243-255. 2005.
- JUWARKAR, A.; DUTTA, S.A. Impact of distillery effluent application to land on soil microflora. **Environmental Monitoring and Assessment** 15: 201-210. 1990.
- KANNAN, A.; UPRETI, R.K. Influence of distillery effluent on germination and growth of mung bean (*Vigna radiata*) seeds. **J. Hazard. Mater.** 153, 609-615. 2008.
- KAPARAJU, P.; SERRANO, M.; ANGELIDAKI, I. Optimization of biogas production from wheat straw stillage in UASB reactor, **Applied Energy**, v. 87, p. 3779-3783. 2010.
- LETTINGA, G.; HOBMA, S.W.; HULSHOFF POL, L. W.; DE ZEEUW, W.; DE JONG, P.; GRIN, P. C.; ROERSMA, R.E.; HOBMA, S.W. High-rate anaerobic waste-water treatment using the UASB reactor under a wide range of temperature conditions. **Biotechnol. and Gen. Engg. Rev.**, 2, 253-283. 1984.
- LIANG, G.Z.; WANG, Y.; ZHOU, Y.; LIU, H.; WU, Z. Variables affecting melanoidins removal from molasses wastewater by coagulation/flocculation. **Sep. Purif. Technol.** 68, 382-389. 2009.
- LIANG, G.Z.; WANG, Y.; ZHOU, Y.; LIU, H.; WU, Z. Stoichiometric relationship in the coagulation of melanoidins-dominated molasses wastewater. **Desalination** 250, 42-48. 2010.
- MAHIMAIRAJA, S.; BOLAN, N.S. Problems and prospects of agricultural use of distillery spentwash in India. SuperSoil 2004: **3rd Australian New Zealand Soils Conference**, University of Sydney, Australia. 2004.
- METCALF & EDDY, Inc; **Wastewater engineering: treatment and reuse**. Boston: McGraw-Hill, 2003. 1819 p.
- MIGO, V.P.; DEL ROSARIO, E.J.; MATSUMURA, M. Flocculation of melanoidins induced by inorganic ions. **Journal of fermentation and bioengineering**. Vol 83, No. 3, 287-291.

- MOHANA, S.; ACHARYA, B.K.; MADAMWAR, D. Distillery spent wash: treatment technologies and potential applications, **Journal of Hazardous Materials**, v. 163, p. 12-25. 2009.
- NANDAN, R.; TONDWALKAR, V.; RAY, P.K. Biomethanation of spent wash: heavy metal inhibition of methanogenesis in synthetic medium. **Journal of Fermentation and Bioengineering**, v. 69, No. 5, 276-281. 1990.
- OLIVEIRA, B.G. **Emissão de metano e microbiota funcional associadas a vinhaça de cana-de-açúcar em sistemas de armazenamento e transporte**. 100p. Tese (Doutorado em Ciências). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Piracicaba. 2015.
- PATHAK, H.; JOSHI, H.C.; CHAUDHARY, A.; CHAUDHARY, R. KAIRA, N.; DWIWEDI, M.K. Soil amendment with distillery effluent for wheat and rice cultivation. **Water, Air and Soil Pollution** 113: 133-140. 1999.
- PIRES, R.A.P; FERREIRA, O.M. **Utilização da vinhaça na bio-fertirrigação da cultura de cana-de-açúcar: estudo de caso em Goiás**. Universidade Católica de Goiás – Departamento de Engenharia, Engenharia Ambiental, Goiânia 2008.
- PRADA, S.M.; GUEKEZIAN, M.; SUÁREZ-IHA, M.E.V. **Metodologia analítica para a determinação de sulfato em vinhoto**. *Química Nova*, v. 21, n. 3, p. 249-252. 1998.
- RAMANA, S.; BISWAS, A.K.; KUNDU, S.; SAHA, J.K.; YADAVA, R.B.R. Effect of distillery effluent on seed germination in some vegetable crops. **Bioresour. Technol.** 82, 273-275.
- RIBAS, M. M. F. Tratamento de vinhaça em reator anaeróbio operado em batelada seqüencial contendo biomassa imobilizada sob condições termofílicas e mesofílicas. 175 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- RODRIGUES, I.J.; FUESS, L.T.; BIONDO, L.; SANTESSO, C.A.; GARCIA, M.L. Coagulation-Flocculation of anaerobically treated sugarcane stillage. **Desalination and water treatment**. v.52 p 4111-4121, 2014.

- ROLIM, M.M.; LYRA, M.R.C.C.; DUARTE, A.S.; MEDEIROS, P.R.F.; SILVA, E.F.F.; PEDROSA, E.M.R. Influência de uma lagoa de distribuição de vinhaça na qualidade da água freática. **Revista Ambiente & Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science**: v.8, n.1, 2013.
- RYAN, D.; GADD, A.; KAVANAGH, J.; ZHOU, M.; BARTON, G. A comparison of coagulant dosing options for the remediation of molasses process water. **Sep. Purif. Technol.** 58, 347-352. 2008.
- RYZNAR-LUTY, A.; KRZYWONOS, M.; CIBIS, E.; MISKIEWICZ, T. Aerobic biodegradation of vinasse by a mixed culture of bacteria of the genus *Bacillus*: optimization of temperature, pH and oxygenation state. **Polish J. of Environ. Stud.** Vol 17, No. 1. 101-112. 2008.
- SANGAVE, P.C.; PANDIT, A.B. Ultrasound pre-treatment for enhanced biodegradability of the distillery wastewater. **Ultrason. Sonochem.** 11, 197-203. 2004.
- SANGAVE, P.C.; PANDIT, A.B. Ultrasound and enzyme assisted biodegradation of distillery wastewater. **J. Environ. Manage.** 80, 36-46. 2006.
- SANGAVE, P.C.; GOGATE, P.R.; PANDIT, A.B. Combination of ozonation with conventional aerobic oxidation for distillery wastewater treatment. **Chemosphere** 68, 32-41. 2007.
- SATYAWALI, Y.; BALAKRISHNAN, M. Wastewater treatment in molasses-based alcohol distilleries for COD and color removal: a review. **J. Environ. Manage.** 86, 481-497. 2008.
- SHEEHAN, G.J.; GREENFIELD, P.F. Utilisation, treatment and disposal of distillery wastewater. **Water Res.** 14, 257-277. 1980.
- SOUZA, R.P. **Redução da toxicidade da vinhaça: tratamento combinado coagulação/floculação/fotocatálise**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR, Brasil. 2010.
- TBW - Naturgerechte Technologien, Bau- und Wirtschaftsberatung. Anaerobic methods of distillery waste and wastewater treatment. **Technical Information W4e**. 2000.

- U. S. Environmental Protection agency. Guidelines for water reuse. Washington, DC: 2012.
- WILKIE, A. C.; RIEDESEL, K.J.; OWENS, J.M. Stillage characterization and anaerobic treatment of ethanol stillage from conventional and cellulosic feedstocks, **Biomass and Bioenergy**, v. 19, p. 63-102. 2000.
- WILKIE, A.C. Biomethane from biomass, biowaste and biofuels. In: WALL, J.D.; HARWOOD, C.S.; DEMAIN, A. (eds). **Bioenergy**. Washington D.C.: ASM Press, 2008. p. 195-205.
- WILLINGTON, I.P.; MARTEN, G.G. Options for handling stillage waste from sugar-based fuel ethanol production, **Resources and Conservation**, v. 8, p. 111-129. 1982.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION; UNEP; FAO. WHO **Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater**. Geneva: WHO Press, 2006. Volume II – Wastewater use in agriculture.
- XING, G.X. ; ZHANG, S.F.; JU, B.Z.; YANG, J.Z. Recent advances in modified starch as flocculant, **in: The Proceedings of the Third International Conference on Functional Molecules**, Dalian University of Technology, Dalian, 2005, pp. 13–18.
- YAVUZ, Y. EC and EF processes for the treatment of alcohol distillery wastewater. **Separation Purification Technology** 53. 135-140. 2007.
- ZAYAS, T., ROMERO, V., SALGADO, L., MERAZ, M., MORALES, U. Applicability of coagulation/flocculation and electrochemical processes to the purification of biologically treated vinasse effluent. **Sep. Purif. Technol.** 57, 270-276. 2007.
- ZOLIN, C.A; PAULINO, J.; BERTONHA, A.; FREITAS, P.S.L.; FOLEGATTI, M.V. Estudo exploratório do uso da vinhaça ao longo do tempo. I. Características do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.15, n.1, p.22-28, 2011.

**ANEXOS**

ANEXO 1– Concentrações das substâncias no solo após aplicação de dosagem máxima de vinhaça segundo orientações da CETESB em solo do tipo 1<sup>a</sup> (Referência: Pires e Ferreira, 2008) para vinhaça bruta e vinhaça bruta diluída (composição média) e efluentes inicial e final estudados neste trabalho e sua relação com os valores máximos permitidos pela CETESB

Substância	Vi	Concentrações das substâncias no solo (mg <sub>substância</sub> /Kg <sub>solo</sub> ) após hipotética aplicação de:			
		Vinhaça média bruta	Vinhaça média diluída	Efluente inicial	Efluente final
<b>DQO</b>	nsa	183,1722	183,1722	67,47313	22,41012
<b>DBO</b>	nsa	82,51	82,51	52,0507	40,29295
<b>N</b>	nsa	3,227058	3,227058	na	na
<b>K</b>	nsa	19,88656	19,88656	19,88656	19,88656
<b>NH<sub>3</sub></b>	nsa	0,458389	0,458389	0,636175	0,423302
<b>NO<sub>2</sub><sup>-</sup></b>	nsa	0,010268	0,010268	0,003374	0,000905
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	nsa	0,220027	0,220027	0,09639	0,090546
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	nsa	12,83489	12,83489	9,157068	7,243676
<b>Al</b>	nsa	262,1984	262,1984	0,041448	0,025353
<b>B</b>	nsa	0,018336	0,018336	0,003566	0,00086
<b>Ba</b>	300	0,002237	0,002237	0,002651	0,002037
<b>Ca</b>	nsa	3,910974	3,910974	1,956721	1,747537
<b>Cd</b>	3	0,003887	0,003887	< 4,82E-05	< 4,53E-05
<b>Co</b>	35	nd	nd	9,64E-05	0,000136
<b>Cr</b>	150	0,00055	0,00055	0,00053	0,000498
<b>Cu</b>	200	0,002164	0,002164	0,000289	0,000407
<b>Fe</b>	nsa	0,289702	0,289702	0,035182	0,758322
<b>Mg</b>	nsa	1,576858	1,576858	1,17596	1,118243
<b>Mn</b>	nsa	0,02864	0,02864	0,018266	0,024538
<b>Mo</b>	50	0,007334	0,007334	< 4,82E-05	< 4,53E-05
<b>Na</b>	nsa	0,210125	0,210125	3,089305	2,90562
<b>Ni</b>	70	0,000953	0,000953	0,000337	0,000407
<b>Pb</b>	180	nd	nd	0,000145	0,000272
<b>Sr</b>	nsa	0,016282	0,016282	0,007277	0,006791
<b>V</b>	nsa	0,00044	0,00044	0,000111	0,000136
<b>Zn</b>	450	0,016099	0,016099	0,005012	0,002218
<b>Cl</b>	nsa	nd	nd	< 0,000482	< 0,001811
<b>SST</b>	nsa	31,17044	31,17044	0,001735	0,001268
<b>SSF</b>	nsa	nd	nd	0,000386	0,000317
<b>SSV</b>	nsa	nd	nd	0,001349	0,000951
<b>SDT</b>	nsa	nd	nd	0,049641	0,02988
<b>Condutividade (dS/m)</b>	nsa	nd	nd	0,050605	0,054328
<b>Alcalinidade (mgCaCO<sub>3</sub>.L<sup>-1</sup>)</b>	nsa	0,231028	0,231028	3,301364	6,621173

Vi: Valores de intervenção (mg/kg solo) para as substâncias encontradas em solo agrícola; na: não analisado; nd: não definido; nsa: não se aplica.

ANEXO 2 - Concentrações das substâncias no solo após aplicação de dosagem máxima de vinhaça segundo orientações da CETESB em solo do tipo 2<sup>a</sup> (Referência: Pires e Ferreira, 2008) para vinhaça bruta e vinhaça bruta diluída (composição média) e efluentes inicial e final estudados neste trabalho e sua relação com os valores máximos permitidos pela CETESB

Substância	Vi	Concentrações das substâncias no solo (mg <sub>substância</sub> /Kg <sub>solo</sub> ) após hipotética aplicação de:			
		Vinhaça média bruta	Vinhaça média diluída	Efluente inicial	Efluente final
<b>DQO</b>	nsa	290,6755	290,6755	107,0729	35,56256
<b>DBO</b>	nsa	130,9349	130,9349	82,59912	63,94077
<b>N</b>	nsa	5,121009	5,121009	na	na
<b>K</b>	nsa	31,55793	31,55793	31,55793	31,55793
<b>NH<sub>3</sub></b>	nsa	0,727416	0,727416	1,009545	0,671737
<b>NO<sub>2</sub><sup>-</sup></b>	nsa	0,016294	0,016294	0,005354	0,001437
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	nsa	0,34916	0,34916	0,152961	0,143687
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	nsa	20,36765	20,36765	14,53133	11,49497
<b>Al</b>	nsa	416,082	416,082	0,065773	0,040232
<b>B</b>	nsa	0,029097	0,029097	0,00566	0,001365
<b>Ba</b>	300	0,00355	0,00355	0,004206	0,003233
<b>Ca</b>	nsa	6,206314	6,206314	3,105115	2,773162
<b>Cd</b>	3	0,006168	0,006168	< 7,65E-05	< 7,18E-05
<b>Co</b>	35	nd	nd	0,000153	0,000216
<b>Cr</b>	150	0,000873	0,000873	0,000841	0,00079
<b>Cu</b>	200	0,003433	0,003433	0,000459	0,000647
<b>Fe</b>	nsa	0,459727	0,459727	0,055831	1,20338
<b>Mg</b>	nsa	2,502311	2,502311	1,866128	1,774536
<b>Mn</b>	nsa	0,045449	0,045449	0,028986	0,038939
<b>Mo</b>	50	0,011639	0,011639	< 7,65E-05	< 7,18E-05
<b>Na</b>	nsa	0,333448	0,333448	4,902411	4,61092
<b>Ni</b>	70	0,001513	0,001513	0,000535	0,000647
<b>Pb</b>	180	nd	nd	0,000229	0,000431
<b>Sr</b>	nsa	0,025838	0,025838	0,011549	0,010777
<b>V</b>	nsa	0,000698	0,000698	0,000176	0,000216
<b>Zn</b>	450	0,025547	0,025547	0,007954	0,00352
<b>Cl</b>	nsa	nd	nd	< 0,000765	< 0,002874
<b>SST</b>	nsa	0,049464	0,049464	0,002753	0,002012
<b>SSF</b>	nsa	nd	nd	0,000612	0,000503
<b>SSV</b>	nsa	nd	nd	0,002141	0,001509
<b>SDT</b>	nsa	nd	nd	0,078775	0,047417
<b>Condutividade (dS/m)</b>	nsa	nd	nd	0,080305	0,086212
<b>Alcalinidade (mgCaCO<sub>3</sub>.L<sup>-1</sup>)</b>	nsa	0,366618	0,366618	5,238925	10,50712

Vi: Valores de intervenção (mg/kg solo) para as substâncias encontradas em solo agrícola; na: não analisado; nd: não definido; nsa: não se aplica.

ANEXO 3 – Concentrações das substâncias no solo após aplicação de dosagem máxima de vinhaça segundo orientações da CETESB em solo do tipo 3<sup>a</sup> (Referência: Pires e Ferreira, 2008) para vinhaça bruta e vinhaça bruta diluída (composição média) e efluentes inicial e final estudados neste trabalho e sua relação com os valores máximos permitidos pela CETESB

Substância	Vi	Concentrações das substâncias no solo (mg <sub>substância</sub> /Kg <sub>solo</sub> ) após hipotética aplicação de:			
		Vinhaça média bruta	Vinhaça média diluída	Efluente inicial	Efluente final
<b>DQO</b>	nsa	183,1722	183,1722	67,47313	22,41012
<b>DBO</b>	nsa	82,51	82,51	52,0507	40,29295
<b>N</b>	nsa	3,227058	3,227058	na	na
<b>K</b>	nsa	19,88656	19,88656	19,88656	19,88656
<b>NH<sub>3</sub></b>	nsa	0,458389	0,458389	0,636175	0,423302
<b>NO<sub>2</sub><sup>-</sup></b>	nsa	0,010268	0,010268	0,003374	0,000905
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	nsa	0,220027	0,220027	0,09639	0,090546
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	nsa	12,83489	12,83489	9,157068	7,243676
<b>Al</b>	nsa	262,1984	262,1984	0,041448	0,025353
<b>B</b>	nsa	0,018336	0,018336	0,003566	0,00086
<b>Ba</b>	300	0,002237	0,002237	0,002651	0,002037
<b>Ca</b>	nsa	3,910974	3,910974	1,956721	1,747537
<b>Cd</b>	3	0,003887	0,003887	< 4,82E-05	< 4,53E-05
<b>Co</b>	35	nd	nd	9,64E-05	0,000136
<b>Cr</b>	150	0,00055	0,00055	0,00053	0,000498
<b>Cu</b>	200	0,002164	0,002164	0,000289	0,000407
<b>Fe</b>	nsa	0,289702	0,289702	0,035182	0,758322
<b>Mg</b>	nsa	1,576858	1,576858	1,17596	1,118243
<b>Mn</b>	nsa	0,02864	0,02864	0,018266	0,024538
<b>Mo</b>	50	0,007334	0,007334	< 4,82E-05	< 4,53E-05
<b>Na</b>	nsa	0,210125	0,210125	3,089305	2,90562
<b>Ni</b>	70	0,000953	0,000953	0,000337	0,000407
<b>Pb</b>	180	nd	nd	0,000145	0,000272
<b>Sr</b>	nsa	0,016282	0,016282	0,007277	0,006791
<b>V</b>	nsa	0,00044	0,00044	0,000111	0,000136
<b>Zn</b>	450	0,016099	0,016099	0,005012	0,002218
<b>Cl</b>	nsa	nd	nd	< 0,000482	< 0,001811
<b>SST</b>	nsa	0,03117	0,03117	0,001735	0,001268
<b>SSF</b>	nsa	nd	nd	0,000386	0,000317
<b>SSV</b>	nsa	nd	nd	0,001349	0,000951
<b>SDT</b>	nsa	nd	nd	0,049641	0,02988
<b>Condutividade (dS/m)</b>	nsa	nd	nd	0,050605	0,054328
<b>Alcalinidade (mgCaCO<sub>3</sub>.L<sup>-1</sup>)</b>	nsa	0,231028	0,231028	3,301364	6,621173

Vi: Valores de intervenção (mg/kg solo) para as substâncias encontradas em solo agrícola; na: não analisado; nd: não definido; nsa: não se aplica.

ANEXO 4 – Concentrações das substâncias no solo após aplicação de dosagem máxima de vinhaça segundo orientações da CETESB em solo do tipo 4 Horizonte AP (Referência: Rolim et al., 2013) para vinhaça bruta e vinhaça bruta diluída (composição média) e efluentes inicial e final estudados neste trabalho e sua relação com os valores máximos permitidos pela CETESB

Substância	Vi	Concentrações das substâncias no solo (mg <sub>substância</sub> /Kg <sub>solo</sub> ) após hipotética aplicação de:			
		Vinhaça média bruta	Vinhaça média diluída	Efluente inicial	Efluente final
<b>DQO</b>	nsa	183,1722	183,1722	67,47313	22,41012
<b>DBO</b>	nsa	82,51	82,51	52,0507	40,29295
<b>N</b>	nsa	3,227058	3,227058	na	na
<b>K</b>	nsa	19,88656	19,88656	19,88656	19,88656
<b>NH<sub>3</sub></b>	nsa	0,458389	0,458389	0,636175	0,423302
<b>NO<sub>2</sub><sup>-</sup></b>	nsa	0,010268	0,010268	0,003374	0,000905
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	nsa	0,220027	0,220027	0,09639	0,090546
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	nsa	12,83489	12,83489	9,157068	7,243676
<b>Al</b>	nsa	262,1984	262,1984	0,041448	0,025353
<b>B</b>	nsa	0,018336	0,018336	0,003566	0,00086
<b>Ba</b>	300	0,002237	0,002237	0,002651	0,002037
<b>Ca</b>	nsa	3,910974	3,910974	1,956721	1,747537
<b>Cd</b>	3	0,003887	0,003887	< 4,82E-05	< 4,53E-05
<b>Co</b>	35	nd	nd	9,64E-05	0,000136
<b>Cr</b>	150	0,00055	0,00055	0,00053	0,000498
<b>Cu</b>	200	0,002164	0,002164	0,000289	0,000407
<b>Fe</b>	nsa	0,289702	0,289702	0,035182	0,758322
<b>Mg</b>	nsa	1,576858	1,576858	1,17596	1,118243
<b>Mn</b>	nsa	0,02864	0,02864	0,018266	0,024538
<b>Mo</b>	50	0,007334	0,007334	< 4,82E-05	< 4,53E-05
<b>Na</b>	nsa	0,210125	0,210125	3,089305	2,90562
<b>Ni</b>	70	0,000953	0,000953	0,000337	0,000407
<b>Pb</b>	180	nd	nd	0,000145	0,000272
<b>Sr</b>	nsa	0,016282	0,016282	0,007277	0,006791
<b>V</b>	nsa	0,00044	0,00044	0,000111	0,000136
<b>Zn</b>	450	0,016099	0,016099	0,005012	0,002218
<b>Cl</b>	nsa	nd	nd	< 0,000482	< 0,001811
<b>SST</b>	nsa	0,03117	0,03117	0,001735	0,001268
<b>SSF</b>	nsa	nd	nd	0,000386	0,000317
<b>SSV</b>	nsa	nd	nd	0,001349	0,000951
<b>SDT</b>	nsa	nd	nd	0,049641	0,02988
<b>Condutividade (dS/m)</b>	nsa	nd	nd	0,050605	0,054328
<b>Alcalinidade (mgCaCO<sub>3</sub>.L<sup>-1</sup>)</b>	nsa	0,231028	0,231028	3,301364	6,621173

Vi: Valores de intervenção (mg/kg solo) para as substâncias encontradas em solo agrícola; na: não analisado; nd: não definido; nsa: não se aplica.

ANEXO 5 - Concentrações das substâncias no solo após aplicação de dosagem máxima de vinhaça segundo orientações da CETESB em solo do tipo 4 Horizonte A2 (Referência: Rolim et al., 2013) para vinhaça bruta e vinhaça bruta diluída (composição média) e efluentes inicial e final estudados neste trabalho e sua relação com os valores máximos permitidos pela CETESB

Substância	Vi	Concentrações das substâncias no solo (mg <sub>substância</sub> /Kg <sub>solo</sub> ) após hipotética aplicação de:			
		Vinhaça média bruta	Vinhaça média diluída	Efluente inicial	Efluente final
<b>DQO</b>	nsa	183,1722	183,1722	67,47313	22,41012
<b>DBO</b>	nsa	82,51	82,51	52,0507	40,29295
<b>N</b>	nsa	3,227058	3,227058	na	na
<b>K</b>	nsa	19,88656	19,88656	19,88656	19,88656
<b>NH<sub>3</sub></b>	nsa	0,458389	0,458389	0,636175	0,423302
<b>NO<sub>2</sub><sup>-</sup></b>	nsa	0,010268	0,010268	0,003374	0,000905
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	nsa	0,220027	0,220027	0,09639	0,090546
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	nsa	12,83489	12,83489	9,157068	7,243676
<b>Al</b>	nsa	262,1984	262,1984	0,041448	0,025353
<b>B</b>	nsa	0,018336	0,018336	0,003566	0,00086
<b>Ba</b>	300	0,002237	0,002237	0,002651	0,002037
<b>Ca</b>	nsa	3,910974	3,910974	1,956721	1,747537
<b>Cd</b>	3	0,003887	0,003887	< 4,82E-05	< 4,53E-05
<b>Co</b>	35	nd	nd	9,64E-05	0,000136
<b>Cr</b>	150	0,00055	0,00055	0,00053	0,000498
<b>Cu</b>	200	0,002164	0,002164	0,000289	0,000407
<b>Fe</b>	nsa	0,289702	0,289702	0,035182	0,758322
<b>Mg</b>	nsa	1,576858	1,576858	1,17596	1,118243
<b>Mn</b>	nsa	0,02864	0,02864	0,018266	0,024538
<b>Mo</b>	50	0,007334	0,007334	< 4,82E-05	< 4,53E-05
<b>Na</b>	nsa	0,210125	0,210125	3,089305	2,90562
<b>Ni</b>	70	0,000953	0,000953	0,000337	0,000407
<b>Pb</b>	180	nd	nd	0,000145	0,000272
<b>Sr</b>	nsa	0,016282	0,016282	0,007277	0,006791
<b>V</b>	nsa	0,00044	0,00044	0,000111	0,000136
<b>Zn</b>	450	0,016099	0,016099	0,005012	0,002218
<b>Cl</b>	nsa	nd	nd	< 0,000482	< 0,001811
<b>SST</b>	nsa	0,03117	0,03117	0,001735	0,001268
<b>SSF</b>	nsa	nd	nd	0,000386	0,000317
<b>SSV</b>	nsa	nd	nd	0,001349	0,000951
<b>SDT</b>	nsa	nd	nd	0,049641	0,02988
<b>Condutividade (dS/m)</b>	nsa	nd	nd	0,050605	0,054328
<b>Alcalinidade (mgCaCO<sub>3</sub>.L<sup>-1</sup>)</b>	nsa	0,231028	0,231028	3,301364	6,621173

Vi: Valores de intervenção (mg/kg solo) para as substâncias encontradas em solo agrícola; na: não analisado; nd: não definido; nsa: não se aplica.

ANEXO 6 – Concentrações das substâncias no solo após aplicação de dosagem máxima de vinhaça segundo orientações da CETESB em solo do tipo 4 Horizonte E (Referência: Rolim et al., 2013) para vinhaça bruta e vinhaça bruta diluída (composição média) e efluentes inicial e final estudados neste trabalho e sua relação com os valores máximos permitidos pela CETESB

Substância	Vi	Concentrações das substâncias no solo (mg <sub>substância</sub> /Kg <sub>solo</sub> ) após hipotética aplicação de:			
		Vinhaça média bruta	Vinhaça média diluída	Efluente inicial	Efluente final
<b>DQO</b>	nsa	438,9558	438,9558	161,6933	53,70386
<b>DBO</b>	nsa	197,7279	197,7279	124,7349	96,55846
<b>N</b>	nsa	7,733356	7,733356	na	na
<b>K</b>	nsa	47,65637	47,65637	47,65637	47,65637
<b>NH<sub>3</sub></b>	nsa	1,098488	1,098488	1,524537	1,014406
<b>NO<sub>2</sub><sup>-</sup></b>	nsa	0,024606	0,024606	0,008085	0,00217
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	nsa	0,527274	0,527274	0,23099	0,216985
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	nsa	30,75767	30,75767	21,9441	17,35882
<b>Al</b>	nsa	628,3352	628,3352	0,099326	0,060756
<b>B</b>	nsa	0,04394	0,04394	0,008547	0,002061
<b>Ba</b>	300	0,005361	0,005361	0,006352	0,004882
<b>Ca</b>	nsa	9,3723	9,3723	4,689107	4,187816
<b>Cd</b>	3	0,009315	0,009315	< 0,000115	< 0,000108
<b>Co</b>	35	nd	nd	0,000231	0,000325
<b>Cr</b>	150	0,001318	0,001318	0,00127	0,001193
<b>Cu</b>	200	0,005185	0,005185	0,000693	0,000976
<b>Fe</b>	nsa	0,694244	0,694244	0,084312	1,817252
<b>Mg</b>	nsa	3,778799	3,778799	2,818084	2,679768
<b>Mn</b>	nsa	0,068634	0,068634	0,043773	0,058803
<b>Mo</b>	50	0,017576	0,017576	< 0,000115	< 0,000108
<b>Na</b>	nsa	0,503547	0,503547	7,403245	6,963058
<b>Ni</b>	70	0,002285	0,002285	0,000808	0,000976
<b>Pb</b>	180	nd	nd	0,000346	0,000651
<b>Sr</b>	nsa	0,039018	0,039018	0,01744	0,016274
<b>V</b>	nsa	0,001055	0,001055	0,000266	0,000325
<b>Zn</b>	450	0,038579	0,038579	0,012012	0,005316
<b>Cl</b>	nsa	nd	nd	< 0,001155	< 0,00434
<b>SST</b>	nsa	0,074697	0,074697	0,004158	0,003038
<b>SSF</b>	nsa	nd	nd	0,000924	0,000759
<b>SSV</b>	nsa	nd	nd	0,003234	0,002278
<b>SDT</b>	nsa	nd	nd	0,11896	0,071605
<b>Condutividade (dS/m)</b>	nsa	nd	nd	0,12127	0,130191
<b>Alcalinidade (mgCaCO<sub>3</sub>.L<sup>-1</sup>)</b>	nsa	0,553638	0,553638	7,911424	15,86705

Vi: Valores de intervenção (mg/kg solo) para as substâncias encontradas em solo agrícola; na: não analisado; nd: não definido; nsa: não se aplica.

ANEXO 7 – Concentrações das substâncias no solo após aplicação de dosagem máxima de vinhaça segundo orientações da CETESB em solo do tipo 4 Horizonte Bh (Referência: Rolim et al., 2013) para vinhaça bruta e vinhaça bruta diluída (composição média) e efluentes inicial e final estudados neste trabalho e sua relação com os valores máximos permitidos pela CETESB

Substância	Vi	Concentrações das substâncias no solo (mg <sub>substância</sub> /Kg <sub>solo</sub> ) após hipotética aplicação de:			
		Vinhaça média bruta	Vinhaça média diluída	Efluente inicial	Efluente final
<b>DQO</b>	nsa	183,1722	183,1722	67,47313	22,41012
<b>DBO</b>	nsa	82,51	82,51	52,0507	40,29295
<b>N</b>	nsa	3,227058	3,227058	na	na
<b>K</b>	nsa	19,88656	19,88656	19,88656	19,88656
<b>NH<sub>3</sub></b>	nsa	0,458389	0,458389	0,636175	0,423302
<b>NO<sub>2</sub><sup>-</sup></b>	nsa	0,010268	0,010268	0,003374	0,000905
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	nsa	0,220027	0,220027	0,09639	0,090546
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	nsa	12,83489	12,83489	9,157068	7,243676
<b>Al</b>	nsa	262,1984	262,1984	0,041448	0,025353
<b>B</b>	nsa	0,018336	0,018336	0,003566	0,00086
<b>Ba</b>	300	0,002237	0,002237	0,002651	0,002037
<b>Ca</b>	nsa	3,910974	3,910974	1,956721	1,747537
<b>Cd</b>	3	0,003887	0,003887	< 4,82E-05	< 4,53E-05
<b>Co</b>	35	nd	nd	9,64E-05	0,000136
<b>Cr</b>	150	0,00055	0,00055	0,00053	0,000498
<b>Cu</b>	200	0,002164	0,002164	0,000289	0,000407
<b>Fe</b>	nsa	0,289702	0,289702	0,035182	0,758322
<b>Mg</b>	nsa	1,576858	1,576858	1,17596	1,118243
<b>Mn</b>	nsa	0,02864	0,02864	0,018266	0,024538
<b>Mo</b>	50	0,007334	0,007334	< 4,82E-05	< 4,53E-05
<b>Na</b>	nsa	0,210125	0,210125	3,089305	2,90562
<b>Ni</b>	70	0,000953	0,000953	0,000337	0,000407
<b>Pb</b>	180	nd	nd	0,000145	0,000272
<b>Sr</b>	nsa	0,016282	0,016282	0,007277	0,006791
<b>V</b>	nsa	0,00044	0,00044	0,000111	0,000136
<b>Zn</b>	450	0,016099	0,016099	0,005012	0,002218
<b>Cl</b>	nsa	nd	nd	< 0,000482	< 0,001811
<b>SST</b>	nsa	0,03117	0,03117	0,001735	0,001268
<b>SSF</b>	nsa	nd	nd	0,000386	0,000317
<b>SSV</b>	nsa	nd	nd	0,001349	0,000951
<b>SDT</b>	nsa	nd	nd	0,049641	0,02988
<b>Condutividade (dS/m)</b>	nsa	nd	nd	0,050605	0,054328
<b>Alcalinidade (mgCaCO<sub>3</sub>.L<sup>-1</sup>)</b>	nsa	0,231028	0,231028	3,301364	6,621173

Vi: Valores de intervenção (mg/kg solo) para as substâncias encontradas em solo agrícola; na: não analisado; nd: não definido; nsa: não se aplica.

ANEXO 8 – Concentrações das substâncias no solo após aplicação de dosagem máxima de vinhaça segundo orientações da CETESB em solo do tipo 4 Horizonte Bsh (Referência: Rolim et al., 2013) para vinhaça bruta e vinhaça bruta diluída (composição média) e efluentes inicial e final estudados neste trabalho e sua relação com os valores máximos permitidos pela CETESB

Substância	Vi	Concentrações das substâncias no solo (mg <sub>substância</sub> /Kg <sub>solo</sub> ) após hipotética aplicação de:			
		Vinhaça média bruta	Vinhaça média diluída	Efluente inicial	Efluente final
<b>DQO</b>	nsa	183,1722	183,1722	67,47313	22,41012
<b>DBO</b>	nsa	82,51	82,51	52,0507	40,29295
<b>N</b>	nsa	3,227058	3,227058	na	na
<b>K</b>	nsa	19,88656	19,88656	19,88656	19,88656
<b>NH<sub>3</sub></b>	nsa	0,458389	0,458389	0,636175	0,423302
<b>NO<sub>2</sub><sup>-</sup></b>	nsa	0,010268	0,010268	0,003374	0,000905
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	nsa	0,220027	0,220027	0,09639	0,090546
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	nsa	12,83489	12,83489	9,157068	7,243676
<b>Al</b>	nsa	262,1984	262,1984	0,041448	0,025353
<b>B</b>	nsa	0,018336	0,018336	0,003566	0,00086
<b>Ba</b>	300	0,002237	0,002237	0,002651	0,002037
<b>Ca</b>	nsa	3,910974	3,910974	1,956721	1,747537
<b>Cd</b>	3	0,003887	0,003887	< 4,82E-05	< 4,53E-05
<b>Co</b>	35	nd	nd	9,64E-05	0,000136
<b>Cr</b>	150	0,00055	0,00055	0,00053	0,000498
<b>Cu</b>	200	0,002164	0,002164	0,000289	0,000407
<b>Fe</b>	nsa	0,289702	0,289702	0,035182	0,758322
<b>Mg</b>	nsa	1,576858	1,576858	1,17596	1,118243
<b>Mn</b>	nsa	0,02864	0,02864	0,018266	0,024538
<b>Mo</b>	50	0,007334	0,007334	< 4,82E-05	< 4,53E-05
<b>Na</b>	nsa	0,210125	0,210125	3,089305	2,90562
<b>Ni</b>	70	0,000953	0,000953	0,000337	0,000407
<b>Pb</b>	180	nd	nd	0,000145	0,000272
<b>Sr</b>	nsa	0,016282	0,016282	0,007277	0,006791
<b>V</b>	nsa	0,00044	0,00044	0,000111	0,000136
<b>Zn</b>	450	0,016099	0,016099	0,005012	0,002218
<b>Cl</b>	nsa	nd	nd	< 0,000482	< 0,001811
<b>SST</b>	nsa	0,03117	0,03117	0,001735	0,001268
<b>SSF</b>	nsa	nd	nd	0,000386	0,000317
<b>SSV</b>	nsa	nd	nd	0,001349	0,000951
<b>SDT</b>	nsa	nd	nd	0,049641	0,02988
<b>Condutividade (dS/m)</b>	nsa	nd	nd	0,050605	0,054328
<b>Alcalinidade (mgCaCO<sub>3</sub>.L<sup>-1</sup>)</b>	nsa	0,231028	0,231028	3,301364	6,621173

Vi: Valores de intervenção (mg/kg solo) para as substâncias encontradas em solo agrícola; na: não analisado; nd: não definido; nsa: não se aplica.

ANEXO 9 – Concentrações das substâncias no solo após aplicação de dosagem máxima de vinhaça segundo orientações da CETESB em solo do tipo 5 testemunho (Referência: Zolin et al., 2011) para vinhaça bruta e vinhaça bruta diluída (composição média) e efluentes inicial e final estudados neste trabalho e sua relação com os valores máximos permitidos pela CETESB

Substância	Vi	Concentrações das substâncias no solo (mg <sub>substância</sub> /Kg <sub>solo</sub> ) após hipotética aplicação de:			
		Vinhaça média bruta	Vinhaça média diluída	Efluente inicial	Efluente final
<b>DQO</b>	nsa	596,5037	596,5037	219,7275	72,97899
<b>DBO</b>	nsa	268,6954	268,6954	169,5041	131,2148
<b>N</b>	nsa	10,50897	10,50897	0	0
<b>K</b>	nsa	64,76096	64,76096	64,76096	64,76096
<b>NH<sub>3</sub></b>	nsa	1,492752	1,492752	2,071717	1,378492
<b>NO<sub>2</sub><sup>-</sup></b>	nsa	0,033438	0,033438	0,010986	0,002949
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	nsa	0,716521	0,716521	0,313896	0,294865
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	nsa	41,79706	41,79706	29,82016	23,58917
<b>Al</b>	nsa	853,8542	853,8542	0,134975	0,082562
<b>B</b>	nsa	0,05971	0,05971	0,011614	0,002801
<b>Ba</b>	300	0,007285	0,007285	0,008632	0,006634
<b>Ca</b>	nsa	12,73616	12,73616	6,372098	5,690887
<b>Cd</b>	3	0,012659	0,012659	< 0,000157	< 0,000147
<b>Co</b>	35	nd	nd	0,000314	0,000442
<b>Cr</b>	150	0,001791	0,001791	0,001726	0,001622
<b>Cu</b>	200	0,007046	0,007046	0,000942	0,001327
<b>Fe</b>	nsa	0,943419	0,943419	0,114572	2,469491
<b>Mg</b>	nsa	5,135067	5,135067	3,829537	3,641578
<b>Mn</b>	nsa	0,093267	0,093267	0,059483	0,079908
<b>Mo</b>	50	0,023884	0,023884	< 0,000157	< 0,000147
<b>Na</b>	nsa	0,684278	0,684278	10,06038	9,462205
<b>Ni</b>	70	0,003105	0,003105	0,001099	0,001327
<b>Pb</b>	180	nd	nd	0,000471	0,000885
<b>Sr</b>	nsa	0,053023	0,053023	0,023699	0,022115
<b>V</b>	nsa	0,001433	0,001433	0,000361	0,000442
<b>Zn</b>	450	0,052425	0,052425	0,016323	0,007224
<b>Cl</b>	nsa	nd	nd	< 0,001569	< 0,005897
<b>SST</b>	nsa	0,101507	0,101507	0,00565	0,004128
<b>SSF</b>	nsa	nd	nd	0,001256	0,001032
<b>SSV</b>	nsa	nd	nd	0,004395	0,003096
<b>SDT</b>	nsa	nd	nd	0,161657	0,097305
<b>Condutividade (dS/m)</b>	nsa	nd	nd	0,164796	0,176919
<b>Alcalinidade (mgCaCO<sub>3</sub>.L<sup>-1</sup>)</b>	nsa	0,752347	0,752347	10,75095	21,56197

Vi: Valores de intervenção (mg/kg solo) para as substâncias encontradas em solo agrícola; na: não analisado; nd: não definido; nsa: não se aplica.

ANEXO 10 – Concentrações das substâncias no solo após aplicação de dosagem máxima de vinhaça segundo orientações da CETESB em solo do tipo 5 após 20 aplicações de vinhaça (Referência: Zolin et al., 2011) para vinhaça bruta e vinhaça bruta diluída (composição média) e efluentes inicial e final estudados neste trabalho e sua relação com os valores máximos permitidos pela CETESB

Substância	Vi	Concentrações das substâncias no solo (mg <sub>substância</sub> /Kg <sub>solo</sub> ) após hipotética aplicação de:				
		Vinhaça média bruta	Vinhaça média diluída	Efluente inicial	Efluente final	
<b>DQO</b>	nsa	440,8093	440,8093		162,3761	53,93063
<b>DBO</b>	nsa	198,5628	198,5628		125,2616	96,96618
<b>N</b>	nsa	7,76601	7,76601		na	na
<b>K</b>	nsa	47,8576	47,8576		47,8576	47,8576
<b>NH<sub>3</sub></b>	nsa	1,103126	1,103126		1,530975	1,01869
<b>NO<sub>2</sub><sup>-</sup></b>	nsa	0,02471	0,02471		0,008119	0,002179
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	nsa	0,529501	0,529501		0,231966	0,217902
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	nsa	30,88754	30,88754		22,03676	17,43212
<b>Al</b>	nsa	630,9884	630,9884		0,099745	0,061012
<b>B</b>	nsa	0,044125	0,044125		0,008583	0,00207
<b>Ba</b>	300	0,005383	0,005383		0,006379	0,004903
<b>Ca</b>	nsa	9,411875	9,411875		4,708907	4,2055
<b>Cd</b>	3	0,009355	0,009355	<	0,000116	< 0,000109
<b>Co</b>	35	nd	nd		0,000232	0,000327
<b>Cr</b>	150	0,001324	0,001324		0,001276	0,001198
<b>Cu</b>	200	0,005207	0,005207		0,000696	0,000981
<b>Fe</b>	nsa	0,697176	0,697176		0,084668	1,824925
<b>Mg</b>	nsa	3,794755	3,794755		2,829983	2,691084
<b>Mn</b>	nsa	0,068923	0,068923		0,043958	0,059051
<b>Mo</b>	50	0,01765	0,01765	<	0,000116	< 0,000109
<b>Na</b>	nsa	0,505673	0,505673		7,434506	6,99246
<b>Ni</b>	70	0,002295	0,002295		0,000812	0,000981
<b>Pb</b>	180	nd	nd		0,000348	0,000654
<b>Sr</b>	nsa	0,039183	0,039183		0,017513	0,016343
<b>V</b>	nsa	0,001059	0,001059		0,000267	0,000327
<b>Zn</b>	450	0,038742	0,038742		0,012062	0,005339
<b>Cl</b>	nsa	nd	nd	<	0,00116	< 0,004358
<b>SST</b>	nsa	0,075013	0,075013		0,004175	0,003051
<b>SSF</b>	nsa	nd	nd		0,000928	0,000763
<b>SSV</b>	nsa	nd	nd		0,003248	0,002288
<b>SDT</b>	nsa	nd	nd		0,119462	0,071908
<b>Condutividade (dS/m)</b>	nsa	nd	nd		0,121782	0,130741
<b>Alcalinidade (mgCaCO<sub>3</sub>.L<sup>-1</sup>)</b>	nsa	0,555976	0,555976		7,94483	15,93405

Vi: Valores de intervenção (mg/kg solo) para as substâncias encontradas em solo agrícola; na: não analisado; nd: não definido; nsa: não se aplica.