

Análise do processo biodegradativo em resíduos sólidos urbanos aterrados

• **Data de entrada:**
31/08/2018

• **Data de aprovação:**
10/10/2018


Analysis of the biodegradation process in urban solid waste ground

Kellianny Oliveira Aires^{1*} | Márcio Camargo de Melo² | Rui de Oliveira¹ | Veruschka Escarião Dessoles Monteiro²


DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2020.035>

ORCID ID

Aires KO  <https://orcid.org/0000-0003-0565-6132>

Melo MC  <https://orcid.org/0000-0001-6215-8100>

Oliveira R  <https://orcid.org/0000-0002-1972-9809>

Monteiro VED  <https://orcid.org/0000-0002-7714-5692>

Resumo

As dinâmicas envolvidas no processo de biodegradação dos resíduos sólidos urbanos (RSU) e na formação do biogás incluem diversos fatores físicos, químicos e microbiológicos. O objetivo deste artigo foi analisar a biodegradação de RSU aterrados em uma célula experimental. Os indicadores monitorados foram temperatura, umidade, pH, sólidos voláteis e quantificação dos micro-organismos aeróbios totais. O biogás foi mensurado por meio de um detector portátil que verificou as concentrações de CH₄, CO₂ e O₂. Os dados foram submetidos à estatística descritiva e, em seguida, foi gerada uma matriz de correlação de Pearson com as variáveis envolvidas no processo. O monitoramento da célula experimental verificou que os diversos indicadores analisados foram propícios à degradação da matéria orgânica, embora a produção de biogás não tenha sido potencializada em termos de metano.

Palavras-chave: Resíduos sólidos urbanos. Biodegradação. Célula experimental. Biogás.

Abstract

The dynamics involved in the biodegradation process of urban solid waste (USW) and in the formation of biogas include various physical, chemical and microbiological factors. The objective of this paper was to analyse the biodegradation of grounded USW in an experimental cell. The parameters monitored were temperature, moisture content, pH, volatile solids and quantification of total aerobic microorganisms. The biogas was measured by means of a portable detector that verified the concentrations of CH₄, CO₂ and O₂. The data were submitted to descriptive statistics and then a Pearson correlation matrix was generated with the variables involved in the process. The monitoring of the experimental cell verified that the several analysed parameters were favorable to the degradation of the organic matter, although the biogas production was not potentiated in terms of methane.

Keywords: Urban solid waste. Biodegradation. Experimental cell. Biogas.

¹ Universidade Estadual da Paraíba (UEPB) - Campina Grande - PB - Brasil.

² Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) - Campina Grande - PB - Brasil.

* **Autor correspondente:** kelliannyoaires@hotmail.com.

1 INTRODUÇÃO

A biodegradação da matéria orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) resulta na produção de subprodutos como lixiviado e biogás. Os processos de biodegradação de RSU em aterros sanitários se dividem em duas fases: aeróbia e anaeróbia. Assim que o resíduo é aterrado, um período de aclimação é observado, correspondendo à fase em que ocorre um acúmulo de umidade e oxigênio, que sustentam a atividade microbiana. Durante esse primeiro estágio de decomposição, o oxigênio presente nos espaços entre os resíduos recém-aterrados é rapidamente consumido por micro-organismos aeróbios, resultando na produção de dióxido de carbono, água e no aumento da temperatura. Uma fase de transição se instala na ausência do oxigênio molecular. Essa fase é breve em relação à decomposição anaeróbia, pois o oxigênio não é repostado, uma vez que os resíduos são cobertos por camadas de solo (TCHOBANOGLOUS et al., 1993; MCBEAN et al., 1995; KJELDEN et al., 2002).

Dessa forma, a biodegradação dos RSU requer a ação de comunidades microbianas variadas, consistindo de muitos grupos de estirpes facultativas e anaeróbias estritas (SZYŁAK-SZYDŁOWSKI; KORNIEŁOWICZ-KOWALSKA, 2012). Assim, ocorre uma sucessão de micro-organismos a depender da fase de biodegradação dos RSU.

Embora essa divisão em fases facilite o entendimento do processo biodegradativo e de seus impactos sobre as emissões gasosas, na prática, em aterros sanitários e células experimentais, essas fases não estão bem definidas. Isto porque sempre há o aterramento de resíduos novos, causando diferença na idade do material disposto, não sendo difícil encontrar as várias fases ocorrendo simultaneamente, como é o caso desse estudo.

Desta maneira, estudos em células experimentais proporcionam a compreensão do processo biodegradativo e possibilitam o monitoramento

das variações de massa existente no seu interior, uma vez que se trata de um sistema heterogêneo quanto às características físicas, químicas e biológicas onde diferentes micro-organismos coexistem e interagem para biodegradação da matéria orgânica e produção de biogás (YOUCAI et al., 2002). O biogás é uma mistura gasosa composta, principalmente, de metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), bem como vapor d'água e diversos gases traço (PERSSON et al., 2006).

De acordo com Ferreira et al. (2017), estudar os indicadores físico-químicos e microbiológicos e como eles interagem entre si é uma importante ferramenta, uma vez que estes podem aumentar o desempenho dos processos biodegradativos, elevar as concentrações de biogás e também reduzir a emissão de gases de efeito estufa liberados ao ambiente.

Nesse sentido, este trabalho propõe analisar a biodegradação de resíduos sólidos urbanos aterrados em uma célula experimental. Tais resultados visam a contribuir com o desenvolvimento de alternativas tecnológicas que permitam uma maior eficiência nos processos biodegradativos relacionados à produção de biogás e avaliar o comportamento dos RSU quanto a aspectos físicos, químicos e microbiológicos, além de contribuir para a proteção da saúde pública e para a redução dos impactos ambientais.

2 METODOLOGIA

2.1 Área de estudo e célula experimental

A pesquisa foi desenvolvida no município de Campina Grande, estado da Paraíba, Brasil. O clima da região é do tipo semiárido, com temperatura média anual de 22,4 °C e precipitação média de 875,4 mm (AES, 2013). A geração per capita de RSU é de 0,64 kg.hab⁻¹.dia⁻¹, resultando em uma produção em torno de 261 t.dia⁻¹ de resíduos (ECOSAM, 2014; ECOSOLO, 2016).

A célula experimental construída na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) possui 2,0 m de diâmetro interno, 3,5 m de altura e volume de 11 m³ (Fig. 1). Foi dotada de 12 pontos de coleta de RSU, em diferentes níveis de profundidade, denominados superficial, superior, intermediário e inferior, que são distribuídos ao longo do diâmetro e da altura da célula experimental.

Essa célula foi instrumentada com sistemas de drenagem de líquidos e gases, medidores de nível dos líquidos, de recalque superficial e profundo e de temperatura ao longo da profundidade. Nas camadas de base e de cobertura, foi utilizado um solo com características de baixa permeabilidade (10^{-7}m.s^{-1}) para evitar o fluxo excessivo de líquidos e gases.

Visando a obter amostras representativas dos RSU de Campina Grande-PB, a célula experimental foi preenchida com resíduos coletados, em locais selecionados a partir de um planejam-

to estatístico, com nível de confiança de 95%. A rota selecionada para a pesquisa compreendeu doze bairros do município, totalizando aproximadamente 8,5 toneladas de RSU. O procedimento de coleta seguiu a NBR 10007 (ABNT, 2004) - Amostragem de Resíduos.

A célula experimental preenchida no ano de 2011 apresentou uma redução de 50% na massa de RSU aterrados, devido aos recalques acentuados. Dessa forma, no ano de 2015 foi verificada a necessidade de manutenção da célula experimental, por meio de reparos construtivos, com a inserção de nova instrumentação, e uma camada de RSU foi reposta, sendo esse procedimento denominado retroalimentação. Dessa forma, a distribuição dos resíduos na célula experimental consiste de resíduos de 2011 e 2015. Vale ressaltar que os resultados contemplados para esta pesquisa representam o monitoramento da célula experimental apenas após o processo de retroalimentação.

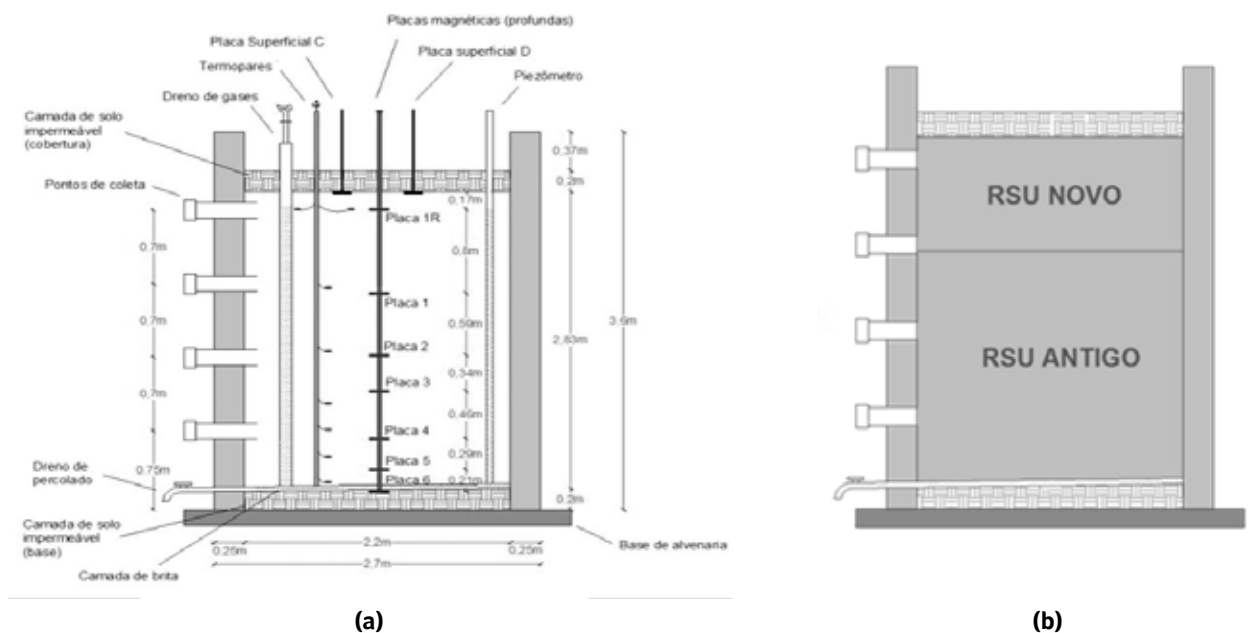


Figura 1 - (a) Instrumentação da célula experimental; (b) Configuração após a retroalimentação com RSU.

2.2 Composição gravimétrica e volumétrica dos RSU

Para determinar a composição gravimétrica e volumétrica dos RSU, a metodologia seguiu a Réseau Européen de Mesures pour la Caractérisation des Ordures Ménagères (REMECOM), descrita no Caderno Técnico Lipor (2000) para a triagem de resíduos.

Inicialmente, os resíduos coletados foram homogeneizados e quarteados; em seguida, retiraram-se 140 kg da pilha resultante do quarteamento dos RSU. Posteriormente, os resíduos foram pesados e separados em frações de plásticos, metais, vidros, papel e papelão, matéria orgânica, compósitos (material formado a partir da mistura de 2 ou mais constituintes), têxteis sanitários (papel higiênico, fraldas descartáveis, absorventes, entre outros) e outros resíduos (madeira, tecido, couro, borracha). Para determinar o percentual de cada componente presente nos resíduos sólidos urbanos foi utilizada a Eq. 1.

$$CG = \frac{P_{FS}}{P_T} \quad (1)$$

Onde:

CG = composição gravimétrica (%);

Para exprimir a CG em %, a relação entre os pesos deve ser multiplicada por 100.

PFS = peso de cada fração segregada (kg);

PT = peso total dos resíduos sólidos segregados (kg).

Após a composição gravimétrica, realizou-se a composição volumétrica com o mesmo material separado e classificado pela gravimetria, no qual foram feitas leituras de volumes dos resíduos soltos, utilizando a Eq. 2. Em seguida, os resíduos foram compactados estaticamente, simulando a compactação ocorrida no interior da célula experimental, com o auxílio de um soquete de peso igual a 49 kg, obtendo-se a composição volumétrica dos resíduos compactados.

$$V = \frac{\pi h (R^2 + Rr + r^2)}{3} \quad (2)$$

Onde:

V = volume dos resíduos;

h = altura encontrada;

R = raio maior;

r = raio menor.

2.3 Monitoramento dos indicadores microbiológico e físico-químico

Os RSU foram extraídos pelos pontos laterais de coleta da célula experimental (Fig. 1) em diferentes profundidades (2,70; 2,0; 1,35 e 0,7 m); na coleta mensal foi retirado 0,5 kg de RSU. A Tabela 1 apresenta as metodologias utilizadas para os indicadores microbiológico e físico-químico. Cabe destacar que ensaios de quantificação de bactérias anaeróbias totais são importantes para a análise do processo biodegradativo. Entretanto, devido a problemas técnicos e operacionais, não foi possível a determinação desse grupo de micro-organismos.

Tabela 1 - Metodologia dos indicadores microbiológico e físico-químico.

Indicador	Variáveis	Unidade	Método	Referência
Microbiológico	Quantificação de bactérias aeróbias totais	UFC/mL	Spread-Plate	APHA/AWWA/WEF, 2012
Físico-químico	pH	-	Potenciométrico	APHA/AWWA/WEF, 2012; SILVA; OLIVEIRA, 2001
	Sólidos voláteis e Umidade	(%)	Gravimétrico - Ignição e secagem a 500 ± 50 °C	WHO (1979)
	Temperatura	°C	Termopar tipo K, com leitura direta em termômetro digital portátil	Instruções do fabricante, modelo MT-600, faixa de medição -100 a 1300 °C

2.4 Monitoramento do biogás

O monitoramento do biogás na célula experimental foi realizado com um detector portátil e automático de gases com infravermelho, denominado Dräger, modelo X-am 7000. O equipamento faz a sucção do gás e direciona o fluxo para os sensores de leitura entre 180 e 300 segundos, permitindo medições diretas no dreno de gases, em que foram verificadas concentrações de CH_4 e CO_2 de 0-100% e para O_2 de 0-25%.

2.5 Tratamento estatístico dos dados

Os indicadores microbiológico e físico-químico foram tabulados e submetidos à estatística descritiva, visando a auxiliar na análise do comportamento dos dados. Os parâmetros descritivos avaliados foram: máximo, mínimo, média, desvio padrão e coeficiente de variação. Em seguida, foi gerada uma matriz de correlação de Pearson com as variáveis envolvidas no processo: temperatura interna e ambiente, CO_2 , CH_4 , O_2 , pH, umidade, sólidos voláteis, tempo e quantificação de aeróbios totais, verificando o nível de correlação entre duas ou mais variáveis. Para o processamento dos dados foi utilizado o Microsoft Excel 2010.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Composição gravimétrica e volumétrica dos RSU

A composição gravimétrica permite o conhecimento dos RSU quanto à sua quantidade em

peso, que é expressa em percentual e identifica a presença de cada componente. Já a composição volumétrica representa o espaço físico ocupado por cada fração de resíduo no interior de uma célula após o aterramento (AIRES et al., 2017).

A composição física dos resíduos depende do crescimento populacional, dos padrões de consumo, dos hábitos alimentares, da quantidade de resíduos, do poder aquisitivo, da existência de programas de reciclagem e compostagem e das condições climáticas locais (OGWUELEKA, 2013).

Na Fig. 2 está representada em percentuais a composição gravimétrica e volumétrica dos RSU soltos e compactados. Analisando a composição dos RSU de Campina Grande-PB, pode-se observar que 46,5% são de matéria orgânica putrescível, representada por restos de alimentos, particularmente cascas, frutas e legumes. Entre os componentes potencialmente recicláveis dos RSU, os plásticos apareceram com maior valor percentual (16,7%), seguidos por papel e papelão (11,1%), vidros (2,5%) e metais (0,6%), sendo que, quando dispostos em excesso nos aterros sanitários, esses materiais podem dificultar os processos biodegradativos. Foi verificado ainda 2,4% para os compósitos, 7,8% para os têxteis sanitários e 12,4% para os outros resíduos, que não foram classificados nas categorias anteriormente citadas.

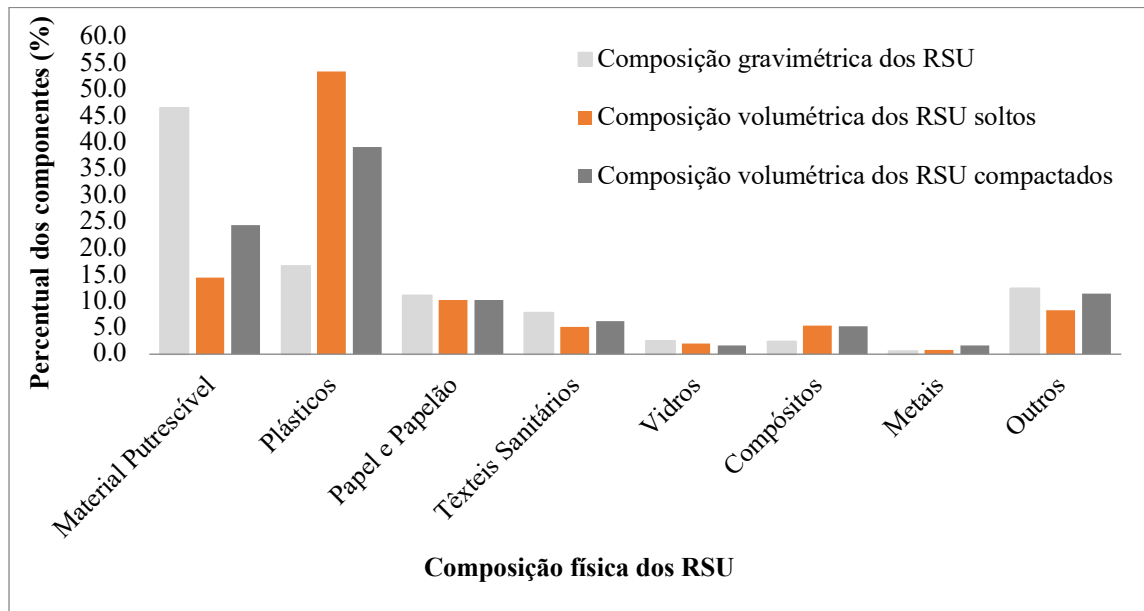


Figura 2 - Composição gravimétrica e volumétrica dos RSU (soltos e compactados) dos RSU.

Os percentuais de matéria orgânica obtidos apresentaram-se abaixo da média brasileira, que se encontra na faixa de 50 a 55% (COLMANETTI et al., 2000). Os RSU no Brasil possuem uma das taxas mais elevadas de detritos orgânicos em sua composição, abrangendo uma série de micro-organismos que encontram uma gama de substratos disponíveis para utilizar em seu metabolismo no processo biodegradativo (MARIANO; MOURA, 2009).

Apesar de altos percentuais de matéria orgânica serem vistos como algo negativo em aterros sanitários, este é o principal componente responsável pela formação do biogás. Os resultados da composição física dos resíduos de Campina Grande-PB mostraram elevados percentuais de material putrescível, sugerindo a viabilidade, do ponto de vista de tratamento desse tipo de resíduo, por meio de tecnologias como a compostagem e o aproveitamento energético do biogás (BASSIN; ROSADO 2012).

Com relação aos percentuais de papel e papelão, foi verificado que estes estão próximos à média

nacional, que é de 13%. Metais e vidros são materiais que apresentam elevada estabilidade química, entretanto os resultados mostraram baixos percentuais desses componentes. Vale ressaltar que alumínio, papel, plástico e vidro são os quatro materiais que apresentam os maiores índices de reciclagem pós-consumo no Brasil (ABRELPE, 2016). Destaca-se que o município de Campina Grande-PB, atualmente, não dispõe de coleta seletiva, o que sugere uma maior diversidade de micro-organismos na massa de RSU aterrada para realização do processo biodegradativo.

A Fig. 2 expressa também os percentuais volumétricos dos RSU soltos e compactados, sendo observado que a quantidade de matéria orgânica aumentou de 14,5% para 24,4% após a compactação, devido à redução de volume da maioria dos componentes dos RSU.

A quantidade de plásticos apresentou a maior variação em termos volumétricos e representou 16,7% em peso dos resíduos, que ocuparam 53,5% do volume após a compactação. A diferença desses valores mostra a ausência de pro-

gramas de gestão integrada dos resíduos sólidos no município de Campina Grande-PB, uma vez que apresentaram índices volumétricos dos resíduos compactados e soltos elevados, de 39,2 e 53,5%, respectivamente.

Embora os plásticos sejam materiais leves, em grandes quantidades ocupam um volume considerável, podendo interferir nos processos de compactação dos resíduos sólidos em aterros sanitários, reduzindo a área disponível e diminuindo a vida útil. Ao serem dispostos no solo e aterrados, os plásticos também podem prejudicar a decomposição dos materiais putrescíveis, porque podem criar camadas impermeáveis que afetam as trocas de líquidos e gases produzidos no processo de biodegradação da matéria orgânica.

A quantidade de plásticos em termos volumétricos demonstra o potencial para o processo de reciclagem desses materiais. Logo, a triagem dos

plásticos é de extrema importância e deve ser valorizada para que as condições do aterro sanitário sejam melhoradas.

De acordo com Silva et al. (2011), os plásticos possuem um elevado poder calorífico, e por isso são considerados um componente importante no processo biodegradativo, favorecendo a produção de biogás e seu consequente aproveitamento energético. Os demais componentes que foram caracterizados tiveram percentuais menores, tanto em relação ao peso como ao volume.

3.2 Aeróbios totais e temperatura

A Fig. 3 ilustra a quantificação das bactérias aeróbias totais e o comportamento da temperatura ambiente e interna da célula experimental em função do tempo de aterramento dos RSU.

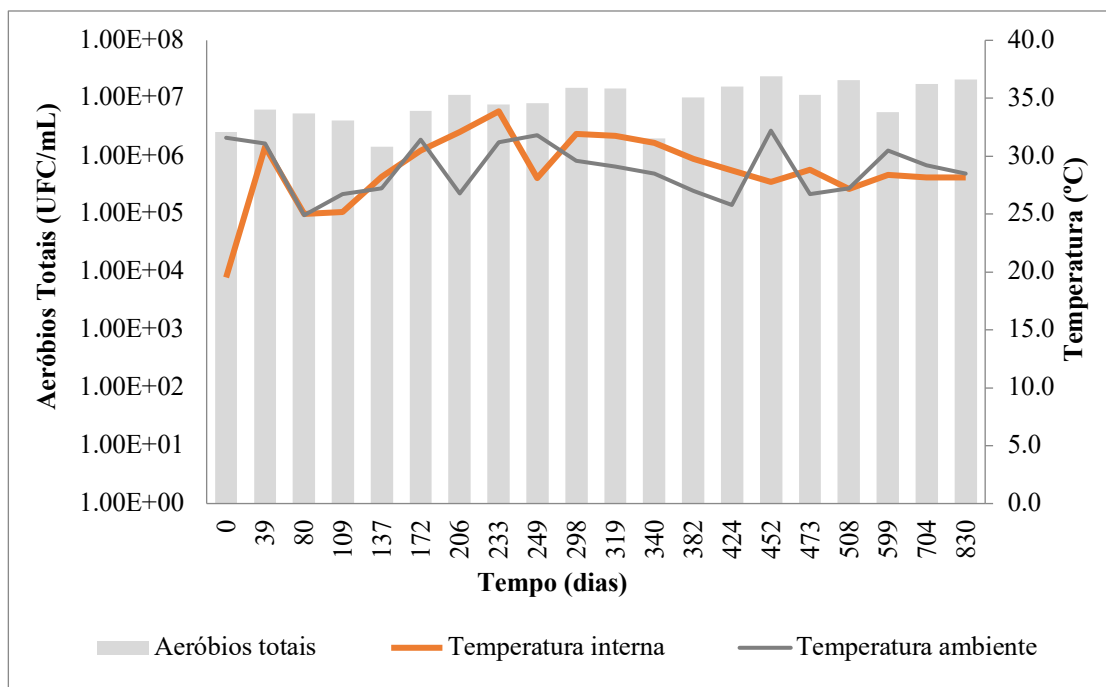


Figura 3 – Aeróbios totais e temperatura ao longo do tempo de aterramento dos RSU.

Foi observado no interior da massa de RSU que a temperatura oscilou de 19,5 a 33,8 °C, com média de 28,7 °C, enquanto no ambiente externo as temperaturas variaram de 24,9 a 32,2 °C, com média de 28,8 °C. O processo de retroalimentação proporcionou uma diminuição na temperatura interna na massa de resíduos (dia 0), justificada pela retirada da camada de cobertura de solo compactado, que refletiu em temperaturas distintas. Após esse período, as temperaturas aumentaram, indicando a ocorrência de micro-organismos aeróbios que, ao degradarem a matéria orgânica a compostos mais simples como H₂O e CO₂, liberam calor.

As concentrações de bactérias aeróbias totais ao longo de todo o período de monitoramento variaram de 106 a 108 Unidades Formadoras de Colônias (UFC/mL), sendo um indicativo da presença de micro-organismos facultativos, que sobrevivem tanto na presença como na ausência do oxigênio molecular.

Diferentemente do que se esperava em um ambiente que simula um aterro sanitário, em que a maior parte dos processos de degradação ocorre em condições anaeróbias, a célula experimental de RSU apresentou características diferenciadas com a presença de bactérias aeróbias, em todos os níveis (superficial, superior, intermediário e inferior). Esse comportamento pode estar atribuído à altura da massa de RSU, à entrada de ar pelos pontos laterais de coleta de RSU da célula experimental e às fissuras na camada de cobertura de solo compactado, que não permitem um ambiente com condições totalmente controladas de anaerobiose.

A presença de micro-organismos aeróbios, quimiorganotróficos ou aeróbios facultativos é característica das fases de hidrólise e acidogênese do processo biodegradativo, uma vez que estes apresentam necessidades nutricionais simples e crescem quimiorganotroficamente em pH neu-

tro e temperaturas na faixa mesofílica, o que foi verificado na maior parte do monitoramento do sistema experimental desta pesquisa, em que as alterações foram relativamente pequenas para esses indicadores.

Resultados semelhantes aos dessa pesquisa foram obtidos por Aires (2018) e Silva et al. (2015), que encontraram bactérias aeróbias em todas as camadas da célula experimental, mesmo naquelas mais profundas, onde teoricamente deveria haver menor quantidade de oxigênio. Monteiro et al. (2006) relataram a presença de bactérias aeróbias totais nos RSU de células cobertas há 5 anos no Aterro da Muribeca, em Recife-PE, associando este fato à entrada de oxigênio pelos sistemas de cobertura e drenagem de gases.

Para Aires (2018), micro-organismos aeróbios sofrem menor influência de fatores externos quando comparados aos anaeróbios, visto que são menos sensíveis a mudanças ambientais, fato que permite pequenas variações na contagem de suas colônias ao longo do tempo.

Na maior parte do monitoramento, a temperatura ambiente ficou abaixo da temperatura interna. Entre os dias 39 e 172, foi observado um equilíbrio entre a temperatura média interna e a temperatura ambiente. A temperatura média interna apresentou-se com limites aceitáveis para a degradação microbiana dos resíduos sólidos, ficando na faixa mesofílica, considerada ótima para produção de biogás. Segundo Tchobanoglous et al. (1993), para uma maior eficiência do processo de digestão anaeróbia, os níveis de temperatura ótima são os mesofílicos, de 20 a 40°C e os termofílicos de 50 a 55°C.

Para Igoni et al. (2008), a temperatura mesofílica é vital, mas a estabilização ao longo do tempo é preponderante, uma vez que variações de temperatura, abaixo ou acima da faixa considerada ótima, poderiam alterar de forma negativa a eficiência do processo biodegradativo, sob o risco

de perda nas populações microbianas. Dessa forma, a temperatura apresentou comportamento favorável ao processo biodegradativo e ao desenvolvimento de bactérias aeróbias totais.

3.3 Umidade e sólidos voláteis

Para Tchobanoglous et al. (1993), a umidade constitui-se em um dos fatores mais importantes no processo de biodegradação de RSU, pois disponibiliza o teor de água necessário para que ocorram as reações químicas e a consequente

degradação da matéria orgânica, estando também relacionado à composição física e ao modo de coleta dos RSU, bem como às condições meteorológicas. Os sólidos voláteis fazem alusão à biodegradabilidade da fração orgânica de RSU; assim, quanto maior o teor de sólidos voláteis, maior a quantidade de matéria orgânica a ser decomposta e, conseqüentemente, maior será o potencial de produção de biogás (GONZALEZ-FERNANDEZ et al., 2008). A Fig. 4 apresenta o comportamento da umidade e dos sólidos voláteis na célula experimental de RSU.

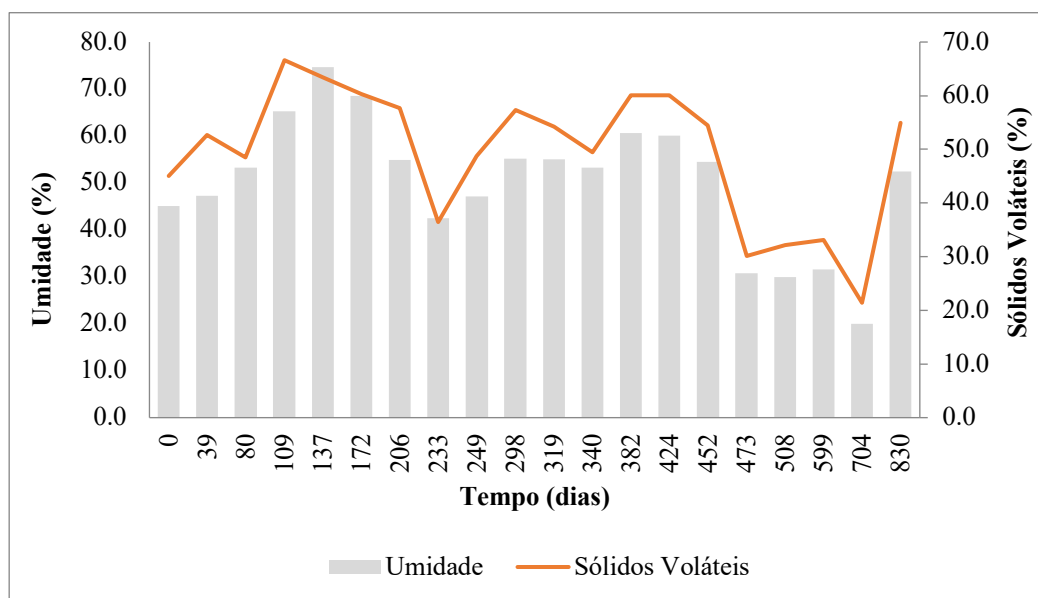


Figura 4 – Umidade e sólidos voláteis ao longo do tempo de aterramento dos RSU.

De acordo com a Fig. 4, observa-se que à medida em que os sólidos voláteis aumentam, também se eleva a umidade. Mudanças significativas nesses indicadores foram observadas, com percentuais entre 20 e 74% ao longo do tempo de monitoramento.

O percentual de sólidos voláteis e de umidade acima de 40%, na maior parte do monitoramento, pode ser atribuído à quantidade de matéria orgânica, 46,5% (Fig. 2) após a retroalimenta-

ção, no interior da célula experimental de RSU. Além do mais, os resíduos de Campina Grande-PB são caracterizados na fonte geradora como resíduos úmidos, antes mesmo do aterramento (ECOSOLO, 2016). Um fato a ser considerado é que a umidade tanto pode estimular como inibir a biodegradação dos resíduos, uma vez que infiltrações excessivas podem diminuir a ação dos micro-organismos.

Os teores máximos de umidade e sólidos voláteis encontrados foram nos dias de monitoramento 109, 137, 172, entre os meses de junho e agosto de 2015, que correspondem ao período de maior precipitação no município de Campina Grande-PB, atingindo 200 mm. Valores acima de 60% de umidade também foram encontrados nos dias 382 e 424 referentes aos meses de maio e junho de 2016, com índices pluviométricos acima de 80 mm. Cabe destacar que a água infiltrada através das camadas de RSU pode carrear nutrientes e compostos químicos e elevar as concentrações de oxigênio, influenciando a atividade microbiana e a velocidade da biodegradação (AIRES, 2018).

Nos últimos meses de monitoramento, especialmente entre os dias 473 e 704, foi verificada uma redução nos teores de umidade e sólidos voláteis. Isso pode ter ocorrido em função dos processos biodegradativos avançados e da redução da matéria orgânica no interior da célula experimental, que pode acumular materiais recalcitrantes, não sendo facilmente assimilados pelas comunidades microbianas existentes na massa de resíduos. Por outro lado, no monitoramento referente ao dia 830 esses teores aumentam, possivelmente devido à heterogeneidade dos RSU aterrados, ao índice de precipitação nesse período, que foi de 194 mm, e ao processo de lixiviação, sendo essa medição referente ao mês de julho de 2017.

Pode-se afirmar que a matéria orgânica estava sendo degradada ao longo do tempo de aterramento, uma vez que ocorreu a diminuição no percentual dos sólidos voláteis de 45%. Ribeiro et al. (2016) obtiveram redução de sólidos voláteis no monitoramento de um biorreator com RSU de 60 a 95%. Palmisano e Barlaz (1996) reportaram valores de redução de sólidos voláteis na faixa de 35 a 60%. Kelly (2002) registrou uma re-

dução nos sólidos voláteis de 58%, para RSU depositados em células de aterros com 730 dias de monitoramento. Esse mesmo autor ainda afirma que amostras de resíduos com concentrações de sólidos voláteis menores do que 20% já podem ser consideradas estabilizadas, o que implica em baixos teores de matéria orgânica.

A redução nos sólidos voláteis indica que a degradação no interior da célula experimental ocorreu, uma vez que a matéria orgânica estava sendo consumida pelas comunidades microbianas. Cabe destacar que, embora os sólidos voláteis e a umidade tenham diminuído, eles apresentaram grande variabilidade ao longo do tempo. Esse comportamento, contudo, não limitou o desenvolvimento dos processos biodegradativos e a produção de biogás pela atividade microbiana.

3.4 Concentração de gases e pH

A variação do pH no interior da massa de resíduos afeta o processo de digestão anaeróbia, uma vez que está relacionado aos produtos formados a partir das fases de biodegradação dos resíduos sólidos, podendo as oscilações desse indicador acelerar ou retardar a produção de biogás. Com o monitoramento dos gases produzidos durante o processo biodegradativo pode-se verificar a estabilidade dos resíduos orgânicos, analisar as fases de degradação dos resíduos sólidos e indicar o potencial de poluição ambiental. A Fig. 5 ilustra as concentrações dos gases resultantes da decomposição da matéria orgânica, em termos dos gases metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) e oxigênio (O_2) e o pH no interior da célula experimental de RSU.

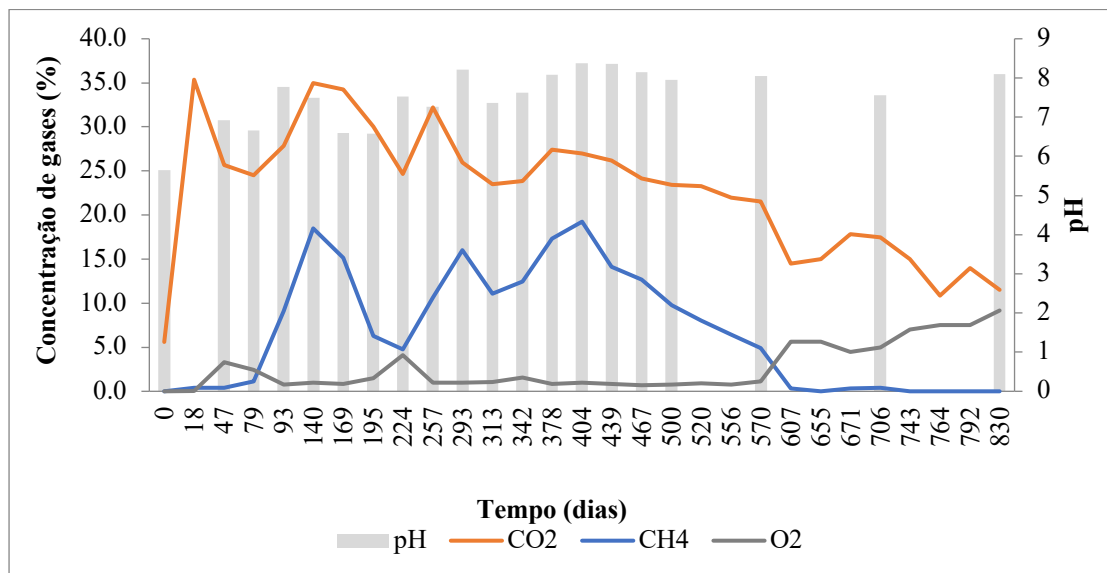


Figura 5 - Concentração de CH₄, CO₂, O₂ e pH ao longo do tempo de aterramento dos RSU.

As concentrações dos gases monitorados na célula experimental variaram de 0 a 19,2% para CH₄, com média de 8,3%; para o CO₂ oscilaram de 5,6 a 35,3%, com média de 24,4%, e para o oxigênio, de 0 a 9,1%, com média de 1,9 %. Já o pH oscilou de 5,6 a 8,4, com média de 7,4. Segundo Chernicharo (2000), valores de pH abaixo de 6,0 e acima de 8,3 devem ser evitados, uma vez que podem inibir a atividade das arqueas metanogênicas. Para Kjeldsen et al. (2002), para uma boa biodegradabilidade dos RSU, o pH deve estar compreendido entre 4,5 e 9,0.

Conforme ilustrado na Fig. 5, no início do monitoramento foi observado um percentual de 35% de CO₂, que, devido ao processo de retroalimentação, favoreceu maior disponibilidade de nutrientes e umidade à célula experimental. As características iniciais ácidas do pH são um indicativo da presença de bactérias fermentadoras, hidrolíticas e acidogênicas, que promovem o acúmulo de ácidos graxos voláteis e elevam as concentrações de CO₂. Segundo Tchobanoglous et al. (1993), as bactérias produtoras de ácidos têm um crescimento ótimo na faixa de pH entre

5,0 e 6,5; para este estudo o pH mínimo foi de 5,6, estando no limite considerado ideal.

Com relação às concentrações de O₂ na célula experimental, pode-se dizer que permaneceram, na maioria do período de monitoramento, em baixos percentuais (< 5%). No dia 224 verificou-se que o aumento da concentração de O₂ correspondeu a uma redução de CH₄, indicando o efeito inibitório do oxigênio na atividade metanogênica. Elevados percentuais de oxigênio podem ser prejudiciais ao sistema; contudo, pequenas concentrações podem ser benéficas, desde que não afetem o metabolismo dos micro-organismos anaeróbios estritos (AIRES et al., 2017).

As concentrações de CH₄ tiveram início após 93 dias de aterramento dos RSU, quando o pH chegou a 7,7. No processo de digestão anaeróbia, o desenvolvimento ótimo das arqueas metanogênicas ocorre em uma faixa de pH relativamente estreita de (6,5 a 7,5), porém estes micro-organismos também conseguem estabilidade para a formação de biogás em um intervalo de pH entre 6 e 8; quando o pH sofre variações fora deste intervalo, a produção de biogás, sobretudo do

metano, pode ser inibida (FERREIRA et al., 2017; ANGELIDAKI; SANDERS, 2004). Destaca-se que as baixas concentrações de metano podem ainda estar associadas às dimensões da célula experimental, que apresenta maior área superficial quando comparada ao volume, o que pode facilitar a troca de energia e matéria com o meio ambiente (MELO et al., 2016).

O pH pode ser um indicador para a metanogênese. De acordo com a Fig. 5, após 224 dias de monitoramento, o pH oscilou de neutro a básico (7,2 a 8,3), condição indispensável para o bom desempenho da atividade metanogênica. Em relação às fases de degradação, a elevação do pH indica a transição para a fase metanogênica. Tal fato implica na produção de bicarbonato pelas arqueas metanogênicas, que convertem ácidos e hidrogênio, presentes no meio, em metano, aumentando assim o pH. Para Igoni et al. (2008), o crescimento microbiano tem influência direta na concentração de biogás, uma vez que a biodegradação dos RSU é inibida pela acidez excessiva.

Foi verificado que as concentrações de CO_2 prevaleceram sobre as de CH_4 e, embora o processo de retroalimentação tenha melhorado o desempenho da célula experimental, não houve a predominância da metanogênese. Segundo Tchobanoglous et al. (1993), em aterros sanitários, a fase metanogênica apresenta percentuais volumétricos médios de 40% para CO_2 e 55% para CH_4 . Essa fase é longa e pode perdurar durante toda a vida útil do aterro.

Mesmo sendo identificados valores de pH na faixa recomendada, esse fato não foi suficiente para contribuir com uma elevada produção de CH_4 , o que pode estar associado também à heterogeneidade dos resíduos ou devido aos fatores ambientais que as arqueas metanogênicas exigem para seu desenvolvimento, uma vez que, esses micro-organismos são anaeróbios estritos.

Embora a evolução do pH concorra para o estabelecimento das fases de biodegradação dos resíduos, essas fases não puderam ser definidas com exatidão, visto que a célula experimental é composta por RSU de diferentes idades, podendo encontrar o estabelecimento de mais de uma fase ao mesmo tempo, assim como ocorre comumente em aterros sanitários. Vale ressaltar que a partir de 570 dias as concentrações de CH_4 e CO_2 se reduziram drasticamente, enquanto as de O_2 aumentaram, o que pode ter ocorrido em virtude da estabilização dos RSU.

3.5 Análises estatísticas

A Tabela 2 apresenta os valores máximo, mínimo, média, desvio padrão e coeficiente de variação dos indicadores monitorados na célula experimental. A partir da análise de dispersão dos dados, percebe-se a ocorrência de uma alta variabilidade nos valores encontrados, indicada pelo coeficiente de variação.

Segundo Fonseca; Martins (1996), um coeficiente menor ou igual a 15% corresponde a uma baixa dispersão. Se o coeficiente de variação estiver entre 15 e 30% haverá uma média dispersão, e se for maior do que 30%, uma alta dispersão.

De acordo com os dados da Tabela 2, foi observado que apenas os indicadores temperatura interna e externa e pH apresentaram coeficiente de variação inferior a 15%, que indica a alta homogeneidade dos dados. Com média dispersão foram identificados os indicadores umidade e sólidos voláteis. Todos os demais indicadores monitorados na célula experimental apresentaram dispersão alta, indicando elevada variabilidade dos dados. Essa discrepância pode estar associada à heterogeneidade dos RSU, pois sua composição variável não proporciona a obtenção de dados homogêneos, bem como as condições ambientais às quais a célula experimental está submetida.

Tabela 2 - Máximo, mínimo, média, desvio padrão e coeficiente de variação dos indicadores monitorados na célula experimental.

DIAS	T. ambiente	T. interna	Aeróbios	pH	Umidade	Sól. Volát.	CO ₂	CH ₄	O ₂
0	31,6	19,5	2,63E+06	5,6	45,1	45,1	5,6	0	0
39	31,1	30,8	6,29E+06	6,9	47,2	52,7	35,36	0,37	0,04
80	24,9	25	5,52E+06	6,6	53,2	48,5	25,67	0,43	3,3
109	26,7	25	4,14E+06	7,7	65,2	66,6	24,5	1,1	2,43
137	27,2	28,2	1,46E+06	7,5	74,7	63,4	27,83	9,13	0,77
172	31,4	30,5	6,11E+06	6,6	68,5	60,3	35	18,5	0,95
206	26,8	32	1,14E+07	6,6	54,9	57,7	34,25	15,18	0,85
233	31,2	33,8	7,83E+06	7,5	42,4	36,4	30	6,3	1,5
249	31,8	28	8,19E+06	7,2	47,1	48,8	32,2	10,64	0,98
298	29,6	31,9	1,51E+07	8,2	55,2	57,3	26	16	1
319	29,1	31,7	1,47E+07	7,4	55,1	54,3	23,5	11,1	1,07
340	28,5	31,2	2,04E+06	7,6	53,3	49,4	27,4	17,32	0,86
382	27	29,8	1,03E+07	8	60,7	60,1	27	19,25	0,95
424	25,8	28,7	1,60E+07	8,4	60,0	60,0	26,2	14,12	0,84
452	32,2	27,7	2,41E+07	8,3	54,5	54,4	24,13	12,7	0,7
473	26,7	28,8	1,15E+07	8,2	30,7	30,2	23,4	9,8	0,76
508	27,2	27,2	2,04E+07	7,9	29,9	32,2	21,5	4,9	1,1
599	30,5	28,4	5,68E+06	8	31,5	33,2	17,5	0,4	5
704	29,2	28,2	1,78E+07	7,5	20,0	21,4	10,83	0	7,53
830	28,5	28,2	2,13E+07	8,1	52,4	55,0	11,5	0	9,17
Máximo	32,2	33,8	2,41E+07	8,4	74,69	66,62	35,36	19,25	9,17
Mínimo	24,9	19,5	1,46E+06	5,6	20,01	21,41	5,6	0	0
Média	28,85	28,73	1,06E+07	7,49	50,08	49,35	24,47	8,362	1,99
Desvio padrão	2,19	3,06	6,62E+06	0,71	13,47	12,17	7,81	6,87	2,40
Coef. Var. (%)	7,57	10,67	6,23E+01	9,44	26,91	24,67	31,90	82,10	120,80

A baixa dispersão observada na análise dos resultados de temperatura e pH demonstrou uma circunstância esperada, em função das pequenas variações constatadas durante o monitoramento. A temperatura ambiente apresentou o menor coeficiente de variação (7,5%), mantendo-se esse indicador na faixa mesofílica, tanto no ambiente interno como no externo à célula experimental.

No caso do pH, o baixo coeficiente de variação (9,44%) das medições oscilou próximo ao pH 7,0, o qual representa resultados positivos e significativos para a comunidade microbiana, uma vez que o pH é um dos fatores mais importantes para o entendimento das dinâmicas e alterações ocorridas no interior da célula experimental.

Os sólidos voláteis apresentaram valores diferenciados de amplitude e dados com média dispersão, com tendência à redução, visto que, à medida em que o tempo passa, esse indicador

converge para percentuais menores em função do consumo da matéria orgânica, principalmente pelas bactérias e arqueas metanogênicas.

A umidade associada a fatores climáticos e a degradação da fração orgânica dos RSU apresentaram média dispersão; entretanto, os percentuais monitorados mostraram-se dentro da faixa adequada para desenvolvimento das comunidades microbianas, favorecendo o processo de biodegradação e a produção de biogás.

As bactérias aeróbias mostraram coeficiente de variação elevado, de 62%, não apresentando comportamento tendencial, visto que foram observadas quantificações dessas bactérias durante todo o monitoramento.

De maneira geral, todos os gases monitorados (CH₄, CO₂ e O₂) apresentaram coeficientes de variação maior do que 30%. Tal fato está associado

às diferentes fases de biodegradação dos RSU, que acarretaram em concentrações diferenciadas durante o processo; às diferentes idades de disposição dos RSU na célula experimental; à composição física dos resíduos aterrados e ao comportamento dos indicadores físico-químicos ao longo do monitoramento.

Diante dos resultados obtidos, pode-se afirmar que é possível ocorrer o estabelecimento de mais de uma fase biodegradativa ao mesmo tempo, gerando diferenças entre as concentrações máximas e mínimas de cada componente do biogás. Assim, a célula experimental de RSU reflete o comportamento de um aterro sanitário em escala real, em que as condições são conhecidas. Entretanto, não são totalmente controladas.

3.6 Matriz correlação

A análise da correlação amostral estuda o comportamento conjunto de duas variáveis distin-

tas ao medir o grau de associação entre elas. De acordo com Hair Jr. et al. (2009), os coeficientes de correlação podem variar de -1,0 a 1,0. Na prática, quanto mais próximo de 1,0 (independentemente do sinal), maior é o grau de dependência estatística entre as variáveis (SILVA, 2016).

De acordo com Dancey; Reidy (2006), correlações entre 0,10 e 0,30 podem ser consideradas fracas; entre 0,40 e 0,60 podem ser consideradas moderadas; e valores entre 0,70 e 1,0 podem ser interpretados como fortes. Neste trabalho, foram consideradas e discutidas apenas correlações significativas moderadas e fortes, ou seja, aquelas que apresentaram valores $\pm 0,40$.

A significância estatística do coeficiente de correlação é determinada por sua comparação com o coeficiente crítico. Na Tabela 3 estão apresentados os dados da matriz de correlação.

Tabela 3 - Matriz de correlação.

	DIAS	T ambiente	T interna	Aeróbios	pH	Umidade	Sól. Volát.	CO ₂	CH ₄	O ₂
DIAS	1,00									
T ambiente	-0,06	1,00								
T interna	0,16	0,07	1,00							
Aeróbios	0,69	0,00	0,16	1,00						
pH	0,67	-0,22	0,36	0,54	1,00					
Umidade	-0,49	-0,16	0,08	-0,29	-0,09	1,00				
Sól. Volát.	-0,44	-0,15	0,06	-0,18	-0,05	0,96	1,00			
CO ₂	-0,47	-0,03	0,62	-0,25	-0,01	0,46	0,44	1,00		
CH ₄	-0,08	-0,04	0,53	0,06	0,22	0,47	0,43	0,56	1,00	
O ₂	0,70	-0,09	-0,09	0,33	0,22	-0,35	-0,32	-0,57	-0,53	1,00

De maneira geral, a Tabela 3 apresenta diversos indicadores que se correlacionaram, atingindo correlações fortes, de 0,96. Foi observado que o tempo é um fator importante, que se relacionou forte e moderadamente com a maioria dos indicadores. Com o passar dos dias de monitoramento da célula experimental, ocorreu o aumento do pH, dos aeróbios totais e das concentrações de O₂.

Entretanto, correlações negativas também foram observadas entre o tempo e os indicadores umidade, sólidos voláteis e CO₂, visto que, com o passar dos dias, a matéria orgânica vai sendo degradada e, conseqüentemente, esses indicadores tendem a ser reduzidos.

Analisando a Tabela 3, pode-se inferir que as pequenas variações de temperatura no interior da

célula experimental favoreceram as concentrações de CH_4 e CO_2 . Foi verificada uma correlação moderada entre esses fatores, o que pode ser justificado pelo fato de as arqueas metanogênicas exigirem, para seu desenvolvimento na produção de biogás, condições de temperatura mesofílica, o que foi observado no monitoramento da célula experimental.

O pH também apresentou correlação moderada positiva com os aeróbios totais, indicando que um consórcio sintrófico de micro-organismos está presente na massa de RSU e, dependendo da comunidade microbiana e da composição dos resíduos, o processo biodegradativo pode ser realizado em faixas ácidas, neutras e básicas por bactérias e arqueas metanogênicas (SOLLI et al., 2014).

O teor de sólidos voláteis e a umidade se relacionaram fortemente e também apresentaram correlações moderadas e positivas com as concentrações de CO_2 e CH_4 . Para Schirmer et al. (2015), resíduos com alto conteúdo de matéria orgânica possuem maior potencial de produção de gases. À medida em que as populações microbianas realizam a biodegradação dos RSU, intensificam-se a liberação de água e, dessa forma, maiores proporções de umidade são correlacionadas às taxas de biodegradação dos resíduos.

A fase metanogênica é caracterizada como a etapa final do processo de biodegradação dos RSU, em que os principais produtos são CO_2 e CH_4 . Nesse contexto, uma correlação moderada positiva foi obtida entre esses gases, que compõem a maior parcela do biogás. Entretanto, correlações moderadas negativas foram observadas entre esses gases e o O_2 , o que já era esperado, uma vez que, os micro-organismos envolvidos na degradação da matéria orgânica são, preferencialmente, anaeróbios estritos ou facultativos e necessitam de condições ótimas para seu metabolismo.

4 CONCLUSÃO

Os indicadores microbiológico e físico-químico monitorados na célula experimental foram propícios à biodegradação dos RSU e à produção de biogás, tendo sido constatadas temperaturas mesofílicas, pH neutro, sólidos voláteis e umidade elevadas, que são condições importantes para o desenvolvimento do metabolismo das comunidades microbianas responsáveis pelo processo de biodegradação de RSU. Entretanto, quantificações de bactérias aeróbias totais foram observadas ao longo de todo o monitoramento, sendo associadas, principalmente, a fatores externos que contribuíram para entrada de O_2 na célula experimental, como aberturas para coleta das amostras de RSU, fissuras na camada de cobertura de solo compactado e percolação de águas pluviais.

A produção de biogás foi estimulada com a retroalimentação da célula experimental, que após o preenchimento com novos resíduos obteve um percentual de 46,5% de material putrescível, que é considerado elevado. Contudo, as concentrações de CO_2 prevaleceram sobre as de CH_4 , o que pode ser um indicativo do efeito inibitório que o oxigênio é capaz de ocasionar na atividade das arqueas metanogênicas.

As análises estatísticas realizadas serviram de subsídio para comprovar a correlação e o comportamento multivariado entre os indicadores microbiológico e físico-químicos envolvidos no processo de biodegradação dos RSU na célula experimental, demonstrando que os indicadores monitorados são importantes para a produção de biogás, apesar de o metano ter atingido concentração máxima de 19,8% ao longo do tempo de aterramento.

5 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Todos os autores contribuíram de forma igualitária.

6 REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007: Resíduos Sólidos – amostragem de Resíduos**. Rio de Janeiro, 2004.
- ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. Grappa Editora e Comunicação, 2016.
- AESA**. Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. Disponível em: <<http://site2.aesa.pb.gov.br/aesa/sort.do?layoutCollection=0&layoutCollectionProperty=&layoutCollectionState=3&pagerPage=0>>. Acesso em 12/11/2013.
- AIRES, K. O. **Comunidades de bactérias e arqueas e produção de biogás em célula experimental de resíduos sólidos urbanos**. 2018. 134p. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental). Universidade Estadual da Paraíba. Campina Grande-PB.
- AIRES, K. O.; SOUSA, R. B. A.; GUEDES, M. J. F.; SANTOS, J. J. N.; MELO, M. C. Composição física dos resíduos sólidos urbanos na produção de biogás em uma célula experimental. II Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Ciências. Campina Grande-PB, 2017. **Anais...**
- ANGELIDAKI, I.; SANDERS, W. Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**. v. 3, n. 2, 2004.
- APHA, American Public Health Association American; AWWA, Water Works Association; WEF, Water Environment Federation. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 22 ed. Washington, 2012.
- BASSIN, J. P.; ROSADO, A. S. Técnicas de biologia molecular aplicadas ao estudo da diversidade microbiana. In: **Processos biológicos avançados para tratamento de efluentes**. Ed Interciência, Rio de Janeiro, 2012, 357 p.
- CHERNICHARO C. A. L. **Reatores Anaeróbios - Cap. 2 - Fundamentos da Digestão Anaeróbia**. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2000.
- COLMANETTI, J. P.; BERNARDES, R. S.; PALMEIRA, E. M. Uso de Reatores de Batelada para Digestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos Municipais. **Anais...** Porto Alegre, 2000.
- DANCEY, C; REIDY, J. **Estatística Sem Matemática para Psicologia: Usando SPSS para Windows**. Porto Alegre, Artmed, 2006.
- ECOSAM**. Empresa de Consultoria em Saneamento Ambiental. **Plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos do município de Campina Grande – PB: Diagnóstico da situação atual dos resíduos sólidos urbanos**. 2014. 289 p. Disponível em: <http://sesuma.org.br/estudos/Diagnostico_2204_VF.pdf> Acesso em: Maio/2016.
- ECOSOLO**. **Dados do monitoramento do Aterro Sanitário de Campina Grande: ano 2016**. Campina Grande: ECOSOLO, 2016. (Documento impresso).
- FERREIRA, N. A. L.; AIRES, K. O.; ALMEIDA, M. A. V.; MELO, M. C.; MONTEIRO, V. E. D. Avaliação das concentrações de metano gerado em um biorreator de bancada com base em parâmetros físico-químicos. **Eng Sanit Ambient**. v. 22. n. 3. 2017. p. 473-479.
- FONSECA, J. S.; MARTINS, G. A. **Curso de Estatística**. Editora Atlas. 6 ed. 1996.
- GONZALEZ-FERNANDEZ, C.; NIETO-DIEZ, P. P.; LEON-COFRECES, C.; GARCIA-ENCINA, P. A. Solids and nutrients removal from liquid fraction of swine manure slurry through screening and flocculation treatment and influence of these processes on anaerobic biodegradability. **Bioresour Technol**. 2008, v. 99, p. 6233-6239.
- HAIR Jr., J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise multivariada de dados**. 6 ed. Porto Alegre, Bookman, 2009. 688 p.
- IGONI, A. H.; AYOTAMUNO, M. J.; EZE, C. L.; OGAJI, S. O. T.; PROBERT, S. D. Designs of anaerobic digesters for producing biogas from municipal solid-waste. **Applied Energy**, 2008, v. 85, n. 6, p. 430-438.
- KELLY, R. J. **Solid waste biodegradation enhancements and the evaluation of analytical methods used to predict waste stability**. Thesis (Master in Science) - Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 2002. 66 p.
- KJELDSEN, P.; BARLAZ, M. A.; ROOKER, A. P.; BAUN, A.; LEDIN, A.; CHRISTENSEN, T. H. Present and long-term composition of municipal solid leachate. **Critical Reviews. Environmental Science and Technology**. v. 32, n. 4, 2002. p. 297-336.
- LIPOR. **Serviço Intermunicipalizado de Gestão de Resíduos do Grande Porto**. Caderno Técnico, 2000.
- MARIANO, G. L.; MOURA, M. A. L. Comportamento da temperatura do lixo em duas épocas distintas (seca e chuvosa) no lixão da cidade de Maceió-AL. **Revista Ciência e Natureza**. UFSM, v. 31, n. 2, 2009. p. 57 – 70.
- MCBEAN, E. A.; F. A. ROVERS.; G. J. FARQUHAR. **Solid Waste Landfill Engineering and Design**. Editora: Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1995.
- MELO, M. C.; FARIAS, R. M. S; CARIBÉ, R. M.; SOUSA, R. B. A.; MONTEIRO, V. E. D. A Case of Study About the Influence of Organic Matter in Municipal Solid Waste Settlement. **Soils and Rocks**, São Paulo, 2016, n. 39, v. 2, p. 139-148.
- MONTEIRO, V. E. D.; MELO, M. C.; ALCANTARA, P. B.; ARAUJO, J. M.; ALVES, I. R. de F. S.; JUCÁ, J. F. T. Estudo do comportamento de RSU em uma célula experimental e suas correlações com aspectos microbiológicos, físicos e químicos. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. II, 2006. p. 223-230.

OGWUELEKA, T. C. Survey of household waste composition and quantities in Abuja, Nigeria. **Resources, Conservation and Recycling**. v. 77, 2013. p. 52-60.

PALMISANO, A. C.; BARLAZ, M. A. **Microbiology of Solid Waste**. In: Anna C. Palmisano, Morton A. Barlaz (eds), 1996. 224 p.

PERSSON, M.; JÖNSSON, O.; WELLINGER, A. **Biogas upgrading to vehicle fuel standards and grid injection**. IEA Bioenergy, Task 37 – Energy from Biogas and Landfill Gas, 2006.

RIBEIRO, L. S.; SILVA, A. S.; ALVES, F. S.; MELO, M. C.; PAIVA, W.; MONTEIRO, V. D. E. Monitoramento físico-químico de um biorreator com resíduos sólidos urbanos em escala piloto na cidade de Campina Grande (PB). **Engenharia Sanitária e Ambiental (Online)**, 2016. v. 21, p. 1-9.

SCHIRMER, W. N. et al. Avaliação da geração de gás sulfídrico no biogás gerado a partir de resíduos sólidos urbanos. **Ciência & Tecnologia**, FATEC-JB, Jaboticabal - SP, v. 7, n. 1, p. 1-15, 2015.

SILVA, A. dos S. **Análise de componentes tóxicos em resíduos sólidos urbanos**. 2016. 158p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande-PB.

SILVA, A. S.; RIBEIRO, L. S.; PAIVA, W.; MELO, M. C.; MONTEIRO, V. E. D. Avaliação do potencial tóxico dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Campina Grande – PB. **Revista Matéria**. Rio de Janeiro. 2015. v. 20, n.4, p. 840-851.

SILVA, J. C.; OLIVEIRA, M. A.; PIRES, P. H.; SILVA, T. P.; RODRIGUES, M. Reciclagem energética: uma solução inovadora para o plástico não reciclável. **Revista Eletrônica E-xacta**, Belo Horizonte, 2011, v. 4, n. 2 – Edição Especial Interdisciplinaridade. p. 87-96.

SILVA, S. A.; OLIVEIRA, R. **Manual de análises físico-químicas de águas de abastecimento e residuárias**. Campina Grande-PB: O Autor, 2001. 265 p.

SOLLI, L.; HÅVELSRUD, O. E.; HORN, S. J.; RIKE, A. G. A metagenomic study of the microbial communities in four parallel biogas reactors. **Biotechnol. Biofuels**, 2014. v. 7, n. 1, p. 146.

SZYŁAK-SZYDŁOWSKI, M.; KORNIŁŁOWICZ-KOWALSKA, T. The mycobiota of landfill leachates in the pretreatment process in a sequencing batch reactor. **Cent. Eur. J. Biol.**, v. 7, 2012.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. A. **Integrated solid waste management**. Engineering principles and management issues. New York, 1993.

YOUCAI, Z.; LUOCHUN, W.; RENHUA, H.; DIMIN, X.; GUOWEI, G. A Comparison of refuse attenuation in laboratory and field scale lysimeters. **Waste Management**. v. 22, n. 1, 2002.

WHO. WORLD HEALTH ORGANIZATION. International Reference Center for Wastes Disposal. **Methods of analysis of sewage sludge solid wastes and compost**. Switzerland, 1979.