

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

MODELAGEM MATEMÁTICA DO TRATAMENTO DE DEJETO BOVINO POR BIODIGESTÃO ANAERÓBIA

Vitheli de Oliveira Ocampos¹
Gabriela Pereira de Assis¹
Izabel Melz Fleck¹
* Leandro Fleck¹

MATHEMATICAL MODELING OF BOVINE MANURE TREATMENT BY ANAEROBIC DIGESTION

Recibido el 23 de abril de 2024. Aceptado el 22 de abril de 2025

Abstract

Brazilian livestock stands out worldwide, however it generates organic waste that requires adequate treatment to avoid environmental impacts. The present study is based on the hypothesis that anaerobic digestion can be used for the efficient treatment of livestock waste. Bovine manure from beef cattle was used as substrate and sludge from an anaerobic starch biodigester was used as inoculum. The factors inoculum mixing ratio (IMR) (%) and operating time (OT) of the anaerobic biodigesters (days) were controlled, with their effects on the color, turbidity and COD parameters being evaluated using a CCRD. The highest efficiency of the system was observed for turbidity removal (96.94%). The IMR factor, quadratic term, had a significant effect on the removal of turbidity and color. Although COD removal was not high, similar results were observed in the literature. The mathematical model for turbidity was statistically significant, presenting a p-value of 0.03. The biogas produced by experimental test 08, showed 82.0% methane, 16.0% carbon dioxide and a total absence of hydrogen sulfide. The anaerobic biodigestion technique is indicated for the treatment of cattle waste using starch effluent biodigester inoculum, however it is suggested that researchers in the area carry out additional research under experimental conditions different from those tested in the present study.

Keywords: bioenergy, biogas, organic matter, livestock.

¹ Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Brasil.

* *Autor correspondal:* 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. Email: leandro.fleck@uems.br

Resumo

A pecuária brasileira se destaca em nível mundial, entretanto gera resíduos orgânicos que necessitam de tratamento adequado para evitar impactos ambientais. O presente estudo está baseado na hipótese de que a biodigestão anaeróbia pode ser utilizada para o eficiente tratamento de dejetos da pecuária. Foi utilizado como substrato dejetos bovino de gado de corte e como inóculo lodo de um biodigestor anaeróbio de fecularia. 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 DQO, avaliados utilizando-se um DCCR. A maior eficiência do sistema foi observada para a remoção de turbidez (96.94%). O fator PMI, termo quadrático, exerceu efeito significativo sobre a remoção de turbidez e cor. Embora a remoção de DQO não tenha sido elevada, observa-se resultados semelhantes na literatura. O modelo matemático para a turbidez foi estatisticamente significativo, apresentando p-valor de 0.03. O biogás produzido pelo ensaio experimental 08, apresentou 82.0% de metano, 16.0 % de dióxido de carbono e ausência total de sulfeto de hidrogênio. A técnica de biodigestão anaeróbia é indicada para o tratamento de dejetos bovinos com a utilização de inóculo de biodigestor de efluente de fecularia, entretanto sugere-se que pesquisadores da área façam pesquisas adicionais em condições experimentais diferentes das testadas no presente estudo.

Palavras-chave: bioenergia, biogás, matéria orgânica, pecuária.

Introdução

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), o Brasil apresenta 234,4 milhões de cabeças de gado, sendo que 18 milhões estão concentrados no MS. Segundo análise do 1º trimestre de 2023, Mato Grosso do Sul foi o 7º no ranking nacional, contabilizando 14 mil cabeças de bovinos abatidos (IBGE, 2023). Paralelamente, no ranking da cadeia produtiva do leite e derivadas, o Brasil está em 3º lugar com mais de 34 bilhões de litros por ano, sendo produzido em 98% dos municípios brasileiros (MAPA, 2024; IBGE, 2022). No Estado de Mato Grosso do Sul (MS), a produção de leite é de 1.34 milhões de litros por dia, dados que poderiam ser melhorados com a inserção de novas tecnologias e profissionalização dos envolvidos no setor produtivo (AGRAER, 2023).

A pecuária, a exemplo das demais atividades rurais gera resíduos orgânicos, que podem causar poluição como resultado da emissão de metano (Albuquerque *et al.*, 2022), ocasionando o aumento do fenômeno conhecido como efeito estufa (Pasquelini, 2020). Este fator tem sido determinante para o avanço tecnológico em pesquisas, cujos estudos visam a redução dos impactos ambientais provenientes da pecuária mundial (Alan; Köker, 2023).

Os resíduos de bovinos, conforme descrito por Mayo *et al.* (2019), em decorrência do contato direto com os cursos d'água, causa a poluição hídrica, devido a presença de matéria orgânica e nutrientes, a exemplo do nitrato. Segundo Gomes *et al.* (2014), altas concentrações de nutrientes podem acarretar mortalidade de espécies aquáticas e aumento de patógenos. Para que os impactos ambientais resultantes da pecuária sejam reduzidos, é necessário o tratamento prévio desses materiais para posterior destinação final no ecossistema.

Neste contexto, conforme Feitosa e Matos (2021) apontam, os resíduos agropecuários submetidos a diferentes tipos de tratamentos biológicos, apresentam uma série de benefícios significativos, tais como a produção de composto orgânico, produção de biofertilizantes, geração de biogás e bioetanol.

No âmbito dos tratamentos biológicos, merece especial destaque a técnica de biodigestão anaeróbia, a qual é capaz de transformar uma ampla variedade de biomassa em biogás e biofertilizante, de maneira econômica e ecologicamente responsável (RICHARDS; YABARD, 2023). Partindo desse princípio, é notório que a prática da utilização de esterco, proveniente da pecuária bovina, oferece soluções eficientes para a diminuição de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEEs) (Esteves *et al.*, 2019).

Segundo Richards e Yabard (2023) o biogás, constituído predominantemente de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), é um valioso subproduto derivado do tratamento anaeróbio de resíduos agrícolas, apresentando diversas vantagens, como a redução de emissões gasosas e a substituição de fontes fósseis tradicionais de energia.

Estudos recentes têm explorado a aplicação de biodigestores anaeróbios para o tratamento de resíduos pecuários, destacando não apenas o potencial de mitigação de impactos ambientais, mas também a recuperação energética por meio da produção de biogás. Corroborando com essa questão, Martins *et al.* (2024), Albuquerque *et al.* (2022) e Esteves *et al.* (2019) apontam a importância do processo de biodigestão anaeróbia para o tratamento de resíduos da pecuária, entretanto, é necessário o entendimento de que a eficiência do processo depende de fatores operacionais que influenciam diretamente no metabolismo microbiano como, por exemplo, a proporção de inóculo, tempo de retenção hidráulica e características físico-químicas do substrato.

Trabalhos como os de Fleck *et al.* (2017) e Assis *et al.* (2023) demonstraram que o uso de inóculos provenientes de efluentes industriais, como de fecularias, pode acelerar a adaptação microbiológica e aumentar a estabilidade operacional. Além disso, abordagens de Delineamento Composto Central Rotacional têm sido empregadas para otimizar variáveis operacionais e desenvolver modelos matemáticos capazes de prever o desempenho do processo, contribuindo para a aplicação em escala real (Cancelier *et al.*, 2015; Leite *et al.*, 2021; Variani; Kripka, 2021).

Neste contexto, o presente estudo está baseado na hipótese de que a biodigestão anaeróbia pode ser utilizada para o eficiente tratamento de dejetos da pecuária, 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.

Material e métodos

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. 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.

Coleta e armazenamento do substrato

Foi utilizado como substrato para a condução dos ensaios experimentais de biodigestão anaeróbia, dejetos bovinos originários de gado de corte, criados predominantemente a pasto. 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.

Caracterização do substrato

A fim de padronizar as características físico-químicas, o dejetos bovino foi coletado em um único dia, em volume suficiente para atender a demanda de todos os ensaios experimentais. A caracterização prévia do substrato foi realizada utilizando APHA (2012); Carmo e Silva (2012) e Matos (2016), sendo observado pH de 7.08, 74.3% de sólidos e 11.69 Dag/kg de matéria orgânica.

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 dejetos bovino, cujas proporções foram definidas em ensaios preliminares.

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.

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, 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.

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).

Preparo dos substratos

Após a coleta, para o preparo do substrato a ser utilizado na biodigestão anaeróbia, inicialmente foi realizada a análise de determinação de sólidos totais. Para isso, foram pesados aproximadamente 30 g de dejetos de bovinos, em três cadinhos, para a determinação do peso úmido (PU). Em seguida, os cadinhos foram levados para a estufa à 105 °C, até atingirem peso constante, de forma a determinar o peso seco (PS). Seguindo recomendações de Matos (2016), o teor de sólidos totais foi quantificado por meio da Equação (2), a partir da Equação (1):

$$U = \frac{PU-PS}{PU} \times 100 \quad \text{Equação (1)}$$

$$ST = 100 - U \quad \text{Equação (2)}$$

Em que:

U = teor de umidade, em %;

ST = teor de sólidos totais, em %;

PU = peso úmido da amostra, em g;

PS = peso seco da amostra, em g.

A partir dos resultados observados na análise de sólidos totais, foi determinado a quantidade de água destilada a ser adicionada ao dejetos bovino, a fim de se obter uma concentração de 8% de sólidos totais, conforme recomendado por Matos (2016).

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 2², 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, sendo os valores reais definidos com base em ensaios experimentais preliminares.

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

A Proporção de Mistura do Inóculo (PMI) corresponde à fração percentual, em base de massa úmida, do inóculo proveniente do biodigestor de efluente de fecularia em relação à massa total da mistura inicial (inóculo + dejetos bovinos) utilizada no reator. Por exemplo, um valor de PMI de 12% indica que, para cada 100 g de mistura inicial, 12 g correspondem ao inóculo e 88 g ao dejetos bovinos.

Os níveis de PMI e de Tempo de Operação (TO) adotados no presente estudo foram definidos a partir de ensaios preliminares realizados previamente, visando contemplar condições operacionais representativas de sistemas em escala laboratorial, sem comprometer a estabilidade microbiológica. Para a construção do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), optou-se por valores mínimos e máximos de PMI de 4% e 20%, respectivamente, e de TO de 8 a 20 dias, de forma a possibilitar a avaliação de respostas tanto em condições reduzidas quanto ampliadas de tempo de operação e proporção de inóculo.

No DCCR, a repetição é realizada exclusivamente no ponto central, pois este é utilizado para estimar o erro puro experimental e verificar a reprodutibilidade do sistema, sem necessidade de replicar as demais combinações fatoriais. Assim, cada condição experimental foi conduzida uma única vez, com exceção do ponto central, que foi repetido três vezes para garantir a robustez estatística, reduzindo o número total de ensaios sem comprometer a qualidade do ajuste do modelo, além de contribuir para minimizar efeitos de deriva temporal e garantir maior robustez estatística ao ajuste do modelo.

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 3.

$$\text{Variável resposta: } a_1 + a_2\text{PMI} + a_3\text{PMI}^2 + a_4\text{TO} + a_5\text{TO}^2 + a_6\text{PMI} \times \text{TO} \quad \text{Equação (3)}$$

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 dejetos bovino, foi testada pela Análise de Variância (ANOVA) com um intervalo de confiança de 90%.

Análise da produção de biogás

A análise da qualidade do biogás produzido pelo sistema de tratamento anaeróbio de dejetos bovinos, foi realizada utilizando um autoanalisador portátil de biogás (Confor BM4S). Foram consideradas as concentrações de metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) e sulfeto de hidrogênio (H₂S). Devido ao volume de biogás produzido ser o fator limitante para a aplicação do autoanalisador, optou-se por analisar o biogás produzido no ensaio experimental número 8, o qual apresentou o maior tempo de operação do sistema (20 dias).

Resultados e discussão

Análise de eficiência da biodigestão anaeróbia

Dentre os três parâmetros avaliados, observa-se que as maiores eficiências foram obtidas para a remoção de turbidez e cor, o que por consequência pode ser um indicativo de elevada remoção de sólidos do sistema de tratamento (Tabela 2). O processo de remoção de matéria orgânica (em termos de DQO) não apresentou resultados desejáveis, uma vez que, a maior eficiência foi de 56.11%. É importante destacar que este resultado não inviabiliza a aplicação da biodigestão anaeróbia para o tratamento de dejetos bovinos, quando o objetivo for a remoção de matéria orgânica, mas indica que novos estudos podem ser desenvolvidos, com diferentes faixas de PMI e TO.

Embora os resultados não sendo expressivos em termos de remoção de DQO, encontram-se na literatura trabalhos que obtiveram resultados semelhantes ao presente estudo, a exemplo do que foi relatado por Costalonga *et al.* (2019), os quais ao caracterizarem o afluente e o efluente da bovinocultura leiteira, tratado em biodigestor anaeróbio associado com um ciclo de recirculação, obtiveram remoção de 65.00% de DQO.

Considerando que para o presente estudo utilizou-se inóculo de um biodigestor aplicado ao tratamento da água residuária de fecularia, Fleck *et al.* (2017), otimizaram as condições operacionais de um reator anaeróbio aplicado ao tratamento de águas residuárias da produção de fécula de mandioca. No estudo realizado, os autores constataram remoção máxima de DQO de 96.82%, valores superiores ao presente estudo. Estes resultados confirmam a atividade microbiológica do inóculo que foi utilizado, uma vez que o mesmo é proveniente da mesma unidade agroindustrial utilizada por Fleck *et al.* (2017), corroborando que a eficiência do sistema para o tratamento de dejetos bovinos, pode ser melhorada em condições diferentes do delineamento experimental.

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

Ensaio Experimental	Remoção de Turbidez (%)	Remoção de Cor (%)	Remoção de DQO (%)
1	86.24	73.45	56.11
2	95.91	88.52	47.88
3	87.33	77.79	41.94
4	86.54	92.51	40.21
5	72.12	48.78	5.45
6	76.17	67.85	14.29
7	95.47	86.59	1.52
8	94.24	86.48	8.61
9	93.81	77.55	3.83
10	95.44	87.35	3.69
11	96.94	89.57	3.69

É importante destacar que todos os ensaios do DCCR foram executados em ordem aleatorizada, com o objetivo de minimizar possíveis efeitos de deriva temporal no sistema experimental. Assim, a baixa remoção de DQO observada em determinados ensaios experimentais, inclusive em condições do ponto central do delineamento, não pode ser atribuída à sequência de execução. É mais provável que essas variações estejam associadas a fatores intrínsecos às condições operacionais testadas, como maior carga orgânica ou acúmulo de compostos intermediários, que podem reduzir a eficiência do processo.

Análise de efeitos para a remoção de poluentes ambientais

O fator PMI, termo quadrático, exerceu efeito significativo sobre a remoção de turbidez e cor dos biodigestores anaeróbios, pois os p-valores foram inferiores ao nível de significância adotado, de 10% (Tabela 3). Considerando que 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; lemma, 2014), entende-se que condições mais elevadas de PMI e TO podem resultar em eficiências mais reduzidas do sistema em relação a turbidez e cor.

Embora alguns coeficientes estimados, com base na análise de efeitos, não tenham apresentado significância estatística dentro do nível de confiança adotado, optou-se por manter todos os termos lineares, quadráticos e de interação no ajuste. Essa decisão se justifica porque, no contexto de modelagem de processos ambientais complexos, a retirada de termos pode distorcer a superfície de resposta e limitar a capacidade de simulação em regiões do espaço experimental que não foram diretamente testadas. Além disso, a literatura aponta que, mesmo para parâmetros não significativos, a presença no modelo pode auxiliar na interpretação física do fenômeno (Rodrigues; lemma, 2014). Assim, a abordagem adotada permite que os modelos sirvam como ferramentas preditivas iniciais, a serem refinadas em estudos futuros.

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

Turbidez			
Fator	Efeito	Erro Padrão	p-valor
Média	95.38	2.38	0.00*
PMI**. (L)	-0.64	2.92	0.83
PMI. (Q)	-19.06	3.48	0.002*
TO***.(L)	1.79	2.92	0.57
TO. (Q)	1.77	3.48	0.63
PMI X TO.	-5.23	4.12	0.26
Cor			
Média	84.78	5.57	2.2x10 ⁻⁵ *
PMI. (L)	8.83	6.83	0.25
PMI. (Q)	-21.23	8.15	0.05*
TO.(L)	7.43	6.83	0.33
TO. (Q)	7.15	8.15	0.42
PMI X TO.	-0.18	9.65	0.99
DQO			
Média	3.58	14.67	0.82
PMI. (L)	-2.35	17.99	0.90
PMI. (Q)	25.96	21.47	0.28
TO.(L)	0.009	17.99	0.99
TO. (Q)	21.13	21.47	0.37
PMI X TO.	3.25	25.41	0.90

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

Modelagem matemática para remoção de poluentes ambientais

Os modelos matemáticos representativos do processo de biodigestão anaeróbia do dejetos bovino são apresentados nas Equações 4, 5 e 6 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 mostra de extrema importância, dada a sua aplicabilidade para a simulação de cenários, os quais podem ser determinantes para a redução de impactos ambientais (Variani; Kripka, 2021).

$$RT (\%) = 95.38 - 0.32PMI - 9.53PMI^2 + 0.90TO + 0.89TO^2 - 2.62PMI \cdot TO \quad \text{Equação (4)}$$

$$RC (\%) = 84.78 + 4.42PMI - 10.62PMI^2 + 3.72TO + 3.58TO^2 - 0.09PMI \cdot TO \quad \text{Equação (5)}$$

$$RDQO (\%) = 3.58 - 2.35PMI + 25.96PMI^2 + 0.009TO + 21.13TO^2 + 3.25PMI \cdot TO \quad \text{Equação (6)}$$

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.

O modelo matemático para a eficiência de remoção de turbidez (Equação 4) indica que a variável mais influente é o termo quadrático de PMI, com coeficiente negativo (-9,53), evidenciando que níveis muito baixos ou muito altos de proporção de inóculo tendem a reduzir a eficiência. O termo de interação entre as variáveis independentes também é negativo, sugerindo que, quando ambos os fatores aumentam simultaneamente, a eficiência de remoção de turbidez pode cair.

Assim como na turbidez, para o modelo matemático representativo da eficiência da remoção de cor (Equação 5) o termo quadrático de PMI apresenta impacto negativo (-10,62). Os termos lineares de PMI e TO são positivos, sugerindo ganhos iniciais com aumento moderado desses fatores, mas limitados por efeitos quadráticos adversos. Embora o modelo não tenha sido estatisticamente significativo ao nível de 10%, ele fornece *insights* relevantes sobre tendências e zonas operacionais.

Diferente das demais variáveis, para o modelo matemático representativo da eficiência de remoção de DQO (Equação 6), o termo quadrático de PMI é positivo, sugerindo que valores mais extremos desse fator tende a aumentar a remoção de DQO. No entanto, o baixo intercepto (3,58) e a não significância estatística global indicam que, nas condições testadas, o processo apresentou limitações para remoção de matéria orgânica, possivelmente relacionadas à biodegradabilidade do substrato e à presença de frações recalcitrantes.

Embora a análise estatística tenha indicado que alguns coeficientes, particularmente no modelo matemático para a remoção de DQO, não apresentaram significância dentro do nível de confiança adotado, optou-se por manter todos os termos do modelo quadrático (lineares, quadráticos e de interação). Essa decisão foi adotada para evitar que a retirada seletiva de termos pudesse distorcer a geometria da superfície e comprometer a capacidade de prever tendências no espaço experimental.

No presente estudo, o objetivo dos modelos não foi apenas a predição estatística estrita, mas também a utilização como ferramenta exploratória para simulação de cenários, identificação de regiões promissoras de operação e comparação entre variáveis-resposta. Assim, a preservação da equação completa garante que o modelo mantenha coerência matemática e permita, em trabalhos futuros, análises multicritério ou otimizações por função de desejabilidade, mesmo para variáveis com baixo ajuste no experimento atual.

Validação dos modelos matemáticos propostos

A validação do modelo matemático possui importância científica fundamental, pois assegura que a equação proposta é capaz de representar, com precisão, o comportamento do processo dentro dos limites controlados para as variáveis independentes adotadas no estudo (LASKAR *et al.*, 2022). Esse procedimento é essencial para verificar a adequação do ajuste estatístico e garantir que as predições geradas sejam confiáveis e aplicáveis às condições experimentais avaliadas (Beven; Lane, 2022).

No contexto de processos ambientais, como a biodigestão anaeróbia, a validação adquire relevância ainda maior, uma vez que modelos devidamente testados permitem simular cenários operacionais, antecipar respostas do sistema e apoiar a tomada de decisão para otimização em escala real. Dessa forma, a validação não apenas confirma a robustez estatística do modelo, mas também assegura sua utilidade prática na gestão e aprimoramento tecnológico do tratamento de resíduos. Corroborando com essa questão, Eker *et al.* (2018), destacam a validação como etapa-chave para estabelecer confiança na aplicabilidade dos modelos à tomada de decisão em contextos ambientais e, Janová *et al.* (2024), argumentam que a correta validação deve incluir a discussão explícita sobre como o modelo atende ao seu propósito proposto.

Em relação ao presente estudo, na Tabela 4 é apresentada a análise de variância (ANOVA) para a validação dos modelos matemáticos propostos. Verifica-se que o p-valor de 0.03 foi estaticamente significativo para a análise de turbidez, sendo este inferior ao nível de significância adotado, de 10%. Devido à grande variabilidade inerente ao processo de tratamento de efluentes envolvendo microrganismos, podem ser considerados significativos os parâmetros com p-valores menores que 10% (Rodrigues; lemma, 2014).

Neste contexto, seguindo as recomendações apresentadas por Cancelier *et al.* (2015), pode-se afirmar que no presente estudo, dentre os modelos matemáticos gerados, o melhor ajuste estatístico foi obtido para os dados referentes a eficiência de remoção de turbidez no sistema de tratamento anaeróbio de dejetos bovinos, o que não inviabiliza a utilização dos demais modelos matemáticos para a investigação de possíveis cenários associados a biodigestão anaeróbia.

Tabela 4. Validação estatística dos modelos matemáticos de simulação

Turbidez				
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Gráus de Liberdade	Quadrado Médio	p-valor
Regressão	547.84	5	109.57	0.03*
Resíduos	85	5	17.00	
Total	632.84	10		
Cor				
Regressão	968.78	5	193.76	0.22
Resíduos	465.57	5	93.11	
Total	1434.35	10		
DQO				
Regressão	1591.00	5	318.20	0.77
Resíduos	3228.03	5	645.61	
Total	4819.03	10		

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

Gráficos de superfície de resposta

Embora os modelos matemáticos propostos não sejam estatisticamente significativos para as variáveis dependentes cor 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 1 os gráficos de superfície de resposta do modelo matemático proposto para a turbidez (A), cor (B) e DQO (C).

Constatou-se que a maior remoção de turbidez (Figura 1A) ocorre em condições experimentais próximo ao ponto central do delineamento experimental, as quais são caracterizadas por 12% de mistura do inóculo (PMI) ao dejetto bovino, com o biodigestor anaeróbico operando por 14 dias (TO). De maneira similar, corroborando com o que foi apresentado na discussão da Tabela 3, o estudo indica que operando nessas condições experimentais, o biodigestor anaeróbico propicia as melhores respostas em termos de remoção de cor (Figura 1B).

Entretanto, para a remoção de matéria orgânica (em termos de DQO) há indícios de que melhores resultados podem ser obtidos em condições mais reduzidas de PMI e TO (Figura 1C), o que leva a concluir 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 anaeróbico, sem comprometer a eficiência do sistema empregado.

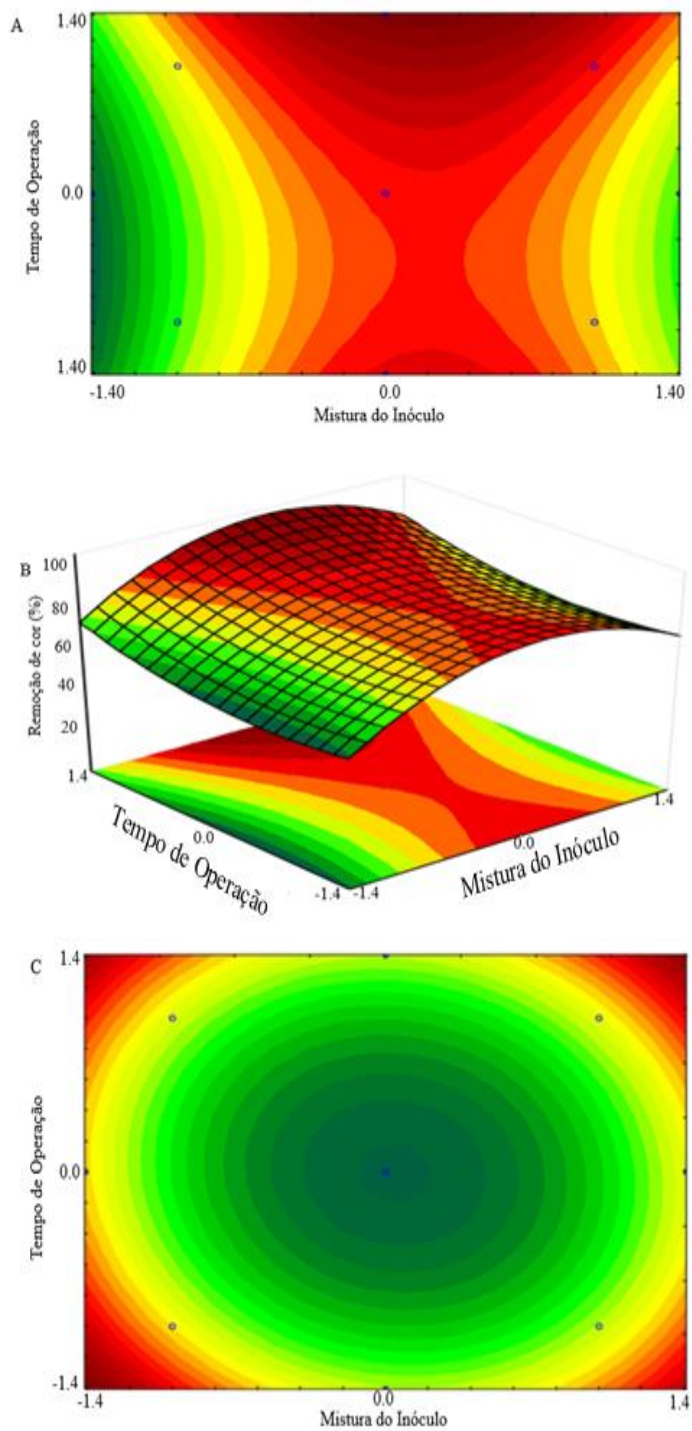


Figura 1. Superfície de resposta para a remoção de poluentes ambientais. (A) Turbidez; (B) Cor; (C) DQO

É importante destacar que as superfícies de resposta obtidas para turbidez e cor apresentam características próximas a paraboloides hiperbólicos, o que indica a ausência de um ponto ótimo global dentro da faixa experimental estudada. Nesse caso, a escolha de condições mais favoráveis foi baseada na região experimental que apresentou os maiores valores de remoção das variáveis respostas, considerando a aplicabilidade prática do processo. Entende-se que essa estratégia é plausível em estudos de superfície de resposta quando não há máximo/mínimo definido no domínio experimental, permitindo identificar uma zona operacional preferencial.

Além disso, mesmo em casos em que os modelos matemáticos não apontem um ponto ótimo teórico para as variáveis independentes, a escolha final da faixa de operação dos parâmetros operacionais deve considerar não apenas o valor matemático exato, mas também um intervalo de operação que seja estável, seguro e tecnicamente viável. Essa abordagem, muitas vezes chamada de ótimo prático, busca acomodar variações inerentes ao processo, reduzir riscos de instabilidade e facilitar a aplicação em escala real.

Caracterização do biogás produzido

Embora o objetivo do presente estudo tenha sido aplicar a biodigestão anaeróbia para o tratamento de dejetos bovinos, é de conhecimento que a técnica possui como coproduto a produção de biogás, uma emergente fonte alternativa de energia em grande escala (Deng *et al.*, 2023). Para que a caracterização do biogás não fosse comprometida, optou-se por avaliar o biogás produzido pelo maior tempo de operação (20 dias). Constatou-se que o biogás apresentou 82.0% de metano, 16.0 % de dióxido de carbono e ausência total de sulfeto de hidrogênio (Tabela 5). A ausência de sulfeto de hidrogênio é de extrema importância em sistemas de produção de biogás, pois suas características ácidas podem resultar em corrosão e diminuição da vida útil de motores e equipamentos utilizados para a produção da bioenergia (Zhang *et al.*, 2021).

No caso em questão, ensaio experimental 8 (PMI = 12%; TO = 20 dias), embora a eficiência de remoção de DQO tenha sido baixa (8.61%), observou-se elevada concentração de CH₄ no biogás (82%). Esse resultado indica que, apesar da menor remoção global da carga orgânica, a fração efetivamente degradada foi convertida em um biogás de alta qualidade, com predominância de metano. É importante salientar que a análise realizada neste estudo se refere exclusivamente à composição do biogás e não à eficiência de conversão da matéria orgânica em biogás, a qual dependeria também da medição do volume total gerado. Esse comportamento pode estar relacionado à presença de frações orgânicas mais facilmente degradáveis no substrato, resultando em metano de alta pureza, mesmo quando persistem compostos recalcitrantes que mantêm a DQO residual elevada.

Ao comparar os resultados obtidos com as informações constantes na literatura, observa-se melhores resultados no estudo desenvolvido. Ribeiro *et al.* (2020) ao avaliarem a geração de biogás a partir da digestão anaeróbia de dejetos bovinos, obtiveram biogás com composição de 65% de metano, 8% de CO₂ e 5% de H₂S.

CIBiogás (2019) em nota técnica, relata produção de biogás com 55.0% de metano para bovino de leite e 62.0% para bovino de corte, o que destaca a elevada produção de metano obtida no presente estudo, de 82.0%. Esta discrepância pode estar relacionada ao manejo da pecuária, bem como aos parâmetros controlados no sistema de tratamento empregado. Em escala real, o potencial de produção de biogás depende do arranjo tecnológico disponível, o que pode influenciar diretamente na qualidade do biocombustível produzido.

Tabela 5. Caracterização do biogás produzido durante o experimento

Elemento	Concentração (%)
Metano (CH ₄)	82.00
Dióxido de Carbono (CO ₂)	16.00
Sulfeto de Hidrogênio (H ₂ S)	0.00

Considerações finais

Após a realização dos ensaios experimentais seguindo rigorosos critérios científicos, a hipótese de que a biodigestão anaeróbia pode ser utilizada para o eficiente tratamento de dejetos da pecuária, utilizando inóculo de biodigestor aplicado ao tratamento de efluentes de fecularia, foi confirmada. O Brasil, por ser um país essencialmente agropecuário, deve buscar constantemente formas para otimizar os sistemas de tratamento de seus resíduos, sendo esse um dos principais produtos do presente estudo.

Embora os resultados tenham sido promissores, ressalta-se que estudos adicionais podem ser realizados a fim de melhorar a eficiência de remoção de matéria orgânica em biodigestores anaeróbios aplicados ao tratamento de dejetos de bovinos. Considerando a qualidade do biogás produzido, é fortemente encorajado a utilização do tratamento anaeróbio de dejetos bovinos para a produção de bioenergia, a qual pode ser utilizada nas propriedades pecuaristas, possibilitando atender alguns objetivos essenciais da sustentabilidade ambiental (ODS), além de reduzir custos com energia elétrica para os produtores rurais.

Cabe destacar que o presente estudo não contemplou um balanço de carbono completo, considerando simultaneamente as frações líquida e gasosa do processo. Assim, para potencializar a compreensão integral da dinâmica de conversão e possíveis perdas de carbono, recomenda-se que trabalhos futuros incluam essa análise combinada, de modo a fornecer uma estimativa mais abrangente e precisa da eficiência global do sistema.

Referências bibliográficas

- APHA (2012) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 22th ed. Washinton, DC – EUA: Ed. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.
- AGRAER, Agência de Desenvolvimento Agrário e Extensão Ruural (2023) *Cadeia produtiva do leite de MS precisa passar por mudanças estruturais para elevar a produção*. Acesso em: 13 jun. 2024. Disponível em: <https://www.agraer.ms.gov.br/cadeia-produtiva-do-leite-de-ms-precisa-passar-por-mudancas-estruturais-para-elevar-a-producao>
- Alan, H., Köker, A. R. (2023) Analyzing and mapping agricultural waste recycling research: An integrative review for conceptual framework and future directions. *Resources Policy*, **85**(part. B), 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103987>
- Albuquerque, M. G., Sousa, S. S. O. de, Arruda, V. C. M. de, El-Deir, S. G. (2022) Impactos socioambientais dos dejetos da pecuária no âmbito rural: uma revisão de literatura. *Revista AIDIS*, **15**(1), 517-529. <http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2022.15.1.78123>
- Assis, G. P., Ocampos, V. O., Fleck, I. M., Fleck, L. (2023) Modelagem matemática do tratamento de soro de leite por biodigestão anaeróbia. *Revista de estudos ambientais*, **25**(2), 39-50. <https://doi.org/10.7867/1983-1501.2023V25N2P39-50>
- Beven, K., Lane, S. (2022) On (in)validating environmental models. 1. Principles for formulating a Turing-like Test for determining when a model is fit-for purpose. *Hydrological Process*, **36**(10), e.14704. <https://doi.org/10.1002/hyp.14704>
- Cancelier, A., Dal’ Soto, U. P., Costelli, M. C., Lopes, T. J., Silva, A. (2015) Avaliação da produção de biogás de dejetos de suínos utilizando a metodologia de superfície de resposta. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, **20**(2), 209-217. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522015020000101264>
- Carmo, D. L., Silva, C. A. (2012) Métodos de Quantificação de Carbono e Matéria Orgânica em Resíduos Orgânicos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, **36**(1), 1211-1220. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000400015>
- Chen, S., Zhang, J., Wang, X. (2015) Effects of alkalinity sources on the stability of anaerobic digestion from food waste. *Waste Management & Research*, **33**(11), 1033-1040. <https://doi.org/10.1177/0734242X15602965>
- CIBIOPAS- Energias Renováveis. (2019) *Nota Técnica 01/2019: Produção de biogás a partir de dejetos da bovinocultura de leite e corte*. p.1-8.
- Costalonga, L. G., Pires, N. O., Costa, T. R., Bottrel, S. E. C., Monteiro Neto, J. M., Pereira, R. O., Paula, V. R. de, Otênio, M. H. (2019) Avaliação da atividade estrogênica em efluente da pecuária leiteira. *Principia – Caminhos da Iniciação Científica*, **19**(2), 1-12, 2019. <https://doi.org/10.34019/2179-3700.2019.v19.29921>
- Deng, C., Kang, X., Lin, R., Wu, B., Ning, X., Wall, D., Murphy, J. D. (2023) Boosting biogas production from recalcitrant lignin-based feedstock by adding lignin-derived carbonaceous materials within the anaerobic digestion process. *Energy*, **278**(part A), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127819>
- Derringer, G. C., Suich, R. (1980) Simultaneous optimization of several responses variables. *Journal of Quality Technology*, **12**(4), 214-219. <https://doi.org/10.1080/00224065.1980.11980968>
- Eker, S., Rovenskaya, E., Obersteiner, M., Langan, S. (2018) Practice and perspectives in the validation of resource management models. *Nature communications*, **(9)**, 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07811-9>
- Esteves, E. M. M., Herrera, A. M. N., Esteves, V. P. P., Morgado, C. do R. V. (2019) Life cycle assessment of manure biogas production: a review. *Journal of Cleaner Production*, **219**(10), 411-423. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.091>
- Feitosa, A. K., Matos, M. A. A. de. (2021) A gestão de biorresíduos na perspectiva da economia circular. In: FEITOSA, A. K. (Org.) *Gestão, Meio Ambiente e Sustentabilidade*. Mulheres na Ciência, v. 4. Fortaleza: Aliás, 2021. 172 pp.
- Fleck, L., Tavares, M. H. F., Eyng, E., Andrade, M. A. M., Frare, L. M. (2017) Optimization of anaerobic treatment of cassava processing wastewater. *Engenharia Agrícola*, **37**(3), 574-590. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v37n3p574-590/2017>

- Gomes, A. C. A., Rocha, M. M., Galvão, A. S., Albino, P. M. B. (2014) Incentivos para a viabilização do biogás a partir dos resíduos da pecuária leiteira no Estado de Minas Gerais. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, **30**(0), 149-160. <http://dx.doi.org/10.5380/dma.v30i0.34192>
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2022) *Painel de Indicadores*. Acesso em: 13 jun. 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/indicadores.html>
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2023) *Cresce o abate de bovinos, frangos e suínos no 1º tri de 2023*. Agência IBGE notícias, 2023. Acesso em: 13 jun. 2024. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/37070-cresce-o-abate-de-bovinos-frangos-e-suinos-no-1-tri-de-2023>
- Janová, J., Bödeker, K., Bingham, L., Kindu, M., Knoke, T. (2024) The role of validation in optimization models for forest management. *Annals of Forest Science*, **81**(19), 1-19. <https://doi.org/10.1186/s13595-024-01235-w>
- Kwietniewska, E., Tys, J. (2014) Process characteristics, inhibition factors and methane yields of anaerobic digestion process, with particular focus on microalgal biomass fermentation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **34**(1), 491-500. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.041>
- Laskar, A. A., Ahmed, M., Khan, A. S., Samir, M. (2022) Experimental investigation and statistical validation of mathematical models for hot air-drying traits of carrot. *Food Science and Technology International*, **29**(4), 345-360. <https://doi.org/10.1177/10820132221093264>
- Leite, J. G. B. S., Santos, R. S., Lima, G. S., Silva, C. C., Assis, F. G. V., Oliveira, E. A., Leal, P. L. (2021) Co-digestão anaeróbica de manipueira, casca de café e esterco bovino: Um estudo de otimização do processo de otimização. *Brazilian Journal of Development*, **7**(1), 1334-1355. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n1-091>
- Martins, F. J. S. B., Bruel, G. M., Souza, T. R. C., Esposito. (2024) Aproveitamento de dejetos bovinos para a produção de biogás. *Latin American Journal of Energy Research*, **11**(1), 99-113. <https://doi.org/10.21712/lajer.2024.v11.n1.p99-113>
- Matos, C. F. (2016) *Produção de biogás e biofertilizante a partir de dejetos bovinos, sob sistema orgânico e convencional de produção*. 66 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola e Ambiental) – Instituto de Tecnologia- Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.
- Mayo, A. L., Ritter, D. J., Bruthans, J., Tingey, D. (2019) Contributions of commercial fertilizer, mineralized soil nitrate, and animal and human waste to the nitrate load in the Upper Elbe River Basin, Czech Republic. *HydroResearch*, **1**(1), 25-35. <https://doi.org/10.1016/j.hydres.2019.04.003>
- MAPA, Ministério da Agricultura E Pecuária (2024) *Mapa do leite: políticas públicas e privadas para o leite*. Acesso em: 13 jun. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/producao-animal/mapa-do-leite>
- Pasqualini, A. A. (2020) Aplicação dos biodigestores na pecuária sustentável. *Revista Faculdades do Saber*, **5**(9), 598-609. <https://rfs.emnuvens.com.br/rfs/article/view/89>
- Ribeiro, S. A. S., Junho, A. L., Barros, R. M., Santos, I. F. S., Tiago Filho, G. L., Martuscelli, E., Freitas, J. V. R. (2020) Estudo preliminar da biodigestão de esterco bovino com soro de leite em sistema de digestão em duplo estágio com purificação de biogás. **9**(8), 1-25. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i8.5911>
- Richards, D., Yabar, H. (2023) Promoting energy and resource from livestock waste: case study yuge farm, Japan. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, **7**(2), 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100299>
- Rodrigues, M. R., Lemma, A. F. (2014) *Experimental design and process optimization*. 2ª Ed. São Paulo.
- Variani, L., Kripka, M. (2021) Método de decisão multicritério aplicado à seleção de materiais estruturais considerando o impacto ambiental. *Revista AIDIS*, **14**(1), 462-476. <https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2021.14.1.70213>
- Zhang, Y., Kawasaki, Y., Oshita, K., Takaoka, M., Daisuke, M., Inoue, G., Tanaka, T. (2021) Economic assessment of biogas purification systems for removal of both H₂S and siloxane from biogas. *Renewable Energy*, **168**(0), 119-130. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.058>