



Helenton Carlos da Silva
(Organizador)

Engenharia
Ambiental e Sanitária:
Interfaces do Conhecimento 2

Atena
Editora

Ano 2019

Helenton Carlos da Silva
(Organizador)

Engenharia Ambiental e Sanitária:
Interfaces do Conhecimento 2

Atena Editora
2019

2019 by Atena Editora
Copyright © Atena Editora
Copyright do Texto © 2019 Os Autores
Copyright da Edição © 2019 Atena Editora
Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira
Diagramação: Natália Sandrini
Edição de Arte: Lorena Prestes
Revisão: Os Autores



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição Creative Commons. Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores. Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

Profª Drª Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Alexandre Jose Schumacher – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia
Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Faria – Universidade Estácio de Sá
Prof. Dr. Eloi Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima
Prof. Dr. Fabiano Tadeu Grazioli – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Profª Drª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Universidade Federal do Maranhão
Profª Drª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste
Profª Drª Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia
Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista
Profª Drª Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Profª Drª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Profª Drª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto
Prof. Dr. Alexandre Leite dos Santos Silva – Universidade Federal do Piauí
Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)	
E57	<p>Engenharia ambiental e sanitária [recurso eletrônico] : interfaces do conhecimento 2 / Organizador Helenton Carlos da Silva. – Ponta Grossa, PR: Atena Editora, 2019. – (Engenharia Ambiental e Sanitária. Interfaces do Conhecimento; v. 2)</p> <p>Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-85-7247-694-2 DOI 10.22533/at.ed.942190910</p> <p>1. Engenharia ambiental. 2. Engenharia sanitária I. Silva, Helenton Carlos da. II. Série.</p> <p style="text-align: right;">CDD 628.362</p>
Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422	

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná - Brasil
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

A obra “*Engenharia Ambiental e Sanitária Interfaces do Conhecimento*” aborda uma série de livros de publicação da Atena Editora, em seu II volume, apresenta, em seus 31 capítulos, discussões de diversas abordagens acerca da importância da engenharia ambiental e sanitária, tendo como base suas diversas interfaces do conhecimento.

Entre os muitos usuários da água, há um setor que apresenta a maior interação e interface com o de recursos hídricos, o setor de saneamento.

A questão das interfaces entre saneamento e recursos hídricos coloca-se no saneamento como usuário de água e como instrumento de controle de poluição, em consequência, de preservação dos recursos hídricos.

Estas interfaces, como linhas integradas prioritárias de pesquisa, relacionam-se ao desenvolvimento e a inovação, seja de caráter científico e tecnológico, entre as áreas de recursos hídricos, saneamento, meio ambiente e saúde pública.

Dentro deste contexto podemos destacar que o saneamento básico é envolto de muita complexidade, na área da engenharia ambiental e sanitária, pois muitas vezes é visto a partir dos seus fins, e não exclusivamente dos meios necessários para atingir os objetivos almejados.

Neste contexto, abrem-se diversas opções que necessitam de abordagens disciplinares, abrangendo um importante conjunto de áreas de conhecimento, desde as ciências humanas até as ciências da saúde, obviamente transitando pelas tecnologias e pelas ciências sociais aplicadas. Se o objeto saneamento básico encontra-se na interseção entre o ambiente, o ser humano e as técnicas podem ser facilmente traçados distintos percursos multidisciplinares, potencialmente enriquecedores para a sua compreensão.

Neste sentido, este livro é dedicado aos trabalhos relacionados a estas diversas interfaces do conhecimento da engenharia ambiental e sanitária. A importância dos estudos dessa vertente é notada no cerne da produção do conhecimento, tendo em vista o volume de artigos publicados. Nota-se também uma preocupação dos profissionais de áreas afins em contribuir para o desenvolvimento e disseminação do conhecimento.

Os organizadores da Atena Editora agradecem especialmente os autores dos diversos capítulos apresentados, parabenizam a dedicação e esforço de cada um, os quais viabilizaram a construção dessa obra no viés da temática apresentada.

Por fim, desejamos que esta obra, fruto do esforço de muitos, seja seminal para todos que vierem a utilizá-la.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
PLANOS MUNICIPAIS DE SANEAMENTO BÁSICO: EXPERIÊNCIAS E COMPREENSÕES PARA SEU ACOMPANHAMENTO E ATUALIZAÇÃO	
Marcelo Seleme Matias	
DOI 10.22533/at.ed.9421909101	
CAPÍTULO 2	17
AS CARAVANAS DE SANEAMENTO NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO: FORMA DE DIÁLOGO DE SABERES E DE CAPACITAÇÃO PARA O PROCESSO DE ELABORAÇÃO DE PLANOS MUNICIPAIS DE SANEAMENTO BÁSICO	
Luiz Roberto Santos Moraes	
Luciana Espinheira da Costa Khoury	
Ilka Vlaida Almeida Valadão	
DOI 10.22533/at.ed.9421909102	
CAPÍTULO 3	29
AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS DE PROJEÇÃO POPULACIONAL PARA ELABORAÇÃO DE PROJETOS DE SANEAMENTO BÁSICO EM BELÉM DO PARÁ	
Giovanni Chaves Penner	
Laércio dos Santos Rosa Junior	
Ana Gabriela Santos Dias	
DOI 10.22533/at.ed.9421909103	
CAPÍTULO 4	37
ESTIMATIVA DE POTENCIAL HÍDRICO SUBTERRÂNEO NA REGIÃO NORTE DO ESTADO DO PARANÁ	
Maurício Marchand Krüger	
Cláudio Marchand Krüger	
Rodrigo Pinheiro Pacheco	
Marcos Cesar Santos da Silva	
DOI 10.22533/at.ed.9421909104	
CAPÍTULO 5	51
ESTRATÉGIAS INSTITUCIONAIS E REGULATÓRIAS PARA ENFRENTAMENTO DA CRISE HÍDRICA NO ESTADO DE SÃO PAULO	
Ester Feche Guimarães	
Marcel Costa Sanches	
DOI 10.22533/at.ed.9421909105	
CAPÍTULO 6	61
PARCERIAS PÚBLICO-PRIVADAS: DO CONCEITO À PRÁTICA, UMA ÊNFASE NO SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DA BAHIA	
Renavan Andrade Sobrinho	
Abelardo de Oliveira Filho	
Cristiane Sandes Tosta	
DOI 10.22533/at.ed.9421909106	

CAPÍTULO 7	74
ANÁLISE DA QUALIDADE DE ÁGUA DE POÇOS SEDIMENTADOS NAS COMUNIDADES RURAIS DO MUNICÍPIO DE SÃO MIGUEL DO IGUAÇU	
Maria Cristina Scarpari Juliana Ninov Márcia Antonia Bartolomeu Agustini Fabio Orssatto	
DOI 10.22533/at.ed.9421909107	
CAPÍTULO 8	92
CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA CLARIFICADA PROVENIENTE DO TRATAMENTO DO RESÍDUO DO TRATAMENTO DE ÁGUA EM CICLO COMPLETO	
Isadora Alves Lovo Ismail Angela Di Bernardo Dantas Luiz Di Bernardo Cristina Filomêna Pereira Rosa Paschoalato Mateus Ancheschi Roveda Guimarães	
DOI 10.22533/at.ed.9421909108	
CAPÍTULO 9	105
PRÉ-TRATAMENTO DE ÁGUA DE TORRE DE RESFRIAMENTO VISANDO REÚSO	
Nathalia Oliveira dos Santos Lídia Yokoyama Vanessa Reich de Oliveira Gabriel Travagini Ribeiro	
DOI 10.22533/at.ed.9421909109	
CAPÍTULO 10	118
PRÉ-TRATAMENTO DE ÁGUA DO MAR AO SISTEMA DE OSMOSE INVERSA EM USINAS TERMELÉTRICAS	
Luciano Dias Xavier Lídia Yokoyama Vanessa Reich de Oliveira Gabriel Travagini Ribeiro	
DOI 10.22533/at.ed.94219091010	
CAPÍTULO 11	131
QUALIDADE DAS ÁGUAS DO PARQUE LAGOAS DO NORTE, TERESINA-PI	
Rafael Diego Barbosa Soares Carlos Ernando da Silva Ronne Wesley Lopes da Cruz	
DOI 10.22533/at.ed.94219091011	
CAPÍTULO 12	141
CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA DA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DO RIBEIRÃO SANTO AMARO, ESTADO DO ESPÍRITO SANTO	
Caio Henrique Ungarato Fiorese Herbert Torres Gilson Silva Filho	
DOI 10.22533/at.ed.94219091012	

CAPÍTULO 13	156
CONTROLE DE ENCHENTES E A ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA EM BLUMENAU, SC, BRASIL	
Raphael Franco do Amaral Tafner Roberto Righi	
DOI 10.22533/at.ed.94219091013	
CAPÍTULO 14	168
APLICAÇÃO DE TETO JARDIM RESIDENCIAL NA REDUÇÃO DE ALAGAMENTO URBANO	
Raquel da Silva Pinto Camila de Fátima Lustosa Gabriele Sabbadine André Augusto Gutierrez Fernandes Beati Rafael Augusto Valentim da Cruz Magdalena Luciane de Souza Oliveira Valentim	
DOI 10.22533/at.ed.94219091014	
CAPÍTULO 15	180
DESENVOLVIMENTO DE GEOPOLÍMEROS COM A INCORPORAÇÃO DO LODO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA	
Matheus Rossetto Luciano Senff Simone Malutta Rubia Lana Britenbach Meert Bruno Borges Gentil	
DOI 10.22533/at.ed.94219091015	
CAPÍTULO 16	194
BENCHMARKING DE DESEMPENHO ENTRE OPERADORAS DE ÁGUA E ESGOTO EM NÍVEL DE BACIA HIDROGRÁFICA	
Tiago Balieiro Cetrulo Aline Doria de Santi Rui Domingos Ribeiro da Cunha Marques Tadeu Fabrício Malheiros Natália Molina Cetrulo	
DOI 10.22533/at.ed.94219091016	
CAPÍTULO 17	203
ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA EM EFLUENTES SIMULADOS DA INDÚSTRIA DE LATICÍNIOS	
Micheli Tutumi de Araujo Alexandre Saron	
DOI 10.22533/at.ed.94219091017	
CAPÍTULO 18	218
ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA DO USO DE ÁGUA RESIDUÁRIA COMO ÁGUA DE AMASSAMENTO PARA CONCRETO	
André Schramm Brandão Ênio Pontes de Deus Antônio Eduardo Bezerra Cabral Wyoskynaria Mihaly Maia da Silva Francisco Altanízio Batista de Castro Júnior	
DOI 10.22533/at.ed.94219091018	

CAPÍTULO 19	231
APLICAÇÃO DO MÉTODO ESTATÍSTICO DCCR NA REMOÇÃO DE CORANTES EM EFLUENTE TÊXTIL POR PROCESSO DE ELETROCOAGULAÇÃO	
Fabíola Tomassoni Elisângela Edila Schneider Cristiane Lisboa Giroletti Maria Eliza Nagel-Hassemer Flávio Rubens Lapolli	
DOI 10.22533/at.ed.94219091019	
CAPÍTULO 20	244
DESAGUAMENTO E HIGIENIZAÇÃO DE LODO DE ESGOTO UTILIZANDO ESTUFA AGRÍCOLA SOBRE LEITOS DE SECAGEM	
Juliana Guasti Lozer Ricardo Franci Gonçalves Vinícius Mattos Fabris	
DOI 10.22533/at.ed.94219091020	
CAPÍTULO 21	254
DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO DE CADASTRAMENTO E CLASSIFICAÇÃO DE ÁREAS POTENCIALMENTE CONTAMINADAS PELA DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	
Renato Ribeiro Siman Hugo de Oliveira Fagundes Larissa Pereira Miranda Luciana Harue Yamane	
DOI 10.22533/at.ed.94219091021	
CAPÍTULO 22	267
ENZIMAS LIGNINOLÍTICAS DE <i>Trametes sp.</i> NA REMEDIAÇÃO DE COMPOSTOS FENÓLICOS GERADOS DURANTE TRATAMENTO DE EFLUENTE KRAFT EM LAGOAS AERADAS FACULTATIVAS	
Eliane Perreira Machado Gustavo Henrique Couto Aline Cristine Hermann Bonato Camila Peitz Claudia Regina Xavier	
DOI 10.22533/at.ed.94219091022	
CAPÍTULO 23	276
ESTUDO COMPARATIVO DA SECAGEM NATURAL DE LODOS DE ETEs SUBMETIDOS AO PROCESSO DE CENTRIFUGAÇÃO	
Sara Rachel Orsi Moretto Walmor Cardoso Godoi Sebastião Ribeiro Junior	
DOI 10.22533/at.ed.94219091023	

CAPÍTULO 24	287
ESTUDO DA AÇÃO DE CONSÓRCIOS MICROBIANOS NA REMEDIAÇÃO DE ÁGUAS CONTAMINADAS	
Viviane Nascimento da Silva e Sá Fabiana Valéria da Fonseca Leila Yone Reznik Tito Lívio Moitinho Alves	
DOI 10.22533/at.ed.94219091024	
CAPÍTULO 25	300
ESTUDO DO ACÚMULO DE NITRITO EM REATOR SEQUENCIAL EM BATELADA VISANDO A REMOÇÃO DE NITROGÊNIO PELA VIA CURTA	
Ajadir Fazolo Alisson Luiz Boeing Kátia Valéria Marques Cardoso Prates Paulo Henrique Mazieiro Pohlmann Rafael Coelho Ciciliato Rafaella Oliveira Baracho	
DOI 10.22533/at.ed.94219091025	
CAPÍTULO 26	311
GESTÃO DE MICROPOLUENTES EM BACIAS HIDROGRÁFICAS URBANAS: O CASO DO RIO BELÉM, CURITIBA, PARANÁ	
Demian da Silveira Barcellos Harry Alberto Bollmann	
DOI 10.22533/at.ed.94219091026	
CAPÍTULO 27	330
II-032 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE REÚSO AGROPECUÁRIO DOS EFLUENTES DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO DA EMBASA, SITUADAS NO SEMIÁRIDO BAIANO	
Evanildo Pereira de Lima Helder Guimarães Aragão	
DOI 10.22533/at.ed.94219091027	
CAPÍTULO 28	339
IMPLANTAÇÃO DE SISTEMA DE REÚSO URBANO NÃO POTÁVEL EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO	
Juliana Guasti Lozer Victor Correia Faustini Cinthia Gabriela de Freitas Ribeiro Vieira Reis Nadja Lima Gorza Renata Maia das Flores	
DOI 10.22533/at.ed.94219091028	
CAPÍTULO 29	351
O REÚSO DA ÁGUA DE EFLUENTE NO PÓLO PETROQUÍMICO DE CAPUAVA – SÃO PAULO	
Sâmia Rafaela Maracaípe Lima Eduardo Ueslei de Souza Siqueira Layse de Oliveira Portéglio Mainara Generoso Faustino	
DOI 10.22533/at.ed.94219091029	

CAPÍTULO 30	363
PRODUÇÃO DE BIOMASSA MICROALGAL EM EFLUENTE SUCROALCOOLEIRO CLARIFICADO POR COAGULAÇÃO ELETROQUÍMICA	
Mauricio Daniel Montaña Saavedra	
Viktor Oswaldo Cárdenas Concha	
Reinaldo Gaspar Bastos	
DOI 10.22533/at.ed.94219091030	
CAPÍTULO 31	379
USO DE ESGOTOS TRATADOS NO NORDESTE DO BRASIL: POTENCIAIS E DESAFIOS	
Rafaela Ribeiro de Oliveira	
Yldeney Silva Domingos	
Luara Musse de Oliveira	
DOI 10.22533/at.ed.94219091031	
SOBRE O ORGANIZADOR.....	391
ÍNDICE REMISSIVO	392

PRODUÇÃO DE BIOMASSA MICROALGAL EM EFLUENTE SUCROALCOOLEIRO CLARIFICADO POR COAGULAÇÃO ELETROQUÍMICA

Mauricio Daniel Montaña Saavedra

Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Tecnologia Agroindustrial e Socioeconomia Rural
Araras – São Paulo

Viktor Oswaldo Cárdenas Concha

Universidade Federal de São Paulo, Departamento de Engenharia Química
Diadema – São Paulo

Reinaldo Gaspar Bastos

Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Tecnologia Agroindustrial e Socioeconomia Rural
Araras – São Paulo

RESUMO: O processo de produção de etanol combustível gera quantidades consideráveis de vinhaça como água residuária. Devido aos grandes volumes gerados por safra, o cultivo de microalgas surge como alternativa de tratamento, visando a remoção de carbono e nutrientes e obtendo biomassa passível de aproveitamento comercial. Como o efluente apresenta pH ácido e elevada turbidez, faz-se necessário um pré-tratamento para adequar a vinhaça como meio de cultivo. Neste contexto, o trabalho teve como objetivo avaliar o processo integrado de eletrocoagulação da vinhaça de cana-de-açúcar com eletrodos de alumínio ou ferro e posterior cultivo da microalga

Desmodesmus subspicatus. A eletrocoagulação com ambos materiais adequou o pH da vinhaça e clarificou o efluente, sendo necessária a dosagem de 2,9 g Al⁺³ L⁻¹ ou 11,1 g Fe⁺² L⁻¹ pela eletrólise usando eletrodos de alumínio ou ferro, respectivamente. O grau de clarificação atingido foi superior à centrifugação (método de clarificação alternativo), a qual precisou de ajuste de pH para o posterior cultivo da microalga. O cultivo mixotrófico de *D. subspicatus* mostrou uma elevada produtividade de biomassa (1,47 g L⁻¹ dia⁻¹) e rendimento biomassa/substrato (1,46 g biomassa g COT⁻¹). O processo integrado atingiu a remoção de 68 e 76% do carbono orgânico e nitrogênio total da vinhaça *in natura*, respectivamente, usando eletrodos de alumínio. O cultivo em vinhaça pré-tratada com eletrodos de ferro mostrou resultados inferiores, indicando uma possível interferência de espécies do metal remanescentes no meio. **PALAVRAS-CHAVE:** Clarificação, Cultivo mixotrófico, *Desmodesmus subspicatus*, Eletrocoagulação, Vinhaça.

MICROALGAL BIOMASS PRODUCTION
FROM SUGARCANE PROCESSING
WASTEWATER CLARIFIED BY
ELECTROCHEMICAL COAGULATION

ABSTRACT: The ethanol fuel productive

process generates considerable amounts of vinasse as wastewater. Due to the large generated volumes, microalgae cultivation is an alternative for treatment, in order to remove carbon and nutrients and to produce valuable biomass. However, due to vinasse high turbidity and acidic pH, it is necessary to perform a pretreatment process to adequate the effluent as a culture medium. In this context, the objective of this work was to evaluate the integrated process of electrocoagulation of sugarcane vinasse using aluminum or iron electrodes and subsequent cultivation of the *Desmodesmus subspicatus* microalgae. Electrocoagulation with both materials adjusted vinasse pH and clarified the effluent, being necessary the dosage of $2.9 \text{ g Al}^{+3} \text{ L}^{-1}$ or $11.1 \text{ g Fe}^{+2} \text{ L}^{-1}$ by the electrolysis using aluminum or iron electrodes, respectively. Electrocoagulation was more efficient in turbidity removal than centrifugation (an alternative clarification method), which required adjustment of pH for the subsequent cultivation of the microalgae. The mixotrophic cultivation of *D. subspicatus* showed high biomass productivity ($1.47 \text{ g L}^{-1} \text{ day}^{-1}$) and biomass to substrate yield ($1.46 \text{ g biomass g COT}^{-1}$). The integrated process removed 68 and 76% of the organic carbon and total nitrogen from raw sugarcane vinasse, respectively, using aluminum electrodes. The microalgae cultivation in vinasse pretreated using iron electrodes showed inferior results, indicating a possible interference of remaining metal species in the medium.

KEYWORDS: Clarification, *Desmodesmus subspicatus*, Electrocoagulation, Mixotrophic cultivation, Vinasse.

1 | INTRODUÇÃO

A produção brasileira de etanol a partir de cana-de-açúcar atinge atualmente mais de 30 bilhões de litros (CONAB, 2019). A depender da configuração da fermentação-destilação, o processo produtivo gera, por cada litro de etanol, em torno de 10 a 14 litros de vinhaça, a principal água residuária deste setor (DIAS *et al.*, 2015). Por causa do grande volume gerado, a disposição desta água residuária é um dos maiores desafios envolvidos na produção de etanol. Atualmente, a disposição de vinhaça *in natura* no solo é permitida sem nenhum tipo de tratamento prévio, na forma de fertirrigação dos canaviais. No entanto, o volume do efluente utilizado para tal prática é restrito e a mesma deve ser efetuada de forma criteriosa segundo estabelece a normativa P4.231 da CETESB para evitar poluição de corpos de água, acúmulo superficial de vinhaça, ocorrência de processos erosivos, geração de maus odores e proliferação de vetores (CETESB, 2015). Nesse sentido, o volume de vinhaça restante deve receber um tratamento adequado antes de sua disposição no ambiente.

Dentre as alternativas para o tratamento da vinhaça destaca-se o cultivo microbiano. Em especial, a produção de biomassa microalgal tem se tornado atrativa nos últimos anos devido a que é uma potencial fonte de biomoléculas de interesse industrial e matéria prima para uma variedade de produtos de valor agregado (BENEMANN, 2013). Portanto, o cultivo desses micro-organismos no efluente

poderia gerar um duplo ganho, ou seja, ambiental, ao minimizar a carga poluidora da vinhaça, e econômico, ao possibilitar o desenvolvimento de novos produtos, gerando novas fontes de receita e uma maior competitividade da indústria sucroalcooleira (BRASIL; SILVA; SIQUEIRA, 2016).

Considerando que a vinhaça apresenta uma elevada turbidez, faz-se necessário a clarificação prévia para permitir a adequada incidência de luz no efluente, possibilitando dessa forma o cultivo mixotrófico (SANTANA *et al.*, 2017). Nesse sentido, a eletrocoagulação pode ser uma alternativa promissora, uma vez que o processo tem a capacidade de clarificar variados efluentes sem diluição prévia nem adição de reagentes químicos (MOUSSA *et al.*, 2017). Este método eletroquímico baseia-se na geração *in situ* simultânea de espécies químicas coagulantes (cátions polivalentes), hidrogênio gasoso (H₂) e íons hidroxila (OH⁻) pela oxidação eletrolítica de um ânodo de sacrifício e pela decomposição da água na superfície do cátodo, desencadeada pela passagem de uma corrente elétrica entre eletrodos (HAKIZIMANA *et al.*, 2017).

Nesse contexto, o trabalho teve como objetivo estudar o processo integrado de eletrocoagulação da vinhaça de cana-de-açúcar e posterior cultivo da microalga *Desmodesmus subspicatus*, avaliando o material dos eletrodos, a dosagem de Al⁺³ ou Fe⁺² pela eletrólise necessária para a clarificação, a produtividade de biomassa e a remoção da carga poluidora do efluente.

2 | MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Vinhaça de cana-de-açúcar

A vinhaça utilizada no estudo foi coletada no mês de setembro/2017 diretamente da saída das colunas de destilação de uma usina sucroalcooleira de Araras-SP e mantidas congeladas (-20°C) até uso. A caracterização da vinhaça *in natura* utilizada no estudo é descrita na Tabela 1.

PARÂMETRO	VALOR	UNIDADES
pH	4,3 ± 0,1	-
Turbidez	2400 ± 400	NTU
Sólidos suspensos (SS)	5,5 ± 0,2	g L ⁻¹
Carbono orgânico total (COT)	10,1 ± 0,4	g L ⁻¹
Nitrogênio total (NT)	0,59 ± 0,02	g L ⁻¹

Tabela 1. Parâmetros físico-químicos da vinhaça de cana-de-açúcar *in natura*.

Valor médio ± desvio padrão (n = 3).

2.2 Pré-tratamento por coagulação eletroquímica

Para o estudo do pré-tratamento por eletrocoagulação (EC) usou-se um reator eletrolítico de bancada tipo batelada (Figura 1), composto por: (1) fonte elétrica de corrente contínua (0-12 V; 0-50 A); (2) cuba eletrolítica de material plástico (150 x 150 x 150 mm), contendo 2,8 L de vinhaça; (3) eletrodos metálicos (125 x 80 x 2 mm) em arranjo paralelo, 2 cátodos e 2 ânodos, área anódica total de 300 cm² e distância cátodo-ânodo de 2 cm; (4) agitador magnético (45 x 9 mm diâmetro). A eletrocoagulação foi conduzida usando eletrodos de alumínio ou ferro por até 5 horas, corrente constante de 6 A (densidade de corrente = 20 mA cm⁻²; relação área anódica : volume = 0,107 cm⁻¹), inversão de polaridade automática em intervalos de 15 min e agitação de 450 rpm, como sugerido em estudos similares (KANNAN; KARTHIKEYAN; TAMILSELVAN, 2006; KHANDEGAR; SAROHA, 2012). Coletaram-se amostras em intervalos de uma hora, para posterior sedimentação por 24 horas e avaliação físico-química do sobrenadante, a fim de estabelecer a dosagem necessária de Al⁺³ ou Fe⁺², segundo o material dos eletrodos utilizado, para adequar a vinhaça para o posterior cultivo de *D. subspicatus*.

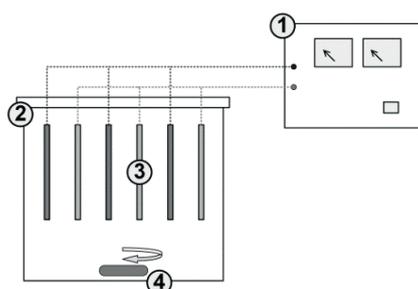


Figura 1. Reator eletrolítico de bancada.

A dosagem de Al⁺³ ou Fe⁺² em cada caso foi calculada a partir da lei de *Faraday*, segundo a Equação 1, na qual m = dosagem de Al⁺³ ou Fe⁺² (massa de ânodo dissolvido na eletrólise), expresso em g L⁻¹; I = corrente elétrica aplicada, expressa em A; t = tempo de eletrólise expresso em h; M = massa molar da espécie química (55,8 g mol⁻¹ para o ferro e 27 g mol⁻¹ para o alumínio); z = carga elétrica da espécie química (3 para o alumínio e 2 para o ferro); F = constante de *Faraday* (96500 C mol⁻¹); Vol = volume de vinhaça, expresso em L.

$$m = \frac{I t M}{3600 z F Vol} \quad \text{Equação 1}$$

Uma vez determinadas as dosagens necessárias, a eficiência na remoção de turbidez, COT e NT da eletrocoagulação com eletrodos de ferro e alumínio com essas dosagens (pré-tratamentos 1 e 2, respectivamente) foi comparada com a eficiência de

processos de pré-tratamento alternativos (pré-tratamentos 3 e 4), segundo a Tabela 2. A centrifugação nos pré-tratamentos 3 a 4 foi realizada por 5 minutos a 3000 rpm (1844g) e 25°C. Em cada caso, o sedimentado foi descartado e o sobrenadante coletado para análise físico-química e posterior cultivo de *D. subspicatus*. Para o ajuste de pH da vinhaça *in natura* (pré-tratamento 4) usou-se uma solução de NaOH 10 M até o pH final de 7,5. A vinhaça não foi diluída em nenhum dos pré-tratamentos (1 a 4).

PRÉ-TRATAMENTO	DETALHE
1	Eletrocoagulação com eletrodos de alumínio
2	Eletrocoagulação com eletrodos de ferro
3	Centrifugação
4	Ajuste de pH e centrifugação

Tabela 2. Resumo de pré-tratamentos efetuados na vinhaça de cana-de-açúcar *in natura*.

Calculou-se o custo estimado da eletrocoagulação dos pré-tratamentos 1 e 2, expresso em R\$ m⁻³, segundo a Equação 2. Na qual: *m* = dosagem de Al⁺³ ou Fe⁺² (massa de ânodo dissolvido na eletrólise) expresso em kg m⁻³; *a* = custo do alumínio ou ferro metálico no mercado brasileiro, calculado como R\$ 7,54 kg⁻¹ para o alumínio e R\$ 1,43 kg⁻¹ para o ferro, a partir dos dados das exportações brasileiras registrados no MDIC (2018); *E* = consumo de energia elétrica pela eletrólise (calculado segundo a Equação 3), expresso em kWh m⁻³; *b* = custo da energia elétrica para a usina de produção de etanol combustível, calculado como R\$ 0,21 kWh⁻¹ a partir do preço de venda da energia elétrica gerada a partir do bagaço de cana-de-açúcar segundo a ANEEL (2019), levando em conta os leilões de geração de energia dos últimos 5 anos; *t* = tempo de eletrólise expresso em h; *V_{cel(t)}* = voltagem nos eletrodos a cada tempo *t* expressa em V; *I* = corrente elétrica aplicada durante a eletrólise expressa em A; *Vol* = volume de vinhaça, expresso em L.

$$\text{Custo estimado} = m a + E b \quad \text{Equação 2}$$

$$E = \frac{\int_0^t V_{cel(t)} I dt}{Vol} \quad \text{Equação 3}$$

2.3 Cultivo De Microalga *D. Subspicatus*

As cepas da microalga *D. subspicatus* foram obtidas do banco de microalgas do LABMAC-UFSCar e propagadas em meio BG11 (RIPPKA *et al.*, 1979) até biomassa seca aproximada de 0,5 g L⁻¹. Logo após, um volume suficiente de inóculo foi centrifugado a 3000 rpm (1844g) por 20 minutos, o sobrenadante foi descartado

e o sedimentado ressuspendido em vinhaça pré-tratada por cada um dos processos detalhados na Tabela 2. Em cada experimento, começou-se o cultivo com biomassa seca inicial de aproximadamente 0,3 g L⁻¹ e volume de meio de cultivo de 25 mL contido em frascos Erlenmeyer de 125 mL. Os cultivos foram conduzidos em agitador orbital (100 rpm, 25°C) por 48 horas, com fotoperíodo de 12 horas e intensidade luminosa aproximada de 2 klux, conforme usado em anteriores trabalhos do grupo de pesquisa (FONTE, 2016; MORAIS, 2018). Os frascos foram retirados em cada intervalo de tempo para determinação de biomassa seca e COT, NT e pH do meio de cultivo.

A velocidade específica de crescimento máxima da biomassa ($\mu_{\text{máx biomassa}}$), expressa em dia⁻¹, foi calculada mediante regressão linear dos dados obtidos durante a fase exponencial de crescimento ajustados na Equação 4. Na qual: $X_{(t)}$ corresponde à biomassa seca (g L⁻¹) a cada tempo t (h) pertencente à fase exponencial de crescimento; X_1 corresponde à biomassa seca no início da fase exponencial (g L⁻¹); t_1 corresponde ao tempo inicial da fase exponencial de crescimento, expresso em h.

$$\ln(X_{(t)}) = \ln(X_1) + \frac{\mu_{\text{máx biomassa}}}{24}(t - t_1) \quad \text{Equação 4}$$

A produtividade de biomassa (P_{biomassa}), expressa em g L⁻¹ dia⁻¹, foi calculada segundo a Equação 5. Na qual: X_0 e X_f correspondem respectivamente à biomassa seca no início e no fim do cultivo, expressa em g L⁻¹; t_f corresponde ao tempo total do cultivo (48 horas).

$$P_{\text{biomassa}} = 24 \frac{X_f - X_0}{t_f} \quad \text{Equação 5}$$

O rendimento biomassa/substrato ($Y_{\text{biomassa/COT}}$), expresso em g biomassa g COT⁻¹, foi calculado mediante regressão linear dos dados obtidos durante o cultivo ajustados na Equação 6. Na qual: $X_{(t)}$ corresponde à biomassa seca (g L⁻¹) a cada tempo t (h) durante o cultivo, X_0 corresponde à biomassa seca (g L⁻¹) no início do cultivo; $COT_{\text{consumido}(t)}$ corresponde à diferença entre o COT inicial do meio de cultivo e o COT do meio a cada tempo t (h) durante o cultivo, expressos em (g L⁻¹).

$$X_{(t)} = X_0 + Y_{\text{biomassa/COT}} COT_{\text{consumido}(t)} \quad \text{Equação 6}$$

2.4 Análises

A caracterização físico-química da vinhaça *in natura* e nas diferentes etapas

dos tratamentos foi conduzida conforme a metodologia do *Standard Methods* (APHA, 2005). Na Tabela 3 são apresentadas as técnicas analíticas utilizadas para a determinação de cada parâmetro. Os resultados foram apresentados como o valor médio \pm desvio padrão. As análises estatísticas (ANOVA e teste Tukey $p < 0,05$) foram feitas usando o *software* R versão 3.4.0.

PARÂMETRO	TÉCNICA UTILIZADA	UNIDADES
pH	Potenciometria	-
Turbidez	Nefelometria	NTU
Sólidos suspensos	Gravimetria (membrana de 0,45 μm)	g L^{-1}
Carbono orgânico total (COT)	Combustão a alta temperatura	g L^{-1}
Nitrogênio total (NT)	Combustão e quimioluminescência	g L^{-1}
Biomassa seca	Gravimetria (membrana de 0,45 μm)	g L^{-1}

Tabela 3. Parâmetros e técnicas analíticas utilizadas.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Pré-tratamento por coagulação eletroquímica

Verificou-se uma remoção superior a 98% da turbidez inicial da vinhaça, atingindo valores menores a 30 NTU após as dosagens entre 2,9 e 3,6 g L^{-1} de Al^{+3} pela eletrólise (Figura 2a). No entanto, a eletrocoagulação com eletrodos de ferro demandou maior quantidade de Fe^{+2} para o mesmo grau de clarificação (11,1 g L^{-1} de Fe^{+2}). Tal diferença pode ser atribuída à menor carga positiva do Fe^{+2} quando comparado ao Al^{+3} (CHEN, 2004). Resultados similares observaram-se em outros efluentes, como no efluente de produção de levedura (KOBYA; DELIPINAR, 2008) ou em água residuária da produção de vinho (KARA *et al.*, 2013). Cabe destacar que a sedimentação da vinhaça *in natura* por 24 horas sem dosagem de Al^{+3} ou Fe^{+2} (0 horas de eletrocoagulação) removeu ao redor de 90% da turbidez inicial, atingindo o valor final de 205 ± 10 NTU.

No caso da EC com alumínio, observou-se um aumento da turbidez após as dosagens de 0,7 e 1,4 g L^{-1} de Al^{+3} . Esse comportamento foi analisado por Chou, Wang e Chang (2009) sendo atribuído à mudança no mecanismo de sedimentação dos coágulos formados durante a EC segundo o pH e a concentração das espécies coagulantes. No entanto, esse comportamento não foi observado na EC com eletrodos de ferro nas faixas analisadas. Nesse caso, a turbidez foi removida gradualmente. Na Figura 2b, pode se observar a aparência dos sobrenadantes conforme a dosagem de Al^{+3} ou Fe^{+2} (segundo o material dos eletrodos utilizado), correspondente a cada hora de EC (0 até 5 horas). Observou-se uma intensa coloração nas primeiras horas usando eletrodos de ferro, provavelmente pela presença de espécies de Fe (II) e Fe (III) em suspensão (KHANDEGAR; SAROHA, 2012).

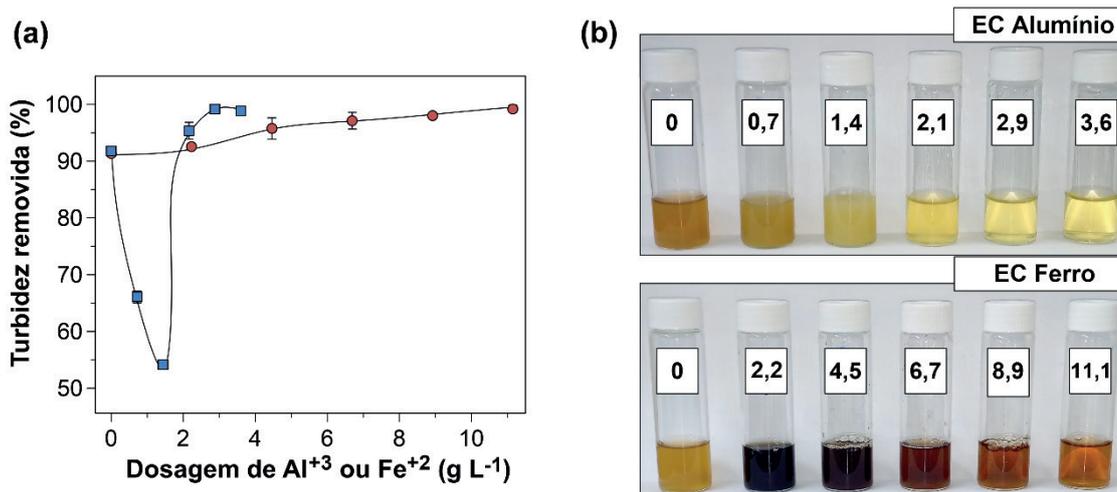


Figura 2. Turbidez removida (a) e aparência do sobrenadante (b) conforme a dosagem de Al³⁺ ou Fe²⁺ pela eletrólise com eletrodos de alumínio (■) ou ferro (●), respectivamente.

As barras de erro representam o desvio padrão (n = 3).

Foi observado uma tendência à estabilidade na porcentagem de COT e NT restante no sobrenadante conforme o aporte dos cátions pela eletrólise (Figuras 3a e 3b). O processo com eletrodos de alumínio se mostrou mais eficiente na remoção de COT e NT quando comparado à EC com eletrodos de ferro. O resultado confirmou o observado por Khandegar e Saroha (2012) com o mesmo efluente e o reportado por Ryan *et al.* (2008) com o efluente biodigerido da fermentação de melaço. No entanto, observaram-se resultados diferentes daqueles obtidos com efluente de produção de levedura, o que pode ser atribuído à diferente natureza físico-química dos efluentes anteriormente citados (KOBYA; DELIPINAR, 2008; MOHAMMAD; MUTTUCUMARU, 2009).

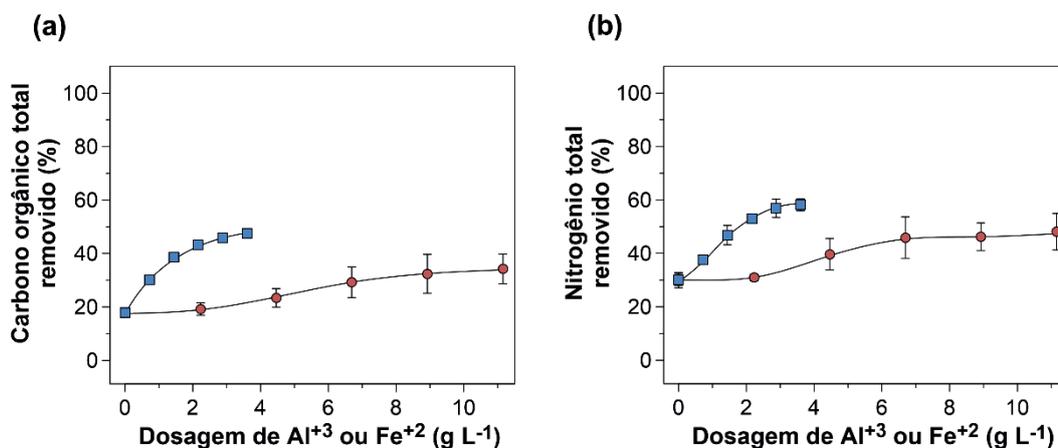


Figura 3. Remoção de carbono orgânico total (a) e nitrogênio total (b) no sobrenadante conforme a dosagem de Al³⁺ ou Fe²⁺ pela eletrólise com eletrodos de alumínio (■) ou ferro (●), respectivamente.

As barras de erro representam o desvio padrão (n = 3).

No estudo, a remoção máxima de COT da vinhaça foi em torno a 45 e 30% para eletrodos de alumínio e ferro, respectivamente. O resultado foi inferior ao citado na literatura para vinhaça *in natura*, de ao redor de 70% de remoção da demanda química de oxigênio (DQO) (KANNAN; KARTHIKEYAN; TAMILSELVAN, 2006; KHANDEGAR; SAROHA, 2012). No entanto, o resultado obtido é promissor levando em conta que após EC se tem um efluente altamente clarificado contendo em torno a 5,5-6,5 g L⁻¹ de COT passível de reaproveitamento via cultivo da microalga. Ainda se observou entre 40-50% de NT remanescente na vinhaça, o que conservou a relação carbono/nitrogênio (C/N) em torno de 20, valor original do efluente *in natura*.

O valor do pH do sobrenadante conforme a eletrocoagulação tendeu à neutralidade para ambos materiais (Figura 4). De forma geral, a coagulação eletroquímica tende a elevar o pH de efluentes ácidos conforme o tempo devido à produção de íons OH⁻ no cátodo (CHEN, 2004), sendo esta uma vantagem do processo de EC quando comparado à coagulação química (CAÑIZARES *et al.*, 2009). Cabe destacar que a neutralização da vinhaça após EC possibilita o cultivo de *D. subspicatus* sem a necessidade de correção do pH do meio, uma vez que o pH observado se aproximou ao pH do meio padrão BG11 (pH ≈ 7,4).

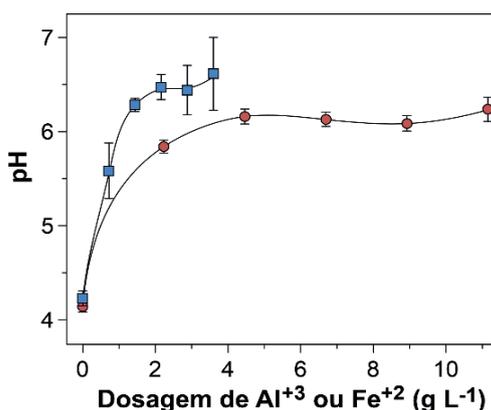


Figura 4. pH do sobrenadante conforme a dosagem de Al³⁺ ou Fe²⁺ pela eletrólise com eletrodos de alumínio (■) ou ferro (●), respectivamente.

As barras de erro representam o desvio padrão (n = 3).

O perfil de consumo elétrico conforme a dosagem de Al³⁺ ou Fe²⁺ mostrou-se linear conforme a eletrólise com ambos materiais (Figura 5a), uma vez que não se registrou variação considerável na voltagem nos eletrodos (V_{cel}) durante o processo ($4,0 \pm 0,3$ V para EC com eletrodos de alumínio e $4,9 \pm 0,5$ V para EC com eletrodos de ferro). Estes resultados sugerem passivação desprezível dos eletrodos durante a eletrocoagulação. Na Figura 5b, apresenta-se uma estimativa do custo do processo de eletrocoagulação segundo a dosagem de Al³⁺ ou Fe²⁺ pela eletrólise. Não foram encontrados relatos na literatura que reportem valores de custo estimado, consumo de eletrodos nem consumo de energia elétrica por volume do tratamento de EC de vinhaça de cana-de-açúcar *in natura*. De acordo com Guerreiro *et al.* (2016), o

custo estimado da coagulação química de vinhaça biodigerida é de R\$ 5,70 m⁻³, considerando somente o custo do coagulante (R\$ 2,00 kg⁻¹ de FeCl₃ 38% m/m). A eletrocoagulação pode se apresentar como uma alternativa de menor custo quando comparada ao processo oxidativo avançado *Fenton* (R\$ 86,60 m⁻³ segundo Guerreiro *et al.* (2016)), considerando que a eficiência na remoção de COT do biodigerido foi similar (40-55%).

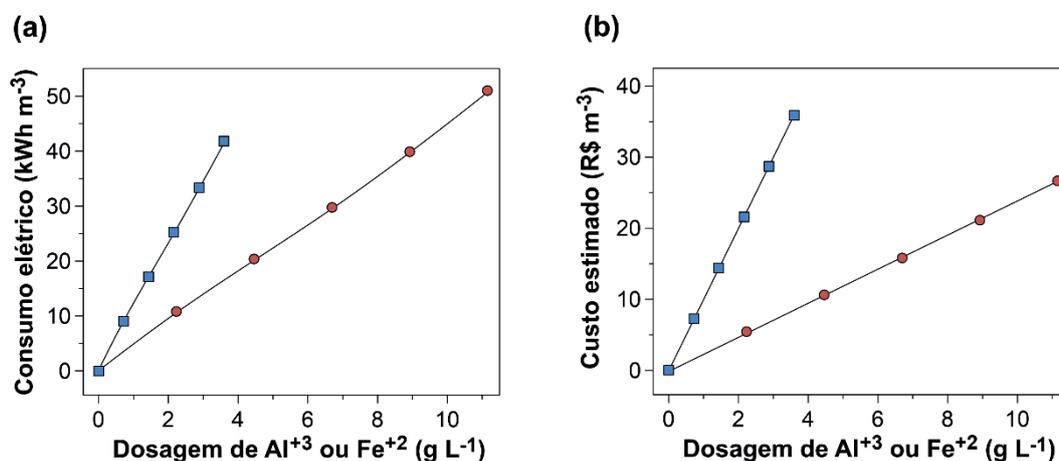


Figura 5. Consumo elétrico (a) e custo estimado (b) conforme a dosagem de Al⁺³ ou Fe⁺² pela eletrólise com eletrodos de alumínio (■) ou ferro (●), respectivamente.

De acordo com os resultados anteriores, o cultivo de *D. subspicatus* foi conduzido utilizando como meios de cultivo o sobrenadante da EC após a dosagem de 2,9 g L⁻¹ de Al⁺³ (nomeada pré-tratamento 1) e o sobrenadante da EC após dosagem de 11,1 g L⁻¹ de Fe⁺² (nomeada pré-tratamento 2). Observou-se que a eletrocoagulação tanto para eletrodos de alumínio como ferro (pré-tratamentos 1 e 2) leva a remoções superiores dos parâmetros citados quando comparado à centrifugação sem e com ajuste prévio do pH (pré-tratamentos 3 e 4), segundo a Figura 6.

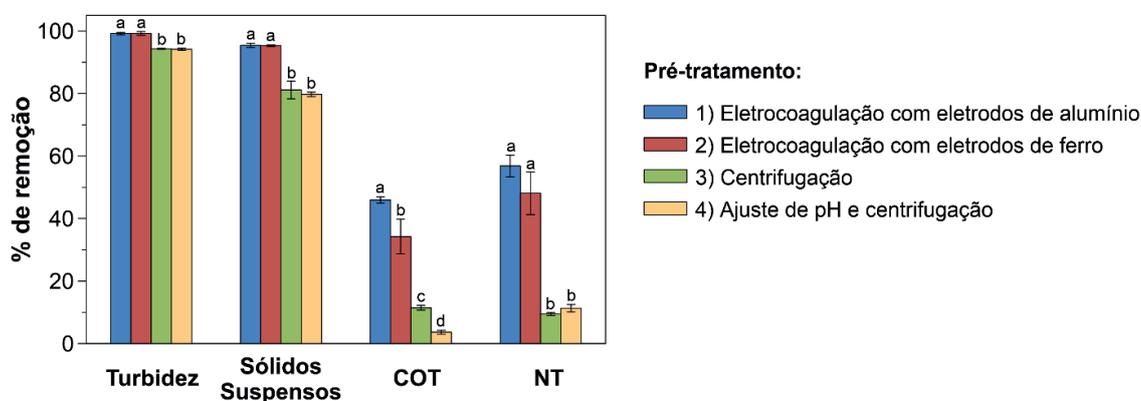
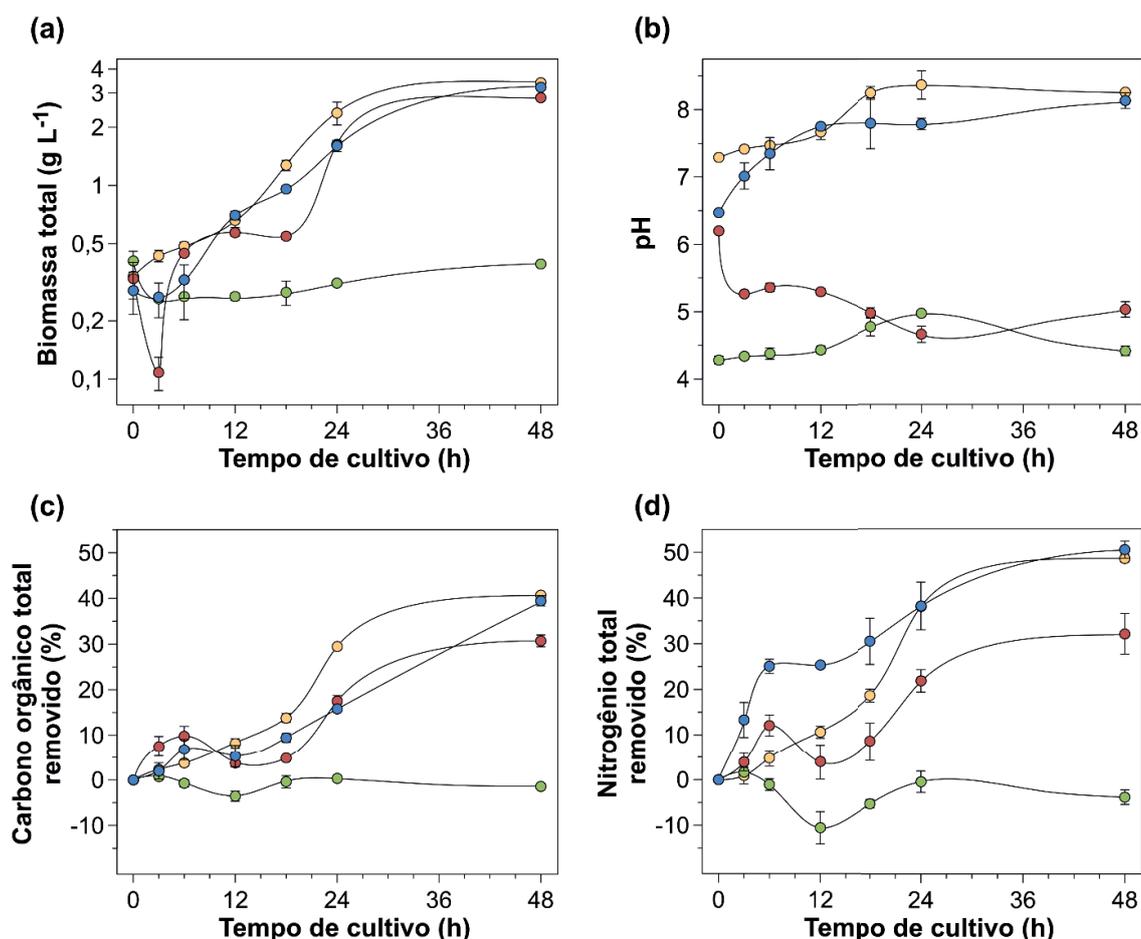


Figura 6. Eficiência de remoção de turbidez, sólidos suspensos, carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) segundo pré-tratamentos.

Letras diferentes indicam diferenças significativas pelo teste Tukey ($p < 0,05$). As barras de erro representam o desvio padrão ($n = 3$).

3.2 Cultivo da microalga *D. Subspicatus*

A Figura 7a apresenta as curvas de cultivo em vinhaça segundo os diferentes pré-tratamentos. Os resultados indicaram perfis de crescimento similares no cultivo nas condições 1 (EC com eletrodos de alumínio) e 4 (ajuste de pH com posterior centrifugação), apresentando a fase exponencial de crescimento entre 3 e 24 horas, velocidades específicas de crescimento ($\mu_{\text{máx biomassa}}$) em torno de $2,0 \text{ dia}^{-1}$ e produtividades de biomassa (P_{biomassa}) ao redor de $1,5 \text{ g L}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ (Tabela 4).



Cultivo em vinhaça pré-tratada por:

- 1) Eletrocoagulação com eletrodos de alumínio
- 2) Eletrocoagulação com eletrodos de ferro
- 3) Centrifugação
- 4) Ajuste de pH e centrifugação

Figura 7. Curvas de crescimento (a), pH do meio de cultivo (b), carbono orgânico total (c) e nitrogênio total (d) removido segundo tempo de cultivo nas diferentes condições.

As barras de erro representam o desvio padrão (n = 3).

Por outro lado, a velocidade de crescimento e produtividade foi menor em vinhaça eletrocoagulada com eletrodos de ferro ($1,54 \text{ dia}^{-1}$ e $1,26 \text{ g L}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, respectivamente). Esse resultado pode estar relacionado à queda no pH durante as primeiras horas de cultivo observado nesta condição (Figura 7b). O fenômeno observado pode ter sido ocasionado pela oxidação de espécies de Fe (II) dissolvido remanescentes no meio,

as quais ao passar a espécies de Fe (III) pela ação da aeração (cultivo agitado, o qual favoreceu a difusão de O₂ no meio), poderiam ter formado hidróxidos e consumido OH⁻, acidificando o meio e prejudicando o cultivo nos tempos iniciais (CHEN, 2004). O cultivo em vinhaça centrifugada sem ajuste de pH (condição de cultivo 3) mostrou um crescimento baixo a partir da terceira hora (0,24 dia⁻¹) e uma produtividade de biomassa nula. Tal resultado ressaltou a importância de adequação prévia do pH da vinhaça para o cultivo de *D. subspicatus*.

PRÉ-TRATAMENTO	$\mu_{\text{máx biomassa}}$ (dia ⁻¹)	P _{biomassa} (g L ⁻¹ dia ⁻¹)	Y _{biomassa/COT} (g biomassa g COT ⁻¹)
1) Eletrocoagulação, eletrodos de alumínio	2,08 ± 0,16 (R ² = 0,98)	1,47 ± 0,06 a	1,46 ± 0,12 (R ² = 0,97)
2) Eletrocoagulação, eletrodos de ferro	1,54 ± 0,67 (R ² = 0,72)	1,26 ± 0,03 b	1,30 ± 0,21 (R ² = 0,88)
3) Centrifugação	0,24 ± 0,02 (R ² = 0,97)	0,00 ± 0,00 c	0,06 ± 0,23 (R ² = 0,01)
4) Ajuste de pH e centrifugação	1,96 ± 0,20 (R ² = 0,97)	1,53 ± 0,06 a	0,87 ± 0,03 (R ² = 0,99)

Tabela 4. Avaliação do cultivo de *D. subspicatus* nas diferentes condições.

Valor médio ± desvio padrão (n = 3).

R²: coeficiente de determinação da regressão linear.

Letras diferentes indicam diferenças significativas pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Observou-se uma tendência à alcalinização do meio durante todo o tempo de cultivo nas condições 1 e 4, e a partir de 24 horas no caso da condição 2 (Figura 7b). Sabe-se que a alcalinização do meio de cultivo pode ser ocasionada pela ação da fotossíntese realizada por micro-organismos fotossintetizantes (MARKOU; VANDAMME; MUYLEAERT, 2014) ou pelo consumo de ácidos orgânicos presentes na vinhaça (DE MATTOS; BASTOS, 2015), pelo que o metabolismo autotrófico pode ter acontecido paralelamente ao consumo de matéria orgânica do meio (metabolismo mixotrófico).

Santos *et al.* (2016) registraram velocidade específica de crescimento máxima de 0,096 dia⁻¹ para cultivo heterotrófico de *Spirulina* máxima em vinhaça filtrada 1% v/v. Santana *et al.* (2017) observaram valores de produtividade de 0,16 e 0,22 g L⁻¹ dia⁻¹ para cultivo mixotrófico de *Micractinium* sp. e *Chlamydomonas biconvexa*, respectivamente, em vinhaça clarificada com Ca(OH)₂ sem diluição. Candido e Lombardi (2018) obtiveram velocidades específicas de crescimento máximas entre 1,4 e 1,6 dia⁻¹ no cultivo mixotrófico de *C. vulgaris* em vinhaça filtrada 60% v/v e biodigerida 80% v/v. Os resultados anteriores indicaram o potencial de *D. subspicatus*, uma vez que os parâmetros cinéticos de crescimento em vinhaça clarificada pelos métodos apresentados no presente estudo foram superiores.

Nas Figuras 7c e 7d, pode se observar que, após 48 horas de cultivo, a remoção máxima de COT e NT nas condições 1 e 4 foi similar (em torno de 40 e 50% do COT e NT do meio de cultivo). No entanto, devido a que a concentração de carbono orgânico total inicial nessas condições foi diferente (os pré-tratamentos removeram quantidades diferentes de COT da vinhaça *in natura*, segundo a Figura 6), os rendimentos biomassa/substrato ($Y_{\text{biomassa/COT}}$) obtidos diferiram. Os maiores rendimentos foram registrados nas condições 1 e 2 (1,46 g biomassa g COT⁻¹ na condição 1 e 1,30 g biomassa g COT⁻¹ na condição 2, em relação a 0,87 g biomassa g COT⁻¹ na condição 4). O resultado sugeriu que outra fonte de carbono além do orgânico foi usada para sustentar o crescimento da biomassa nos cultivos em vinhaça pré-tratada por eletrocoagulação. Nesse sentido, à maior incidência de luz promovida pelo elevado grau de clarificação atingido com a eletrocoagulação (Figura 6) teria promovido o consumo paralelo de fontes de carbono inorgânico (CO₂ e carbonatos) mediante a fotossíntese (metabolismo mixotrófico).

3.3 Processo Global

O processo de EC com eletrodos de alumínio e posterior cultivo apresentou o maior potencial de remoção de COT e NT do efluente quando comparado ao processo com eletrodos de ferro e cultivo (Tabela 5). Ambos processos atingiram maiores remoções de COT e NT quando comparados à centrifugação (com e sem ajuste de pH) e cultivo. Tal resultado sugeriu que o processo integrado de EC e posterior cultivo de *D. subspicatus* é uma alternativa promissora para o tratamento da vinhaça, levando em conta adicionalmente que o processo de EC pode ser facilmente escalonado para tratar os grandes volumes de vinhaça gerados (HAKIZIMANA *et al.*, 2017) e que o cultivo de microalgas vem sendo estudado como parte importante para a implementação da biorrefinaria baseada em cana-de-açúcar (BRASIL; SILVA; SIQUEIRA, 2016).

TRATAMENTO	PARÂMETRO (remoção)		
	pH	Carbono orgânico total (g L ⁻¹)	Nitrogênio total (g L ⁻¹)
Vinhaça de cana-de-açúcar <i>in natura</i>	4,3 ± 0,1 c	10,1 ± 0,4 a	0,59 ± 0,02 a
1) Eletrocoagulação com eletrodos de alumínio e cultivo de <i>D. subspicatus</i>	8,1 ± 0,2 a	3,2 ± 0,1 (68,4%) e	0,14 ± 0,01 (76,4%) e
2) Eletrocoagulação com eletrodos de ferro e cultivo de <i>D. subspicatus</i>	5,0 ± 0,2 b	4,6 ± 0,1 (54,6%) d	0,21 ± 0,01 (62,8%) d
3) Centrifugação e cultivo de <i>D. subspicatus</i>	4,4 ± 0,1 c	8,4 ± 0,1 (16,0%) b	0,49 ± 0,01 (17,3%) b
4) Ajuste de pH, centrifugação e cultivo de <i>D. subspicatus</i>	8,3 ± 0,1 a	5,2 ± 0,1 (49,0%) c	0,25 ± 0,01 (57,5%) c

Tabela 5. Parâmetros físico-químicos da vinhaça *in natura* e após tratamentos.

O valor em parênteses representa a remoção calculada a partir da vinhaça *in natura*.

Valor médio \pm desvio padrão (n = 3).

Letras diferentes indicam diferenças significativas entre valores do parâmetro pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Os resultados obtidos para a EC e posterior cultivo de *D. subspicatus* foram similares aos obtidos por Liu e Liu (2016) em estudo integrando o cultivo da microalga *C. vulgaris* com o pré-tratamento por EC com eletrodos de ferro. Os autores reportaram a remoção global de 77% da demanda química de oxigênio (DQO) e 88% do NT do digerido anaeróbico diluído de uma mistura de esterco de gado leiteiro e resíduos orgânicos de alimentos. Os resultados do presente estudo são promissores, uma vez que demonstraram a possibilidade de replicar o método de EC e posterior cultivo de microalgas em vinhaça.

4 | CONCLUSÕES

Os resultados indicaram a viabilidade do processo integrado de eletrocoagulação e posterior cultivo mixotrófico de *D. subspicatus*, obtendo simultaneamente produção de biomassa e remoção de carbono orgânico e nitrogênio total da vinhaça de cana-de-açúcar. A eletrocoagulação foi eficiente na remoção da turbidez característica do efluente *in natura* e corrigiu o pH inicial ácido da vinhaça até valores próximos ao meio padrão BG11, o que permitiu o cultivo da microalga logo após a eletrocoagulação. A eletrocoagulação com eletrodos de alumínio demandou uma menor dosagem de coagulante (Al^{+3}) (menor tempo de eletrólise) em relação ao processo usando ferro como eletrodos. O cultivo na vinhaça pré-tratada com eletrodos de ferro apresentou menor produtividade de biomassa e menor remoção de carbono orgânico e nitrogênio total do meio, devido provavelmente à interferência de espécies de ferro dissolvido nas primeiras horas do cultivo.

REFERÊNCIAS

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resultados Leilões de Geração, 2014-2019. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/leiloes>>. Acesso em: 3 julho 2019.

APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**, 21 ed. Washington, D.C., 2005.

BENEMANN, J. **Microalgae for Biofuels and Animal Feeds**. *Energies*, v. 6, p. 5869-5886, 2013.

BRASIL, B. S. A. F.; SILVA, F. C. P.; SIQUEIRA, F. G. **Microalgae biorefineries: The Brazilian scenario in perspective**. *New Biotechnology*, 2016.

CANDIDO, C.; LOMBARDI, A. T. **The physiology of *Chlorella vulgaris* grown in conventional and biodigested treated vinasses**. *Algal Research*, v. 30, p. 79-85, 2018.

CAÑIZARES, P.; JIMÉNEZ, C.; MARTÍNEZ, F.; RODRIGO, M. A.; SÁEZ, C. **The pH as a key parameter in the choice between coagulation and electrocoagulation for the treatment of wastewaters.** Journal of Hazardous Materials, v. 163, p. 158–164, 2009.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Vinhaça - Critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola**, 2015. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/normas-tecnicas-cetesb/normas-tecnicas-vigentes/>>. Acesso em: 15 de maio de 2019.

CHEN, G. **Electrochemical technologies in wastewater treatment.** Separation and Purification Technology, v. 38, p. 11-41, 2004.

CHOU, W. L.; WANG, C. T.; CHANG, S. Y. **Study of COD and turbidity removal from real oxide-CMP wastewater by iron electrocoagulation and the evaluation of specific energy consumption.** Journal of Hazardous Materials, v. 168, p. 1200-1207, 2009.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Safra Brasileira de Cana-de-Açúcar, Boletim Cana 1 Levantamento 19-20, 2019. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>> Acesso em: 15 de maio de 2019.

DE MATTOS, L. F. A.; BASTOS, R. G. **COD and nitrogen removal from sugarcane vinasse by heterotrophic green algae *Desmodesmus* sp.** Desalination and Water Treatment, v. 57, p. 9465-9473, 2015.

DIAS, M. O. S.; FILHO R. M.; MANTELATTO P. E.; CAVALETT O.; ROSSELL C. E. V.; BONOMI A.; LEAL M. R. L. V. **Sugarcane processing for ethanol and sugar in Brazil.** Environmental Development, v. 15, p. 35-51, 2015.

FONTE, J. C. **Efeito da razão carbono: nitrogênio no cultivo heterotrófico de cianobactérias unicelulares e filamentosas em vinhaça de cana-de-açúcar**, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de São Carlos, Araras-SP, Brasil, 2016.

GUERREIRO, L. F.; RODRIGUES, C. S. D.; DUDA, R. M.; OLIVEIRA, R. A.; BOAVENTURA, R. A. R.; MADEIRA, L. M. **Treatment of sugarcane vinasse by combination of coagulation/flocculation and Fenton's oxidation.** Journal of Environmental Management, v. 181, p. 237-248, 2016.

HAKIZIMANA, J. N.; GOURICH, B.; CHAFI, M.; STIRIBA, Y.; VIAL, C.; DROGUI, P.; NAJA, J. **Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches.** Desalination, v. 404, p. 1-21, 2017.

KANNAN, N.; KARTHIKEYAN, G.; TAMILSELVAN, N. **Comparison of treatment potential of electrocoagulation of distillery effluent with and without activated *Areca catechu* nut carbon.** Journal of Hazardous Materials, v. B137, p. 1803–1809, 2006.

KARA, S.; GÜRBULAK, E.; EYVAZ, M.; YÜKSEL, E. **Treatment of winery wastewater by electrocoagulation process.** Desalination and Water Treatment, v. 51, p. 5421–5429, 2013.

KHANDEGAR, V; SAROHA, A. K. **Electrochemical Treatment of Distillery Spent Wash Using Aluminum and Iron Electrodes.** Chinese Journal of Chemical Engineering, v. 20, n. 3, p. 439- 443, 2012.

KOBYA, M.; DELIPINAR, S. **Treatment of the baker's yeast wastewater by electrocoagulation.** Journal of Hazardous Materials, v. 154, p. 1133–1140, 2008.

LIU, Z.; LIU, Y. **Synergistic integration of electrocoagulation and algal cultivation to treat liquid anaerobic digestion effluent and accumulate algal biomass.** Process Biochemistry, v. 51, p. 89–94, 2016.

MARKOU, G.; VANDAMME, D.; MUYLAERT, K. **Microalgal and cyanobacterial cultivation: The supply of nutrients**. *Water Research*, v. 65, p. 186-202, 2014.

MDIC – MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇOS. Estatísticas de comércio exterior do Brasil, Exportação e Importação Geral 2018, NCM 76011000, NCM 72011000. Disponível em: <<http://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral>>. Acesso em: 3 julho 2019.

MOHAMMAD, M. E.; MUTTUCUMARU, S. **Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation/flotation processes**. *Journal of Environmental Management*, v. 90, p. 1663–1679, 2009.

MORAIS, D. V. **Produção de ficocianina por *Aphanothece microscopica Nägeli* a partir de vinhaça de cana-de-açúcar**, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de São Carlos, Araras-SP, Brasil, 2018.

MOUSSA, D. T.; EL-NAAS, M. H.; NASSER, M.; AL-MARRI, M. J. **A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: Potentials and challenges**. *Journal of Environmental Management*, v. 186, n. 1, p. 24-41, 2017.

RIPPKA, R.; DERUELLES, J.; WATERBURY, J. B.; HERDMAN, M.; STANIER R. G. **Generic assignments strain histories and properties of pure cultures of cyanobacteria**. *Journal of General Microbiology*, v. 111, p. 1-61, 1979.

RYAN, D.; GADD, A.; KAVANAGH, J.; ZHOU, M.; BARTON, G. **A comparison of coagulant dosing options for the remediation of molasses process water**. *Separation and Purification Technology*, v. 58, p. 347-352, 2008.

SANTANA, H.; CEREIJO, C.; TELES, V.C.; NASCIMENTO, R.; FERNANDES, M.; BRUNALE, P.; CAMPANHA, R.; SOARES, I.P.; SILVA, F.; SABAINI, P.S.; SIQUEIRA, F.G.; BRASIL, B. **Microalgae cultivation in sugarcane vinasse: Selection, growth and biochemical characterization**. *Bioresource Technology*, v. 228, p. 133-140, 2017.

SANTOS, R. R. D.; ARAÚJO, O. Q. F.; MEDEIROS, J. L.; CHALOUB, R. M. **Cultivation of *Spirulina maxima* in medium supplemented with sugarcane vinasse**. *Bioresource Technology*, v. 204, p. 38-48, 2016.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Ação antrópica 131, 139, 161, 165
Acompanhamento 1, 2, 3, 6, 14, 15, 70, 133, 291, 294, 295, 335, 391
Adensamento por gravidade 92, 93, 94, 95, 99, 100, 103, 104
Água clarificada 92, 93, 94, 96, 97, 99, 100, 102, 103, 127, 128, 129, 182
Água pluvial 168, 172, 176, 247
Água salina 118, 119
Águas subterrâneas 50, 74, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 140, 386, 390
Água subterrânea 37, 383, 384, 390
Alagamento 168, 169, 170, 176, 177, 178, 179
Análise ambiental 141
Análise envoltória de dados 194, 196

B

Belém do Pará 29, 30, 31
Benchmarking métrico 194, 196
Blumenau 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167

C

Carbono orgânico total 92, 93, 94, 95, 97, 98, 100, 102, 365, 369, 370, 372, 373, 375
Coagulação 94, 98, 118, 119, 120, 121, 123, 127, 128, 129, 239, 363, 366, 369, 371, 372
Coliformes 74, 75, 77, 78, 80, 81, 82, 83, 84, 90, 131, 135, 136, 138, 139, 246, 252, 288
Contaminação 55, 74, 75, 76, 81, 83, 84, 87, 89, 111, 232, 333, 334, 359
Crise hídrica 51, 52, 53, 54, 58, 59, 60

D

Desaguamento por centrifugação 92, 93, 94, 96, 100, 101, 102, 103, 104
Disponibilidade hídrica subterrânea 37, 39, 46, 48

E

Eficiência de operadoras 194
Enchentes 141, 146, 147, 150, 151, 152, 156, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 179

F

Floculação 94, 118, 119, 120, 121, 123, 125, 127, 128, 129

G

Geopolímero 180, 181, 183, 192

Geoprocessamento 141, 143, 153, 259, 261, 266, 330, 331

Gestão da demanda 51, 52, 56

Gestão da oferta 51, 52, 55, 56

J

Jica 156, 163, 164, 165, 167

L

Lodo de ETA 180, 192, 193

M

Microfiltração 118, 120, 122, 127, 128, 129

O

Obras de saneamento 25, 29

Osmose inversa 105, 106, 107, 108, 109, 110, 113, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 122, 123, 127, 128, 129

P

Parcerias público-privadas 61, 62, 65, 71, 72, 73

Parque Lagoas do Norte 131, 132, 134

Planejamento 1, 2, 3, 4, 5, 6, 12, 15, 17, 19, 20, 22, 23, 24, 26, 27, 30, 52, 53, 64, 73, 117, 133, 141, 143, 152, 154, 166, 167, 195, 236, 241, 256, 302, 303, 305, 310, 355, 356, 361, 391

Planejamento regional 141, 356

Plano municipal de saneamento básico 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 12, 13, 14, 17, 19, 20, 21, 27, 140

Potencial hídrico subterrâneo 37

PPP 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72

Projeção populacional 29, 30, 31, 33, 36

Projetos de saneamento 29, 31, 36

Q

Qualidade da água 76, 91, 103, 106, 118, 119, 120, 131, 133, 134, 135, 139, 140, 216, 264, 320, 327, 330, 335, 346, 349, 353, 355, 382, 383, 384, 387

R

Recursos hídricos 18, 20, 21, 25, 28, 37, 38, 41, 42, 49, 50, 51, 52, 54, 55, 56, 75, 106, 131, 132, 140, 141, 142, 152, 153, 162, 166, 167, 179, 181, 208, 218, 229, 254, 325, 327, 329, 330,

339, 340, 341, 350, 353, 355, 360, 361, 379, 382, 384, 385, 388, 389

Regulação 10, 19, 20, 22, 51, 59, 60, 63, 70, 72, 202, 313

Reserva ativa 37

Resíduos de ETA 92

Reúso 105, 106, 108, 111, 112, 116, 117, 218, 219, 220, 228, 229, 230, 330, 331, 332, 333, 334, 335, 336, 337, 338, 339, 340, 341, 342, 343, 344, 346, 347, 348, 349, 350, 351, 352, 353, 354, 355, 356, 357, 358, 359, 360, 361, 362, 379, 380, 381, 382, 383, 384, 385, 386, 387, 388, 389

Revisão 1, 2, 3, 5, 6, 10, 11, 12, 15, 27, 52, 54, 59, 60, 156, 162, 208, 311, 314, 362

S

Saneamento 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 31, 35, 36, 37, 38, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 59, 60, 61, 62, 63, 65, 69, 70, 71, 72, 131, 133, 135, 140, 168, 179, 198, 208, 218, 221, 244, 311, 313, 314, 318, 321, 322, 323, 328, 330, 339, 340, 341, 350, 351, 358, 380

T

Teto jardim 168, 169, 170, 171, 172, 173, 176, 177, 178, 179

Torre de resfriamento 105, 108, 111, 112, 113

U

Ultrafiltração 105, 109, 110, 113, 114, 116, 120, 359

Urbano 76, 134, 143, 158, 160, 165, 166, 167, 168, 169, 179, 181, 339, 341, 350, 351, 353, 356, 381, 391

Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-7247-694-2



9 788572 476942