



II-176 - O IMPACTO DA APLICAÇÃO DE VINHOTO NO SOLO: MODELAGEM NUMÉRICA DA DISTRIBUIÇÃO DE NUTRIENTES E OPORTUNIDADES DE REAPROVEITAMENTO EM DESTAQUE

Thais Girardi Carpane

Engenheira Ambiental e Sanitarista pela Universidade Federal de Juiz de Fora. Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais. Doutoranda em Hidráulica e Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais.

Míriam Cristina Santos Amaral

Engenheira Química pela Universidade Federal de Minas Gerais. Mestre e Doutora em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais. Professora associada do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais.

Victor Rezende Moreira⁽¹⁾

Engenheiro Químico pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Mestre e Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais. Professor adjunto do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais.

Endereço⁽¹⁾: Av. Antônio Carlos, 6627 – Escola de Engenharia, Bloco 1 – 4º andar, sala 4622. Pampulha, Belo Horizonte – Minas Gerais – Brasil. CEP: 31270-010. E-mail: victor@desa.ufmg.br; victorrznde.eng@gmail.com

RESUMO

O impacto da aplicação de vinhoto no solo é uma questão relevante na agricultura, especialmente na cultura da cana-de-açúcar. Este estudo se concentra na modelagem numérica da distribuição de nutrientes após a aplicação de vinhoto no solo, buscando entender melhor como esses nutrientes se dispersam e interagem com o solo. Além disso, o trabalho destaca as oportunidades de reaproveitamento do vinhoto, considerando sua riqueza em matéria orgânica e nutrientes. Ao compreender melhor a distribuição desses nutrientes, é possível maximizar os benefícios agrônômicos do vinhoto, reduzindo também possíveis impactos ambientais negativos, como a lixiviação de nutrientes para os corpos d'água. Foi perceptível a relação entre a concentração de nutriente no efluente e a sua recuperação quando ao reuso, sendo o potássio o nutriente que apresentou maior taxa de recuperação. Ademais, foi observada a linearidade da concentração de nutriente presente no vinhoto comparativamente com sua concentração no solo. Dessa forma, é possível identificar a grande oportunidade de reuso de nutrientes proporcionada pela fertirrigação do vinhoto, dando uma maior aplicabilidade ao conceito de economia circular, uma vez que os resíduos das usinas sucroalcooleiras se tornam matéria prima para a produção da cana-de-açúcar e destaca-se a necessidade de cuidados como a determinação de forma correta dos parâmetros de aplicação para evitar possíveis impactos ambientais.

PALAVRAS-CHAVE: Fertirrigação, Efluente Industrial, Transporte de Nutrientes, Solo e Águas Subterrâneas, Economia Circular.

INTRODUÇÃO

O setor sucroalcooleiro é um dos segmentos mais tradicionais do país, com grande impacto na economia brasileira. O país é o segundo maior produtor de etanol do mundo, o primeiro em produção de cana-de-açúcar e o principal exportador destes itens (UNICA, 2024). Entretanto, aliado a esta grande produção está a geração de resíduos, com destaque para o vinhoto. Trata-se de um efluente proveniente da destilação de uma solução alcoólica, o vinho, obtida no processo de fermentação do álcool. Em média, espera-se que para cada litro de etanol produzido sejam gerados de 10 a 15 litros de vinhoto, sendo produzidos, aproximadamente, 300 bilhões de litros anualmente deste resíduo (SANTOS *et al.*, 2019).



A composição do vinhoto varia de acordo com o processo produtivo utilizado na usina. Em geral, ele é caracterizado pela elevada concentração de matéria orgânica e nutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio, que quando aplicados ao solo podem resultar em grandes benefícios para o sistema solo-planta. Os benefícios da prática de aplicação incluem uma maior fertilidade do solo, aprimoramento de sua estrutura física, da atividade microbiana e resultante aumento da produtividade agrícola (SILVA, 2020; Fuess e Garcia, 2014). Devido a estes benefícios, que a prática de fertirrigação é utilizada para a disposição do vinhoto sendo uma forma de reaproveitar o potencial nutricional existente neste resíduo.

Embora a prática de fertirrigação possa trazer muitos benefícios para os produtores, existem algumas desvantagens como a determinação de uma taxa de aplicação que seja segura aos solos, a possibilidade de lixiviação de nutrientes e o risco de salinização pelo excesso de concentração de sais no perfil do solo, que alertam para o cuidado sobre essa prática. Desta forma, o entendimento da distribuição dos nutrientes no solo, assim com o seu comportamento de percolação é de extrema importância para garantir a qualidade ambiental no reuso do vinhoto via fertirrigação.

O objetivo deste estudo foi abordar a distribuição e o transporte de nutrientes no solo por meio de modelagem numérica, considerando os principais processos envolvidos, a saber difusão, advecção e dispersão mecânica, bem como o fenômeno primordial de interação entre contaminantes e solo, que é o processo de adsorção. Além disso, foi avaliado a disponibilidade de nutrientes provenientes do vinhoto para sua aplicação como fertilizante e em outras formulações, no contexto do reaproveitamento de subprodutos de águas residuais.

MATERIAIS E MÉTODOS

Caracterização dos parâmetros de interesse

O vinhoto utilizado foi advindo da cana-de-açúcar, amostrado em uma indústria de bioetanol localizada no estado de Minas Gerais (Brasil), responsável por uma produção diária de vinhaça de 12.649 m³ (527 m³/h). As amostras coletadas foram armazenadas a 4°C até os procedimentos experimentais poderiam ser concluídos. Sua caracterização físico-química está apresentada da Tabela 1.

Tabela 1: Caracterização do vinhoto coletado em relação aos principais componentes.

Parâmetros	Unidade	Valor
DQO	mg/L	83.000
Condutividade Elétrica	mS/cm	12,1
pH		4,6
Nitrogênio	mg/L	716
Fósforo	mg/L	2.276
Potássio	mg/L	3.836

Para caracterização do solo estudado e determinação dos parâmetros de modelagem da distribuição dos nutrientes foi considerado um solo argiloso, uma vez que é característico da maioria do território brasileiro. Considerou-se que a parcela de aplicação do vinhoto possui 5 metros de comprimento e 2 metros de profundidade, sendo considerados para análise do modelo dispersivo uma única aplicação de 1 m³ de vinhoto.

Descrição da modelagem empregada

O modelo para avaliação da distribuição de nutrientes fundamenta-se na equação de transporte de solutos no solo, abrangendo tanto a dimensão temporal quanto espacial. Ele incorpora os processos de difusão, advecção, e dispersão mecânica, com o termo adicional de adsorção no solo. A expressão matemática que representa o modelo pode ser formalizada conforme indicado na Equação 1-2, e os parâmetros descritos na Tabela 2. Sua discretização numérica foi realizada através do emprego de diferenças finitas, aproximando, assim, as derivadas espaciais e temporais. A discretização foi aplicada separadamente para as direções horizontal (x) e vertical (y).



$$\frac{\partial C}{\partial t} = \omega D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + v_x \frac{\partial C}{\partial x} + \alpha_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - K_d C \frac{\partial C}{\partial t} = \omega D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + v_x \frac{\partial C}{\partial x} + \alpha_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - K_d C$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \omega D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + v_x \frac{\partial C}{\partial x} + \alpha_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - K_d C$$

equação (1)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \omega D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + v_y \frac{\partial C}{\partial y} + \alpha_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - K_d C \frac{\partial C}{\partial t} = \omega D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + v_y \frac{\partial C}{\partial y} + \alpha_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - K_d C$$

equação (2)

Tabela 2: Variáveis utilizadas para a modelagem do transporte de nutrientes no solo.

Variável	Símbolo	Valor	Unidade	Referência
$D_{x,y}$	Coeficiente de difusão horizontal(x)/ vertical (y)	$D_{x,N}D_{x,N}$: 4,43.10 ⁻¹⁰	m ² /s	Nascentes <i>et al.</i> , (2009), Costa <i>et al.</i> , (2009)
		$D_{y,N}D_{y,N}$: 0,3 $D_{x,N}D_{x,N}$		
		$D_{x,K}D_{x,K}$: 3,81.10 ⁻¹⁰		
		$D_{y,K}D_{y,K}$: 0,3 $D_{x,K}D_{x,K}$		
		$D_{x,P}D_{x,P}$: 6,17.10 ⁻¹³		
		$D_{y,P}D_{y,P}$: 0,3 $D_{x,P}D_{x,P}$		
$v_{x,y}$	Velocidade horizontal (x)/ vertical (y) de advecção	$v_x v_x$: 1,62.10 ⁻⁴	m/s	Wanderley (2000)
		$v_y v_y$: 0,3 $v_x v_x$		
$\alpha_{x,y}$	Coeficiente de dispersão mecânica horizontal (x)/vertical (y)	$\alpha_x \alpha_x$: 1,62.10 ⁻⁶	m ² /s	Wanderley (2000)
		$\alpha_y \alpha_y$: 0,3 $\alpha_x \alpha_x$		
K_d	Coeficiente de distribuição para adsorção	$K_{d,N}K_{d,N}$: 1,3.10 ⁻³	m ³ /kg	Pires (2007)
		$K_{d,P}K_{d,P}$: 1,5.10 ⁻³		
		$K_{d,K}K_{d,K}$: 1,8.10 ⁻³		
C	Concentração do nutriente	$C_N C_N$: 0.716	kg/m ³	-
		$C_P C_P$: 2.276		
		$C_K C_K$: 3.839		
ω	Tortuosidade do solo	0.4	-	Costa <i>et al.</i> , (2009)
x,y	Posições horizontal e vertical	-	m	-
t	Tempo	-	s	-



A implementação prática da solução desta equação foi conduzida por meio do software MATLAB (R2018b). No contexto do modelo, considerou-se um lançamento pontual do composto no ponto $L/2$ da parcela, assumindo que o transporte seguiria um padrão de dispersão modelado como uma função gaussiana. A discretização dos parâmetros espaciais e temporais foi uniforme, simplificando a modelagem, embora limitando-a em cenários mais complexos. Importante ressaltar que certos elementos foram desconsiderados na modelagem, como a heterogeneidade do solo. Dado o curto intervalo temporal considerado na simulação, também foram desconsideradas as variações temporais nas propriedades do solo, bem como reações químicas complexas.

RESULTADOS

A Figura 1 exibe o mapa de concentração de potássio, nitrogênio e fósforo no solo, ao longo da parcela de aplicação, com os eixos x representando o comprimento da parcela e y indicando a profundidade do solo. As escalas e representações foram mantidas uniformes, variando de 0 a 4,0 kg/m^3 para facilitar a comparação.

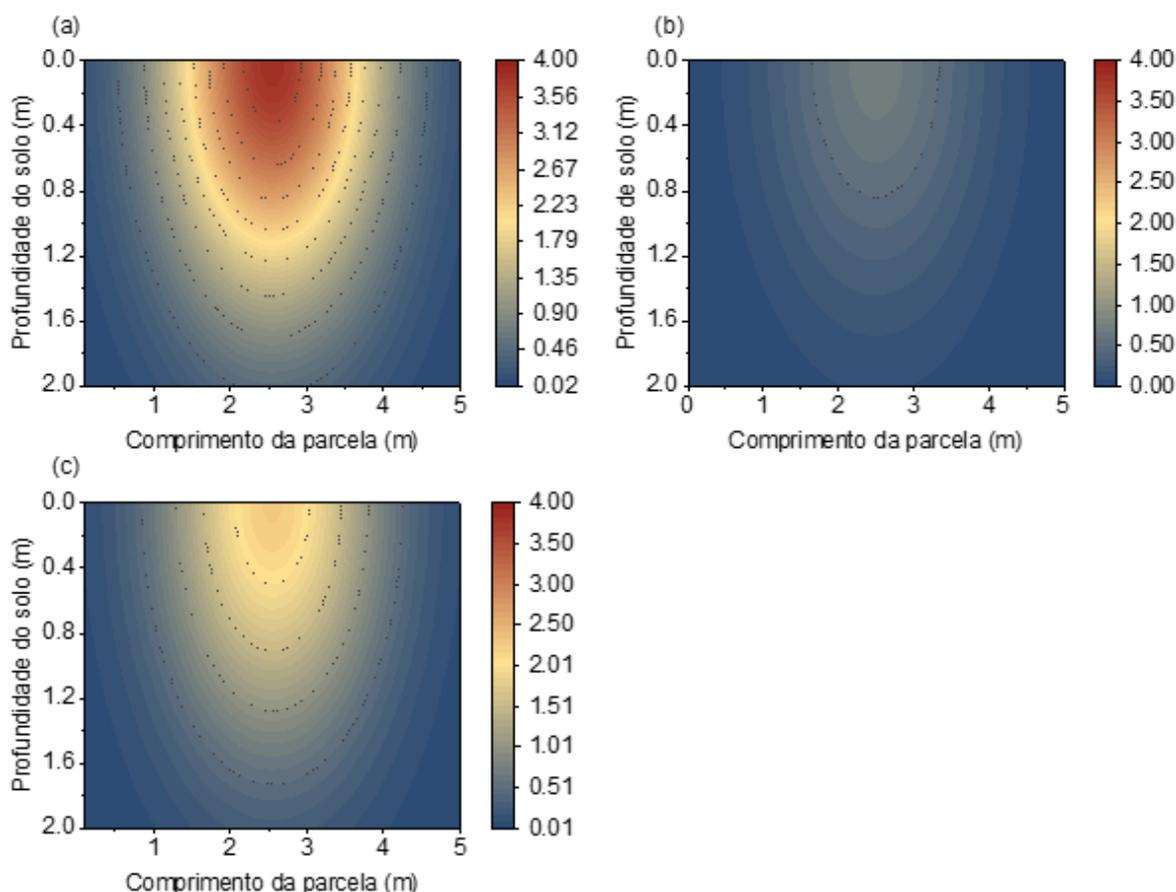


Figura 1. Distribuição de (a) potássio, (b) nitrogênio e (c) fósforo no solo após aplicação do vinhoto. A escala dos gráficos de contorno foi mantida entre 0 – 4,0 kg/m^3 para fins de comparação.

Com o intuito de aprimorar a visualização das concentrações de nitrogênio e fósforo, foram criados mapas de concentração no solo (Figura 2), ajustando a escala para variar entre os valores mínimos e máximos de concentração desses elementos no vinhoto. Em complemento, A Figura 3 apresenta o perfil de concentração no solo para os três macronutrientes.

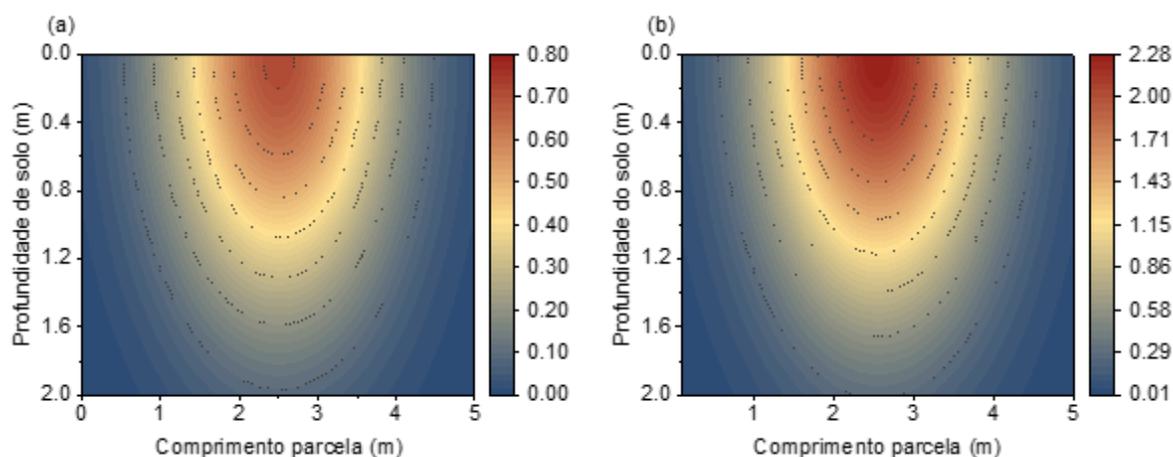


Figura 2: Ampliação para visualização detalhada da distribuição de (a) nitrogênio e (b) fósforo no solo, destacando os resultados após a aplicação do vinhoto para facilitar a interpretação do mapa de concentração. A escala dos gráficos está expressa em kg/m^3 .

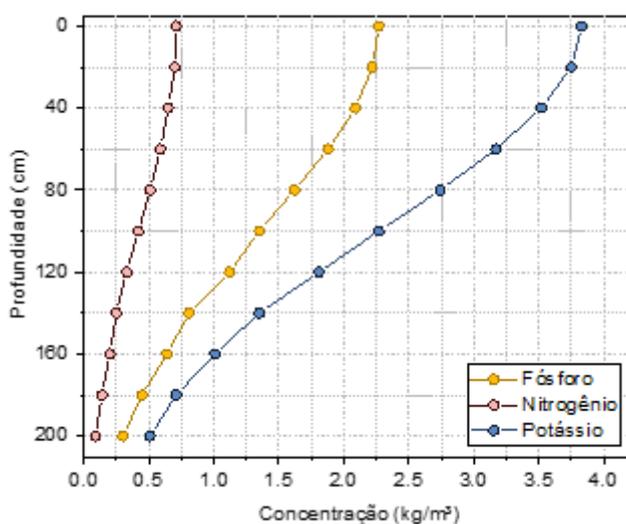


Figura 3: Perfil de concentração no solo para os macronutrientes potássio, nitrogênio e fósforo.

Na Figura 4, são apresentadas de forma resumida as principais informações referentes ao balanço de massa realizado. Para cada nutriente, a figura destaca a massa total recuperada, a quantidade passível de reaproveitamento na cultura e a porção remanescente, que representa a quantidade de nutriente recuperado descontada do valor já reaproveitado na cultura. Foi considerado que a quantidade reaproveitada seria suficiente para uma produção de 100 toneladas de cana-de-açúcar por hectare (280:50:50 para N:P:K), resultando em valores inferiores a 0,1% da quantidade total de nutrientes recuperada.



CONCLUSÕES

Diante do trabalho apresentado é possível identificar a grande oportunidade de reuso de nutrientes proporcionada pela fertirrigação do vinhoto, dando uma maior aplicabilidade ao conceito de economia circular, uma vez que os resíduos das usinas sucroalcooleiras se tornam matéria prima para a produção da cana-de-açúcar. Além disso, o reaproveitamento agrícola dos nutrientes presentes no vinhoto, além de apresentarem valor ambiental, pode também proporcionar um valor econômico aos produtores, já que irá diminuir os gastos com adubos químicos e, conseqüentemente, é uma forma de diminuir a dependência na compra destes itens. Entretanto, ressalta-se a necessidade de cuidados como a determinação de forma correta dos parâmetros de aplicação para que a prática de fertirrigação seja realizada de forma correta e que não apresente riscos aos solos e às águas subterrâneas.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi financiada pela Pró-reitoria de Extensão da Universidade Federal de Minas Gerais (PROEX – UFMG), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Observatório de cana e bioenergia - UNICA “Exportação anual de etanol por local de embarque (mil litros),” 2024. <https://unicadata.com.br/listagem.php?idMn=24>.
2. SANTOS, J. F., CANETTIERI, E. V., SOUZA, S. M. A. R. C., RODRIGUES, L. B., MARTÍNEZ, E. A. “Treatment of sugarcane vinasse from cachaça production for the obtainment of *Candida utilis* CCT 3469 biomass,” *Biochem Eng J*, vol. 148, pp. 131–137, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.bej.2019.04.009.
3. SILVA, L. C. M. “Avaliação do crescimento de microrganismos fotossintetizantes em fotobiorreator tubular empregando nutrientes provenientes da vinhaça tratada,” Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.
4. L. T. Fuess and M. L. Garcia, Qual o valor da vinhaça?, 1st ed., vol. 1. 2012.
5. Nascentes, R. et al., “Coeficiente de difusão de nitrato e potássio em solo fertirrigado com vinhaça,” *Geotecnia*, vol. 117, pp. 43–70, 2009.
6. Costa, J. P. V., Bastos, A. L., Reis, L. S., Martins, G. O., Santos, A. F. “Difusão de fósforo em solos de alagoas influenciada por fontes do elemento e pela umidade,” *revista caatinga*, vol. 22, no. 3, pp. 225–231, Jun. 2009.
7. Wanderley, R. M. “Modelo advectivo-dispersivo de transporte de solutos em solo não-saturado utilizando os métodos das características e dos elementos finitos,” Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, 2000.
8. Pires, J.A.C. “Estudo de barreira de proteção com solo compactado em célula experimental no aterro sanitário de rio das ostras (rj),” Mestrado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
9. Costa, J. P. V., Barros, N. F., Bastos, A. L., Albuquerque, A. W. “Fluxo difusivo de potássio em solos sob diferentes níveis de umidade e de compactação,” *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 13, no. 1, pp. 56–62, Jun. 2009.
10. Castioni, G. A. F. et al., “Sistema radicular da cana-de-açúcar em diferentes configurações de plantio submetido ao controle de tráfego agrícola,” in XXXV Congresso Brasileiro de Ciência do SOlo, Natal, Aug. 2015, pp. 1–10.
11. Carpanez, T. G., Moreira, V. R., Assis, I. R., Amaral, M. C. S. “Sugarcane vinasse as organo-mineral fertilizers feedstock: Opportunities and environmental risks,” *Science of The Total Environment*, vol. 832, p. 154998, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.154998.