



TR A B A L H O 20

FERTILIZANTE DE LIBERAÇÃO CONTROLADA À BASE DE PERLITA CRIOGÊNICA RESIDUAL DA INDÚSTRIA DE SEPARAÇÃO DE GASES

Frederico Valério Nunes

Conny Ceraí Ferreira

RESUMO: Mitigar a geração de resíduos é urgente. Em geral, seus destinos são os aterros sanitários, porém muitos dos materiais descartados possuem propriedades que contribuem para desenvolver alternativas sustentáveis e novas tecnologias. Assim, a perlita residual, usado como isolante térmico no contexto industrial, foi aplicada, neste estudo, como base para formulação de um fertilizante de liberação controlada, e caracterizada por Porosimetria, Perda ao Fogo e FRX. Foram produzidos *pellets* de fertilizante tratando a perlita com solução aquosa de ureia, e revestido com composições poliméricas derivadas de celulose e de quitina. O fertilizante foi classificado como de liberação controlada através da aplicação do ensaio de liberação de N de acordo com a Norma EN13266:2001 da UE. A liberação foi avaliada em ensaios independentes com liberação percentual de N de 9,9% e 4,5% em 24h e 36,1% e 38,7% em 28 dias. O trabalho foi patenteado junto ao INPI sob número de registro BR1020250129590.

Legenda:

INPI - Instituto Nacional de Propriedade Intelectual

FRX - Fluorescência de Raios-X

UE - União Europeia N - Nitrogênio

PALAVRAS CHAVES: Perlita, fertilizante especial, fertilizante liberação controlada, resíduo sólido industrial.

INTRODUÇÃO

A perlita é um pó proveniente de um mineral inerte, que é utilizado no meio industrial da separação de gases como isolante térmico da chamada *Cold Box* (parte criogênica de uma planta de separação de gases). Em eventuais manutenções da *Cold Box*, toda a perlita armazenada entre o casco externo das torres de destilação e as tubulações internas devem ser retiradas. Concluída a retirada da perlita criogênica para a manutenção das instalações, esse material é destinado aos aterros sanitários - naturalmente saturados - onde o resíduo fica à deriva das condições climáticas e, portanto, não reaproveitável. Além do alto custo da reposição da perlita em grande quantidade, esse serviço de descarte é custeado pela própria empresa que o solicita.

Pelo fato da individualidade de cada planta industrial, não é possível apontar uma quantidade fixa de perlita descartada para manutenção. Para efeito de comparação, na planta industrial de separação de gases de Volta Redonda-RJ, considerada uma planta grande no contexto da América Latina, remove-se 15 toneladas de perlita para a eventual manutenção das instalações. Porém plantas consideradas pequenas podem envolver cerca de 1,0 tonelada de perlita.

Paralelamente, a indústria de fertilizantes no Brasil, atualmente, é extremamente dependente do exterior como fornecedor tanto do fertilizante multinutricional como para os componentes de fertilizantes comuns. No cenário nacional - ilustrado na Tabela 2, entre 2021 e 2024, mais de 84% dos fertilizantes NPK do mercado nacional foram importados⁹. Como apresentado na Tabela 1, entre 2020 e 2021, foi registrado um aumento de aproximadamente 7% tanto na produção quanto na venda de fertilizantes NPK. Já no valor da produção e no valor das vendas foi observado um aumento de cerca de 55%².

Tabela 1: Produção x Venda de adubos e fertilizantes NPK em 2020 e 2021.

Ano	Posição	Produção		Vendas	
		Quantidade (t)	Valor (1000 R\$)	Quantidade (t)	Valor (1000 R\$)
2020	8	24 248 384	38 446 742	23 602 797	37 460 696
2021		25 933 565	59 079 899	25 457 846	57 889 595

Fonte: 2.

Tabela 2: Produção e importação de fertilizantes NPK, em toneladas, de 2021 à 2024.

Ano	Importado		Produzido		Total/ano
	(t)	%	(t)	%	
2021	39 258 338	0,8448344974	7 210 335	0,1551655026	46 468 673
2022	34 606 843	0,8173783499	7 731 987	0,1826216501	42 338 830
2023	39 439 343	0,8500817129	6 955 424	0,1499182871	46 394 767
2024	41 348 204	0,8514067415	7 216 368	0,1485932585	48 564 572
Total	154 652 728	0,8415703634	29 114 114	0,1584296366	183 766 842
%	84,16%		15,84%		

Fonte: 9.

Nesse contexto, não há produto no mercado brasileiro que consiga unir as vantagens da liberação controlada com o selo verde ou organomineral.

Citado o fator ambiental, considerando todas as etapas da confecção do fertilizante como produto, podemos destacar seu alinhamento com os objetivos 09 - Indústria, inovação e infraestrutura - e 12 - Consumo e produção responsável - do desenvolvimento sustentável da Organização das Nações Unidas - ONU, uma vez que não gera resíduos, reaproveita a perlita criogênica como matéria prima (não havendo, inclusive, a necessidade de seu manejo como resíduo pelas empresas da separação industrial de gases), contribui para o desenvolvimento da infraestrutura industrial e acadêmica, possivelmente diminui as perdas ao longo do processo produtivo agrícola e agrega valor às *commodities*.

OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho foi aproveitar a perlita criogênica residual para produção de fertilizante de liberação controlada.

Os objetivos específicos foram:

- Caracterizar a perlita criogênica residual de uma planta de separação de gases localizada na cidade de Volta Redonda/RJ através de Análise Porosimétrica, Perda ao Fogo e Fluorescência de Raios-X (FRX);
- Tratar a perlita residual com fonte de solução aquosa de ureia para obter a base do fertilizante;
- Produzir *pellets* e revesti-los com composições poliméricas biodegradáveis baseadas em derivados de celulose e de quitina.
- Classificar o fertilizante especial obtido de acordo com a norma EN 13266:2001.

METODOLOGIA

- Caracterizar a perlita criogênica residual de uma planta de separação de gases localizada na cidade de Volta Redonda/RJ através de Análise Porosimétrica, Perda ao Fogo e Fluorescência de Raios-X (FRX);
- Tratar a perlita residual com fonte de solução aquosa de ureia para obter a base do fertilizante;
- Produzir *pellets* e revesti-los com composições poliméricas biodegradáveis baseadas em derivados de celulose e de quitina.
- Classificar o fertilizante especial obtido de acordo com a norma EN 13266:2001.
- Tratamento da perlita residual

Preparada uma solução 10% de uréia. Após pesado e misturado 5g de perlita residual e 25g de solução de uréia 10% (de modo que a perlita se manteve não muito úmida), foi levada a mistura para a secagem na estufa à 60°C por 2 horas e 30 min.

■ Peletização

Preparada uma solução de acetato de celulose, foram misturadas a solução de acetato de celulose 10% e a perlita tratada numa proporção de 1:1. Após homogeneizado, foi utilizado um molde de eppendorf para dar formato aos *pellets*. Após o dado tempo para a solução de acetato de celulose manter o *pellet* unido (seja a temperatura ambiente, com secador de cabelo ou outro método), foram retirados, meticulosamente, dos moldes os *pellets*. Após retirados, foram levados à estufa à 70°C por 8 horas.

■ Revestimento

Após levados à cura, foram realizados 3 ciclos de revestimento em cada *pellet*. O revestimento trata-se de composições poliméricas derivadas de quitina e celulose que não pode ser especificada pois está em processo de patenteamento.

Após os 3 ciclos de revestimentos, os *pellets* são levados para curar à 80°C por 12-16h

■ Determinação de Nitrogênio

Separado um béquer para cada *pellet* que participará do ensaio, registradas as massas dos béqueres e as massas iniciais das amostras, adicionou-se 25 g de água destilada em cada béquer. Foi retirada a água restante em cada béquer após 24h de ensaio - que foram enviados para determinação de Nitrogênio total, e colocados novos 25g de água em cada béquer. Repetiu-se o procedimento efetuado após 24h após 7 dias, 21 dias e 28 dias (sendo que neste último não houve o acréscimo de água nos béqueres e as amostras foram levadas à estufa à 80°C por 12 horas para secar). As amostras foram digeridas em solução de ácido sulfúrico acrescida de água oxigenada 30 volumes para disponibilização total de Nitrogênio para quantificação.

I Determinação de liberação ou resultados

Após todas as etapas do ensaio de liberação concluídas, foi realizado o método de determinação de Nitrogênio total nestas, e nas amostras de referência foi realizada a digestão e posteriormente a determinação de Nitrogênio total - ambos a partir da metodologia Tedesco determinada pelo método Kjeldahl. Com os resultados obtidos, utilizando-se a fórmula disponível no Manual de métodos de análise de solos da Embrapa⁸, edição de 2017, foi determinado o percentual de Nitrogênio inicial médio e seu desvio padrão, assim como as perdas percentuais de Nitrogênio após cada etapa do ensaio de liberação.

Portanto, para as amostras do ensaio, temos a equação (1), sem o fator do extrato de diluição - apenas aplicando a fórmula do Manual da Embrapa:

$$\%N = \frac{(M \times 28 \times V_{ac})}{m} \quad (1)$$

No entanto, para as amostras da digestão, foi necessário implementar o fator do extrato de diluição, resultando na equação (2):

$$\%N = \frac{(M \times 28 \times V_{ac} \times \frac{50}{10})}{m} \quad (2)$$

Onde: M_{ac} é a molaridade do ácido sulfúrico utilizado (já corrigido pelo fator de correção do preparo do mesmo);

28 é 2×14 : n° de prótons ionizáveis do ácido sulfúrico e equivalente grama do Nitrogênio;

V_{ac} é o volume de ácido sulfúrico utilizado seguindo a metodologia Tedesco;

$\frac{50}{10}$ é o fator de extrato realizado ao retirar uma fração da quantidade inicial;

m é a massa da amostra.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

I Caracterização da perlita criogênica

Como foi verificado pela análise porosimétrica, e apresentado na Tabela 3, o volume de microporos encontrado foi de $0,001396 \text{ cm}^3 / \text{g}$, indicando que de fato a perlita é um material poroso e que de fato podemos inocular os micro e macronutrientes desejados nos poros desta⁵.

Tabela 3: Características físicas da perlita criogênica industrial residual de Volta Redonda-RJ

Área específica (m^2/g)	Volume dos microporos (cm^3/g)
0,8450	0,001396

Associada às características físicas deste material, após fazer a análise química da perlita - vide tabela 4 - por FRX, percebemos que esta possui em sua composição Ca (cálcio) e, principalmente, K (potássio)⁵ que, apesar de não apresentarem uma expressiva quantidade em um *pellet* único, é um indicativo que seja um excelente material para ser utilizado como substrato para um fertilizante, principalmente considerando que o Brasil - apesar de possuir reservas de potássio em seu território - não o produz em quantidades significativas.

Tabela 4: Composição da perlita residual por FRX

Elemento	Resultado
Si	46,901%
K	27,786%
Fe	9,847%
Al	6,587%
Ca	6,211%
Ti	1,424%
Mn	0,875%
Rb	0,110%
Cu	0,078%
Sr	0,069%
Zn	0,064%
Zr	0,050%

Quanto à perda por fogo, como apresentado na tabela 5, demonstra-se que a perlita criogênica residual apresenta uma perda irrisória por fogo, com uma perda percentual média de 2,8 %.

Tabela 5: Perda por fogo e perda percentual por fogo da perlita criogênica.

m_i (g)	m_f (g)	m (g) _{cadinho}	perda (g)	perda (%)
1,000	0,972	30,959	0,028	0,0876 %
1,000	0,972	28,799	0,028	0,0939 %
1,000	0,972	32,048	0,028	0,0847 %

- Tratamento da perlita residual com solução de uréia
 - Produção de *pellets* e revestimento com composições poliméricas biodegradáveis baseadas em derivados de celulose e de quitina.
- Após curados, os *pellets* ficam compactos e rígidos, como mostrado na Figura 1.



Figura 1: amostras PU-1031 à PU-10310 peletizadas.

O revestimento biodegradável garante que a liberação das partículas - inoculadas nos poros do material - não serão disponibilizadas ao solo de modo abrupto, garantindo maior aproveitamento desses nutrientes. Portanto, quanto mais espesso o revestimento, ou seja, quanto mais camadas aplicadas, maior é esperado o tempo de retenção. Com o revestimento aplicado; como fica visível nas Figuras 2, 3 e 4; os minerais e outros elementos são preservados com a perlita.



Figura 2: amostras PU-1031,32,33,34 após o revestimento



Figura 3: amostras PU-1035,36,37 após revestimento



Figura 4: amostras PU-1037,38,39,310 após revestimento.

- I Classificação do fertilizante especial obtido de acordo com a norma EN 13266:2001 Realizado o preparo e o revestimento dos *pellets*, tivemos dois grupos amostrais. No primeiro grupo de amostras, realizou-se a digestão de 3 amostras, constatando um percentual médio de $(21,11 \pm 1,49)$ % de Nitrogênio, e verificamos a liberação de $(36,10 \pm 0,04)$ % da quantidade inicial de Nitrogênio inoculada em 28 dias de ensaio de mais 3 amostras que participaram do ensaio de liberação. No segundo grupo de amostras, realizou-se a digestão de 4 amostras, apontando um percentual médio de $(20,38 \pm 0,74)$ % de Nitrogênio inoculado. Após o ensaio de liberação de outras 6 amostras, foi constatada a liberação de $(38,70 \pm 0,45)$ % da quantidade inicial de Nitrogênio¹⁰. Os dados citados acima encontram-se nas tabelas 6 e 7.

Tabela 6: Quantidade de Nitrogênio das amostras do ensaio de digestão.

Amostra	%N
PU 1011	19,52 %
PU 1012	21,11 %
PU 1013	22,70 %
PU 1037	19,64 %
PU 1038	20,19 %
PU 1039	21,40 %
PU 10310	20,29 %

Tabela 7: Quantidade de Nitrogênio liberada pelas amostras do ensaio de liberação.

Ensaio	Tempo	%N média Liberada
1	24h	(09,90 ± 0,66) %
	7d	(31,20 ± 0,73) %
	21d	(35,20 ± 0,18) %
	28d	(36,10 ± 0,04) %
2	24h	(04,50 ± 0,29)%
	7d	(27,30 ± 0,70) %
	21d	(37,80 ± 0,18) %
	28d	(39,30 ± 0,04) %

CONCLUSÕES

Como verificado pela caracterização porosimétrica e comprovado pela determinação de Nitrogênio total de digestão, é possível inocular macro e micronutrientes (e outras partículas) nos poros da perlita criogênica residual. Além disso, foi comprovado, também, que o material não sofreu perdas significativas por fogo. Dito isso, de acordo com a norma EN 13266:2001, o fertilizante especial desenvolvido se encaixa na categoria de fertilizantes de liberação lenta, dada a liberação média de menos de 7,5 % de Nitrogênio em 24 horas e menos de 38 % após 28 dias.

REFERÊNCIAS

AHMED, Ismail M.; HAMED, Mostafa M.; METWALLY, Sayed S. Experimental and mathematical modeling of Cr(VI) removal using nano-magnetic Fe3O4-coated perlite from the liquid phase. Chinese Journal of Chemical Engineering, v.28, n.6, p. 1582–1590, 2020. Disponível em: <<https://www.scopus-com.ez24.periodicos.capes.gov.br/record/display.uri?eid=2-s2.0-85084823392&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&sot=b&sdt=b&s=ALL%2810.1016%2Fj.cjche.2019.12.027%29&sessionSearchId=b4bd8f8876d7821b50d1858d9088a24d>>. Acesso em: 2 jul. 2025.

CEON, **Extrativa mineral e de transformação - Anuário Estatístico do Brasil - IBGE**, Anuário Estatístico do Brasil - IBGE, disponível em: <<https://anuario.ibge.gov.br/2023/industria/extrativa-mineral-e-de-transformacao.html>>. acesso em: 12 jul. 2025.

HAMID REZA ROOSTA; AZAD, Hossein Sharifi; SEYED HOSSEIN MIRDEHGHAN, Comparison of the growth, fruit quality and physiological characteristics of cucumber fertigated by three different nutrient solutions in soil culture and soilless culture systems, **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, 2025.

JARQUÍN-ROSALES, Domitila; VALLE, José Raymundo Enríquez-del; ALPUCHE-OSORNO, Juan José; et al. Agave angustifolia bulbil growth in different substrates, with doses of fertigation and inoculation with Azospirillum brasilense. *Ciência Rural*, v. 53, n. 3, 2023. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/cr/a/pWF7gdHSrDghLfmjRH4Dstv/?lang=en>>. Acesso em: 28 mar. 2023.

KHOSHRAFTAR, Zohreh; MASOUMI, Hadiseh ; GHAEMI, Ahad. On the performance of perlite as a mineral adsorbent for heavy metals ions and dye removal from industrial wastewater: A review of the state of the art. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 8, 2023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666016423000907#bib44>>. Acesso em: 24 fev. 2024.

NASERI, Elham; DALIR, Neda; MOKHTASSI-BIDGOLI, Ali; et al. Optimizing saffron cormlet production through substrate composition nutrient concentration and irrigation management in soilless cultivation. *Scientific Reports*, v. 15, n. 1, 2025. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/s41598-024-81282-5>>. Acesso em: 2 jul. 2025.

PANADDA RUNGRUENG; MONTREE HANKOY; METTAYA KITIWAN; et al. Fabrication and Characterization of Lightweight Aggregates with Expanded Perlite and NPK Nutrient Incorporation. *Open Ceramics*, v. 22, n. 2666-5395, p. 100790–100790, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666539525000574?pes=vor&utm_source=scopus&getft_integrator=scopus>. Acesso em: 2 jul. 2025.

TEIXEIRA, Paulo Cesar; DONAGEMMA, Guilherme Kangussu ; FONTANA, Ademir ; et al. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1085209/manual-de-metodos-de-analise-de-solo>>. Acesso em: 1 jul. 2025.

ANDA - Recursos. ANDA. Disponível em: <<https://anda.org.br/recursos/#pesquisa-setorial>>. Acesso em: 12 jul. 2025.

Slow-release fertilizers. Determination of the release of the nutrients. Method for coated fertilizers. <https://www.en-standard.eu/bs-en-13266-2001-slow-release-fertilizers-determination-of-the-release-of-the-nutrients-method-for-coated-fertilizers/>: [s.n.], 2002.