

MODELAGEM MATEMÁTICA DO TRATAMENTO DE SORO DE LEITE POR BIODIGESTÃO
ANAERÓBIA

Mathematical Modeling Of Milk Whey Treatment By Anaerobic Digestion

Gabriela Pereira de Assis¹; Vitheli de Oliveira Ocampos¹; Izabel Melz Fleck²; Leandro Fleck^{3*}

Resumo: O estudo baseia-se na hipótese de que a biodigestão anaeróbia pode ser utilizada para tratar soro de leite, utilizando inóculo de biodigestor de fecularia. Para a realização dos ensaios experimentais, foi utilizado um módulo experimental constituído por biodigestores anaeróbios com volume útil de 1 L, e controle de temperatura em 35 °C. Foram controlados os fatores proporção de mistura do inóculo (PMI) (%) e tempo de operação (TO) (dias), sendo seus efeitos sobre os parâmetros cor, turbidez e demanda química de oxigênio (DQO), avaliados utilizando-se um DCCR. As maiores remoções de turbidez, cor e DQO do soro de leite, quando submetido ao tratamento anaeróbio, foram de 67,12%, 43,48% e 77,25%, respectivamente. O tempo de operação, termo quadrático, exerceu efeito significativo sobre a remoção de turbidez, cor e DQO, apresentando p-valor de 0,04, 0,005 e 0,09, respectivamente. O modelo matemático representativo da eficiência de remoção de cor do soro de leite tratado por biodigestão anaeróbia é estatisticamente significativo. Conclui-se que a biodigestão anaeróbia pode ser utilizada para o tratamento de soro de leite, mas orienta-se que seja avaliada a possibilidade de um maior tempo de operação, além da possibilidade de realizar codigestão anaeróbia com resíduos orgânicos disponíveis na região de interesse.

Abstract: The study is based on the hypothesis that anaerobic digestion can be used to treat milk whey, using inoculum from a starch biodigester. To carry out the experimental tests, an experimental module was used consisting of anaerobic biodigesters with a useful volume of 1 L, and temperature control at 35 °C. The factors inoculum mixing ratio (IMR) (%) and operating time (OT) (days) were controlled, with their effects on the parameters color, turbidity and chemical oxygen demand (COD) being evaluated using a CCRD. The greatest removal of turbidity, color and COD from milk whey, when subjected to anaerobic treatment, were 67.12%, 43.48% and 77.25%, respectively. The operating time, quadratic term, had a significant effect on the removal of turbidity, color and COD, presenting p-values of 0.04, 0.005 and 0.09, respectively. The mathematical model representing the color removal efficiency of milk whey treated by anaerobic digestion is statistically significant. It is concluded that anaerobic digestion can be used to treatment of milk whey, but it is recommended that the possibility of a longer operation time be evaluated, in addition to the possibility of carrying out anaerobic co-digestion with organic waste available in the region of interest.

Palavras-chave:

cor, matéria orgânica, parâmetros ambientais, turbidez, validação estatística.

Keywords: color, organic matter, environmental parameters, turbidity, statistical validation.

¹Graduanda em Tecnologia em Gestão Ambiental, Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, e-mail gabriela.pereira546@gmail.com, vithely@hotmail.com;

²Bióloga, Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, e-mail: izabelmelz.melz@gmail.com;

³Docente, Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul.* Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Unidade Universitária de Mundo Novo, Br. 163, n. 235, Bairro Universitário, Mundo Novo, Mato Grosso do Sul, Brasil, CEP 79980-000, leandro.fleck@uems.br

1 INTRODUÇÃO

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), são produzidos 34.609.218 litros de leite no Brasil, sendo o Estado do Paraná responsável pela produção de 4.472.406 litros. Conforme o Centro de Inteligência do Leite da Embrapa (CILEITE, 2024), os produtores de leite vêm enfrentando grandes desafios desde 2023, com quedas de preço e altos custos de produção. A estimativa do PIB no Brasil em 2024, para a agropecuária é a retração de 1,4%, cujo valores devem ser impactados pela produção leiteira (MINISTÉRIO DA FAZENDA, 2024). Segundo Gurtu *et al.* (2023), o Brasil é o 5º maior produtor de leite, seguido dos países Índia, EUA, China e Paquistão.

Conforme Pratelli *et al.* (2024), o leite é essencial na vida de recém-nascidos e crianças, devido ao seu valor nutricional. No Brasil, o sistema de bovinocultura de leite, é dominada por pequenos e médios produtores, em propriedades rurais de base familiar (ROCHA; SILVA, 2024). As indústrias e cooperativas leiteiras são responsáveis pela recolha do leite nas propriedades (SHARMA *et al.*, 2024). O leite cru integral é vendido como produto de pasteurização, UHT e esterilização (KANANUB *et al.*, 2024); outros produtos advindos do leite são o queijo, doce de leite, bebidas lácteas e iogurte (MAPA, 2024).

O soro é caracterizado como um subproduto originado do processamento industrial do leite (JIANG *et al.*, 2021). Caso seja incorretamente descartado, o soro pode ser um potencial poluidor dos recursos naturais, devido a sua elevada carga orgânica e presença de nutrientes (COZZOLINO *et al.*, 2010; COSTA; FERNANDES; VIANA, 2024). O efluente de soro de leite pode trazer riscos ao ambiente por causa de suas elevadas exigências biológicas e químicas em termos de oxigênio (EL-AIDIA; KHALIFA, 2024).

O descarte inadequado do soro do leite, diretamente no solo ou na água, causa o consumo excessivo de oxigênio, impermeabilização, eutrofização e toxicidade na área onde é descartado, causando vários impactos ambientais (BUCHANAN *et al.*, 2023). Algumas empresas optam por estocar os resíduos em tanques e, posteriormente, descartá-los na rede de esgoto da cidade. No entanto, mesmo com a diluição dos resíduos, estes ainda impactam negativamente o ecossistema (PRAZERES; CARVALHO; RIVAS, 2012).

Como alternativa, para diminuir o impacto ambiental causado por efluentes (RIBEIRO *et al.*, 2020), a exemplo do efluente do soro de leite, pode ser realizado o tratamento prévio ao descarte final. Dentre as possibilidades de tratamento, a biodigestão anaeróbia é citada por Katakí (2016) e Cueva *et al.* (2021), a qual promove diferentes benefícios como, por exemplo, a redução da carga orgânica, obtenção de energia e recuperação de nutrientes.

Neste contexto, o presente estudo está baseado na hipótese de que a biodigestão anaeróbia pode ser utilizada para o eficiente tratamento de soro de leite, utilizando inóculo de biodigestor aplicado ao tratamento de efluentes de fecularia, em que modelos matemáticos poderão ser gerados para a simulação de cenários que potencializem o aprimoramento da técnica em condições reais de operacionalização de biodigestores anaeróbios.

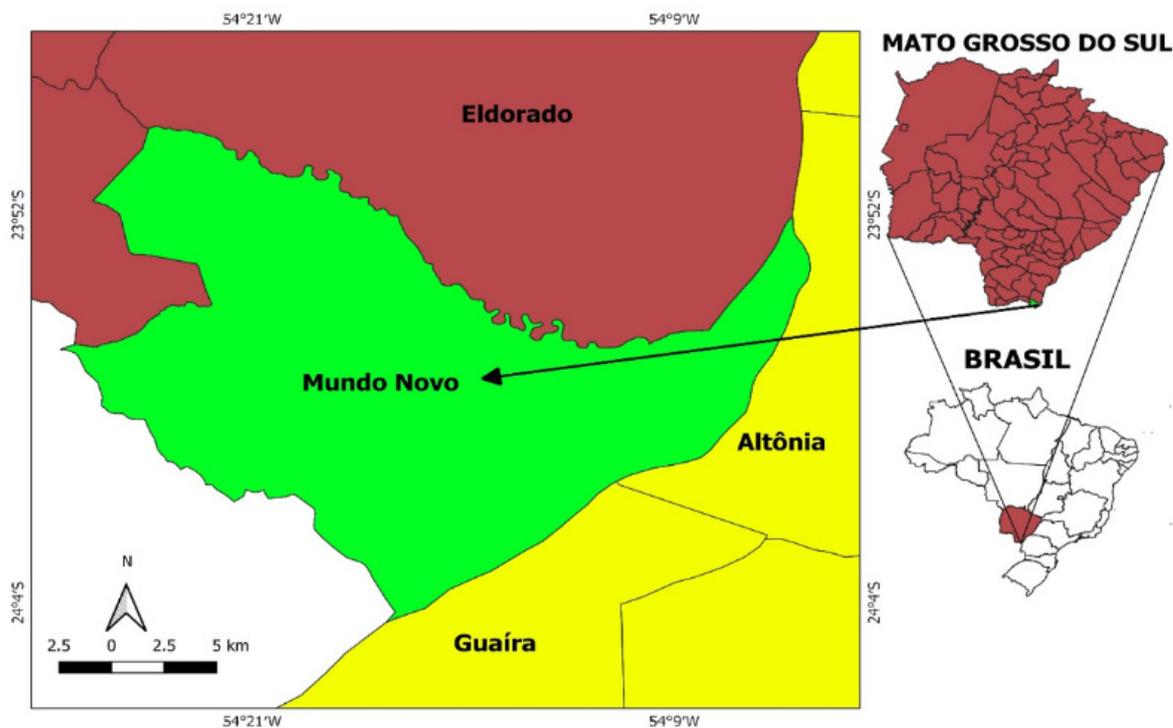
2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Local de Estudo

O trabalho foi realizado no município de Mundo Novo, situado no extremo sul do estado de Mato Grosso do Sul, fazendo divisa com o país Paraguai e com o estado do Paraná (Figura 1). O município possui área de 478,380 km², com a estimativa de 19.193 habitantes e densidade demográfica em 40,12

habitantes/km² (IBGE, 2022). O município está localizado nas coordenadas 23°56' 17" S e 54° 16' 15" O, com altitude de 324 metros acima do nível do mar. A cidade dispõe de um clima temperado, com temperatura média de 28 °C no verão e de 11 °C no inverno.

Figura 1 - Localização geográfica do município de Mundo Novo/MS.



Fonte: Ferreira e Fleck (2021).

2.2 Coleta e armazenamento do substrato

Foi utilizado como substrato para a condução dos ensaios experimentais de biodigestão anaeróbia, soro de leite de um laticínio localizado no estado do Paraná. Após coletado, o substrato foi armazenado em condições de congelamento, a -5 °C, para que as características físico-químicas não fossem alteradas até o momento de uso para a realização dos ensaios experimentais.

2.3 Inóculo

Foi utilizado como inóculo para o processo de biodigestão anaeróbia o lodo de um biodigestor anaeróbio aplicado ao tratamento da água residuária da produção de fécula de mandioca. Para cada condição experimental do delineamento de tratamentos foi realizada a aclimação da biomassa às novas condições de operação, em mistura com o soro de leite, cujas proporções foram definidas em ensaios preliminares.

2.4 Monitoramento do processo

Para monitorar os níveis de acidez e/ou alcalinidade intrínsecos ao sistema, foi utilizado como instrumento de apoio um pHmetro de bancada (pH Pro - Line Lab). Para a correção do pH, utilizou-se soluções de hidróxido de sódio (NaOH) 6 mol e solução de ácido sulfúrico (H₂SO₄) a 20% para obter valores desejáveis na faixa de 7,0, sendo este o pH ideal para o crescimento dos microrganismos

anaeróbicos (CHEN *et al.*, 2015). Para garantir a continuidade da atividade microbiológica, os biodigestores foram monitorados diariamente, para cada ensaio experimental.

2.5 Módulo experimental e coleta das amostras

Para a realização dos ensaios experimentais, foi utilizado um módulo experimental constituído por garrafas de polietileno tereftalato (PET) com volume útil de 1 L, as quais foram imersas em Banho-Maria digital (SP Labor), com o controle de temperatura definido em 35 °C ($\pm 0,1^\circ\text{C}$) (Figura 2), sendo está a temperatura sugerida por Kwietniewska e Tys (2014). Os reatores anaeróbios foram operados em sistema de batelada, apresentando uma saída/entrada para coleta de amostras e ajuste de pH.

Figura 2 - Módulo experimental.



Amostras do substrato foram coletadas no início e ao final de cada ensaio experimental para avaliar a eficiência de remoção de cor, turbidez e demanda química de oxigênio (DQO), utilizando respectivamente os seguintes métodos e instrumentos analíticos: colorímetro de bancada, turbidímetro de bancada e método analítico 5220D (APHA, 2012).

2.6 Delineamento de tratamentos

Foram controlados os fatores proporção de mistura do inóculo (PMI) (%) e tempo de operação (TO) dos biodigestores anaeróbios (dias), sendo seus efeitos sobre os parâmetros cor, turbidez e demanda química de oxigênio (DQO), avaliados utilizando-se um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), ou seja, um esquema fatorial de tratamentos 2^2 , incluindo 4 ensaios fatoriais, 4 ensaios axiais e 3 repetições no ponto central, totalizando 11 ensaios. Na Tabela 1 observa-se a matriz do delineamento de tratamentos com os valores codificados e reais dos fatores em estudo.

Tabela 1 - Delineamento de tratamentos.

Ensaio Experimental	*PMI – Valor codificado	PMI – Valor real (%)	TO- Valor codificado	**TO- Valor real (dias)
1	-1	6,33	-1	9,75
2	-1	6,33	+1	18,25
3	+1	17,67	-1	9,75
4	+1	17,67	+1	18,25
5	-1,41	4,00	0	14,00
6	1,41	20,00	0	14,00
7	0	12,00	-1,41	8,00
8	0	12,00	1,41	20,00
9	0	12,00	0	14,00
10	0	12,00	0	14,00
11	0	12,00	0	14,00

*PMI – Proporção de mistura do inóculo; **TO – Tempo de Operação.

2.7 Geração de modelos matemáticos

Para cada variável resposta (cor, turbidez e demanda química de oxigênio) foi gerado um modelo matemático quadrático representativo do processo, obtido a partir do ajuste estatístico dos resultados correspondentes a todos os ensaios do delineamento de tratamentos. O modelo matemático codificado que foi ajustado a partir dos dados experimentais, é apresentado na Equação 1.

$$\text{Variável resposta: } a_1 + a_2\text{PMI} + a_3\text{PMI}^2 + a_4\text{TO} + a_5\text{TO}^2 + a_6\text{PMI} \times \text{TO} \quad \text{Eq. (1)}$$

Em que:

a = coeficientes que serão ajustados a partir dos dados experimentais.

PMI= valor codificado da proporção de mistura do inóculo.

TO = valor codificado do tempo de operação.

A significância estatística dos modelos matemáticos originados no sistema de tratamento anaeróbio de soro de leite, foi testada pela Análise de Variância (ANOVA) com um intervalo de confiança de 90%.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise de eficiência da biodigestão anaeróbia

As maiores remoção de turbidez, cor e DQO do soro de leite, quando submetido ao tratamento anaeróbio, foram de 67,12%, 43,48% e 77,25%, respectivamente (Tabela 2). Em termos conceituais, entende-se a turbidez como o grau de interferência com a passagem da luz através do efluente; a cor como resultado da presença de sólidos dissolvidos e a DQO como uma forma de quantificar indiretamente a quantidade de matéria orgânica presente no efluente (Von SPERLING, 2014).

Com exceção do parâmetro DQO, as demais variáveis dependentes apresentaram grande variabilidade nos ensaios experimentais do ponto central (ensaios 9, 10 e 11). Esta variabilidade não era esperada, considerando que foram empregadas as mesmas condições operacionais aos biodigestores anaeróbios (RODRIGUES; IEMMA, 2009). Entretanto, esta variabilidade pode ser explicada pela

aplicação do processo biológico ao tratamento do soro de leite, o qual é susceptível a influência de fatores ambientais externos ao sistema, os quais podem ter influenciado nas respostas obtidas, sem serem controladas no presente estudo.

Em estudo similar, Soares *et al.* (2018) ao determinarem o potencial de degradação da matéria orgânica a partir da biodigestão anaeróbia do soro de leite em biodigestor batelada, constataram redução de 20% de DQO em 5 dias de operação, valor superior ao encontrado no presente estudo, no qual obteve-se remoção de 10,58% com o biodigestor operando por 8 dias.

Observou-se que em alguns ensaios experimentais a eficiência do sistema foi baixa ou nula, quando considerado os parâmetros turbidez e cor. Esses resultados são justificados por Ribeiro *et al.* (2020), os quais relatam que o soro de leite cru, o qual foi usado no presente estudo, pode levar a uma rápida acidificação do meio, além de requerer elevados tempos de operação do biodigestor anaeróbio.

Tabela 2 - Eficiência de remoção de parâmetros ambientais pela biodigestão anaeróbia.

Ensaio Experimental	Remoção de Turbidez (%)	Remoção de Cor (%)	Remoção de DQO (%)
1	0,00	39,13	36,12
2	0,00	0,00	7,22
3	0,00	0,00	21,48
4	35,34	43,48	3,37
5	8,18	5,88	64,55
6	20,27	0,00	62,63
7	52,75	17,86	77,00
8	67,12	28,57	10,58
9	8,76	6,25	77,25
10	0,00	0,00	64,79
11	0,00	5,26	65,18

3.2 Análise de efeitos para a remoção de poluentes ambientais

O tempo de operação (TO), termo quadrático, exerceu efeito significativo sobre a remoção de turbidez, cor e DQO, apresentando p-valor de 0,04, 0,005 e 0,09, respectivamente, ambos inferiores ao nível de significância adotado, de 10% (Tabela 3). O efeito de um fator pode ser entendido como a variação causada na resposta, quando percorremos todos os níveis desse fator, independentemente dos demais fatores (RODRIGUES; IEMMA, 2014).

Considerando a definição apresentada por Rodrigues e Iemma (2014), entende-se que valores superiores de TO podem contribuir para a eficiência de remoção de turbidez e cor, cenário este que não é observado para a variável DQO, cujo efeito foi negativo. Paralelamente, para a variável cor, observou-se que a interação entre os fatores foi estatisticamente significativa e positiva, o que significa em termos práticos que a passagem do nível baixo para o nível alto dos fatores estudados e a variação de todos os níveis de um dos fatores dentro de cada nível do outro fator, aumentou a remoção de cor no reator anaeróbio.

A influência significativa do tempo de operação dos biodigestores sobre a eficiência de remoção de turbidez, cor e DQO, é explicada pela importância do Tempo de Retenção Hidráulica (TRH) (PERA *et al.*, 2022) nos sistemas de tratamentos anaeróbios, considerando que o mesmo é determinante para a eficiência de degradabilidade da matéria orgânica constituinte do soro de leite, bem como pela estabilidade do processo de biodigestão anaeróbia.

Tabela 3 - Análise de efeitos para o processo de biodigestão anaeróbia.

Turbidez			
Fator	Efeito	Erro Padrão	p-valor
Média	3,03	10,73	0,79
PMI**. (L)	13,14	13,17	0,36
PMI. (Q)	-3,05	15,72	0,85
TO***.(L)	13,94	13,17	0,34
TO. (Q)	42,93	15,72	0,04*
PMI X TO.	17,67	18,60	0,39
Cor			
Média	3,80	3,36	0,31
PMI. (L)	-0,99	4,13	0,82
PMI. (Q)	2,91	4,92	0,58
TO.(L)	4,88	4,13	0,29
TO. (Q)	23,31	4,92	0,005*
PMI X TO.	41,31	5,83	0,0008*
DQO			
Média	69,22	14,29	0,004*
PMI. (L)	-5,32	17,53	0,77
PMI. (Q)	-24,05	20,92	0,30
TO.(L)	-35,27	17,53	0,10
TO. (Q)	-43,96	20,92	0,09*
PMI X TO.	5,40	24,76	0,84

*Estatisticamente significativo com um nível de significância de 10%; **PMI, corresponde a a proporção de mistura do inóculo; ***TO, corresponde ao tempo de operação.

3.3 Modelagem matemática para remoção de poluentes ambientais

Os modelos matemáticos representativos do processo de biodigestão anaeróbia do soro de leite são apresentados nas Equações 2, 3 e 4 para as variáveis dependentes turbidez, cor e DQO, respectivamente. Os coeficientes foram estimados com base nos resultados da Análise de Regressão Linear Múltipla, utilizando o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ). A modelagem matemática de sistemas ambientais se justifica pela possibilidade de simulação de cenários que são essenciais para a correta gestão dos elementos que podem interagir com o ecossistema, provocando impactos ambientais (KHAN *et al.*, 2024).

$$RT (\%) = 3,03 + 6,57PMI - 1,53PMI^2 + 6,97TO + 21,47TO^2 + 8,84PMI.TO \quad \text{Eq. (2)}$$

$$RC (\%) = 3,80 - 0,49PMI + 1,46PMI^2 + 2,44TO + 11,65TO^2 + 20,65PMI.TO \quad \text{Eq. (3)}$$

$$RDQO (\%) = 69,22 - 2,66PMI - 12,02PMI^2 - 17,64TO - 21,98TO^2 + 2,70PMI.TO \quad \text{Eq. (4)}$$

Em que:

RT(%)= eficiência de remoção de turbidez.

RC(%)= eficiência de remoção de cor.

RDQO(%)= eficiência de remoção de demanda química de oxigênio.

PMI= valor codificado da Proporção de Mistura do Inóculo.

TO = valor codificado Tempo de Operação

Na Tabela 4, apresenta-se a análise de variância (ANOVA) para a validação estatística dos modelos matemáticos propostos. É possível observar que o modelo matemático representativo da eficiência de remoção de cor do soro de leite tratado por biodigestão anaeróbia é estatisticamente significativo, pois o p-valor obtido (0,005) é inferior ao nível de significância adotado, de 10%. Este resultado permite inferir que o modelo matemático da cor apresentou melhores ajustes aos dados experimentais, quando comparados aos modelos matemáticos representativos da eficiência de remoção de turbidez e DQO.

A validação do modelo matemático é de extrema importância científica, pois a mesma atesta a capacidade do modelo matemático em descrever o processo (LASKAR *et al.*, 2022), dentro dos limites controlados para as variáveis independentes consideradas no estudo. Neste caso, para o presente trabalho, os autores recomendam a utilização do modelo matemático para a predição de cenários para o parâmetro cor, sem prejuízo da utilização dos modelos matemáticos da turbidez e DQO para investigação preliminar de possíveis cenários, quando a biodigestão anaeróbia é aplicada ao tratamento de soro de leite.

Tabela 4 - Validação estatística dos modelos matemáticos.

Turbidez				
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	p-valor
Regressão	3638,34	5	727,67	0,21
Resíduos	1729,33	5	345,87	
Total	5367,67	10		
Cor				
Regressão	2528,05	5	505,61	0,005*
Resíduos	169,70	5	33,94	
Total	2697,75	10		
DQO				
Regressão	6082,66	5	1216,53	0,23
Resíduos	3064,88	5	612,98	
Total	9147,54	10		

*Estatisticamente significativo com um nível de significância de 10%.

3.4 Gráficos de superfície de resposta

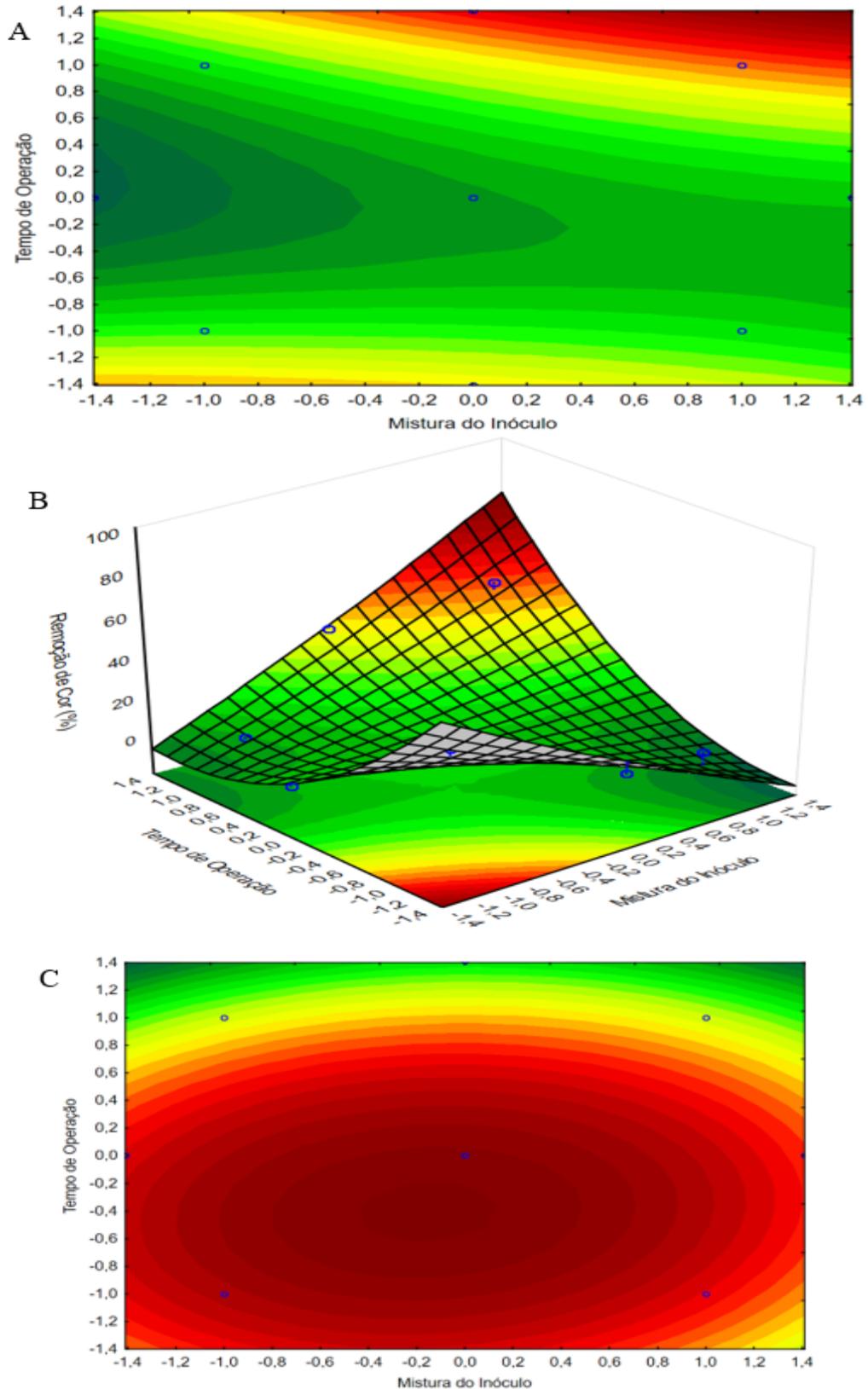
Embora os modelos matemáticos propostos não sejam estatisticamente significativos para as variáveis dependentes turbidez e DQO, é importante evidenciar a dinâmica do processo com base nas faixas máxima e mínima do estudo, as quais poderão ser utilizadas como limites norteadores de estudos futuros. Com base nessas informações, é apresentado na Figura 3 os gráficos de superfície de resposta do modelo matemático proposto para a turbidez (A), cor (B) e DQO (C).

A maior remoção de turbidez (Figura 3A) ocorre em condições mais elevadas do delineamento de tratamentos, para abas as variáveis independentes, PMI e TO. Em termos práticos, é possível inferir que se o estudo tivesse sido conduzido em condições superiores a 20% de inóculo misturado ao soro de leite e 20 dias de operação do biodigestor anaeróbio, a eficiência do sistema teria sido mais elevada para a remoção de turbidez.

Comparativamente, as maiores remoções de cor ocorreram quando o biodigestor anaeróbio operou em condições inferiores de PMI e TO, conforme definido pelo delineamento de tratamentos (Figura 3B). Por fim, constatou-se as melhores remoções de DQO ocorrem quando o biodigestor anaeróbio opera

em condições próximas ao ponto central do delineamento de tratamentos, sendo estas de 12% de inóculo misturado ao soro de leite, com tempo de operação de 14 dias (Figura 3C).

Figura 3 - Superfície de resposta para a remoção de poluentes ambientais. (A) Turbidez; (B) Cor; (C) DQO.



Estas conclusões sugerem que estudos adicionais podem ser realizados em diferentes condições de PMI e TO, a fim de que seja investigada a possibilidade de otimização simultânea das variáveis respostas pela aplicação da técnica da função de desejabilidade, proposta por Derringer e Suich (1980), como forma de reduzir o tempo de operação do reator anaeróbio, sem comprometer a eficiência do sistema empregado para o tratamento biológico do soro de leite.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclui-se que o tempo de operação do biodigestor anaeróbio possui efeito significativo na eficiência do processo de biodigestão anaeróbia de soro de leite. A maior remoção de turbidez ocorre em condições mais elevadas de proporção de mistura do inóculo e tempo de operação do biodigestor anaeróbio. As maiores remoções de cor ocorrem quando o biodigestor anaeróbio opera em condições inferiores de proporção de mistura do inóculo e tempo de operação do biodigestor anaeróbio. As melhores remoções de DQO ocorrem quando o biodigestor anaeróbio opera em condições próximas ao ponto central do delineamento de tratamentos, sendo estas de 12% de inóculo misturado ao soro de leite, com tempo de operação de 14 dias.

Recomenda-se que o modelo matemático para a remoção da cor seja amplamente utilizado na simulação de cenários, sem prejuízo da utilização dos modelos matemáticos gerados para as variáveis dependentes turbidez e DQO, quando o objetivo for o conhecimento prévio do comportamento destas variáveis quando o soro de leite é tratado biologicamente em condições anaeróbias.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Apoio ao Desenvolvimento do Ensino, Ciência e Tecnologia do Estado de Mato Grosso do Sul (FUNDECT)- Termo de Outorga 008/2022.

6 REFERÊNCIAS

- BUCHANAN, D.; MARTINDALE, W.; ROMEIH, E.; HEBISHY, E. Recent advances in whey processing and valorization: technological and environmental perspectives. **International Journal of Dairy Technology**, v. 76 n. 2, p. 291-312, 2023. <<https://doi.org/10.1111/1471-0307.12935>>
- COSTA, A. A. A.; FERNANDES, A. A.; VIANA, A. J. S. Reaproveitamento e alternativas para o soro proveniente de queijarias no município de Itamarandiba – Minas Gerais. **GETEC – Gestão, Tecnologia e Ciências**, v. 19, n. 1, p. 1-8, 2024. <https://revistas.fucamp.edu.br/index.php/getec/article/view/3218>
- COZZOLINO, A.; PIERRO, P. D.; MARINIELLO, L.; SORRENTINO, A.; MASI, P.; PORTA, R. Incorporation of whey proteins into cheese curd by using transglutaminase. **Biotechnology and Applied Biochemistry**, v.38, n.1, p. 289-295, 2010. <<https://doi.org/10.1042/BA20030102>>
- CUEVA, S. C.; BALAGURUSAMY, N.; PÉREZ-VEGA, S. B.; REYES, P.; S. B.; VÁZQUEZ-CASTILHO, J. A.; SERNA, F. J. Z. D.; SALMERÓN, I. Effects of different nitrogen sources on methane production, free ammonium and hydrogen sulfide in anaerobic digestion of cheese whey with cow manure. **Revista Mexicana de ingeniería Química**, v.20, n.3, p. 1-18, 2021. <https://doi.org/10.24275/rmiq/Bio2566>

DERRINGER G. C.; SUICH, R. Simultaneous optimization of several responses variables. *Journal of Quality Technology*, v. 12, n. 4, p. 214-219, 1980. <https://doi.org/10.1080/00224065.1980.11980968>

EL-AIDIE, S. A. M.; KHALIFA, G. S. A. Innovation applications of whey protein for sustainable dairy industry: Environmental and technological perspectives – **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 23, n. 2, e13319, 2024. <<https://doi.org/10.1111/1541-4337.13319>>

EMBRAPA – Notícias. Cadeia produtiva do leite vê cenário desafiador em 2024. 2024. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/86780410/cadeia-produtiva-do-leite-ve-cenario-desafiador-em-2024>. Acesso em: 20 jun. 2024.

FERREIRA, E. S.; FLECK, L. Avaliação da geração e descarte de filtros de cigarros pelos acadêmicos da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS, Mundo Novo). **Revista EIXO**, v. 10, n.1, p. 65-74, 2021. <<https://doi.org/10.19123/eixo.v10i1.844>>

GURTU, A.; SALUNKE, P.; DEBNATH, T. K. Bird's eye view of the global dairy industry: overview of milk-producing countries, dairy processes and cost comparison. **International Journal of Agricultural Resources, Governance and Ecology**, v. 19, n. 1, p. 22-40, 2023. <<https://doi.org/10.1504/IJARGE.2023.133330>>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Produção de Leite**. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/leite/br>. Acesso em: 20 jun. 2024.

JIANG, B.; WANG, L.; WANG, M.; WU, S.; WANG, X.; LI, D.; LIU, C.; FENG, Z.; CHI, Y. Direct separation and purification of α -lactalbumin from cow milk whey by aqueous two-phase flotation of thermo-sensitive polymer/phosphate. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v.101, n.1, p. 4173-4182, 2021. <<https://doi.org/10.1002/jsfa.11055>>

KANANUB, S.; LERTSAKONGKUL, P.; ARYATAWONG, P.; HORHIRUNKHAJOHN, W.; PINNIAM, N.; KRAJANGLIKIT, P.; SONTHONG, K.; KASEMSUWAN, S. Listeria contamination in Milk-Processing chain and proficiency in *Listeria monocytogenes* decontamination of small-scale milk retailers. **Journal of Food Quality**, v. 2024, n. 6263938, p. 1-7, 2024. <<https://doi.org/10.1155/2024/6263938>>

KATAKI, S. W. Phosphorus recovery as struvite from farm, municipal and industrial waste: feedstock suitability, methods and pre-treatments. **Waste Management**, v. 49, n. 1, p. 437-454, 2016. <<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.01.003>>

KHAN, M. A.; KHAN, R.; AL-ZGHOUL, T. M.; KHAN, A.; HUSSAIN, A.; BAARIMAH, A. O.; ARSHAD, M. A. Optimizing municipal solid waste management in urban Peshawar: A linear mathematical modeling and GIS approach for efficiency and sustainability. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v.9, p.1-13, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100704>

LASKAR, A. A.; AHMED, M.; KHAN, A. S.; SAMIR, M. Experimental investigation and statistical validation of mathematical models for hot air-drying traits of carrot. **Food Science and Technology International**, v.29, n.4, p. 345-360, 2022. <https://doi.org/10.1177/10820132221093264>

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA – MAPA. **RTIQ- leite e seus derivados**. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/defesa-agropecuaria/suasa/regulamentos-tecnicos-de-identidade-e>

[qualidade-de-produtos-de-origem-animal-1/rtiq-leite-e-seus-derivados](#). Acesso em: 20 jun. 2024.

MINISTÉRIO DA FAZENDA – Política econômica. **SPE eleva expectativa de crescimento do PIB de 2024 para 2,5%**: altas será impulsionada por indústria e serviços; estimativas ainda não contemplam impactos das chuvas no Rio Grande do Sul. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/fazenda/pt-br/assuntos/noticias/2024/maio/spe-eleva-expectativa-de-crescimento-do-pib-de-2024-para-2-5>. Acesso em: 20 jun. 2024.

PERA, A. L.; SELLARO, M.; BIANCO, M.; ZANARDI, G. Effects of a temporary increase in OLR and a simultaneous decrease in HRT on dry anaerobic digestion of OFMSW. **Environmental Technology**, v.43, n.28, p. 4463-4471, 2022. <https://doi.org/10.1080/09593330.2021.1952312>

PRATELLI, G.; TAMBURINI, B.; BADAMI, G. D.; PIZZO, M. L.; BLASIO, A. D.; CARLISI, D.; LIBERTO, D. D. Cow's milk: a benefit for human health? Omics tools and precision nutrition for lactose intolerance management. **Nutrients**, v. 16, n. 320, p. 1-25, 2024. <https://doi.org/10.3390/nu16020320>

PRAZERES, A. R.; CARVALHO, F.; RIVAS, J. Cheese whey management: a review. **Journal of Environmental Management**, v. 110, n. 1, p. 48-68, 2012. <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.05.018>>

RIBEIRO, S. A. S.; JUNHO, A. L.; BARROS, R. M.; SANTOS, I. F. S.; TIAGO FILHO, G. L.; MARTUSCELLI, E.; FREITAS, J. V. R. Estudo preliminar da biodigestão de esterco bovino com soro de leite em sistema de digestão em duplo estágio com purificação de biogás. **Research, Society and Development**, v. 9, n.8, p. 1-25, 2020. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i8.5911>

ROCHA, J. P.; SILVA, J. dos S. V. da. Caracterização da bacia leiteira do município de Juína – MT, Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 62, n. 3, p. 1-21, 2024. <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2023.272683>

RODRIGUES, M. R.; IEMMA, A. F. **Experimental design and process optimization**. 2ª. ed. São Paulo: 2014.

SHARMA, H.; SINGH, P. K.; KAUR, I.; SINGH, R. Water footprints of dairy milk processing industry: a case study of Punjab (India). *Water*, v. 16, n. 435, p. 1-17, 2024. <https://doi.org/10.3390/w16030435>

SOARES, L. H.; ALVES, A. M.; MOURA, R. B.; ANDRADE, G. S. S. Determinação do potencial de degradação do soro de leite em um reator em batelada de leite estruturado. **Brazilian Applied Science Review**, v. 2, n. 2, p. 677-680, 2018. <https://doi.org/10.34115/basr.v2i2.439>

Von SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4ª. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.