

REVESTIMENTO DE POLIURETANA MODIFICADA COM GEOPOLÍMERO OBTIDO DE RESÍDUO DE ARGILA EXPANDIDA PARA FERTILIZANTES DE LIBERAÇÃO CONTROLADA

¹Jean Pierre da Silva Estevam, ²Helico Vinicius Privatti Granzotti,

³Alexandre Antônio Fidélis Martins Júnior, ⁴Nathália Liz Barrios,

⁵Lisandro Simão, ⁶Ricardo Bortoletto-Santos

¹Universidade de Ribeirão Preto, e-mail: jeanpse@gmail.com; ²Universidade de Ribeirão Preto, e-mail: helico.granzotti@sou.unaerp.edu.br; ³Universidade Federal de São Carlos, e-mail: alexandrejunior@estudante.ufscar.br; ⁴Universidade Federal de São Carlos, e-mail: nathalializb@gmail.com; ⁵Universidade de Ribeirão Preto, e-mail: lsimao@unaerp.br; ⁶Universidade de Ribeirão Preto, e-mail: ricbortolettosantos@hotmail.com

*Agricultura Regenerativa
Tecnologias verdes e inovação sustentável*

Resumo

O uso de fertilizantes agrícolas é essencial para sustentar os atuais níveis de produtividade, porém sua eficiência é frequentemente comprometida por perdas de nitrogênio, especialmente pela volatilização de amônia (NH_3). Nesse contexto, o desenvolvimento de fertilizantes de liberação controlada, associado à valorização de resíduos industriais, representa uma estratégia promissora para aumentar a eficiência agrônômica e promover a economia circular. Este trabalho teve como objetivo desenvolver e avaliar um revestimento de poliuretana (PU) derivada de óleo de mamona, modificada com geopolímero sintetizado a partir de resíduos de argila expandida, para controlar a liberação de nitrogênio em grânulos de ureia. O revestimento foi aplicado aos grânulos, e seu desempenho foi avaliado por meio de ensaio de incubação em solo por 28 dias. A incorporação do geopolímero reduziu a volatilização de amônia de 36,75% para 18,78%, evidenciando maior eficiência na retenção de nitrogênio. Além disso, o sistema permitiu a utilização de revestimentos mais finos sem comprometer o desempenho do material. Os resultados demonstram o potencial da combinação PU-geopolímero para o desenvolvimento de fertilizantes de liberação controlada mais eficientes, sustentáveis e alinhados aos princípios da economia circular.

Palavras-chave: Materiais sustentáveis; Polímeros biodegradáveis; Eficiência agrônômica; Descarbonização; Reciclagem de nutrientes.

Introdução

A argila expandida é um material cerâmico leve e poroso amplamente utilizado na construção civil, cuja produção gera resíduos que demandam destinação adequada. A valorização desses resíduos permite sua conversão em materiais de maior valor agregado, como geopolímeros, alternativa aos materiais convencionais, que contribui para a economia circular e a redução dos impactos ambientais (Kanagaraj *et al.*, 2023). O processo de geopolimerização

transforma materiais ricos em aluminossilicatos em ligantes inorgânicos com propriedades cimentícias, possibilitando aplicações agrícolas a partir de resíduos da fabricação de argila expandida. Essa estratégia favorece a transição para sistemas circulares, com reaproveitamento contínuo dos materiais (Gutiérrez *et al.*, 2022).

Agregados leves de argila expandida já são utilizados como substratos em sistemas alagados construídos, apresentando capacidade de remoção de fosfato e suporte ao desenvolvimento radicular (Mlih *et al.*, 2020). Sua incorporação em formulações agrícolas pode reduzir a dependência de fertilizantes sintéticos e fortalecer a sustentabilidade, especialmente quando associada a polímeros de origem renovável, como os derivados de óleos vegetais, que substituem materiais petroquímicos e reduzem a pegada de carbono (Alves *et al.*, 2024; Ciastowicz; Pamuła; Białowiec, 2024).

O aumento da demanda por alimentos exige maior eficiência no uso de fertilizantes, visando maximizar a disponibilidade de nutrientes e minimizar as perdas ambientais (Bortoletto-Santos *et al.*, 2020). Nesse contexto, a reciclagem de nutrientes constitui uma estratégia importante para o desenvolvimento sustentável da agricultura (El Chami *et al.*, 2023). A ureia, principal fertilizante nitrogenado, pode perder até 50% do nitrogênio aplicado por volatilização de amônia (NH_3). Dessa forma, revestimentos poliméricos constituem uma alternativa para retardar a liberação do nutriente, reduzindo perdas e aumentando a eficiência agronômica.

Este estudo teve como objetivo desenvolver um revestimento que combina propriedades de troca iônica e de barreira física para otimizar a liberação de nutrientes. Para isso, incorporou-se um geopolímero obtido de resíduos de argila expandida a uma matriz de poliuretana (PU) biodegradável, produzida a partir de óleo de mamona, contribuindo para a descarbonização da cadeia produtiva agrícola (Ciastowicz; Pamuła; Białowiec, 2024). Essa abordagem demonstra a valorização de resíduos como insumos de alto desempenho (Sarcinella; Frigione, 2023), resultando em revestimentos capazes de promover a liberação controlada da ureia no solo e reduzir a volatilização de amônia.

Metodologia

O geopolímero foi obtido pela mistura de 136,36 g de resíduo de argila expandida, 45,45 g de metacaulim e 118,18 g de solução alcalina composta por hidróxido e silicato de potássio. Após homogeneização, adicionaram-se 4,9 g de peróxido de hidrogênio a 2% para promover a

expansão. A pasta foi moldada em corpos de prova cúbicos, submetida à cura por 24 h nas formas e por mais 24 h em água para verificação da estabilidade do material. Em seguida, o geopolímero foi triturado em moinho de martelos e moinho de bolas.

Os grânulos comerciais de ureia foram revestidos com poliuretana (PU) à base de óleo de mamona, sintetizada a partir de 4,4'-diisocianato de difenilmetano (MDI) e óleo de mamona na proporção de 60:40 (m/m). O revestimento foi aplicado em revestidor rotativo a 30 rpm e 50 °C, utilizando 4% (m/m) de polímero em relação à ureia e incorporando geopolímero nas concentrações de 5 e 10% (m/m). Os grânulos de ureia sem revestimento e revestido apenas com a poliuretana derivada de óleo de mamona foram denominados de Ur e UrPU, respectivamente, enquanto os grânulos revestidos com a matriz polimérica contendo 5 e 10% de geopolímero foram denominados de UrPUGEO5% e UrPUGEO10%.

Os materiais foram caracterizados por difração de raios X (DRX), fluorescência de raios X (FRX), área superficial específica pelo método BET e potencial zeta em diferentes valores de pH. Além disso, os ensaios de liberação foram conduzidos em Latossolo proveniente de São Carlos (SP, Brasil), previamente caracterizado quanto à granulometria (587 g kg⁻¹ de areia, 76 g kg⁻¹ de silte e 337 g kg⁻¹ de argila), capacidade de retenção de água (200 g kg⁻¹), pH (6,0), carbono orgânico (21,0 g kg⁻¹), capacidade de troca catiônica (4,7 cmolc kg⁻¹) e teor de fósforo (2,3 mg kg⁻¹).

Os tratamentos foram incubados em 10 g de solo, utilizando relação N de 1:1000 (g-N g⁻¹_{solo}). A volatilização de amônia foi determinada utilizando 5 mL de uma solução de ácido bórico a 4% (Bortoletto-Santos *et al.*, 2020). A umidade foi mantida em 80% da capacidade de retenção de água, e as amostras permaneceram incubadas a 25 °C por 3, 7, 14, 28 e 42 dias. Ao final de cada período, a amônia volatilizada (N-NH₃) foi quantificada por titulação com HCl 0,01 mol L⁻¹.

Resultados e Discussão

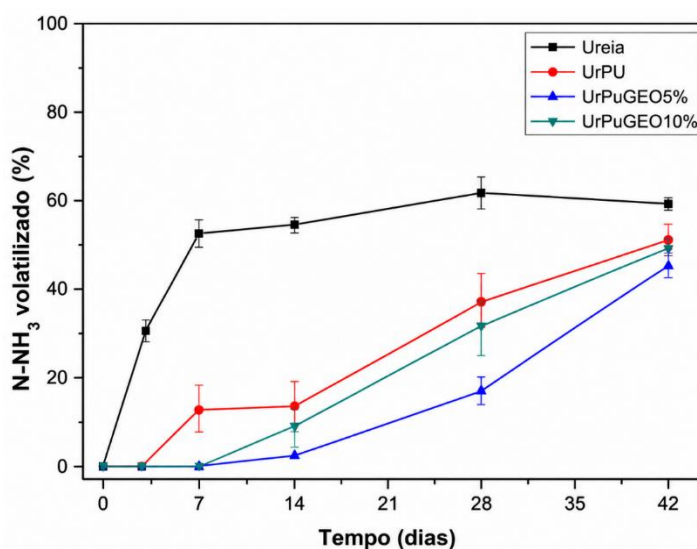
A composição química do resíduo de argila expandida, determinada por fluorescência de raios X (FRX), revelou predominância de dióxido de silício (63,46%), óxido de alumínio (18,74%) e óxido de ferro (7,61%), confirmando seu elevado teor de aluminossilicatos e potencial para síntese de geopolímeros. A difração de raios X (DRX) identificou as fases cristalinas hercinita, quartzo e hematita, além de uma fração amorfa, evidenciada por um halo difuso em baixos ângulos. O resíduo apresentou área superficial específica de 0,5935 m² g⁻¹

(BET) e carga superficial negativa entre pH 2 e 9, característica que favorece a estabilidade coloidal e a interação com espécies iônicas.

Após a geopolimerização, as análises de DRX e potencial zeta indicaram a manutenção das fases cristalinas e do comportamento superficial. Em contrapartida, a área superficial específica aumentou para $59,9924 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$, cerca de 100 vezes superior à do material original, evidenciando a formação de uma estrutura mais porosa.

Nos ensaios de liberação, a ureia sem revestimento apresentou rápida hidrólise, resultando em perdas de 30,63% do nitrogênio aplicado no terceiro dia e de 52,92% no sétimo dia, comportamento favorecido pela baixa capacidade de troca catiônica e reduzida capacidade tampão do solo. Por outro lado, o revestimento de poliuretano retardou a liberação de nitrogênio, mantendo a emissão de amônia praticamente nula até o terceiro dia (UrPU) e até o sétimo dia (UrPUGEO5%). Após 42 dias, o tratamento UrPU apresentou perda acumulada de 51,35% do nitrogênio aplicado. A incorporação de 5% de geopolímero reduziu significativamente a volatilização, com perda acumulada de apenas 3,45% até o 14º dia. Em contrapartida, o tratamento UrPUGEO10% apresentou desempenho semelhante ao UrPU, sugerindo que o excesso de geopolímero promoveu poros e descontinuidades na camada polimérica, reduzindo sua eficiência como barreira à difusão do nitrogênio (Figura 1).

Figura 1. Curvas médias de volatilização de amônia (N-NH_3) durante a incubação aeróbia em solo de grânulos de ureia revestidos e não revestidos. As barras verticais representam o desvio padrão.



Fonte: Os autores.

Conclusão

Os resultados obtidos demonstram que a incorporação de geopolímero em revestimentos de poliuretana à base de óleo de mamona contribui para o controle da liberação de nutrientes em fertilizantes granulados, promovendo redução significativa da volatilização de amônia. Além dos benefícios agronômicos, essa estratégia apresenta elevado potencial para promover a sustentabilidade ambiental e fortalecer os princípios da economia circular. A utilização de resíduos de argila expandida como matéria-prima para a produção de geopolímeros agrega valor a esses resíduos industriais, reduzindo a necessidade de descarte e favorecendo seu reaproveitamento em aplicações de maior valor agregado. Adicionalmente, o emprego de poliuretana derivada de óleo de mamona reforça o uso de matérias-primas renováveis, contribuindo para a redução da dependência de recursos fósseis e para a descarbonização da cadeia produtiva agrícola. Dessa forma, este estudo evidencia o potencial da combinação entre geopolímero e poliuretana de origem renovável no desenvolvimento de revestimentos sustentáveis para fertilizantes de liberação controlada, conciliando eficiência agrônômica, valorização de resíduos industriais e sustentabilidade ambiental.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro por meio dos processos nº 403702/2023-2, 402713/2023-0 e 408961/2025-2; à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Código de Financiamento 001; à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP). Os autores também agradecem ao Laboratório de Processos e Materiais (ProMat – UNAERP) pelo suporte institucional e pela disponibilização da infraestrutura necessária para a realização deste estudo.

Referências

ALVES, Z. et al. A comparison between the use of cork and synthetic aggregates in the production of geopolymer composites. **Construction and Building Materials**, v. 438, p. 137147, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137147>.

BORTOLETTO-SANTOS, R. et al. Polyurethane nanocomposites can increase the release control in granulated fertilizers by controlling nutrient diffusion. **Applied Clay Science**, v. 199, p. 105874, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2020.105874>.

CIASTOWICZ, Ż.; PAMUŁA, R.; BIAŁOWIEC, A. Utilization of Plant Oils for Sustainable Polyurethane Adhesives: A Review. **Materials**, v. 17, n. 8, p. 1738, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17081738>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/17/8/1738>. Acesso em: 20 jun. 2026.

EL CHAMI, D. et al. A Life Cycle Assessment to Evaluate the Environmental Benefits of Applying the Circular Economy Model to the Fertiliser Sector. **Sustainability**, v. 15, n. 21, p. 15468, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su152115468>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/21/15468>. Acesso em: 20 jun. 2026.

GUTIÉRREZ, C. A. et al. Production, Mechanisms, and Performance of Controlled-Release Fertilizers Encapsulated with Biodegradable-Based Coatings. **ACS Agricultural Science & Technology**, v. 2, n. 6, p. 1101-1125, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsagscitech.2c00077>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acsagscitech.2c00077>. Acesso em: 20 jun. 2026.

KANAGARAJ, B. et al. Physical characteristics and mechanical properties of a sustainable lightweight geopolymer based self-compacting concrete with expanded clay aggregates. **Developments in the Built Environment**, v. 13, p. 100115, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2022.100115>.

MLIH, R. et al. Light-expanded clay aggregate (LECA) as a substrate in constructed wetlands – A review. **Ecological Engineering**, v. 148, p. 105783, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105783>.

SARCINELLA, A.; FRIGIONE, M. Sustainable and Bio-Based Coatings as Actual or Potential Treatments to Protect and Preserve Concrete. **Coatings**, v. 13, n. 1, p. 44, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings13010044>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-6412/13/1/44>. Acesso em: 20 jun. 2026.