



**Desenvolvimento de uma Métrica Multicritério para Avaliação da Sustentabilidade de Adsorventes: da Produção ao Descarte**

**Aline S. de Jesus (PG)\**¹,* Gabriel M. D. Ferreira (PQ)2, Guilherme M. D. Ferreira (PQ)3, Aparecida B. Mageste (PQ)\*2**

\* aline.simoura@gmail.com; aparecida.mageste@ufop.edu.br.***¹***Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, UFOP; 2Departamento de Química, UFOP; 3Departamento de Química, UFLA.

**RESUMO**

O crescente desenvolvimento de novos materiais adsorventes para aplicações ambientais demanda critérios objetivos para avaliar sua sustentabilidade ao longo de todo o ciclo de vida. Este trabalho propõe uma métrica multicritério inédita, denominada Adsorbent Sustainability Index (ADSUS), para quantificar a sustentabilidade de adsorventes considerando as etapas de produção, aplicação e descarte. A métrica integra parâmetros técnicos, ambientais e econômicos, como tipo de matéria-prima, consumo energético, eficiência de adsorção, regenerabilidade e descarte. Atribuindo pesos específicos a cada critério, o ADSUS gera um índice unificado que permite comparar diferentes adsorventes sob uma perspectiva abrangente.

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

*Palavras-chave: sustentabilidade, adsorventes, avaliação multicritério, química verde, ciclo de vida.*

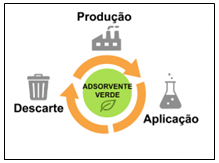
*\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_*



**Introdução**



A crescente demanda por processos ambientalmente responsáveis impulsiona o desenvolvimento de tecnologias alinhadas à Química Verde. Nesse cenário, a adsorção destaca-se como técnica eficaz na remoção de poluentes orgânicos e inorgânicos, combinando eficiência, simplicidade operacional e baixo custo (1–2). O avanço de materiais inovadores, como organo-LDHs, MOFs e biocompósitos, tem ampliado as aplicações em tratamento de efluentes e remediação ambiental (4,5). No entanto, a ausência de métricas integradas que avaliem a sustentabilidade dos adsorventes ao longo de todo o seu ciclo de vida — da produção ao descarte — limita comparações objetivas e decisões orientadas por critérios ambientais (Figura 1). O desenvolvimento dessas métricas é fundamental para promover adsorventes verdadeiramente sustentáveis e otimizar sua aplicação.



**Figura 1.** Criação de métricas integradas capaz de avaliar os adsorventes ao longo de todo o seu ciclo de vida, desde a produção até a aplicação e o descarte.

**Metodologia para construção da Métrica**

***Abordagem Geral:***

* Método multicritério;
* Justificativa dos critérios e subcritérios: serem obetivos e abordarem todo o ciclo de vida do adsorvente. Cada etapa

recebeu um peso e a nota final máxima é 1,0. Assim:

Uma placa com texto

O conteúdo gerado por IA pode estar incorreto.

**Figura 2.** Atribuição de peso para cada etapa do ciclo de vida dos adsorventes.

***Estrutura da métrica ADSUS:***

Dividido em três eixos principais, cada um com critérios, avaliados de 0 a 1,0, e esses podem ser subdivididos quando sua resposta for subjetiva, gerando médias ponderadas. Veja fluxograma abaixo (Figura 2)..

Diagrama

O conteúdo gerado por IA pode estar incorreto.

**Figura 2.** Fluxograma de criação das métricas com estabelecimentos dos critérios e notas.

**Resultados e Discussão**

**A seguir é apresentado a criação dos critérios da métricas para cada etapa e detalhada apenas um critério subjetivo para cada.**

1. **Produção (P):** Avalia o impacto ambiental da síntese/fabricação do adsorvente (Tabela 1).

|  |  |
| --- | --- |
| **Critério** | **Nota** |
| Matéria-prima biomassa/resíduo agro-industrial, biomoléculas | 0,2 |
| Uso de matéria-prima tóxicas ou potencialmente agressivas ao meio ambiente (surfactantes, compostos orgânicos voláteis, P,N,S) | 0,2 |
| Baixo uso de solventes tóxicos (subjetivo) | 0,2 |
| Baixo consumo energético (subjetivo) | 0,2 |
| Processo com poucos resíduos (subjetivo) | 0,2 |
| **Total (P\*0,4 peso atribuído a esta etapa):** | **0,4** |

**Tabela 1.** Critérios principais avaliados na etapa de produção dos adsorventes.



* **Análise de Critérios Subjetivos –** atribuir escalas de classificação ao critério de a cordo com que se possa quantificar sua contribuição para a sustentabilidade da etapa de forma simples e clara para quem está avaliando. Por exemplo:

**Critério: Processo com poucos resíduos** –Avaliar a eficiência atômica ou E-factor (massa de resíduos gerados / massa de produto útil).

**Respostas (Tabela 2):**

|  |  |
| --- | --- |
| **Geração estimada de resíduos sólidos** | **Subpeso** |
| Processo sem resíduos ou com reaproveitamento total | 1,0 |
| < 1 g de resíduo por g de adsorvente | 0,75 |
| 1–5 g de resíduo por g de adsorvente | 0,5 |
| > 5 g/g de resíduo, sem recuperação | 0,25 |
| Processo gera resíduos perigosos ou não tratáveis | 0 |

**Tabela 2.** Respostas atrinuídas aos critérios subjetivos na Tablea 1.



Quando resíduos líquidos e não tivermos ρ. Neste caso, podemos assumir a densidade do resíduo líquido como 1,00 g/mL devido à predominância de solventes aquosos. Neste caso:

= - E-factor\* (E-factor estimado, assumindo ρ=1,00 g/mL)

**2. APLICAÇÃO (A):** Avalia o impacto ambiental e eficiência durante o uso.

|  |  |
| --- | --- |
| **Critério** | **Nota** |
| Alta eficiência com baixa dose (Subjetivo) | 0,3 |
| Reutilização sem perda de desempenho (subjetivo) | 0,3 |
| Uso em meio aquoso sem aditivos | 0,2 |
| Uso de solvente na regeneração | 0,2 |
| **Total (A\*0,3 peso atribuído a esta etapa):** | **0,3** |

**Tabela 3.** Critérios principais avaliados na etapa de aplicação dos adsorventes.



* **Análise de Critérios Subjetivos: Alta eficiência com baixa dose: qmáx (Tabela 4).**

Desenho de um círculo

O conteúdo gerado por IA pode estar incorreto.

**3. DESCARTE (D):** Avalia o comportamento e risco ambiental após o uso. Usou-se critérios mensuráveis, realistas e baseados em dados que podem ser obtidos ou estimados com facilidade em estudos laboratoriais ou bibliográficos (Tabela 5).

|  |  |
| --- | --- |
| **Capacidade de adsorção (mg/g)** | **Subnota** |
| > 500 mg/g | 1,0 |
| 250–500 mg/g | 0,75 |
| 500–250 mg/g | 0,5 |
| 250–100 mg/g | 0,25 |
| 100–10 mg/g | 0,2 |
| <10 mg/g | 0 |

**Tabela 4.** Respostas atrinuídas aos critérios subjetivos na Tablea 3.

|  |  |
| --- | --- |
| **Critério** | **Nota** |
| Estabilidade química aquosa (medida pela em meio aquoso por 24 horas) | 0,2 |
| Lixiviação secundária (metais/comp. orgânicos) do adsorvente | 0,3 |
| Origem da matéria prima (renovável, natural, reaproveitado, sintético, tóxico) | 0,2 |
| Análise da estabilidade do complexo adsorvente + poluente | 0,3 |
| **Total (D\*0,3 peso atribuído a esta etapa):** | **0,3** |

**Tabela 5.** Critérios principais avaliados na etapa de descarte dos adsorventes.



* **Análise de Critérios Subjetivos:**

**Critério: Estabilidade química em meio aquoso –** Importância: Variações significativas de pH indicam instabilidade, hidrólise ou liberação de espécies reativas.

**Respostas:**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Variação de pH** | **Subpeso** | **Resposta** |
| ΔpH ≤ 0,5 | 1,0 | Alta estabilidade |
| 0,5 < ΔpH ≤ 1,5 | 0,5 | Estabilidade mooderada |
| ΔpH > 1,5 | 0 | Baixa estabilidade |

**Tabela 6.** Respostas atribuídas aos critérios subjetivos da Tabela 5.

**Conclusões**

A nova métrica **ADSUS** avalia a sustentabilidade de adsorventes ao longo de todo o ciclo de vida, por meio de uma abordagem multicritério. Com escala de 0 a 1,0, classifica os materiais desde insustentáveis até excelentes, apoiando decisões mais seguras, eficientes e ambientalmente responsáveis. O ADSUS mostra grande potencial como ferramenta de apoio para pesquisadores, indústria e órgãos reguladores.

**Agradecimentos**

UFOP, ProAmb, CNPq, CAPES e FAPEMIG.

**Referências**

1. Crini G, Lichtfouse E Environ Chem Lett. **2019,** 17(1):145–55.
2. Crini G, Lichtfouse E, Wilson LD, Morin-Crini N. **2019**, 17(1):195–213.
3. de Jesus AS, Ferreira GMD, Ferreira GMD, Souza TF, Siqueira KPF, Nogueira AE, et al. Mater Chem Phys. **2024**, 328, 129919.
4. Ahmed I, Lee G, Lee HJ, Jhung SH. Chem. Eng. Jour. **2024**, 488:151022.