



II-147 - ESTUDO DA EMISSÃO DE CARBONO (CO₂) NA INCORPORAÇÃO DE VINHOTO NO SOLO EM DIFERENTES ABORDAGENS DE TRATAMENTO

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; victorrrznde.eng@gmail.com

RESUMO

A incorporação de vinhoto no solo é uma prática comum na agricultura, especialmente na cultura da cana-de-açúcar. O vinhoto é um subproduto da produção de etanol, rico em matéria orgânica e nutrientes. No entanto, sua aplicação pode resultar na emissão de carbono (CO₂) devido à decomposição da matéria orgânica presente. Diferentes abordagens de tratamento do vinhoto podem influenciar essa emissão. Por outro lado, a aplicação direta de vinhoto no solo sem tratamento prévio pode resultar em uma maior emissão de CO₂ devido à decomposição mais rápida da matéria orgânica. Portanto, a escolha da abordagem de tratamento do vinhoto pode afetar significativamente a quantidade de gases emitidos durante sua incorporação no solo, destacando a importância de práticas agrícolas sustentáveis para minimizar o impacto ambiental. Sendo assim, o presente trabalho investigou as emissões de CO₂ durante a incorporação de vinhoto no solo, considerando diferentes abordagens de tratamento baseadas em processos de separação por membranas. Observou-se uma maior produção de gases de efeito estufa ao aplicar o concentrado da ultrafiltração, devido às concentrações mais elevadas de matéria orgânica nessa corrente. As correntes de vinhoto bruto e concentrado da nanofiltração, o oxigênio disponível foi suficiente para a estabilização aeróbia da matéria orgânica, sem induzir condições anaeróbias ou anóxicas no solo. Dessa forma, é possível identificar a oportunidade de reuso de matéria orgânica presente no vinhoto, dando uma maior aplicabilidade ao conceito de economia circular, sendo uma forma de destinação ambientalmente correta para este resíduo altamente poluidor.

PALAVRAS-CHAVE: Emissão de Gases de Efeito Estufa, Reaproveitamento nutricional, Resíduos Agroindústria, Solos e Águas Subterrâneas.



As emissões de gases de efeito estufa (GEEs) são caracterizadas pelo seu aumento crescente ao longo dos anos, sendo que em 2022 os níveis atmosféricos médios anuais de dióxido de carbono (CO₂) atingiram um máximo recorde de 418,56 partes por milhão (ppm). Isto representa um aumento anual de 0,5%, conforme apontou o levantamento da série histórica de dados de 1941 a 2022 (STATISTA, 2024). De acordo com o Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2024) nos dados levantados entre 1990 e 2022, as principais atividades brasileiras geradoras de GEEs são as mudanças de usos de terras seguida pela agropecuária, produção de energia e processos industriais (Figura 1).

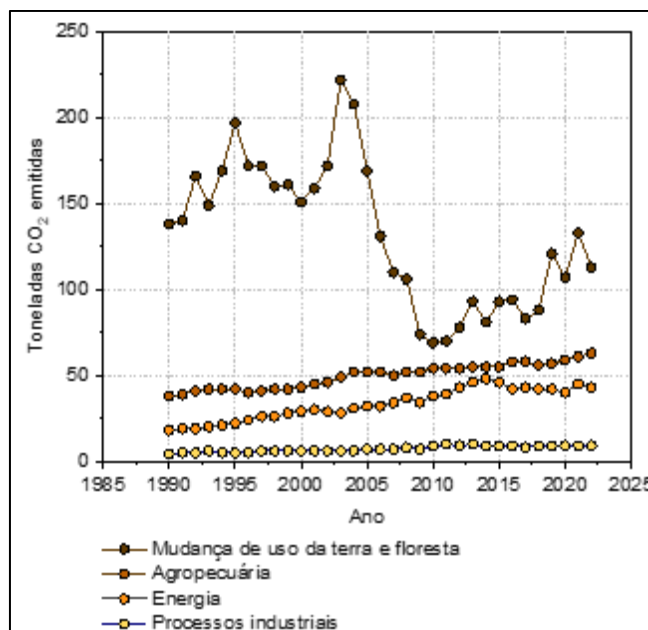


Figura 1: Série histórica das atividades brasileiras quando à emissão de gases de efeito estufa. Adaptado de SEEG (2024)

As mudanças no uso das terras, embora possam ocorrer de forma natural, causam alterações na cobertura dos solos. Quando ocorrem devido à ação antrópica, impactam diretamente no aumento das emissões de GEEs. Uma forma de reduzir esse impacto é a adaptação dos sistemas de plantio com a finalidade de evitar o solo exposto, assim como o seu revolvimento. Além disso, uma visão holística e integrada de todo o sistema produtivo também favorece para uma diminuição das emissões de gases, como por exemplo um menor uso de fertilizantes obtidos da exploração de fontes primárias.

Uma forma de diminuir a dependência da aquisição de fertilizantes convencionais seria realizar o reuso dos nutrientes existentes nos próprios resíduos da agroindústria, como é o caso do vinhoto, a principal água residuária do setor sucroalcooleiro, obtida no processo de fermentação do álcool (SANTOS *et al.*, 2019). Um dos principais constituintes do vinhoto, e presente em elevadas concentrações, é a matéria orgânica (MO), que quando disposta no solo sem o devido tratamento pode causar impactos ambientais, como a diminuição do oxigênio disponível e a formação de regiões anaeróbicas no solo (VON SPERLING, 2014). Outro impacto ainda pouco estudado é a geração de GEEs, notadamente CO₂, formados no processo de estabilização da MO.

OBJETIVO

O presente trabalho objetivou avaliar as emissões de carbono (CO₂) na incorporação de vinhoto no solo em diferentes abordagens de tratamento baseadas em processos de separação por membranas.

MATERIAIS E MÉTODOS

O vinhoto utilizado foi proveniente da cana-de-açúcar e coletado em uma indústria de bioetanol localizada no estado de Minas Gerais, Brasil. Essa indústria é responsável por uma produção diária de vinhaça de 12.649 m³

(527 m³/h). Os experimentos consistiram em ensaios de ultrafiltração, seguidos por nanofiltração, em uma rota integrada para a concentração de potássio e obtenção de água para reúso a partir do vinhoto. Detalhes sobre a operação dos sistemas de tratamento são apresentados em SANTOS (2022). No estudo atual, o foco será no teor de matéria orgânica presente nas correntes geradas e no potencial impacto que elas teriam se dispostas no solo, bem como na geração de CO₂. A caracterização físico-química das correntes consideradas está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Caracterização físico-química do vinhoto e correntes geradas após o tratamento pelos processos de separação por membranas. *VAR: *vinasse application rate* ou taxa de aplicação do vinhoto, definido com base na concentração de potássio e sua demanda pela cultura de cana de açúcar.

PARÂMETRO	VINHOTO BRUTO	CONCENTRADO DA ULTRAFILTRAÇÃO	CONCENTRADO DA NANOFITLRAÇÃO
Carbono orgânico (mg/L)	164.585	447.685	156.001
Nitrogênio (mg/L)	665	675	1.041
Fósforo (mg/L)	220	186	260
Potássio (mg/L)	13.645	21.825	18.916
VAR (m ³ /ha)*	184	115	133
Potencial de área irrigada (ha/d)	68	22	30

Para estabelecimento dos parâmetros foi considerado um solo caracterizado como planossolo, de textura franco-arenosa. Considerou-se que o vinhoto bruto, ou as correntes de concentrado geradas após o tratamento por membranas, seria aplicado em uma área de 1 hectare em uma única aplicação do volume (VAR) definido na Tabela 1.

Foi desenvolvido um modelo computacional para simular o comportamento dinâmico das variáveis O₂, matéria orgânica e CO₂ ao longo de um período de 10 dias, considerando uma única etapa de aplicação e incorporando processos biogeoquímicos pertinentes. O código foi construído e implementado em Matlab, utilizando as seguintes equações diferenciais para descrever a evolução do sistema ao longo do tempo.

$$\frac{d[MO]}{dt} = -k_{MO}[MO](1 - reoxigenação) \quad \frac{d[MO]}{dt} = -k_{MO}[MO](1 - reoxigenação) \quad \text{equação (1)}$$

$$\frac{d[O_2]}{dt} = -k_{O_2}[MO](1 - reoxigenação) \quad \text{equação (2)}$$

$$\frac{d[CO_2]}{dt} = k_{CO_2}[MO] \quad \text{equação (3)}$$

Pressupõe-se que o sistema é homogêneo, desconsiderando as heterogeneidades espaciais no solo. Além disso, assumiu-se que o decaimento da matéria orgânica segue um modelo de primeira ordem, implicando que a taxa de decaimento é proporcional à concentração da matéria orgânica. Eventos de reoxigenação foram modelados como eventos periódicos a intervalos regulares.

RESULTADOS

Os resultados da simulação da concentração de matéria orgânica, oxigênio e dióxido de carbono no solo para a aplicação do vinhoto bruto, do concentrado da ultrafiltração e do concentrado da nanofiltração estão representados na Figura 2.

(a)

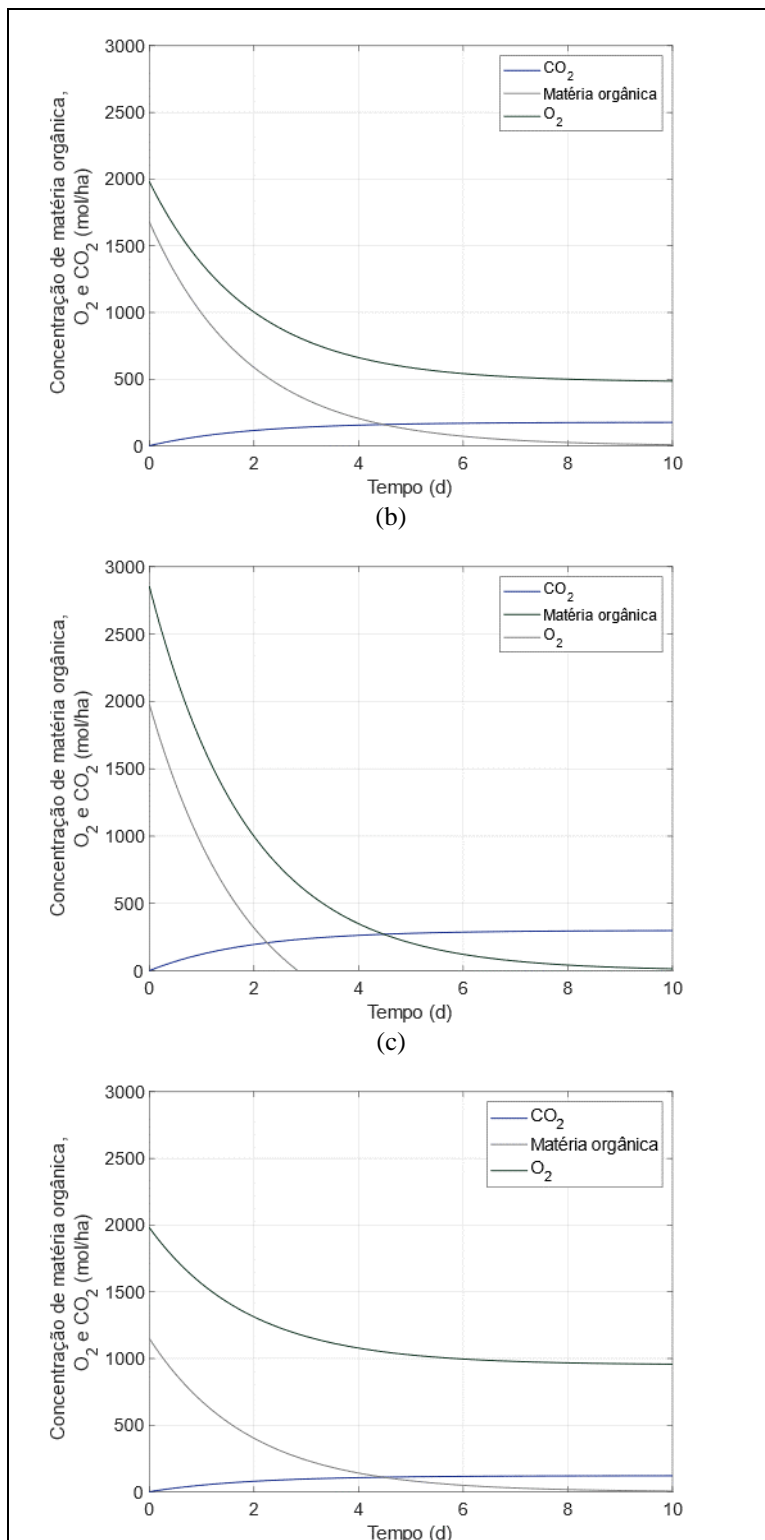


Figura 2: Perfil de concentração de matéria orgânica, oxigênio (O₂) e dióxido de carbono (CO₂) no solo, após aplicação das correntes de (a) vinhoto bruto, (b) concentrado da ultrafiltração, e (c) concentrado da nanofiltração.

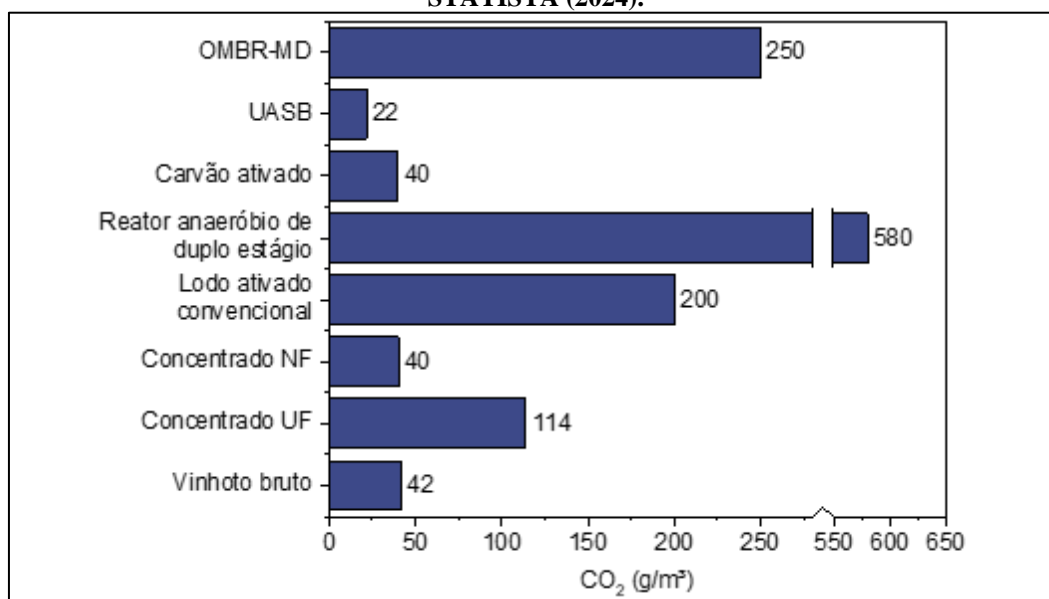
A Tabela 2 exibe o acumulado de CO₂ decorrente da aplicação das três correntes analisadas e da subsequente estabilização da matéria orgânica no tempo de 10 dias. Como esperado, observa-se uma maior produção de gases de efeito estufa (GEE) ao utilizar o concentrado da ultrafiltração, devido às concentrações mais elevadas de matéria orgânica nessa corrente. Vale notar que, para as correntes de vinhoto bruto e concentrado da nanofiltração, as concentrações disponíveis de oxigênio são suficientes para a estabilização aeróbia da matéria orgânica, sem induzir condições anaeróbias ou anóxicas no solo.

Tabela 2: Concentração de matéria orgânica, oxigênio (O₂) e dióxido de carbono (CO₂) no solo, após 10 dias de aplicação.

PARÂMETRO	VINHOTO BRUTO	CONCENTRADO DA ULTRAFILTRAÇÃO	CONCENTRADO DA NANOFILTRAÇÃO
Matéria orgânica (mol/ha)	8.81	14.98	6.03
O ₂ (mol/ha)	485.30	<0	957.28
CO ₂ final	175.97	298.52	120.74

Por fim, a Figura 3 apresenta uma comparação das emissões de CO₂ resultantes da prática de disposição das correntes no solo em relação a outras técnicas de tratamento potencialmente aplicáveis para o efluente gerado.

Figura 3. A comparação entre diversas tecnologias aplicadas no tratamento de efluentes em relação às suas emissões de CO₂ por metro cúbico de efluente tratado/disposto (g/m³). UASB: *up flow Anaerobic Sludge Blanket*; OMBR-MD: biorreator osmótico integrado ao processo de destilação por membranas; UF: ultrafiltração e NF: nanofiltração. Referência de emissão de CO₂ para as tecnologias apresentadas: STATISTA (2024).



Em análise ao perfil de concentração de matéria orgânica, O₂ e CO₂ no solo, após aplicação das correntes analisadas (Figura 2), é perceptível o consumo total do teor de oxigênio do solo para a estabilização da matéria orgânica, após 68 horas da aplicação da corrente no solo (Figura 2b). Comportamento diferente do observado para a aplicação das demais correntes analisadas (Figura 2a e Figura 2c), o que se justifica pela maior concentração de matéria orgânica presente no concentrado da ultrafiltração (Tabela 2), que consequentemente gera uma maior emissão de CO₂. Ao comparar os três cenários, a aplicação do concentrado da nanofiltração se destaca pela menor emissão de CO₂ e uma manutenção de maiores taxas de oxigênio no solo. Esta também é uma corrente enriquecida nos macronutrientes necessários para a cultura de cana-de-açúcar (conforme apresentado na Tabela 1).



Dessa forma, seria possível obter os benefícios do reaproveitamento dos nutrientes presentes no vinhoto, minimizando a geração de gases de efeito estufa (CO_2) ao utilizar o concentrado resultante da nanofiltração como corrente para a fertirrigação. Alternativas para redução dos gases emitidos pela aplicação do concentrado da ultrafiltração e o vinhoto bruto incluem o uso de pré-tratamentos que sejam capazes de remover a carga de matéria orgânica. Estes podem envolver a utilização de reatores biológicos, como aqueles assistidos por membranas. Assim, quando aplicada ao solo, pode resultar em benefícios para o sistema solo-planta como maior fertilidade do solo, melhorando de suas características físicas, químicas e biológicas (CERRI *et al.*, 2020; FUESS E GARCIA 2014).

Ressalta-se que as emissões de CO_2 variam com outros parâmetros além da característica do efluente, como por exemplo o tipo de solo utilizado e o tipo de manejo adota no sistema de plantio. Em solos com menor revolvimento e maior cobertura vegetal as emissões de CO_2 tendem a serem menores.

A comparação estabelecida das tecnologias encontradas na literatura com as utilizadas no trabalho, presente na Figura 3, demonstram que a geração de CO_2 proveniente das práticas de disposição no solo do concentrado da nanofiltração e do vinhoto bruto são semelhantes à outras tecnologias de tratamento, como reatores anaeróbios e carvão ativado, enquanto outras, como lodos ativados e técnicas avançadas demonstram maiores emissões de CO_2 , assim como a disposição do concentrado da ultrafiltração.

CONCLUSÕES

Diante do presente estudo é possível identificar a oportunidade de reuso de matéria orgânica presente no vinhoto, dando uma maior aplicabilidade ao conceito de economia circular, sendo uma forma de destinação ambientalmente correta para este resíduo altamente poluidor. Além disso, associado a este reuso, o trabalho mostra a perspectiva de uma alternativa de menor emissão de GEEs, além de proporcionar maior concentração de matéria orgânica e nutrientes presentes no vinhoto. Ressalta-se ainda a necessidade de cuidados como a determinação correta da taxa a ser aplicada para que a lâmina de resíduo não impacte negativamente o solo e para que o reuso do vinhoto seja realizado de forma correta, a fim de tornar os riscos ambientais desprezíveis.

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. STATISTA, “Average carbon dioxide (CO_2) levels in the atmosphere worldwide from 1959 to 2022 (in parts per million),” Statista, 2024. <https://www.statista.com/statistics/1091926/atmospheric-concentration-of-co2-historic/>
2. SISTEMA de ESTIMATIVA de EMISSÃO e REMOÇÃO de GASES de EFEITO ESTIFA - SEEG, “Emissões totais de CO_2 ,” SEEG, 2024. https://plataforma.seeg.eco.br/?highlight=br-net-emissions-by-sector&_gl=1*16lfrpt*_ga*NDk4Mzg3MjM3LjE3MDUwMDQwNTA.*_ga_XZWSWEJDWQ*MTcwNTAwNDA0OS4xLjAuMTcwNTAwNDA0OS4wLjAuMA.
3. SANTOS, J.F., CANETTIERI, E. V., SOUZA, S. M. A., RODRIGUES, R. C. 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, no. July 2018, pp. 131–137, 2019, doi: 10.1016/j.bej.2019.04.009.
4. VON SPERLING, M. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*, 4 Edição. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.
5. CERRI, B. C., BORELLI, L. M., STELUTTI, I. M., SOARES, M. R., DA SILVA, M. A. “Evaluation of new environmental friendly particulate soil fertilizers based on agroindustry wastes biopolymers and sugarcane vinasse,” *Waste Manag.*, vol. 108, pp. 144–153, 2020, doi: 10.1016/j.wasman.2020.04.038.



6. Fuess, L. T., Garcia, M. L. *Implications of stillage land disposal: A critical review on the impacts of fertigation. Journal of Environmental Management.* vol. 145, 210 – 229, 2014.