

**Pós tratamento por eletrocoagulação de efluente do processamento do soro de leite
tratado por reator anaeróbio**

**Post treatment by electrocoagulation of effluent from the processing of whey treated by
anaerobic reactor**

**Post tratamiento por electrocoagulación de efluentes del procesamiento de suero tratado
por reactor anaerobio**

Recebido: 12/08/2020 | Revisado: 25/08/2020 | Aceito: 28/08/2020 | Publicado: 01/09/2020

Camila Favretto de Souza

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3919-4370>

Universidade de Passo Fundo, Brasil

E-mail: camila.favretto@hotmail.com

Marcelo Hemkemeier

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6541-4827>

Universidade de Passo Fundo, Brasil

E-mail: marceloh@upf.br

Resumo

O soro de leite é um subproduto da fabricação de queijo, rico em proteína, lactose e minerais, que pode ser processado e agregado a novos produtos. Da valorização desse subproduto gera-se um efluente, rico em matéria orgânica, que se não devidamente tratado antes do descarte nos recursos hídricos, causa impactos ambientais. A digestão anaeróbia destaca-se no tratamento desse efluente, pois apresenta bons resultados na remoção da carga orgânica, é de fácil manuseio, não necessita de muito espaço e gera biogás, que pode ser utilizado para obtenção de energia na indústria. No entanto, a digestão anaeróbia não proporciona boa remoção de poluentes persistentes, como o nitrogênio e fósforo, sendo necessário aplicação de pós-tratamento. A eletrocoagulação surge como um método para a remoção desses nutrientes, pois não necessita de controle de pH, demanda menor energia e tem baixa produção de lodo. Trabalhos anteriores foram desenvolvidos com o objetivo de estudar tratamentos para efluentes da indústria de laticínios e indústrias de processamento de soro de leite através de tratamentos anaeróbios ou eletrocoagulação, contudo, não tiveram estudos que relacionassem a utilização da eletrocoagulação após o tratamento anaeróbio. Com isso, esse trabalho objetiva abordar um review acerca do desenvolvimento e aplicação de métodos anaeróbios como alternativa para o

tratamento do efluente obtido no beneficiamento do soro de leite, mostrando a eficiência do tratamento na remoção de DQO e após a aplicação de eletrocoagulação, visando avaliar se esse método de pós tratamento ao tratamento anaeróbio é eficaz como a remoção de nutrientes como nitrogênio e fósforo.

Palavras-chave: Soro de leite; Tratamento anaeróbio; Eletrocoagulação.

Abstract

Whey is a by-product of cheese making, rich in protein, lactose and minerals, which can be processed and added to new products. The valorization of this by-product generates an effluent, rich in organic matter, which, if not properly treated before disposal in water resources, causes environmental impacts. Anaerobic digestion stands out in the treatment of this effluent, as it presents good results in the removal of organic load, is easy to handle, does not require much space and generates biogas, which can be used to obtain energy in industry. However, anaerobic digestion does not provide good removal of persistent pollutants, such as nitrogen and phosphorus, requiring the application of post-treatment. Electrocoagulation appears as a method for removing these nutrients, as it does not require pH control, requires less energy and has low sludge production. Previous studies were developed with the objective of studying treatments for effluents from the dairy industry and whey processing industries through anaerobic treatments or electrocoagulation, however, there were no studies that related the use of electrocoagulation after anaerobic treatment. With this, this work aims to approach a review about the development and application of anaerobic methods as an alternative for the treatment of the effluent obtained in the processing of whey, showing the efficiency of the treatment in the removal of COD and after the application of electrocoagulation, aiming to evaluate whether this method of after treatment to anaerobic treatment is effective as the removal of nutrients such as nitrogen and phosphorus.

Keywords: Whey; Anaerobic treatment; Electrocoagulation.

Resumen

El suero es un subproducto de la elaboración del queso, rico en proteínas, lactosa y minerales, que se puede procesar y agregar a nuevos productos. La valorización de este subproducto genera un efluente, rico en materia orgánica, que si no se trata adecuadamente antes de su disposición en los recursos hídricos, genera impactos ambientales. En el tratamiento de este efluente destaca la digestión anaeróbica, ya que presenta buenos resultados en la remoción de carga orgánica, es fácil de manejar, no requiere mucho espacio y genera biogás, que puede ser utilizado para

obtener energía en la industria. Sin embargo, la digestión anaeróbica no proporciona una buena eliminación de contaminantes persistentes, como el nitrógeno y el fósforo, que requieren la aplicación de un postratamiento. La electrocoagulación aparece como un método de eliminación de estos nutrientes, ya que no requiere control de pH, requiere menos energía y tiene poca producción de lodos. Se desarrollaron estudios previos con el objetivo de estudiar tratamientos para efluentes de la industria láctea e industrias procesadoras de suero mediante tratamientos anaeróbicos o electrocoagulación, sin embargo, no existieron estudios que relacionaran el uso de la electrocoagulación después del tratamiento anaeróbico. Con ello, este trabajo pretende abordar una revisión sobre el desarrollo y aplicación de métodos anaeróbicos como alternativa para el tratamiento del efluente obtenido en el procesamiento del suero, mostrando la eficiencia del tratamiento en la remoción de DQO y posterior a la aplicación de electrocoagulación, con el fin de evaluar si este método de postratamiento al tratamiento anaeróbico es eficaz como la eliminación de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo.

Palabras clave: Suero de leche; Tratamiento anaeróbico; Electrocoagulación.

1. Introdução

O soro de leite é um subproduto das indústrias de laticínio, extraído da coagulação do leite no processo de fabricação do queijo e representa de 80-90% do volume total de leite utilizado, sendo considerado como o poluente mais importante das águas residuais de laticínios, devido a sua elevada carga orgânica, proveniente de gorduras, lactose e minerais, assim como, pelo volume gerado (Nunes et al., 2018; Un et al., 2014; Carvalho et al., 2013).

Segundo Marquardt et al. (2011), 40% do soro de leite produzido no Brasil é descartado sem tratamento adequado, transformando-se em um rejeito industrial nocivo a natureza e causando impactos ambientais, como a contaminação biológica e a eutrofização de rios, devido ao excesso de nutrientes como fósforo e nitrogênio além de elevada DQO, levando a perda de vida aquática, assim como, podendo atrair moscas e mosquitos que transmitem doenças perigosas devida a liberação de odores desagradáveis durante sua decomposição (Reilly et al., 2019; Tirado et al., 2018).

Atualmente o soro de leite deixou de ser considerado um resíduo e passou a ser tratado com subproduto pelas indústrias de beneficiamento, mas mesmo após esse processo ainda resta um efluente a ser tratado (Vettorello et al., 2017). A conscientização social a respeito dos descartes inadequados desse efluente tem forçado as indústrias a tratarem de forma eficiente

esse resíduo gerado no beneficiamento do soro de leite para posterior descarte devida a sua elevada carga orgânica e de nutrientes (Rivas et al., 2011).

Os métodos de tratamento de efluentes com elevada carga orgânica podem ser aeróbios ou anaeróbios, no entanto, os métodos aeróbios demandam alto consumo de energia para o tratamento. Os métodos anaeróbios não apenas removem grande quantidade de Demanda Química de Oxigênio (DQO), como produzem biogás, que pode ser aproveitado pela indústria para a geração de energia, mas esse sistema não remove nutrientes sendo então necessário um pós-tratamento (Spachos et al., 2011). A eletrocoagulação surge como possível método de pós tratamento por ser mostrar eficaz na remoção de poluentes, reduzindo o volume de lodo gerado e utilizando baixa energia e baixo custo operacional.

Dessa forma, esse trabalho aborda um review acerca do desenvolvimento e aplicação de métodos anaeróbios como alternativa para o tratamento do efluente obtido no beneficiamento do soro de leite, mostrando a eficiência do tratamento na remoção de DQO e após a aplicação da eletrocoagulação visando a remoção de nutrientes como nitrogênio e fósforo.

2. Metodologia

A pesquisa foi desenvolvida de forma bibliográfica, qualitativa e os dados foram obtidos através de artigos, dissertações, livros e meios digitais. O artigo está organizado em 5 partes, introdução, metodologia, revisão bibliográfica, onde aborda as características do soro de leite, processo de beneficiamento e valorização, efluente do soro de leite e tratamentos. A quarta parte trata a respeito da eletrocoagulação, trazendo as vantagens e desvantagens da mesma, e por final, na quinta parte, as conclusões finais (Pereira et al., 2018).

3. Revisão Bibliográfica

3.1 Características do soro de leite

O queijo é o produto que tem apresentado maiores taxas de crescimento nos últimos anos no Brasil. Entre os anos de 2005 a 2016, houve um crescimento de 124% no volume total de queijo vendido e no ano de 2016, alcançou 785 mil toneladas vendidas. Devido sua variedade, praticidade e propriedades nutricionais, o queijo está cada vez mais presente na vida dos brasileiros, contando com mais de 70 tipos produzidos no Brasil (Embrapa, 2018).

Com a produção do queijo é gerado o soro de leite, que consiste em um subproduto lácteo das indústrias de laticínios e se apresenta como um líquido amarelo-esverdeado que permanece após a precipitação e remoção da caseína do leite. Este subproduto representa de 80 a 90% do volume de leite utilizado na fabricação do queijo e contém aproximadamente 55% dos nutrientes do leite, incluindo proteínas, lactoses, vitaminas, minerais e geralmente apresenta baixo pH e alcalinidade (Gajo et al., 2016; Prazeres et al., 2012; Vettorello et. al., 2017; Magalhães et al., 2011; Un et al., 2014; Iltchenko et al., 2018; Nunes et al., 2018; Rico et al., 2015; Dereli et al., 2019).

Dependendo do tipo de queijo fabricado e das enzimas utilizadas, o soro de leite pode ser classificado em soro de leite ácido ou doce. O soro de leite ácido é obtido após fermentação ou adição de ácidos orgânicos ou minerais e é um coproduto do processo de fabricação de produtos lácteos, como queijo cottage e iogurte coado. O soro de leite doce é obtido pela adição de enzimas proteolíticas como a quimosina e é produzido durante a fabricação do queijo tipo coalho, cheddar ou suíço. A composição e características do soro de leite dependem de fatores como tipo de leite utilizado (cabra, ovelha, vaca, entre outros), alimentação do animal, época do ano e estágio de lactação (Carvalho et al., 2013; Ganju e Gogate, 2017).

No Quadro 1 é apresentada uma compilação dos autores a respeito das características do soro de leite.

Quadro 1: Características do soro de leite.

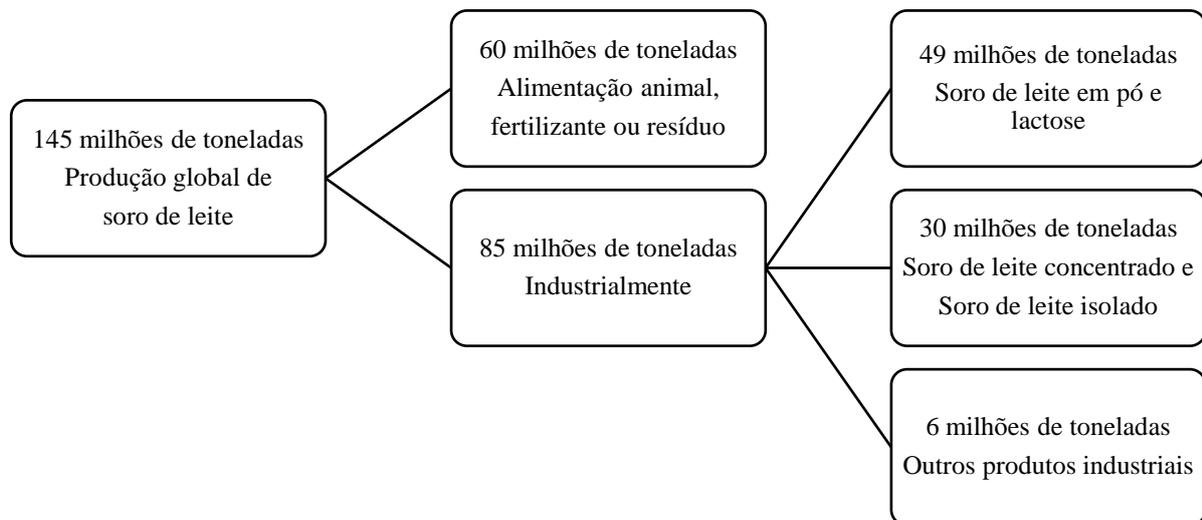
Referências	Frigon et al. (2009)	Spachos e Stamatis (2011)	Marquardt et al. (2011)	Prazeres et al. (2012)	Rico et al. (2015)	Ganju e Gogate (2017)	Itchenco et al. (2018)	Nunes et al. (2018)	Média
Água (%)	-	94	93-94	93-94	-	93-95	-	93-94	93-95
DBO (g L ⁻¹)	-	-	-	27,0-60,0	-	-	-	-	27,0-60,0
DQO (g L ⁻¹)	50-70	-	-	50-102	55,7-59,3	-	-	-	50,0-102,0
Gordura (%)	-	<0,1	-	0,99-10,5 g L ⁻¹	-	-	-	-	<0,1% ou 0,99-10,58 g L ⁻¹
Lactose (%)	70-75	4,5-5,0	4,5-5,0	39-60 g L ⁻¹	60,0-80,0	3,8-5,0	4,66	4,4-5,0	3,8-80,0% ou 39-60 g L ⁻¹
Minerais (%)	-	<0,1	0,6-1,0	0,46-10,0	-	0,5-0,7	0,6	0,6-1,0	0,1-10,0
pH	-	4,5-5,0	6,82	3,8-6,5	-	4,6-6,4	6,49	-	3,8-6,82
Proteínas (%)	10-15	0,8-1,0	0,7-0,9	1,4-8,0 g L ⁻¹	10,0-20,0	0,8-1,0	0,91	0,7-0,9	0,7-20,0% ou 1,4-8,0 g L ⁻¹
Nitrogênio (g L ⁻¹)	-	-	-	0,2-1,76	0,85-1,39	-	-	-	0,2-1,76
Fósforo (g L ⁻¹)	-	-	-	0,124-0,54	0,189-0,217	-	-	-	0,124-0,54
Sólidos Totais (%)	-	-	-	-	5,0-8,0	-	5,6	-	5,0-8,0

Fonte: Autor (2020).

De acordo com o Quadro 1 percebemos que o soro de leite possui uma elevada carga orgânica, devida a quantidade de lactose, proteína e gorduras. Estas características estão representadas pela Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) em torno de 27,0 a 60,0 g L⁻¹ e a Demanda Química de Oxigênio (DQO) em torno de 50 a 102 g L⁻¹. De acordo com Nunes et al., (2018), cerca de 40% do soro de leite produzido no Brasil é descartado de forma incorreta, principalmente pelas pequenas e médias empresas, transformando-se em um rejeito nocivo a natureza se descartado sem o devido tratamento e causando impactos ambientais (Nunes et al., 2018; Carvalho et al., 2013).

A indústria de fabricação de queijo é responsável pelos três principais tipos de efluentes. O soro de leite (resultante da produção de queijo), o segundo soro de leite (resultante da produção de queijo cottage) e soro de leite com águas residuais, onde a água de lavagem de tubulações e armazenamentos se misturam com frações de soro de leite e segundo soro de leite. Na Figura 1 é apresentada a utilização global do soro de leite (Carvalho et al., 2013; Prazeres et al., 2012).

Figura 1: Utilização global do soro de leite.



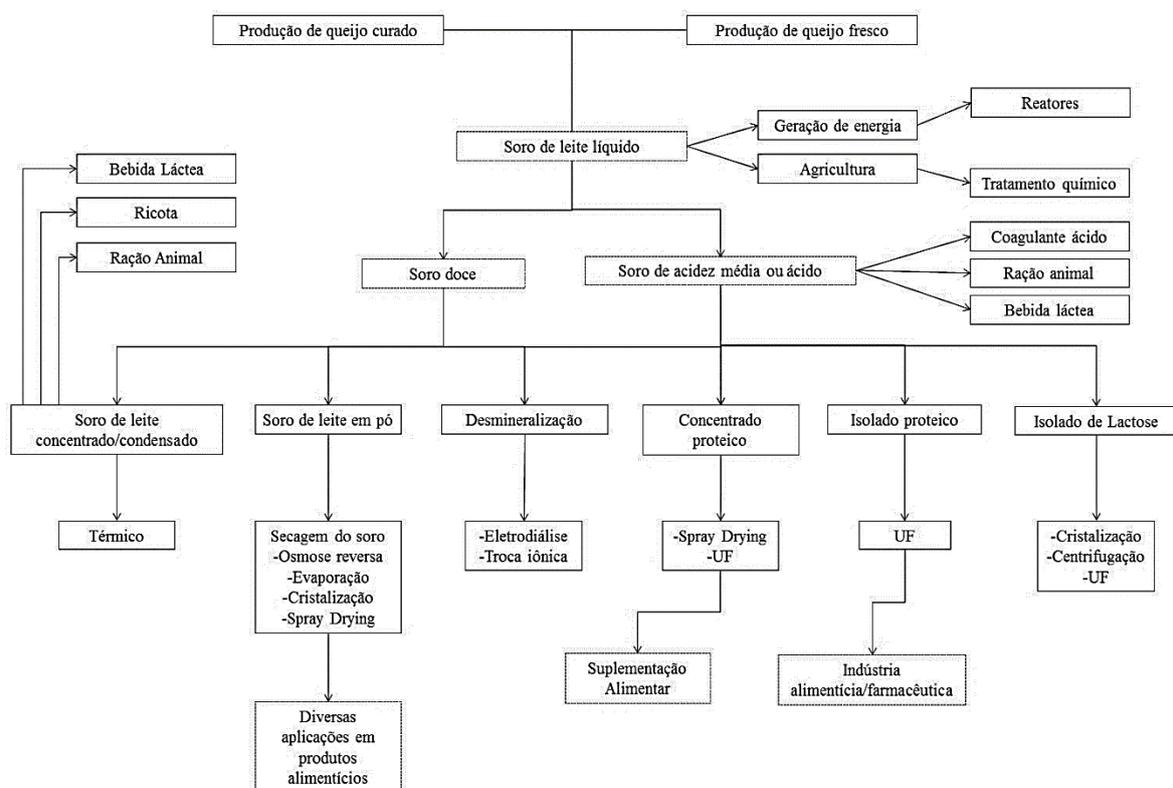
Fonte: Adaptado de Ganju e Gogate (2017).

De acordo com Ganju e Gogate (2017), a utilização global do soro de leite é de 145 milhões de toneladas, sendo 41,38% utilizado para alimentação animal, fertilizante ou resíduo e 58,62% utilizado industrialmente. Desses 58,62% utilizado industrialmente, 33,79% são destinadas a produção de soro de leite em pó e lactose, 20,69% em soro de leite concentrado e soro de leite isolado, e 4,14% em outros produtos industriais.

3.2 Beneficiamento e valorização do soro de leite

Atualmente o soro de leite deixou de ser considerado resíduo e passou a ser tratado como subproduto, possibilitando que seu beneficiamento tenha grande importância econômica, devido a suas características nutricionais, médicas e cosméticas o que intensifica o interesse na valorização de acordo com a Figura 2 (Vettorello et al., 2017; Prazeres et al., 2012; Domingues et al., 2010; Gajo et al., 2016).

Figura 2: Processo de beneficiamento do soro de leite.



Fonte: Adaptado de Nunes et al. (2018).

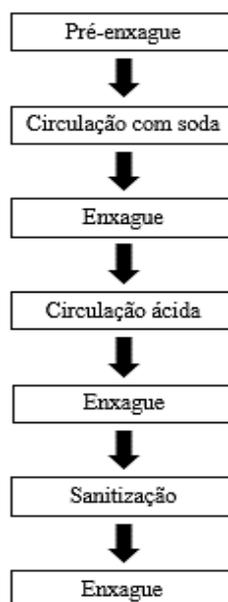
O soro de leite pode ser valorizado quando é utilizado como matéria-prima de novos produtos, sendo que o seu aproveitamento está associado a alimentação humana, animal, geração de energia e reuso na agricultura. Na Figura 2, é apresentado o processo de beneficiamento do soro de leite, onde após a fabricação do queijo, o soro é enviado para indústrias de processamento, sendo transformado em soro modificado, concentrado ou em pó. Essa valorização melhora a vida útil dos produtos e diminui o volume enviado para os sistemas de tratamento, contudo ainda resta um efluente a ser tratado (Nunes et al., 2018; Gajo et al., 2016).

3.3 Efluente do soro de leite

A disponibilidade de água para a produção de alimentos depende cada vez mais do gerenciamento e uso sustentável da água em todos os setores, devida a sua escassez causada pelas mudanças climáticas e aumento populacional. A indústria de alimentos é responsável por 30% do consumo de água e de acordo com os regulamentos sobre higiene alimentar, apenas água potável pode ser utilizada para superfícies de contato com alimentos e limpeza de equipamentos (Meneses e Flores, 2016).

A operação de unidade Clean-In-Place (CIP) é amplamente utilizada nas indústrias de alimentos para a circulação de soluções químicas e enxagues com água, por meios mecânicos sobre as superfícies a serem limpas e é usada globalmente como padrão de limpeza, de acordo com a Figura 3.

Figura 3: Sistema CIP de limpeza.



Fonte: Adaptado de Brum et al. (2009).

Na Figura 3, Brum et al., (2009), descreve as etapas que envolvem o sistema CIP de limpeza, de acordo com o Sistema Brasileiro de Respostas Técnicas (SBRT), onde é feita a utilização de ácidos, sodas e sanitizantes para a limpeza dos mesmos, alterando com recirculações de água para então ser inserido o produto.

As águas residuais provenientes do soro de leite são constituídas por diferentes diluições, que contém geralmente produtos químicos ácidos e alcalinos utilizados no processo

de lavagem e as características deste efluente depende de fatores como, produtos finais, tipo de sistema, método de operação, gestão de águas residuais e clima (Prazeres et al., 2013). No Quadro 2 é apresentada uma compilação dos autores a respeito das características do efluente do soro de leite.

Quadro 2: Características do efluente do soro de leite.

Parâmetros	Fang (1991)	Kalyuzhnyi et al. (1997)	Frigon et al. (2009)	Rivas et al. (2010)	Rivas et al. (2011)	Prazeres et al. (2013)	Un et al. (2014)	Prazeres et al. (2016)	Tirado et al. (2018)	Média
Condutividade (dS m ⁻¹)	-	-	-	11,25-13,47	-	-	17,0	7,35-11,25	15,5	7,35-17,0
DBO (g L ⁻¹)	0,59-1,21	-	2,7	10-12,5	13,3-16,3	6,9-12,9	-	5,88-1,24	-	0,59-16,3
DQO (g L ⁻¹)	1,07-2,18	5,4-77,3	3,9-3,91	0,09-25,58	17,1-19,9	9,3-18,5	15,5	7,42-17,71	-	1,07-77,3
Fósforo (g L ⁻¹)	-	-	0,015-0,025	0,0066-0,0072	0,0063-0,0069	0,103	-	0,089-0,117	-	0,0063-0,117
Lactose (g L ⁻¹)	-	-	2,8-2,82	0,18	0,18	-	-	-	-	0,18-2,82
Óleos e Graxas (g L ⁻¹)	-	0,4-5,7	-	1,83-3,76	-	-	-	-	-	0,4-3,76
pH	5,0-9,0	4,3-8,7	-	4,01-4,55	-	-	5,2	3,39-4,95	5,64	3,39-9,0
Proteínas (g L ⁻¹)	-	2,3-33,5	-	938-947 µg/L	937-949 µg/L	-	-	-	-	2,3-33,5 g L ⁻¹ ou 937-949 µg/L
Nitrogênio Total (g L ⁻¹)	0,029-0,19	0,5-5,6	75-115	0,31-0,35	0,32-0,36	-	-	0,250-0,378	1,106	0,029-115
Sólidos Suspensos Totais (g L ⁻¹)	0,081-0,441	-	-	1,63-4,78	-	-	-	1,35-1,80	5,88	0,081-5,88
Sólidos Totais (g L ⁻¹)	-	-	-	7,02-8,35	7,05-8,25	5,7-15,1	-	3,71-14,33	-	3,71-15,1
Turbidez (NTU)	-	-	-	1331-2004	1112-1550	405-1386	-	254,3-1310,3	6978	254,3-6978

Fonte: Autor (2020).

No Quadro 2, observamos que o alto valor da matéria orgânica é causado pela lactose, conteúdo de proteínas e gorduras, nos intervalos de (g L^{-1}) 0,18-2,82; 2,3-33,5; 0,4-3,76, respectivamente, que podem ser monitorados pela DQO 1,07-77,3 g L^{-1} e DBO 0,59-16,3 g L^{-1} . As proteínas do efluente do soro de leite envolvem principalmente a beta-lactoglobulina e α -lactoalbumina que tem alta afinidade pela água e não precipitam com a caseína durante o processo de fabricação do queijo, já os lipídios podem causar problemas operacionais devido ao potencial de flutuação da biomassa (Prazeres et al., 2012; Lin et al., 2014).

O alto teor de nitrogênio (0,029-115 g L^{-1}) e fósforo (0,0063-0,117 g L^{-1}) presente nos efluentes do soro de leite, tem como principal problema a eutrofização de corpos d'água, que acaba gerando problemas na qualidade da água, perda de animais vivos e possíveis efeitos subletais das toxinas das algas em animais e seres humanos. O excesso de nitrato e fosfato também afetam o ecossistema, pois ajudam no crescimento dramático de algas nas águas continentais e costeiras, já o flúor em excesso leva a doenças como fluorose e artrite (Kajjumba et al., 2019; Tehrani et al., 2019; Segura et al., 2017)

A turbidez é causada pela presença de materiais sólidos em suspensão e organismos microscópicos. A turbidez em torno de 254,3-6978 NTU causa a diminuição da passagem de luz na água reduzindo a fotossíntese dos organismos (algas e vegetação submersa), podendo comprometer a reprodução de peixes e invertebrados (Kim, 2011).

Prazeres et al. (2012), considera que além da valorização, os tratamentos biológicos e físico químicos também podem ser aplicados no gerenciamento do soro de leite.

3.4 Tratamentos para efluente oriundo do beneficiamento do soro de leite

Os processos biológicos podem ser realizados por meio de digestão aeróbia e anaeróbia, a diferença está no uso de microrganismos que dependem ou não de oxigênio (Nunes et al., 2018).

O conteúdo orgânico extremamente alto das águas residuais do soro de leite torna a aplicação do tratamento aeróbio, caracterizado pela degradação da matéria orgânica em temperatura ambiente (22 a 24°C) inadequada, principalmente devido ao custo de suplementação de oxigênio. A digestão anaeróbia é comumente considerada como o único método viável de tratamento de águas residuais com elevada carga orgânica, e pode ser realizada com a utilização de reatores do tipo anaeróbio de manta de lodo (UASB) e de reatores de tanque continuamente agitado que têm a capacidade de recebimento de grande quantidade de carga orgânica, apresentam alta taxa de decomposição, e os poluentes podem ser convertidos

em produtos finais gasosos, principalmente dióxido de carbono e metano, que podem ser utilizados como fonte alternativa de energia (Cuff et al., 2018; Rajeshwari et al., 2000; Dereli et al., 2019; Chernicharo, 2008; Prazeres et al., 2012; Hamdi et al., 2008; Carvalho et al., 2013).

Calcula-se que 90-95% do carbono contido no efluente bruto seja convertido em biogás, o restante vai para o efluente tratado. Essa tecnologia não visa a remoção de nutrientes como nitrogênio e fósforo, no entanto, o tratamento físico químico tem se mostrado eficiente na remoção dos mesmos (Spachos; Stamatis, 2011).

Devido ao alto teor de lactose nas águas residuais do soro de leite e baixa alcalinidade, as usinas de biogás geralmente dependem de um sistema robusto de controle de pH e/ou configurações adequadas de biorreatores. No Quadro 3 são apresentadas as vantagens e desvantagens do tratamento anaeróbio.

Quadro 3: Vantagens e desvantagens do tratamento anaeróbio.

Vantagens	Desvantagens
Baixa produção de sólidos, cerca de 2 a 8 vezes inferior à que ocorre nos processos aeróbios;	Remoção de nitrogênio, fósforo e patógenos insatisfatória;
Baixo consumo de energia, usualmente associado a uma elevatória de chegada. Isso faz com que os sistemas tenham custos operacionais muito baixos;	Produção de efluente com aspecto desagradável e usualmente com qualidade insuficiente para atender os padrões ambientais. Em decorrência, alguma forma de pós tratamento é normalmente necessária;
Baixa demanda de área;	Possibilidade de distúrbios devido a choques de carga orgânica e hidráulica, presença de compostos tóxicos ou ausência de nutrientes;
Baixos custos de implantação, da ordem de 20 a 30 dólares per capta;	A bioquímica e a microbiologia da digestão anaeróbia são complexas e ainda precisam ser mais estudadas;
Produção de metano, um gás combustível de alto teor calorífico;	A partida do processo pode ser lenta, na ausência de lodo de semente adaptado;
Possibilidade de preservação da biomassa, sem alimentação do reator, por vários meses;	Possibilidade de geração de maus odores e de problemas de corrosão, porém controláveis.
Tolerância a elevadas cargas orgânicas, Aplicabilidade em pequena e grande escala e baixo consumo de nutrientes.	

Fonte: Chernicharo (2008).

Analisando o Quadro 3, destacamos que o tratamento anaeróbio além de demandar pouca área, tem um baixo custo de implantação e mesmo o reator ficando sem alimentação a biomassa consegue se preservar por vários meses.

Apesar da alta biodegradabilidade do efluente do soro de leite, eles são considerados um substrato problemático para o tratamento anaeróbio devido sua elevada DQO rapidamente acidificável, teor de sal, cálcio e falta de alcalinidade, sendo então necessária uma suplementação de alcalinidade especialmente durante o início do reator e períodos de alta carga orgânica (Dereli et al., 2019).

Fang (1991) utilizou duas plantas para tratar o efluente do soro de leite, uma planta de lodo ativado em três estágios e um reator anaeróbio. Cada planta piloto tratou continuamente 230 L/h de efluente e o lodo anaeróbio levou cerca de 6 semanas para se aclimatar.

O reator UASB utilizado por Diamantis et al. (2014) para tratar soro de leite diluído com água de lavagem de plantas, comportava 2L de volume e a temperatura era regulada em de 30°C (± 1) durante todo o período experimental, assim como o pH em 6,4 ($\pm 0,05$) e o lodo granular utilizado tinha as mesmas características do efluente com recirculações diárias.

O Flaherty et al. (2006) tratou efluente do soro de leite com dois reatores anaeróbios em escala piloto, um com efluente de baixa resistência (1 kg m^{-3} de DQO) e outro de alta resistência (1 kg m^{-3} de DQO). Ao baixar a temperatura do efluente de alta resistência para 12°C, houve diminuição na eficiência de remoção de DQO, entre 50% e 60% e uma desintegração do lodo granular.

Hamdi et al. (2008) utilizou um reator de filtro anaeróbio a montante com capacidade de 2L e temperatura de 35°C para tratar o efluente do soro de leite e a maior taxa de remoção foi em 4 dias, alcançando 90%.

Frigon et al. (2009) desenvolveram um estudo com o objetivo de avaliar o tratamento de efluente do soro de leite com carga orgânica variada. O sistema de tratamento ocorreu por processo anaeróbio, seguido por um polimento aeróbio. Para esse procedimento os autores projetaram um digestor em escala piloto. O aumento na aeração durante a etapa aeróbia não fez com que o desempenho geral do tratamento melhorasse. Dessa forma, concluiu-se que, o acoplamento de passos aeróbios e anaeróbios no mesmo digestor é promissor, porém, são necessários mais de dois dias para remover eficientemente a fração biodegradável das águas residuais de soro.

Rivas et al. (2010) utilizou o processo de coagulação-floculação para tratar o efluente do soro de leite, sendo utilizados 3 diferentes coagulantes: sulfato ferroso (FeSO_4), sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) e cloreto férrico (FeCl_3). O $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ não teve resultados significativos, devido ao fato do sulfato de alumínio necessitar da utilização de uma quantidade maior que os demais para atingir os mesmos resultados.

O estudo de tratamento aeróbio de efluente do soro de leite pré-coagulado com NaOH ou Ca(OH)_2 foi desenvolvido por Rivas et al., (2011). O lodo gerado na pré-coagulação apresentou propriedades de sedimentação aceitáveis, embora os sólidos do efluente tratado com Ca(OH)_2 é melhor separado do líquido do que aqueles formados em águas residuais processadas com NaOH. Conforme os parâmetros cinéticos biológicos, em ambos os pré-tratamentos, a fase de pré-coagulação tornou o sobrenadante mais propenso à biodegradação do que o efluente não tratado, pois a geração de lodo após processos biológicos é reduzida.

O efluente do soro de leite foi tratado por Carvalho et al. (2013) utilizando oxidação por Fenton. No estudo em questão antes do processo de Fenton o efluente foi submetido a dois pré-tratamentos, sendo eles: nº 1- coagulação e floculação com FeCl_3 ; nº 2- precipitação utilizando Ca(OH)_2 com digestão aeróbia. Nesse segundo tratamento o efluente saiu relativamente limpo e adequado para outros usos.

Segundo Carvalho et al. (2013) a aplicação de processos oxidativos avançados (POAs) após processos químicos e/ou biológicos podem constituir um meio viável e alternativa promissora para eliminar a matéria orgânica do efluente, mas devido ao alto custo operacional associado ao uso de reagentes caros e a possibilidade de formação de compostos tóxicos, buscaram-se outras alternativas para o tratamento do efluente do soro de leite de acordo com a Quadro 4 (Araujo et al., 2016).

Quadro 4: Tratamentos utilizados para efluente do soro de leite e principais resultados.

Referência	Tratamentos utilizados	Principais resultados
Fang (1991)	Lodo ativado e reator anaeróbio	O tratamento com lodo ativado teve uma remoção de 99% na DBO e 91% no nitrogênio com 19,8 horas de retenção. O reator anaeróbio reduziu 87% da DBO após 2 dias de retenção.
Diamantis et al. (2014)	Reator UASB	Remoção de 90% na DQO.
O'Flaherty et al. (2006)	Tratamento anaeróbio	No reator tratado com efluente de baixa resistência, a remoção de DQO em média de 70 a 80%. No efluente de alta resistência, excedeu 90 % de remoção, ambos com temperatura entre 20 e 12°C.
Hamdi et al. (2008)	Reator anaeróbio	Remoção de 80 a 90% na DQO.
Frigon et al. (2009)	Digestão anaeróbia e aeróbio	Remoção de 97% na DQO.
Rivas et al. (2010)	Coagulação-floculação	Ao utilizar FeSO ₄ , houve uma redução de 50% na DQO e 60% na DBO, FeCl ₃ foi semelhante ao FeSO ₄ , alcançando uma redução de 40% na DQO e 60% na DBO e Al ₂ (SO ₄) ₃ não teve resultados significativos.
Rivas et al. (2011).	Tratamento aeróbio com pré-coagulação de NaOH ou Ca(OH) ₂	Ambos os agentes reduziram 50% da DQO.
Carvalho et al. (2013)	Oxidação por fenton	O efluente submetido a coagulação e floculação com FeCl ₃ e após oxidado por Fenton H ₂ O ₂ /Fe (III), reduziu a carga orgânica em 80%, já o tratado por precipitação com Ca(OH) ₂ , e digestão aeróbia, removeu quase o conteúdo total de DQO.

Fonte: Autor (2020).

De acordo com o Quadro 4 os tratamentos que demonstraram melhor eficiência na remoção de DQO em soro de leite foram os tratamentos anaeróbios, o que vem de encontro com os estudos realizados.

O tratamento biológico é importante pois remove grande parte da matéria orgânica presente no efluente. O tratamento anaeróbio pode ser implantado em pequena e grande escala com baixo custo de implantação, baixo consumo de energia e possibilidade da utilização do gás metano, produzido durante o tratamento, ser utilizado como fonte de energia, mas esse método

tem dificuldade na remoção de nutrientes. O tratamento físico-químico por si só, não demonstra bons resultados no tratamento desse efluente, rico em lactose, DQO e DBO, mas é importante para a remoção de nutrientes. Dentre os tratamentos físico-químicos, destaca-se a eletrocoagulação.

3.5 Eletrocoagulação

A eletrocoagulação (EC) está diretamente relacionada ao processo de coagulação via separação de fases para descontaminação de águas residuais antes do processo de descarga no ambiente. A EC é uma tecnologia eletroquímica que visa a redução de poluentes na água, assim como metais tóxicos e poluentes orgânicos persistentes e sua eficiência depende de parâmetros como condutividade e pH. Uma condutividade maior no fluxo de águas residuais, reduz a resistência do circuito de eletrólise, diminuindo a tensão necessária para tratar a carga e consequentemente diminuindo o consumo elétrico do processo (Un et al., 2014; Segura et al., 2017; Reilly et al., 2019).

O equipamento de EC consiste em eletrodos de cátodo e ânodo alimentados por corrente contínua, submersos em um tanque que contém uma solução contaminada. Esses eletrodos podem variar em forma, tamanho e número, mas os metais mais utilizados para a fabricação dos eletrodos de EC são de Al e Fe, pois são econômicos, amplamente disponíveis e não perigosos. O sistema de EC pode ser operado em batelada ou em modo contínuo (Reilly et al., 2019; Melchioris et al., 2016).

De acordo com Reilly (2019), a eletrólise é usada na EC para causar a dissolução do ânodo de metal (sacrifício) nas águas residuais, expressa pelas Equações 1, 2 e 3:

No ânodo:

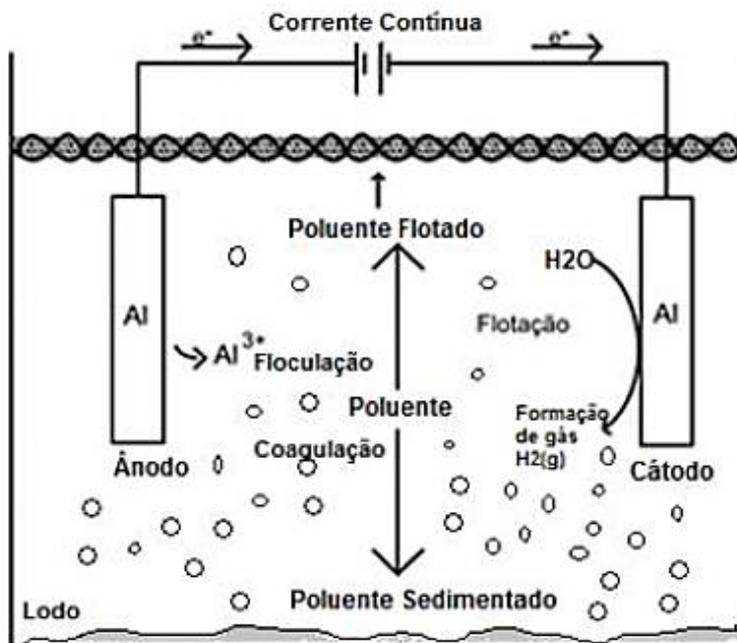


No cátodo:



Na Figura 4 é apresentada uma representação esquemática de um reator de EC.

Figura 4: Representação esquemática de um reator de EC.



Fonte: Melo (2018).

De acordo com a Figura 4, observamos que o fluxo de íons metálicos do ânodo de sacrifício atua como um agente coagulante para a ligação de contaminantes. Em solução, os íons Al^{3+} e Fe^{2+} reagem com os grupos OH^- para formar hidróxidos, que ligam os contaminantes por complexação ou atração eletrostática. A dispersão do coagulante é auxiliada por uma agitação mecânica rápida e a liberação de bolhas de gás na célula da EC auxilia no processo de tratamento, fornecendo fluabilidade para alguns contaminantes coagulados, o que faz com que eles flutuem para a superfície, de onde podem ser removidos, conforme a Figura 4 (Reilly et al., 2019; Tirado et al., 2018).

As espécies dominantes de íons Al e Fe formadas são determinadas pelo pH do fluxo de resíduos. Ao usar eletrodos de Al, um excesso de cátions Al^{3+} é formado em $\text{pH} < 4,0$. $\text{Al}(\text{OH})_3$ é principalmente ativo entre $\text{pH} 4-12$ e os ânions de aluminato são dominantes em pH acima de 12. A valência do Fe dissolvido pode ser controlada pelo pH e usada para prever a formação de coagulantes de $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ou $\text{Fe}(\text{OH})_3$ na solução. Os íons Fe^{2+} são altamente solúveis e, portanto, um pH alcalino é benéfico para sua oxidação em cátions trivalentes, ideais para a coagulação de contaminantes por Fe (Reilly et al., 2019).

A quantidade teórica de íons metálicos produzidos a partir do ânodo durante o processo de eletrocoagulação pode ser quantificada pela lei de Faraday, que é expressa pela Equação 4:

$$m = \frac{ITM}{FZ} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

I= corrente (A);

T= tempo do processo (s);

M= massa molar do metal do eletrodo (g/mol);

F= constante de Faraday (96,485 C/mol);

Z= valência do metal do ânodo.

A distância entre os eletrodos deve ser levada em consideração, pois à medida que a distância entre os eletrodos diminui, o movimento dos íons se torna mais fácil devida a redução da resistência, contudo, o consumo de energia diminui e a eficiência da remoção é aprimorada. Enquanto que o distanciamento dos eletrodos resulta numa dificuldade de movimentação dos íons, aumento da resistência, e conseqüentemente maior consumo de energia (Tehrani et al., 2019).

Os mecanismos envolvidos na EC ainda não são bem entendidos, mas visam a remoção de metais pesados e orgânicos.

Na remoção de orgânicos, depende da estrutura e grupos funcionais dos poluentes. Os principais mecanismos dos poluentes orgânicos são: complexação, neutralização de carga, aprisionamento e adsorção. Na complexação o poluente orgânico atua como ligante, sendo coordenado ao centro metálico por seus grupos funcionais e precipita dentro do bloco coagulante. Na neutralização ou desestabilização de cargas, a dupla camada de poluentes é comprimida, favorecendo a formação de agregados e então a precipitação. No mecanismo de aprisionamento fundamenta-se na captura de moléculas orgânicas nos coágulos hidroxometálicos que arrastam os poluentes com eles e a adsorção, que enquanto as moléculas orgânicas ficam presas, o poluente é fisicamente arrastado pelos coágulos, onde o poluente apresenta interações físico-químicas que favorecem sua adsorção na superfície coagulante. A utilização de cada mecanismo depende da natureza do poluente orgânico, tipo de coagulante e sua dosagem (Segura et al., 2017).

Reilly et al. (2019), demonstrou em seu estudo a respeito da eletrocoagulação, a eficiência desse processo para remoção de nitrogênio, fósforo, turbidez e DQO em águas residuais de laticínio. Em estudos realizados pelo mesmo, foi utilizado ânodo de Al, corrente de 4,3 mA/cm² e tempo de retenção de 30 minutos, alcançando 81% de remoção de nitrogênio, 89% de remoção de fósforo e 61% de remoção de DQO. No mesmo estudo, foi relatada que a

utilização do ânodo de Fe, com pH ajustado para 4,5, condutividade de 3,6 mA/cm² e tempo de retenção de 60 minutos obteve-se uma remoção de 90% na turbidez e DQO.

Em um estudo sobre efluente de soro de leite, Segura et al. (2017) utilizou um eletrodo de ferro, com pH de 4,5 e condutividade de 60 mA/cm², obtendo uma remoção de 86,4% na DQO. Utilizando a mesma matéria prima, Un et al., (2014) realizou um estudo utilizando um reator de eletrocoagulação contínua com ânodo e cátodo de ferro alcançando uma remoção de 86,4% de DQO com pH 5, densidade de corrente 60 mA/cm² e tempo de retenção de 20 minutos.

Melchiors et al. (2016), por sua vez, estudou a eficiência da eletrocoagulação para tratamento de efluente líquido de laticínio bruto, utilizando pH 5,0, condutividade de 5000 mA/cm² e tempo de retenção de 60 minutos, onde obteve-se 97% de remoção da DQO e 99% na remoção da turbidez. O eletrodo de Al permitiu uma clarificação mais rápida, enquanto que o eletrodo de Fe levou a uma solução aquosa remanescente mais clara, mas com um subproduto sólido de coloração aparente, contudo não foram encontrados estudos onde tenha sido utilizada a eletrocoagulação após o tratamento anaeróbio. As principais vantagens e desvantagens da utilização da eletrocoagulação está descrito no Quadro 5.

Quadro 5: Vantagens e desvantagens da utilização de eletrocoagulação.

Vantagens	Desvantagens
- Baixa energia;	- Substituição regular de ânodos e cátodos pois são consumidos;
- Adequada para operação descentralizada / rural;	- Incrustações de lodo nos eletrodos, causando ineficiência no processo;
- Baixo risco de contaminação secundária;	- Requer fonte de energia;
- Baixo custo de capital e operacional;	- Efluente tratado apresenta alta concentração de AL e Fe, necessitando pós tratamento em alguns casos antes do descarte.
- Separação da matéria orgânica mais eficaz e rápida que na coagulação;	-
- Não é necessário controle de pH, a não ser por valores extremos; - Coagulantes eletro gerados diretamente, não sendo necessária adição de íons cloreto ou sulfato, eliminando os ânions competitivos e permitindo remoção máxima de adsorção;	-
- Requer menor quantidade de produtos químicos, pois o coagulante eletro gerado é altamente puro, melhorando a remoção de poluentes;	-
- Redução no volume de lodo;	-
- Remoção de uma ampla variedade de contaminantes.	-

Fonte: Adaptado de Segura et al., (2018); Reilly et al., (2019).

Analisando o Quadro 5, verificamos que as vantagens superam as desvantagens da eletrocoagulação, destacando que a eletrocoagulação requer um baixo custo de capital e operacional, reduz o volume de lodo e remove uma ampla variedade de contaminantes.

4. Conclusões

O soro de leite mesmo após o processo de beneficiamento, necessita de tratamento para o seu efluente devido a elevada quantidade de matéria orgânica e nutrientes presente em sua composição.

Os processos anaeróbios mostram-se eficientes no tratamento do efluente do soro de leite, pois esses processos possuem boa capacidade de tratar efluentes que apresentam elevada carga orgânica. No entanto, esses processos não eliminam nitrogênio e fósforo, sendo então necessário a aplicação de pós-tratamentos.

A eletrocoagulação mostra-se uma interessante opção de pós-tratamento, pois é eficaz na remoção de poluentes persistentes e nutrientes. Além de baixo custo e não necessitar de ajustes de pH a não ser por valores extremos, fácil aplicação e baixa geração de lodo.

Em geral, esse review apresentou as principais vantagens, aplicações e resultados promissores da eletrocoagulação como pós-tratamento do efluente de soro de leite, contudo necessitam estudos que comprovem a eficiência da combinação desses estudos em efluente do soro de leite.

Referências

Araújo, K. S., Antonelli, R., Gaydeczka, B., Granato, A. C., & Malpass G. R. P. (2016). Processos oxidativos avançados: uma revisão de fundamentos e aplicações no tratamento de águas residuais urbanas e efluentes industriais. *Revista Ambiente & Água*, 11(2), 387-401.

Brum, L. F. W., Junior, L. C. O. S., & Benedetti, S. (2009). Reaproveitamento de Água de Processo e Resíduos da Indústria de Laticínios. *2º International Workshop - Advances in Cleaner Production*.

Carvalho, F., Prazeres, A. R., & Rivas, J. Cheese whey wastewater: Characterization and treatment. (2013). *Science of Total Environment*, 445-446, 385-396.

Chernicharo, C. A. L. (2008). *Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias: reatores anaeróbios*, Rio de Janeiro, 5, 121.

Cuff, G., Turcios, A. E., Mohammad-Pajooch, E., Kujawski, O., Weichgrebe, D. & Rosenwinkel, K. H. (2018). High-rate anaerobic treatment of wastewater from soft drink industry: Methods, performance and experiences. *Journal of Environmental Management*, 220, 8–15.

Dereli, R. K., Zee, F. P. V., Ozturk, I. & Lier, J. B. V. (2019). Treatment of cheese whey by a cross-flow anaerobic membrane bioreactor: Biological and filtration performance. *Environmental Research*, 168, 109-117.

Diamantis, V. I., Kapagiannidis, A. G., Ntougias, S., Tataki, V., Melidis, P. & Aivasidis, A. (2014). Two-stage CSTR–UASB digestion enables superior and alkali addition-free cheese whey treatment. *Biochemical Engineering Journal*, 84, 45-52.

Domingues, L., Guimarães, P. M. R., & Teixeira, J. A. (2010). Fermentation of lactose to bio-ethanol by yeasts as part of integrated solutions for the valorisation of cheese whey. *Biotechnology Advances*, 28, 375-384.

Embrapa. (2018). *Anuário leite 2018: Indicadores, tendências e oportunidades para quem vive no setor leiteiro*, São Paulo, 1, 114.

Fang, H. H. P. (1991). Treatment of wastewater from a whey processing plant using activated sludge and anaerobic processes. *Journal of Dairy Science*, 74, (6), 2015-2019.

Frigon, J. C., Breton, J., Bruneau, T., Moletta, R., & Guiot, S. R. (2009). The treatment of cheese whey wastewater by sequential anaerobic and aerobic steps in a single digester at pilot scale. *Bioresource Technology*, 100, 4156–4163.

Gajo, F. F. S., Gajo, A. A., Silva, R. B. V., & Ferreira, E. B. (2016). Diagnóstico da destinação do soro de leite na mesorregião do campo das vertentes – Minas Gerais. *Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes*, 71 (1), 26-37.

Ganju, S., Gogate, P. R. (2017). A review on approaches for efficient recovery of whey proteins from dairy industry effluents. *Journal of Food Engineering*, 215, 84-96.

Hamdi, M., Gannoun, H., Khelifi, E., Bouallagui, H., & Touhami, Y. (2008). Ecological clarification of cheese whey prior to anaerobic digestion in upflow anaerobic filter. *Bioresource Technology*, 99, 6105-6111.

Iltchenko, S., Preci, D., Bonifacin, C., Fraguas, E. F., Steffens, C., Panizzolo, L. A., Colet, R., Fernandes, I. A., Abirached, C., Valduga, E., & Steffens, J. (2018). Whey protein concentration by ultrafiltration and study of functional properties. *Ciência Rural*, 48 (5).

Kajjumba, G. W., Yildirim, E., Aydin, S., Emik, S., Agun, T., Osra, F., & Wasswa, J. (2019). A facile polymerization of magnetic coal to enhanced phosphate removal from solution. *Journal of Environmental Management*, 247, 356-362.

Kalyuzhnyi, S. V., Martinez, E. P., & Martinez, J. R. (1997). Anaerobic treatment of high-strength cheese-whey wastewater in laboratory and pilot UASB-reactors. *Bioresource Technology*, 60, 59-65.

Kim, M. (2011). Estudo da variabilidade de turbidez no trecho superior no rio Guandu. Projeto final de Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

Lin, C. S. K., Koutinas, A. A., Stamatelatos, K., Mubofu, E. B., Matharu, A. S., Kopsahelis, N., Pfaltzgraff, L. A., Clark, J. H., Papanikolaou, S., Kwan, T. H., & Luque, R. (2014). Current and future trends in food waste valorization for the production of chemicals: materials and fuels: a global perspective. *Biofuels Bioproducts and Biorefining*.

Magalhães, K. T., Dragone, G., Pereira, G. V. M., Oliveira, J. M., Domingues, L., Teixeira, J. A., Silva, J. B. A. S., & Schwan, R. (2011). Comparative study of the biochemical changes and volatile compound formations during the production of novel whey-based kefir beverages and traditional milk kefir. *Food Chemistry*, 126, 249–253.

Marquardt, L., Rohlfes, A. L. B., Baccar, N. M., Oliveira, M. S. R. & Richards, N. S. P. S. (2011). Indústrias lácteas: alternativas de aproveitamento do soro de leite como forma de gestão ambiental. *TECNO-LÓGICA*, 15(2), 79-83.

Melchior, M. S., Piovesan, M., Becegato, V. R., Becegato, V. A., Tambourgi, E. B. & Paulino, A. T. (2016). Treatment of wastewater from the dairy industry using electroflocculation and solid whey recovery. *Journal of Environmental Management*, 182, 574-580.

Melo, T. B. (2018). *Ecotoxicidade de efluente sintético contendo alquilbenzeno linear sulfonado (LAS) proveniente do tratamento por eletrocoagulação*. Monografia (Graduação)-Universidade Federal de Goiás, Graduação em Engenharia Civil ou Engenharia Ambiental e Sanitária, Goiás, 2018.

Meneses, Y. E., & Flores, R. A. (2016). Feasibility, safety, and economic implications of whey-recovered water in cleaning-in-place systems: A case study on water conservation for the dairy industry. *Journal of Dairy Science*, 99 (5), 3396-3407.

Nunes, L. A., Gerber, J. Z., Costa, F. P., Souza, R. J. S. & Kalid, R. A. (2018). O soro do leite, seus principais tratamentos e meios de valorização. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, 11 (1), 301-326.

O'Flaherty, V., Mchugh, S. & Collins, G. (2006). Long-Term, high-rate anaerobic biological treatment of whey wastewater at psychrophilic temperatures. *Bioresource Technology*, 97, 1669-1678.

Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J., & Shitsuka R. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*, Santa Maria, 1, 119.

Prazeres, A. R., Carvalho, F., & Rivas, J. (2012). Cheese whey management: A review. *Journal of Environmental Management*, 110, 48-68.

Prazeres, A. R., Carvalho, F., & Rivas, J. (2013). Fenton-like application to pretreated cheese whey wastewater. *Journal of Environmental Management*, 129, 199-205.

- Prazeres, A. R., Rivas, J., Almeida, M. A., Patanita, M., Dôresd, J., & Carvalho, F. (2016). Agricultural reuse of cheese whey wastewater treated by NaOH precipitation for tomato production under several saline conditions and sludge management. *Agricultural Water Management*, 167, 62–74.
- Rajeshwari, K.V., Balakrishnan, M., Kansal, A., Lata, B. K. & Kishore, V.V.N. (2000). State-of-the-art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4, 135-156.
- Reilly, M., Cooley, A. P., Tito, D., Tassou, S. A., & Theodorou, M. K. (2019). Electrocoagulation treatment of dairy processing and slaughterhouse wastewaters. *Energy Procedia*, 161, 343-351.
- Rico, C., Muñoz, N., Fernández, J. & Rico, J. L. (2015). High-load anaerobic co-digestion of cheese whey and liquid fraction of dairy manure in a one-stage UASB process: Limits in co-substrates ratio and organic loading rate. *Chemical Engineering Journal*, 262, 794-802.
- Rivas, J., Prazeres, A. R., Carvalho, F. & Beltran, F. (2010). Treatment of cheese whey wastewater: combined coagulation – flocculation and aerobic biodegradation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58, 7871-7877.
- Rivas, J., Prazeres, A. R., & Carvalho, F. (2011). Aerobic biodegradation of precoagulated cheese whey wastewater. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59, 2511–2517.
- Segura, S. G., Eiband, M. M. S. G., Melo, J. V., & Huitle, C. A. M. (2017). Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 801, 267-299.
- Spachos, T., & Stamatis, A. (2011). Thermal analysis and optimization of an anaerobic treatment system of whey. *Renewable Energy*, 36, 2097-2105.

Tehrani, R. N. A., Mohammadi, A., & Khadir, A. (2019). Optimization of nitrogen removal from an anaerobic digester effluent by electrocoagulation process. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7, 103195.

Tirado, L., Gokkus, O., Brillas, E., & Sires, I. (2018). Treatment of cheese whey wastewater by combined electrochemical processes. *Journal of Applied Electrochemistry*, 48, 1307-1319.

Un, U. T., Kandemir, A., Erginel, N., & Ocal, S. E. (2014). Continuous electrocoagulation of cheese whey wastewater: An application of Response Surface Methodology. *Journal of Environmental Management*, 146, 245-250.

Vettorello, G., Dalcorso, A. B., Betti, J., Kemerich, G. T., & Oliveira, E. C. (2017). Elaboração de sorvete com adição de soro de queijo em pó. *Revista Destaques Acadêmicos*, 9 (4), 142-150.

Porcentagem de contribuição de cada autor ao manuscrito

Camila Favretto de Souza – 70%

Marcelo Hemkemeier – 30%