Mercator, Fortaleza, v. 25, e25005, 2026 ISSN:1984-2201

APLICAÇÃO SEMI-CONTÍNUA DE CHORUME E EFLUENTE DE FOSSA SÉPTICA VISANDO AO AUMENTO E ACELERAÇÃO NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO

https://doi.org/10.36517/rm2026.e25005

Gomes, A.C.C.O. [a*] - Stefanutti, R. [b] - Siébra, H.M.A [c] - Sampaio, F.S.O. [d]

(a) Doutora em Engenharia Civil
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6476-0031. **LATTES:** http://lattes.cnpq.br/4637169786070716.
(b) Doutor em Ciências
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-6776-0413. **LATTES:** http://lattes.cnpq.br/2381599257044388.
(c) Especialista em Biogás
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-9366-6962. **LATTES:** http://lattes.cnpq.br/.
(d) Especialista em Biogás e Biometano
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-8369-7352. **LATTES:** http://lattes.cnpq.br/0929250725582237.

Article history:
Received 30 January, 2026
Accepted 05 February, 2026
Published 10 March, 2026

(*) CORRESPONDING AUTHOR
Address: UEMS. Rodovia Dourados-Itahum, Km 12, Cidade Universitária, CEP:79804-970, Dourados (MS), Brasil. Tel: (+55 67) 3902-2423.
E-mail: accoliveira@uems.br

Resumo

Os biorreatores constituíram sistemas projetados para simular a degradação dos resíduos e a geração de biogás em aterros sanitários, promovendo maior controle ambiental e contribuindo para os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, especialmente os ODS 7 (Energia Limpa e Acessível), 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) e 13 (Ação Climática). Sua utilização possibilitou estratégias sustentáveis de manejo do chorume, ciclagem de líquidos percolados e estímulo à recuperação energética. Este estudo avaliou a produção de biogás em reatores de 1.000 L preenchidos com resíduos sólidos urbanos e submetidos à aplicação semicontínua de chorume bruto, chorume concentrado e efluente de fossa séptica, simulando condições sazonais de seca e chuva. O experimento foi conduzido por 12 meses, com medições diárias de composição e vazão do biogás. Os resultados demonstram que a recirculação de chorume aumentou significativamente a produção de metano em ambos os períodos sazonais, enquanto o efluente de fossa apresentou efeito positivo principalmente no período seco. A pesquisa evidencia o potencial da recirculação de líquidos percolados como estratégia ambientalmente favorável para incremento da digestão anaeróbia, redução de emissão de GEE e fortalecimento de soluções sustentáveis aplicáveis à gestão de aterros sanitários.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos, Biometano, Metano, Lixiviado, Aterro Sanitário, RSU.

Abstract / Resumen

SEMI-CONTINUOUS APPLICATION OF LEACHATE AND SEPTIC TANK EFFLUENT TO INCREASE AND ACCELERATE BIOGAS PRODUCTION IN LANDFILLS

In this study, the bioreactors were constructed as systems designed to simulate waste degradation and biogas generation in landfills, promoting greater environmental control and contributing to the Sustainable Development Goals, particularly SDG 7 (Affordable and Clean Energy), SDG 11 (Sustainable Cities and Communities), and SDG 13 (Climate Action). Their use enables sustainable strategies for leachate management, percolate recirculation, and energy recovery. This study evaluated biogas production in 1,000 L reactors filled with municipal solid waste and subjected to semi-continuous application of raw leachate, concentrated leachate, and septic tank effluent, simulating seasonal dry and rainy conditions. The experiment was conducted over a 12-month period, with daily measurements of biogas composition and flow. The results show that leachate recirculation significantly increased methane production in both seasons, whereas septic tank effluent had a positive effect primarily during the dry period. The findings highlight the potential of leachate recirculation as an environmentally sound strategy to enhance anaerobic digestion, reduce greenhouse gas emissions, and strengthen sustainable solutions for landfill management.

Keywords: Solid Waste, Biomethane, Methane, Leachate, Landfill, MSW.

APLICACIÓN SEMICONTINUA DE LIXIVIADOS Y EFLUENTES DE FOSAS SÉPTICAS PARA AUMENTAR Y ACELERAR LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN VERTEDEROS

En este estudio, los biorreactores fueron construidos como sistemas diseñados para simular la degradación de residuos y la generación de biogás en vertederos, promoviendo un mayor control ambiental y contribuyendo a los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en particular al ODS 7 (Energía asequible y no contaminante), al ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles) y al ODS 13 (Acción por el clima). Su utilización permitió la implementación de estrategias sostenibles para la gestión de lixiviados, la recirculación de líquidos percolados y la recuperación energética. Este estudio evaluó la producción de biogás en reactores de 1.000 litros llenados con residuos sólidos urbanos y sometidos a la aplicación semicontinua de lixiviado bruto, lixiviado concentrado y efluente de fosa séptica, simulando condiciones estacionales de sequía y de lluvia. El experimento se desarrolló durante 12 meses, con mediciones diarias de la composición y el caudal del biogás. Los resultados muestran que la recirculación de lixiviados incrementó de forma significativa la producción de metano en ambas estaciones, mientras que el efluente de fosa séptica presentó un efecto positivo principalmente durante el período seco. Los hallazgos ponen de relieve el potencial de la recirculación de lixiviados como estrategia ambientalmente favorable para mejorar la digestión anaerobia, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y fortalecer soluciones sostenibles aplicables a la gestión de vertederos.

Palabras-clave: Residuos Sólidos, Biometano, Metano, Lixiviado, Vertedero, RSU.

This is an open access article under the CC-BY 3.0 Creative Commons license

INTRODUÇÃO

A principal técnica de destinação final adequada em países em desenvolvimento é o aterro sanitário. Este método de tratamento reduz possíveis impactos ambientais negativos oriundos da destinação incorreta dos mesmos, como a contaminação do ar, solo e águas subterrâneas (COSTA et al., 2018). A digestão anaeróbia dos resíduos no aterro produz biogás que é formado majoritariamente por CH4, CO2 e pequenas concentrações de N, O2, H2S, NH3, H, CO2 dentre outros (Magalhães, 2018; Silva & Mota, 2019). Sua utilização como fonte de energia é um tipo de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) atendendo ao protocolo de Kyoto ao reduzir as emissões dos GEE (SILVA; MOTA, 2019), sendo uma das soluções mais promissoras no tratamento de resíduos alimentares e produção de energia e nutrientes (PARITOSH et al., 2017).

Além da conservação ambiental e melhora na qualidade de vida, o uso da energia advinda do aterro sanitário pode ser utilizado na comercialização de créditos de carbono e uma importante contribuição no incremento na matriz energética do país. Atualmente, em torno de 77% da energia utilizada no Brasil é advinda de hidrelétricas, havendo vulnerabilidade ao depender predominantemente de apenas uma fonte de energia – como a crise ocorrida em 2001, quando os reservatórios baixaram, impossibilitando o funcionamento das grandes hidrelétricas de modo adequado (CROVADOR et al., 2018; SILVA; MOTA, 2019).

De acordo com Nascimento et al. (2019), o Brasil explora de 7% a 20% da quantidade de biogás produzida nos aterros sanitários. Em 2022, foram geradas 77.076.428 toneladas de resíduos sólidos no país e recolhidos em torno de 93%, dos quais 61,1% foram destinados a aterro sanitário. Observa-se um tímido aumento comparando-se a 2019 em que era coletado 92% e destinados 59,5% para aterros sanitários. Apesar do Nordeste ser a segunda região de maior geração de RSU (24,6%) esta possui o Índice de Cobertura da Coleta de RSU mais baixo de todas as regiões do Brasil, com 82,7% dos resíduos coletados – desse montante apenas 37,3% têm como destinação o aterro sanitário, o que corresponde a 5.844.347 t./ano. Apesar de uma parcela ainda não ser abrangida pela coleta regular de RSU, houve melhora quantitativa e qualitativa da cobertura de coleta em todas as regiões do país (ABRELPE, 2020; ABREMA, 2023).

Na região nordeste do país, destaca-se a usina de Gás Natural Renovável da empresa GNR Fortaleza Valorização de Biogás LTDA. A usina de captação do biogás produzido no Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia (ASMOC), realiza a purificação e tratamento do mesmo para produção do biometano e distribuição do gás renovável para indústrias, comércios e residências através da Companhia de Gás do Ceará (CARVALHO et al., 2021). O ASMOC iniciou sua operação em 1991 com os resíduos produzidos em Caucaia/CE e em 1998 passou a receber também os resíduos sólidos oriundos da cidade de Fortaleza/CE (SILVA, 2017). Atualmente, o ASMOC recebe em torno de 5.500 t./dia de RSU e produz cerca de 80.000 m3/dia de biometano.

Devem ser realizados estudos locacionais para entender a produção de biogás que muda de acordo com a região (GOMES et al., 2024). Além da localização geográfica, outras variáveis interferem na geração do biogás, tais como: tipo e idade dos resíduos, grau de decomposição, irrigação com chorume, clima, cobertura do aterro, gestão do aterro, umidade do ar, precipitação, pressão atmosférica, velocidade do vento, radiação solar, pH, temperatura, potencial de oxirredução, teor de sólidos voláteis e variação da composição do gás (CANDIANI; VIANA, 2017; COSTA et al., 2018; GOLLAPALLI; KOTA, 2018; GOMES et al., 2024; LUCERNONI et al., 2017; MACHADO et al., 2021; MAGALHÃES, 2018; MORAIS et al., 2020; MOTA et al., 2019; SANTOS et al., 2019). Desta forma, para aumentar a eficiência do aproveitamento energético do metano em aterro sanitário as variáveis supracitadas que interferem no mesmo devem ser estudadas.

Devido à importância dos aterros sanitários para a disposição de resíduos sólidos no Brasil, ao potencial de geração de energia utilizando o biogás produzido no ASMOC, há necessidade de estudos do comportamento dos aterros no Brasil e ao desenvolvimento de técnicas e tecnologias para aumento da eficiência de produção para utilização do biogás como incremento na fonte na matriz energética. Este estudo foi proposto com o objetivo de avaliar a produção de biogás por meio da digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos com aplicação semi-contínua de chorume e efluente de fossa séptica de esgoto doméstico.

METODOLOGIA

LOCAL DE ESTUDO

A pesquisa foi conduzida na GNR, nas dependências do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia (ASMOC), localizados no município de Caucaia/CE (Figura 1), a 30 Km de Fortaleza e que recebe em torno de 5.500 t./dia de RSU dos municípios de Caucaia e Fortaleza. A temperatura no aterro varia entre 24,6°C a 29,1°C, tendo uma média de 27,5°C e a pluviosidade média mensal no período chuvoso é de 286mm, já no período seco este valor cai para 23,1mm (GOMES et al., 2024).

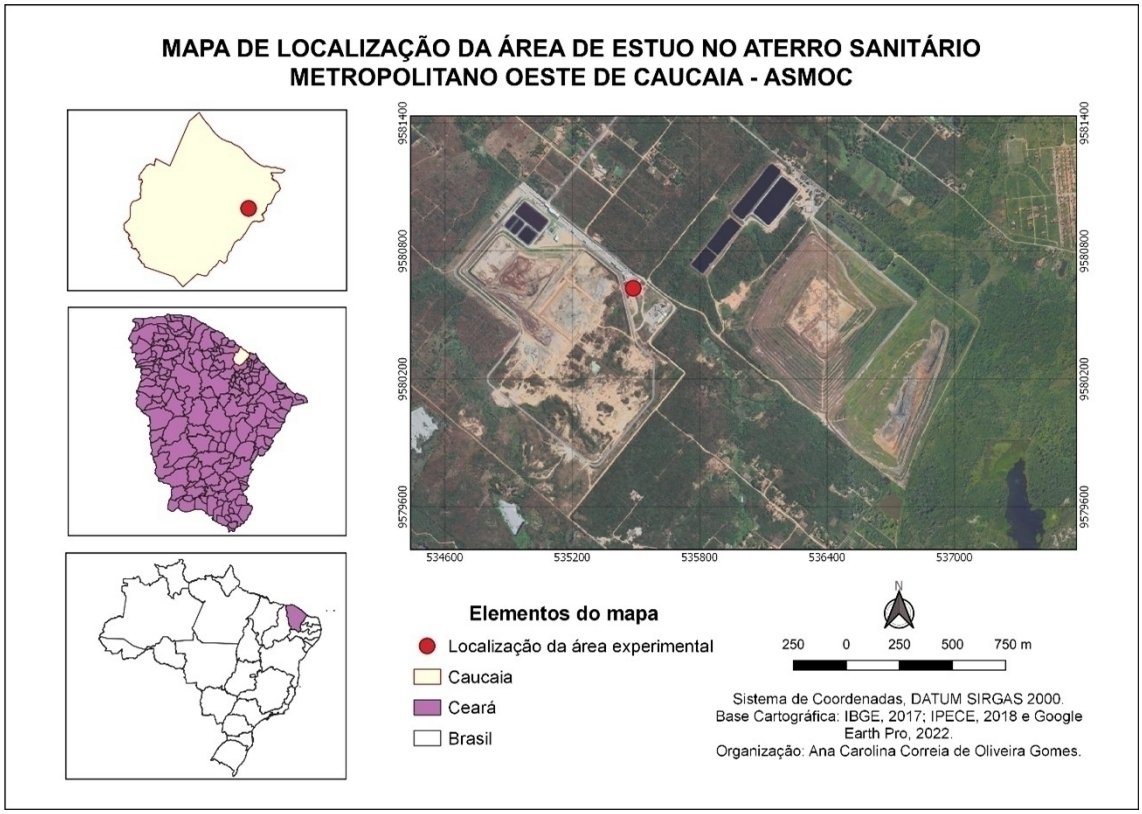

Figura 1 - Mapa de Localização da área de Estudo na GNR, Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia – ASMOC. Fonte: Os autores (2024).

MONTAGEM E OPERAÇÃO DOS REATORES

Utilizou-se um container de 1.000 litros para montagem do reator. Foram adicionadas quatro camadas sobrepostas, sendo a camada inferior composta de 0,15 m de brita n°02, seguido de uma camada de 0,05m de brita n°1 e areia, 0,5m de RSU, cobertura de solo de textura média em uma altura de 0,20m e restando cerca de 10% de headspace. A cada adição de camada foi realizada compactação com soquete (Figura 2).

No topo de cada reator foi colocado um manômetro de baixa pressão para a conexão com o detector da qualidade do gás. Os reatores foram selados hermeticamente para evitar perda de gás e umidade.

Os dispositivos para coleta da massa de resíduo foram inseridos a 2 alturas distintas do reator, sendo a 0,40m e 0,6m. Na parte superior foi inserido um sistema de distribuição de líquido formado por uma mangueira, em forma de espiral, com 2m de comprimento, diâmetro 3/4” e furos de 1” distribuídos em toda sua extensão, fechado na ponta para distribuição do chorume e água, em toda área superficial do reator.

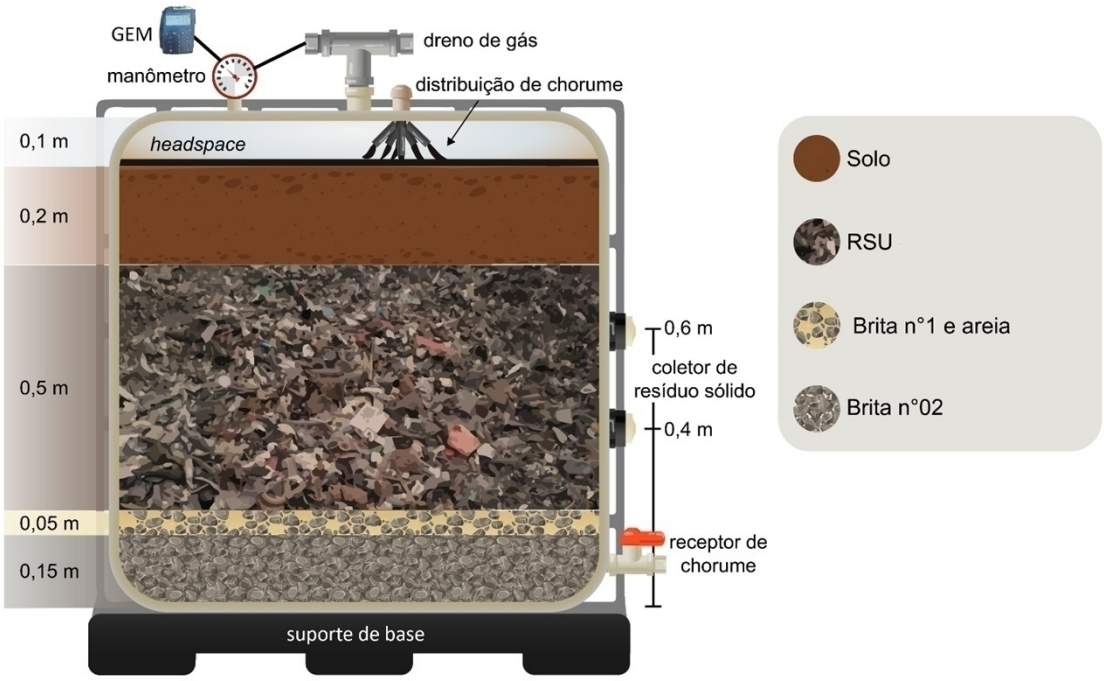

Figura 2 - Vista de um corte representativo do reator de pesquisa instalado na GNR/ASMOC. Fonte: Os autores (2024).

A quantidade de reatores foi estipulada com base em planejamento estatístico fatorial, determinando-se a quantidade de 16 reatores tipo IBC (Figura 3) dos quais, 4 foram irrigados com chorume das células antigas (com idade aproximada de 23 anos), 4 com chorume concentrado (proveniente do tratamento de osmose reversa das células novas que começou a operar em janeiro de 2021); 4 com efluente doméstico de fossa séptica e outros 4 não receberam chorume nem efluente doméstico de fossa séptica.

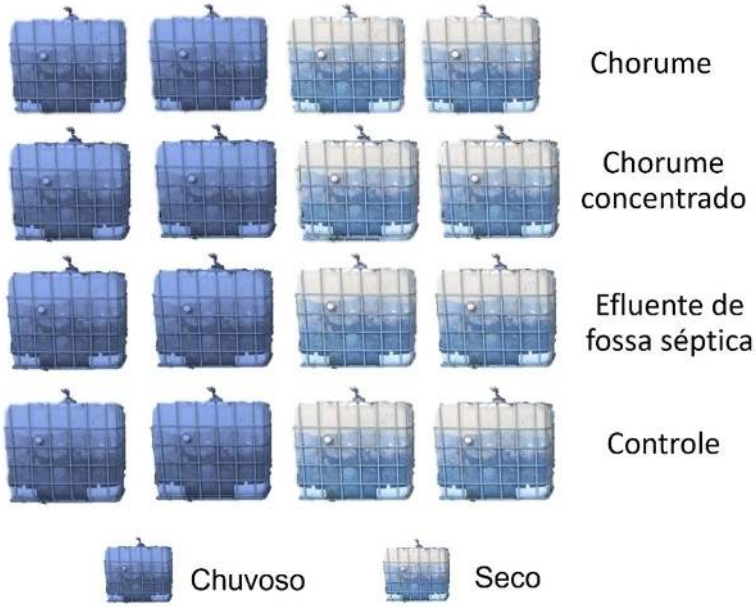

Figura 3 - Disposição e montagem do experimento com os reatores instalados na GNR/ASMOC, Caucaia CE. Fonte: Os autores (2024).

A cada 15 dias foram aplicados 20L de chorume ou efluente de fossa em cada reator determinado, com área superficial de 1m2, os mesmos eram misturados para homogeneização antes da aplicação. A irrigação com 30L de água em cada reator também foi realizada quinzenalmente para simulação da pluviosidade, mantendo a umidade mínima em 50%. A irrigação com água foi intercalada com a disposição do efluente, sendo assim, os reatores foram irrigados semanalmente. Os reatores irrigados com água foram denominados de chuvoso e os demais reatores de seco (Figura 3).

Para simular com mais precisão a decomposição dos resíduos sólidos no ASMOC, os IBCs foram preenchidos de acordo com a proporção dos tipos de resíduos obtidos na análise gravimétrica (Figura 4). Os resíduos orgânicos foram coletados nos restaurantes universitários da UFC Campus do PICI; os demais materiais foram recolhidos assim que eram descarregados no aterro.

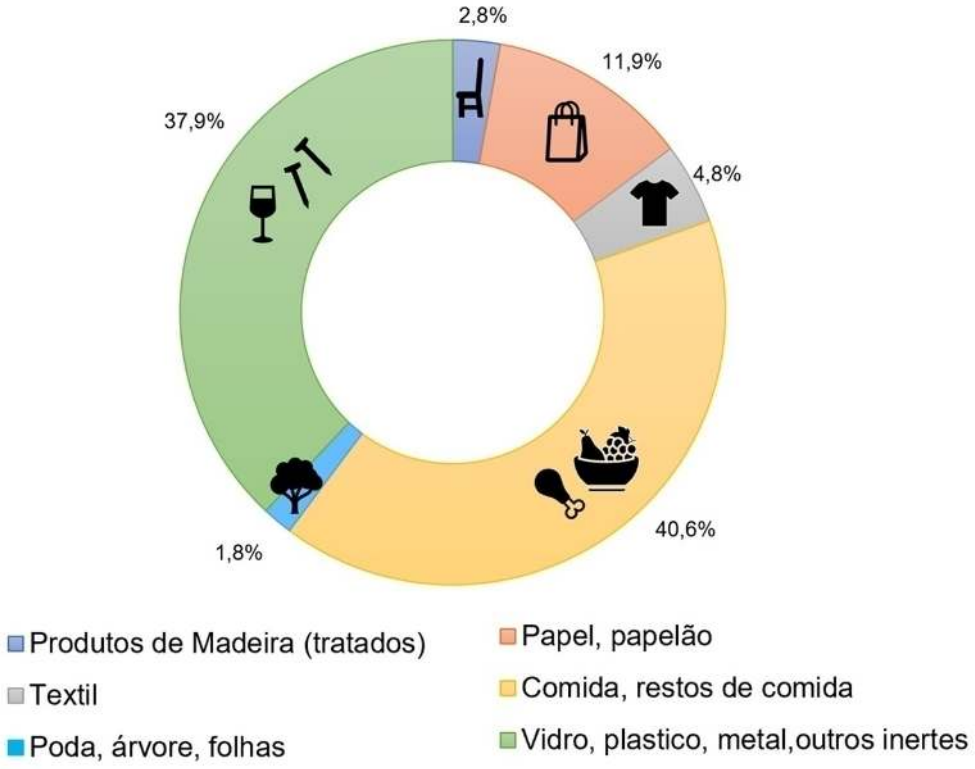

Figura 4 - Composição gravimétrica de amostra representativa de resíduos do ASMOC. Fonte: Criado pela autora com dados extraídos do ASMOC (2022).

Os materiais foram pesados de acordo com cada composição afim de obter a proporção desejada, conforme análise gravimétrica; depois de pesados eles foram triturados e misturados com a finalidade de se obter uma massa homogênea a ser inserida nos reatores. Após mistura, os resíduos eram novamente pesados para distribuição equitativa para cada reator. Tanto os resíduos quanto o solo de cobertura foram compactados manualmente com soquete até a densidade de 332,23 kg/m3.

De acordo com as porcentagens das análises gravimétricas e volume a ser inserido, cada reator recebeu 166,12kg de resíduos sólidos distribuídos em diferentes composições, como mostra a Tabela 1.

Produtos de Madeira (tratados)	Papel, papelão	Orgânico	Têxtil	Poda, árvore, folhas	Vidro, plástico, metal, inertes	Total
4,68 kg	19,83 kg	67,44 kg	8,04 kg	3,07 kg	63,04 kg	166,12 kg

Tabela 1 - Composição da massa dos resíduos em cada reator. Fonte: Os autores (2024).

O chorume da célula antiga e o chorume concentrado foram captados e bombeados para reservatórios de armazenamento para aplicação. O bombeamento do chorume dos reservatórios para os reatores ocorreu através de uma bomba centrífuga monofásica de ¾ CV e com tubulação de PVC de 32mm, acoplado ao sistema de distribuição na parte superior do reator. Antes da ligação da bomba o efluente e chorume eram misturados para homogeneização do composto.

Para captação do chorume produzido nos reatores foi utilizada a válvula de saída existente da base do IBC, conectadas a canos para drenagem do percolado. No primeiro semestre, o esgotamento do chorume ocorreu semanalmente através da abertura da válvula para o tanque de cada reator; posteriormente a drenagem ocorreu diariamente.

MONITORAMENTO DA COMPOSIÇÃO E VAZÃO DO BIOGÁS

A medição da composição do gás foi realizada individualmente, um ponto por vez, com frequência diária. Para medição da composição foi utilizado o analisador de gás portátil GEM5000 da LANDTEC, que foi acoplado ao medidor de volume de gás G0.6 fabricado pela LAO no PAs de cada reator (Figura 5). A válvula de fluxo foi aberta diariamente para leitura da vazão e composição; logo que todo o gás passava, a válvula era fechada novamente.

Figura 5 - Medição da vazão e composição do gás nos reatores instalados na GNR/ASMOC. Fonte: Os autores (2024).

ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados foram tabulados no Excel e para as análises estatísticas foi utilizado o software estatístico JAMOVI versão 2.3, com intervalo de confiança de 95%. Foi realizada a soma das leituras de cada tipo de reator por mês, totalizando 11 amostras cada. Foi aplicado o teste de Shapiro-Wilk, para análise de normalidade dos dados. Realizou-se então o teste de Friedman e de Durbin-Conover.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através do teste de Shapiro-wilk (Tabela 2) foi possível determinar que os dados da produção de metano nos diferentes reatores no decorrer do tempo não seguem distribuição normal, sendo assim, foi realizado o teste de Friedman (Tabela 3) e constatado que existem diferenças significativas entre os grupos. Desta forma, realizou-se o teste de comparações múltiplas (Tabela 4).

Mediana	32,9	0,33	2,71	52,5	290	89,9	119	73,5
25º percentil	7,38	0	0	27,2	199	59,6	29,3	35,6
75º percentil	508	0,688	49,5	189	426	711	222	498
Mínimo	0,58	0	0	0,62	64,1	26,1	8,77	7,86
Máximo	926	2,9	233	428	653	1122	307	866
W de Shapiro-Wilk	0,761	0,714	0,645	0,83	0,938	0,752	0,888	0,769
p Shapiro-Wilk	0,004*	0,001*	< ,001*	0,021*	0,471	0,003*	0,111	0,004*

Tabela 2 - Estatística descritiva do volume de metano em litros produzido no decorrer do experimento nos reatores instalados na GNR/ASMOC. Fonte: Os autores (2024).

Friedman		
χ^2	gl	p
57,3	7	< 0,001*

Tabela 3 - Teste de Friedman do volume de metano em litros produzido no decorrer do experimento nos reatores instalados na GNR/ASMOC. Fonte: Os autores (2024).

		-				Estatística		p
				continua				
Controle chuvoso		-		Controle seco		5,667		< 0,001*
Controle chuvoso		-		Efluente chuvoso		4,959		<0 ,001*
Controle chuvoso		-		Efluente seco		1,133		0,261
Controle chuvoso		-		Chorume chuvoso		3,542		< 0,001*
Controle chuvoso		-		Chorume seco		3,400		0,001*
Controle chuvoso		-		Chorume conc. chuvoso		0,000		1,000
Controle chuvoso		-		Chorume conc. seco		1,417		0,161
Controle seco		-		Efluente chuvoso		0,708		0,481
				conclusão				
Controle seco		-		Efluente seco		4,534		< 0,001*
Controle seco		-		Chorume chuvoso		9,209		< 0,001*
Controle seco		-		Chorume seco		9,067		< 0,001*
Controle seco		-		Chorume conc. chuvoso		5,667		< 0,001*
Controle seco		-		Chorume conc. seco		7,084		< 0,001*
Efluente chuvoso		-		Efluente seco		3,825		< 0,001*
Efluente chuvoso		-		Chorume chuvoso		8,501		< 0,001*
Efluente chuvoso		-		Chorume seco		8,359		< 0,001*
Efluente chuvoso		-		Chorume conc. chuvoso		4,959		< 0,001*
Efluente chuvoso		-		Chorume conc. seco		6,376		< 0,001*
Efluente seco		-		Chorume chuvoso		4,675		< 0,001*
Efluente seco		-		Chorume seco		4,534		< 0,001*
Efluente seco		-		Chorume conc. chuvoso		1,133		0,261
Efluente seco		-		Chorume conc. seco		2,550		0,013*
Chorume chuvoso		-		Chorume seco		0,142		0,888
Chorume chuvoso		-		Chorume conc. chuvoso		3,542		< 0,001*
Chorume chuvoso		-		Chorume conc. seco		2,125		0,037*
Chorume seco		-		Chorume conc. chuvoso		3,400		0,001*
Chorume seco		-		Chorume conc. seco		1,984		0,051
Chorume conc. chuvoso		-		Chorume conc. seco		1,417		0,161

Tabela 4 - Comparações Múltiplas (Durbin-Conover) do volume de metano produzido no decorrer do experimento nos reatores instalados na GNR/ASMOC. Fonte: Os autores (2024).

Ao analisar as Tabelas 2, 3 e 4, é possível perceber que os dados foram separados em três grupos, em que, há diferença estatística entre os grupos e similaridade entre os parâmetros do mesmo agrupamento. O grupo que teve menor produção de metano foi o constituído pelo controle seco e efluente chuvoso. Já o intermediário foi integrado pelo efluente seco, chorume concentrado chuvoso, chorume concentrado seco e controle chuvoso. Por fim, os reatores que apresentaram melhor eficiência na produção de metano foram o chorume chuvoso e o chorume seco (Figura 6). He e Fei (2020) também encontraram maiores valores de metano com a introdução de chorume do que de água. O chorume concentrado seco ficou entre a maior produção de metano e a produção intermediária do mesmo, pois apresentou diferença estatística significativa do efluente seco e semelhança com o chorume seco, entretanto classificou-se no grupo intermediário por apresentar semelhança estatística com o chorume concentrado chuvoso e o controle chuvoso e diferença com o chorume chuvoso.

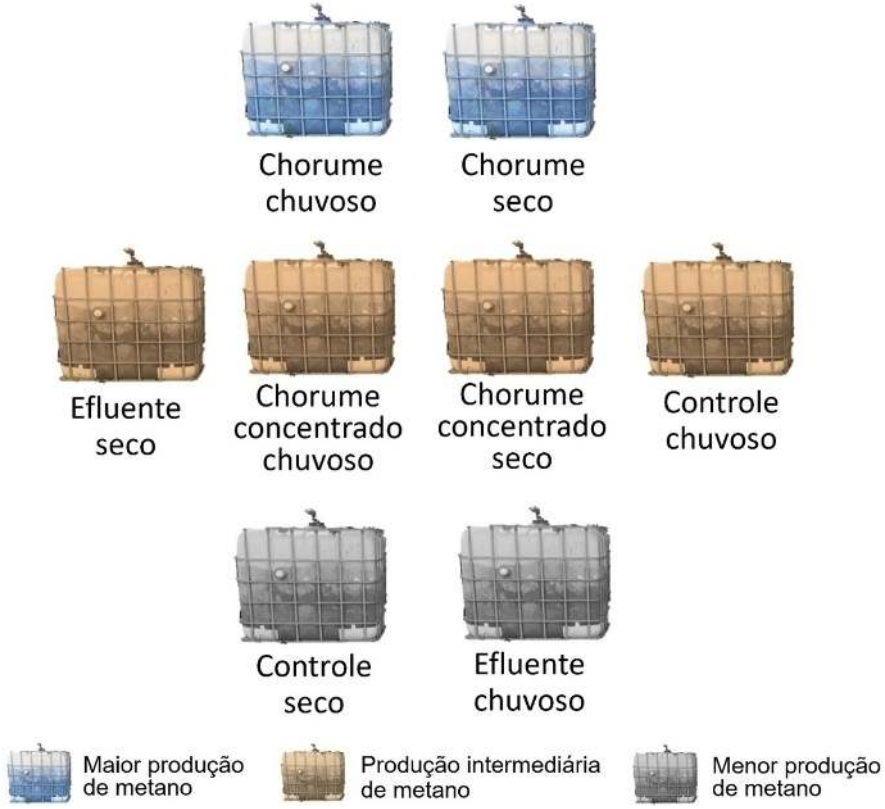

Figura 6 - Similaridade na produção de metano entre os reatores. Fonte: Os autores (2024).

Diante destes dados, percebe-se que não há diferença entre o período seco e chuvoso quando o reator recebe chorume e chorume concentrado. Já no controle e no efluente há diferença significativa no período seco e chuvoso. Sendo assim, fica perceptível que a introdução do chorume bruto ou concentrado aumenta a produção de metano, pois introduzem nutrientes e água no meio. A recirculação do chorume em aterro sanitário culmina no tratamento do lixiviado através de processos físicos, químicos e biológicos e também aumenta a geração de biogás, melhora a biodegradabilidade, ajusta o ambiente de degradação podendo evitar a acidificação no estágio de degradação rápida e acelera a decomposição e estabilização dos RSU (LIU et al., 2021a; MEHRDAD et al., 2021; ZHANG et al., 2021).

O chorume gerado na fase metanogênica, ao ser recirculado, aumenta a hidrólise de resíduos sólidos de alimentos, degradação de sólidos voláteis, melhoria da taxa de acidogênese, aumento na transferência de massa, efeitos positivos nas concentrações de ácidos graxos voláteis e redistribuição de nutrientes (KO; YANG; XU, 2016). Entretanto, apesar de possuir uma quantidade concentrada de microrganismos, nutrientes e metais pesados, caso o chorume proveniente do aterro sanitário seja

disposto de maneira inadequada pode contaminar o meio ambiente e gerar riscos à saúde humana (H. Liu et al., 2021; Mehrdad et al., 2021; Zhang et al., 2021).

Para melhoria no desempenho da digestão anaeróbia em aterro sanitário a taxa de aplicação deve ser estudada, pois o chorume deve ser recirculado em uma quantidade que permita o fornecimento de umidade ao substrato. Entretanto, quando introduzido em volumes muito altos provoca a acidificação, eliminação de nutrientes, de matéria orgânica e microrganismos, reduzindo a produção de metano (Degueurce et al., 2016; Li et al., 2020). O aperfeiçoamento na taxa de aplicação de chorume em reator termofílico de leito de lixiviação foi constatado por Hussain et al. (2017), melhorando a eficiência de acidificação, hidrólise e degradação.

Com relação ao controle, houve diferença estatística entre o período seco e chuvoso, determinando que a pluviosidade interfere na produção de biogás sendo o período seco de menor produção de metano, assim como encontrado por (Gomes et al., 2024) ao analisarem os maciços do ASMOC mensalmente entre janeiro de 2019 a dezembro de 2022. Estes concluíram que há correlação positiva entre pluviosidade e produção de metano no ASMOC. O mesmo foi encontrado por Abushammala et al. (2016) e Romana Gomes et al. (2022) ao estudarem a produção de metano e pluviosidade em aterro sanitário e lixão, respectivamente.

Outra alternativa que aumenta a eficiência da digestão anaeróbia é a utilização da codigestão, que é a mistura de diferentes substratos com características complementares e produtores de metano. Além de interferir no tipo de resíduo, o cosubstrato fornece nutrientes e proporciona efeitos sinergéticos positivos ao meio, melhorando o processo de digestão e a produção do biogás (Obulisamy et al., 2016). Muitos estudos da codigestão de resíduos alimentares e lodo de esgoto vêm sendo realizados, pois ambos possuem potencial de produção de metano e são produzidos em grande escala (Ferreira, 2017).

Em um aterro sanitário existem limitações da utilização do lodo de esgoto pelo volume necessário e também pela interferência no comportamento geomecânico do aterro, sendo assim, uma forma de analisar a codigestão foi através da irrigação do efluente doméstico nos resíduos. Através dos resultados foi possível perceber que a irrigação com efluente de fossa séptica melhorou a produção de metano quando comparado ao controle sem pluviosidade, entretanto teve desempenho equitativo no período chuvoso sem irrigação com efluente. Já na comparação dos reatores que receberam efluente de fossa séptica e pluviosidade tiveram o desempenho inferior ao controle com pluviosidade. Sendo assim, percebe-se que a irrigação de efluente de fossa séptica no período seco aumenta a produção de metano em aterro sanitário, entretanto a irrigação, tanto com chorume bruto quanto com chorume concentrado, apresentou melhor resposta.

Ao estudarem os efeitos da codigestão do lodo de esgoto e resíduos orgânicos alimentares, Koch et al. (2016) constataram aumento no rendimento específico do metano em comparação à monodigestão do lodo, sugerindo um estímulo da geração de metano pela codigestão devido à relação mais favorável de C/N (Carbono/Nitrogênio) com a adição do resíduo alimentar. Ferreira (2017) também obtiveram um incremento na produção específica do metano ao inserir resíduo alimentar ao lodo de esgoto para codigestão anaeróbia em biodigestor em escala de bancada com correção do pH inicial para 7,5. Cheng et al. (2021) constataram aumento na produção de biogás através da codigestão de lodo com resíduos alimentares em um biorreator, podendo ser uma alternativa viável aos combustíveis fósseis. Y. Liu et al. (2021) obtiveram aumento da produção de biogás em um sistema de codigestão de lodo de esgoto e resíduos orgânicos em até sete vezes em comparação com o cenário de referência. Nair et al. (2014) tiveram aumento da produção de metano com a adição de lodo em várias concentrações de sal.

Pesquisas recentes sobre a codigestão anaeróbia de lodo de esgoto e resíduos alimentares constatam que em um futuro próximo a geração de metano através da codigestão pode ser uma fonte de energia promissora, mas estudos são necessários para tornar o processo economicamente viável (Mehariya et al., 2018).

Os resultados obtidos reforçam a relevância ambiental e tecnológica do estudo, uma vez que demonstram que a recirculação de chorume – bruto ou concentrado – constitui estratégia eficiente para intensificar a geração de metano e otimizar o funcionamento de biorreatores em aterros sanitários. Esses achados contribuem para o estado da arte ao comprovar, em ambiente experimental controlado e com simulação climática realista, que a ciclagem de líquidos percolados melhora as condições microbiológicas e físico-químicas do maciço, favorecendo etapas críticas da digestão anaeróbia. Além

disso, os resultados dialogam diretamente com os ODS 7, 11 e 13 ao evidenciar que práticas de gestão integrada de resíduos podem ampliar o aproveitamento energético do biogás, reduzir emissões de GEE e prolongar a vida útil dos aterros. A aplicação prática desse conhecimento pode apoiar a formulação de políticas públicas e de estratégias operacionais para a recirculação de chorume e uso de efluentes de fossa, contribuindo para o desenvolvimento de soluções replicáveis em outros aterros brasileiros, especialmente em regiões tropicais com forte variabilidade pluviométrica.

CONCLUSÃO

A pluviosidade, irrigação de efluente de fossa séptica no período seco e introdução de chorume tanto no período seco quanto no chuvoso aumentaram a produção de metano em aterro sanitário. A maior produção de metano ocorreu com a introdução do chorume nos períodos seco e chuvoso.

Devido à importância dos aterros sanitários para a disposição final de resíduos sólidos no Brasil e ao elevado potencial de geração de energia a partir do biogás produzido em unidades como o ASMOC, torna-se fundamental aprofundar os estudos sobre o comportamento desses sistemas e desenvolver técnicas e tecnologias capazes de ampliar a eficiência da produção de biogás. Os resultados deste trabalho demonstram que a recirculação de chorume — bruto ou concentrado — e a aplicação de efluente de fossa séptica constituem estratégias eficazes para intensificar a digestão anaeróbia, aumentar a produção de metano e promover maior estabilidade do processo. Esses avanços reforçam a necessidade de aprimoramento contínuo dos métodos de manejo de líquidos percolados nos aterros brasileiros, sobretudo considerando a diversidade climática do país e sua influência sobre a biodegradação dos resíduos.

Além de sua contribuição técnica, os achados evidenciam benefícios ambientais expressivos e apresentam forte aderência aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, especialmente os ODS 7 (Energia Limpa e Acessível), 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) e 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima). A intensificação da produção de biogás e seu uso como fonte complementar de energia contribuem para a mitigação de emissões de gases de efeito estufa, para a melhoria da gestão integrada de resíduos sólidos e para o fortalecimento de práticas alinhadas à economia circular. Dessa forma, o estudo não apenas responde à pergunta de pesquisa, mas oferece subsídios relevantes para políticas públicas e para o desenvolvimento de soluções replicáveis em outros aterros, ampliando o potencial de recuperação energética e de sustentabilidade ambiental no país.

DISPONIBILIDADE DE DADOS

Não aplicável.

REFERÊNCIAS

ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE, p. 51, 2020.

ABREMA. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023. Associação de Resíduos e Meio Ambiente, dez. 2023. Available at: . Accessed on: 6 jun. 2024

ABUSHAMMALA, M. F. M.; BASRI, N. E. A.; YOUNES, M. K. Seasonal Variation of Landfill Methane and Carbon Dioxide Emissions in a Tropical Climate. International Journal of Environmental Science and Development, v. 7, n. 8, p. 586–590, 2016.

BRASIL. ODS Brasil – Objetivo. Brasília, [s.d.]. Disponível em: https://odsbrasil.gov.br/objetivo/objetivo?n=1. Acesso em: 10 nov. 2025.

CANDIANI, G.; VIANA, E. Emissões fugitivas de metano em aterros sanitários. GEOUSP: Espaço e Tempo (Online), v. 21, n. 3, p. 845–857, 2017.

CARVALHO, M. L. F. DE et al. Impactos ambientais decorrentes do processo de instalação e operacionalização da Usina de Biogás GNR de Fortaleza (CE): a Educação Ambiental como via de transformação social. Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA), v. 16, n. 4, p. 227–247, 1 ago. 2021.

CHENG, H. et al. Bioenergy recovery from methanogenic co-digestion of food waste and sewage sludge by a high-solid anaerobic membrane bioreactor (AnMBR): mass balance and energy potential. Bioresource Technology, v. 326, n. December 2020, p. 124754, 2021.

COSTA, M. D. et al. Laboratory studies to evaluate the performance of landfill cover layers for the reduction of gases emissions and infiltrations. Engenharia Sanitaria e Ambiental, v. 23, n. 1, p. 77–90, 2018.

CROVADOR, M. I. C. et al. Estimativa Da Produção De Biogás Em Aterro Sanitário Subtropical Brasileiro. Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, v. 11, n. 1, p. 227, 2018.

DEGUEURCE, A.; TRÉMIER, A.; PEU, P. Dynamic effect of leachate recirculation on batch mode solid state anaerobic digestion: Influence of recirculated volume, leachate to substrate ratio and recirculation periodicity. Bioresource Technology, v. 216, p. 553–561, 2016.

FERREIRA, J. S. Codigestão de lodo de esgoto com resíduos urbanos e industriais visando ao aumento da produção de metano. [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.

GOLLAPALLI, M.; KOTA, S. H. Methane emissions from a landfill in north-east India: Performance of various landfill gas emission models. Environmental Pollution, v. 234, p. 174–180, 2018.

GOMES, A. C. C. DE O. et al. Correlação entre parâmetros climáticos e produção de metano em aterro sanitário no nordeste brasileiro. Caderno Pedagógico, v. 21, n. 4, p. e3558, 3 abr. 2024.

HE, H.; FEI, X. Scaling up laboratory column testing results to predict coupled methane generation and biological settlement in full-scale municipal solid waste landfills. Waste Management, v. 115, p. 25–35, set. 2020.

HUSSAIN, A.; FILIATRAULT, M.; GUIOT, S. R. Acidogenic digestion of food waste in a thermophilic leach bed reactor: Effect of pH and leachate recirculation rate on hydrolysis and volatile fatty acid production. Bioresource Technology, v. 245, n. August, p. 1–9, 2017.

KO, J. H.; YANG, F.; XU, Q. The impact of compaction and leachate recirculation on waste degradation in simulated landfills. Bioresource Technology, v. 211, p. 72–79, 2016.

KOCH, K. et al. Co-digestion of food waste in a municipal wastewater treatment plant: Comparison of batch tests and full-scale experiences. Waste Management, v. 47, p. 28–33, 2016.

LI, C. et al. Impact of continuous leachate recirculation during solid state anaerobic digestion of Miscanthus. Renewable Energy, v. 154, p. 38–45, 2020.

LIU, H. et al. The evaluation system of the sustainable development of municipal solid waste landfills and its application. Sustainability (Switzerland), v. 13, n. 3, p. 1–18, 2021a.

LIU, Y. et al. Optimizing the co-digestion supply chain of sewage sludge and food waste by the demand oriented biogas supplying mechanism. Waste Management and Research, 2021b.

LUCERNONI, F. et al. Sampling method for the determination of methane emissions from landfill surfaces. Waste Management and Research, v. 35, n. 10, p. 1034–1044, 2017.

MACHADO, S. L. et al. Biogas production in a tropical landfill: Long-term monitoring results and analysis of variables of influence. Environmental Monitoring and Assessment, v. 193, n. 8, 2021.

MAGALHÃES, G. V. V. Avaliação da biodigestão anaeróbia de residuos orgânicos: ensaios de potencial bioquimico de metano (bmp) e projeto piloto de um biodigestor em escala real. [s.l: s.n.].

MEHARIYA, S. et al. Co-digestion of food waste and sewage sludge for methane production: Current status and perspective. Bioresource Technology, v. 265, n. March, p. 519–531, 2018.

MEHRDAD, S. M. et al. Prediction of methane emission from landfills using machine learning models. Environmental Progress and Sustainable Energy, v. 40, n. 4, p. 1–10, 2021.

MORAIS, M. et al. Análise Físico-química e Microbiológica do Lixiviado do Aterro Sanitário no Município de Rio Branco – Acre. South American Journal, v. 7, n. 1, abr. 2020.

MOTA, F. S. et al. Características Climáticas E Variações Horárias Da Concentração Do Biogás Em Um Aterro Sanitário Localizado No Nordeste Do Brasil. Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online), p. 1–12, 2019.

NAIR, A. et al. Enhancing biogas production from anaerobic biodegradation of the organic fraction of municipal solid waste through leachate blending and recirculation. Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy, v. 32, n. 10, p. 939–946, 14 out. 2014.

NASCIMENTO, M. C. B. et al. Estado da arte dos aterros de resíduos sólidos urbanos que aproveitam o biogás para geração de energia elétrica e biometano no Brasil. Engenharia Sanitaria e Ambiental, v. 24, n. 1, p. 143–155, 2019.

OBULISAMY, P. K. et al. Anaerobic co-digestion of food waste and chemically enhanced primary-treated sludge under mesophilic and thermophilic conditions. Environmental Technology (United Kingdom), v. 37, n. 24, p. 3200–3207, 2016.

PARITOSH, K. et al. Food Waste to Energy: An Overview of Sustainable Approaches for Food Waste Management and Nutrient Recycling. BioMed Research InternationalHindawi Limited, , 2017.

ROMANA GOMES, É. et al. Influência de condições climáticas na composição do biogás gerado no lixão municipal de Juazeiro do Norte – CE. Revista DAE, v. 70, n. 237, p. 210–228, 5 jul. 2022.

SANTOS, G. O. et al. Otimização da captação de metano de um aterro sanitário do Nordeste brasileiro. Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB, v. 1, n. 47, p. 204, 2019.

SILVA. Avaliação da evolução do comportamento geomecânico de aterros sanitários com base na realização de ensaios de laboratório e de campo. Tese—Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2017.

SILVA, A. K. M.; MOTA, F. S. B. Caracterização dos resíduos sólidos urbanos: aproveitamento do biogás. 1a edição ed. Curitiba: Appris, 2019.

ZHANG, P. et al. Numerical model of leachate recirculation in bioreactor landfills with high kitchen waste content. Water (Switzerland), v. 13, n. 13, 2021.

Afiliação dos Autores

Gomes, A.C.C.O. - Professora da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Dourados (MS), Brasil.
Stefanutti, R. - Professor da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza (CE), Brasil
Siébra, H.M.A - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza (CE), Brasil
Sampaio, F.S.O. - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza (CE), Brasil

Contribuição dos Autores

Gomes, A.C.C.O. - O autor contribuiu para a elaboração, realização e manipulação dos dados e redação do texto.
Stefanutti, R. - O autor contribuiu para a elaboração e realização dos dados e para a redação.
Siébra, H.M.A - O autor contribuiu para a elaboração e realização dos dados.
Sampaio, F.S.O. - O autor contribuiu para a elaboração e realização dos dados.

Editores Responsáveis

Alexandra Maria Oliveira
Alexandre Queiroz Pereira
Eduardo Von Dentz