

## TECNOSSOLOS: ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DAS CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS (1984-2023)

EMANUÉLLE SOARES CARDOZO<sup>1</sup>; JOHNY BARRÊTO ALVES<sup>2</sup>; STÉFANY DAS NEVES<sup>3</sup>; CAROLINE DA ROSA<sup>4</sup>; DANIELE DA ROSA<sup>5</sup>; LIZETE STUMPF<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Univeridade Federal de Pelotas– emanuellesoarescardozo@gmail.com

<sup>2</sup>Universidade Federal de Santa Maria– johnnybarreto@gmail.com

<sup>3</sup>Universidade Federal de Pelotas– engsneves@gmail.com

<sup>4</sup>Universidade Federal de Pelotas– carolynedarosa@hotmail.com

<sup>5</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul– danielle.sdarosa@gmail.com

<sup>6</sup>Universidade Federal de Pelotas– zete.stumpf@gmail.com

### 1. INTRODUÇÃO

Em escala mundial, o carvão mineral representa 27,10% da produção de energia primária, sendo a segunda fonte energética mais utilizada (WEC, 2021). Entretanto, a extração desse recurso energético é cercada por problemáticas ambientais, econômicas e sociais (ZOCHE et al., 2023). A mineração de carvão pode ocorrer por meio de lavra subterrânea ou a céu aberto, ambas com alta geração de resíduos.

O desequilíbrio de ecossistemas decorrente da mineração de carvão a céu aberto perdura por décadas, devido aos expressivos impactos ambientais negativos (COSTA; ZOCHE, 2009). No âmbito pedológico, este cenário evidencia a necessidade de adoção de práticas eficazes, com potencial para restaurar a qualidade e a funcionalidade do solo degradado, por meio da neutralização de poluentes, restabelecimento da fertilidade, recuperação da estrutura, revegetação e monitoramento contínuo (ROUHANI et al., 2023a). A recuperação efetiva das áreas degradadas pela extração de carvão enfrenta diversas adversidades, como a complexidade dos ecossistemas, a falta de recursos financeiros e a escassez de políticas públicas adequadas (ROUHANI et al., 2023b).

A criação de tecnossolos é uma estratégia de reabilitação ambiental vinculada à gestão de resíduos da mineração, estes solos são construídos utilizando os subprodutos gerados por essa atividade econômica. Entretanto, os tecnossolos tendem a apresentar concentração significativa de metais pesados e baixa fertilidade devido à carência de nutrientes essenciais, o que limita o crescimento de plantas e dificulta a restauração dos ecossistemas (SCHAD, 2018). Além disso, esses solos frequentemente apresentam alta suscetibilidade à erosão e à degradação provocada por intempéries, baixa porosidade devido à elevada compactação e desbalanceamento do pH (ZOCHE et al., 2023).

Nas últimas décadas, diversos estudos têm sido conduzidos na área de recuperação de solos degradados pela mineração de carvão. No entanto, ainda não foram realizadas tentativas de apresentar uma visão abrangente sob uma perspectiva bibliométrica. Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo fornecer um panorama mundial das pesquisas relacionadas a essa área de conhecimento, considerando as últimas quatro décadas.

### 2. METODOLOGIA

A revisão bibliométrica é um método de análise quantitativa baseado em estatísticas matemáticas e é amplamente aplicada na análise de áreas de pesquisa emergentes, pois fornece uma visão integradora e permite a identificação de lacunas e tendências futuras (NEDERHOF, 2006). Para este estudo, a coleta de dados foi realizada por meio de uma busca no banco de dados *Scopus* da editora

*Elsevier*, utilizando as seguintes palavras-chave e operadores booleanos: "mined soils" OR "minesoils" OR "technosols" AND "coal". Foram aplicados filtros para considerar somente documentos do tipo artigo, publicados entre 1º de janeiro de 1984 e 31 de dezembro de 2023 no idioma inglês. Este conjunto de dados, composto por 111 artigos, foi analisado utilizando o *software livre* VOSviewer, desenvolvido por VAN ECK e WALTMAN (2010).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A recuperação de áreas mineradas por meio da criação de tecnossolos tem se tornado um tema relevante para a área ambiental, diante da demanda por práticas sustentáveis que contribuam para o alcance dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pela Organização das Nações Unidas (BANDYOPADHYAY; MAITI, 2022). Neste contexto, a análise temporal indica que 69,37% dos artigos foram publicados na última década.

Os Estados Unidos destacam-se como o país que mais contribuiu para o desenvolvimento desta área de pesquisa, com 23 artigos publicados, seguidos por Polônia (13), Bulgária (11), Rússia (11) e Brasil (10). A análise de co-ocorrência de palavras-chave, utilizando uma frequência de repetição acima de oito, identificou 33 termos, subdivididos em três *clusters* (Figura 1).

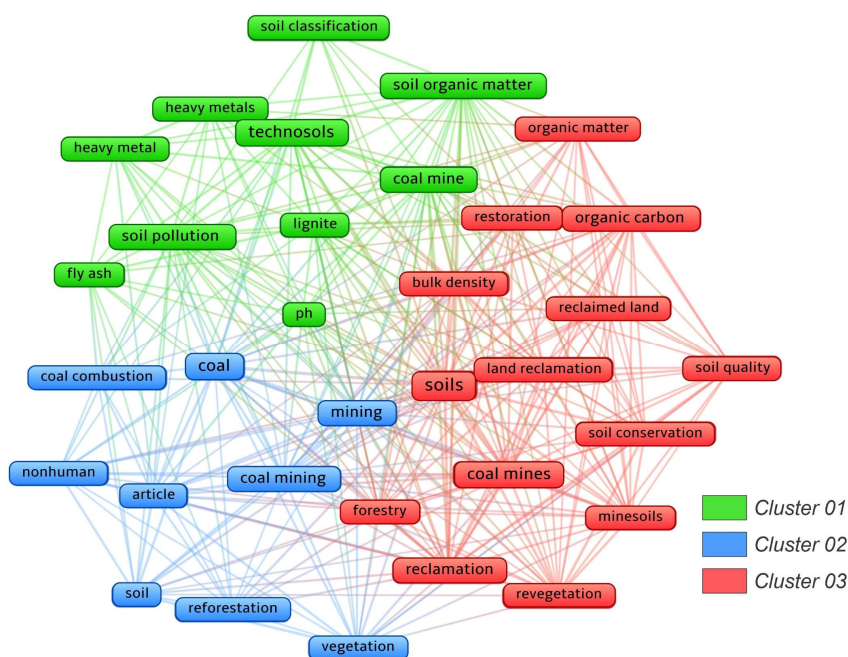


Figura 1- Mapa de co-ocorrência de palavras-chave.

O primeiro *cluster* (verde) aborda os desafios que afetam a eficácia e a sustentabilidade dos tecnossolos, como a presença de poluentes e a acidez gerada pela drenagem ácida de minas, decorrente da oxidação de minerais sulfetados expostos às intempéries (KRECHETOV et al., 2019). Por exemplo, RIVAS-PÉREZ et al. (2016) analisaram a evolução das características químicas de tecnossolos derivados de resíduos de uma mina de carvão, localizada no noroeste da Espanha, ao longo de 20 anos, e constataram uma redução na acidez e toxicidade. No Brasil, BITENCOURT et al. (2015) observaram que em áreas recuperadas a acidificação em profundidade apresenta menor intensidade, associada a um maior potencial de naturalização e menores valores de pH, em comparação com uma região sem a recuperação ambiental devida.

O segundo cluster (azul) enfoca as consequências ambientais da extração de carvão, com destaque para a contaminação de solos em áreas rurais próximas a essas atividades. HUSSAIN et al. (2018) exemplificam essa questão ao identificar altos níveis de elementos tóxicos em solos aráveis na província de Shaanxi, China, localizada nas adjacências de uma mineradora. Em Moçambique, DIAS (2024) observou a contaminação de Cr, Cu, Zn e Pb em uma cronosequência de tecnossolos com até 10,6 anos de restauração (oriundas da queima do carvão e da poeira gerados durante as atividades de mineração), com consequências negativas no retorno dos organismos do novo solo, principalmente ácaros e colêmbolos.

O terceiro cluster (vermelho) foca na restauração das propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos. No Brasil, STUMPF et al. (2018) mostraram que após 8,6 anos de restauração, o tecnossolo sob o cultivo de *Urochloa brizantha* apresentou uma melhoria significativa em sua estrutura. Contudo, os autores reforçam a necessidade de assumir tecnossolos como um novo sistema, onde o monitoramento de atributos a longo prazo é fundamental, já que relações positivas entre carbono orgânico do solo e agregação do solo demoram a ser restauradas devido à forte compactação das áreas mineradas. Complementarmente, MIGUEL et al. (2023) forneceram dados de longo prazo sobre o desempenho de gramíneas perenes na melhoria das propriedades físicas de tecnossolos e mostraram que aos 10,6 anos de revegetação, todas as gramíneas perenes conseguem melhorar as condições físicas até 0,10 m de profundidade. No entanto, a compactação na camada de 0,10–0,20 m ainda persiste através da presença de elevada densidade do solo, resistência tênsil de agregados e resistência do solo à penetração. Neste cluster destacam-se termos como "*organic carbon*" e "*soil conservation*", indicando o foco na manutenção da qualidade do solo, com ênfase na preservação do carbono orgânico e práticas sustentáveis. AHIRWAL e MAITI (2018) analisaram as propriedades de um tecnossolo na Índia e observaram que, após 16 anos de revegetação, o estoque de carbono do ecossistema atingiu 33% do valor registrado em uma área florestal não perturbada.

#### 4. CONCLUSÕES

Apesar do crescente interesse, que reflete a intensificação da preocupação com práticas sustentáveis, o número total de artigos cuja temática central são os tecnossolos ainda é reduzido. Isso indica que questões importantes ainda precisam ser exploradas para otimizar o uso de tecnossolos na recuperação de áreas degradadas. Do ponto de vista dos ODS, a implementação eficaz dos tecnossolos está diretamente relacionada ao cumprimento dos ODS 6 (Água Limpa e Saneamento), ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima) e ODS 15 (Vida Terrestre). No Brasil, esse campo de estudo encontra-se em fase emergente, tornando crucial a continuidade das pesquisas de longo prazo, focadas na compreensão dos processos pedogenéticos e na sustentabilidade desses solos.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHIRWAL, J.; MAITI, S. K. Development of Technosol properties and recovery of carbon stock after 16 years of revegetation on coal mine degraded lands, India. **CATENA**, v. 166, p. 114–123, 2018.
- BANDYOPADHYAY, S.; MAITI, S. K. *Psidium guajava* (L.)—a Bioeconomic Plant for Restoration of Industrial Solid Waste Dump: a Green and Sustainable Approach. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 233, n. 8, p. 312, 2022.

- BITENCOURT, D. G. B.; PINTO, L. F. S.; PAULETTO, E. A.; SILVA, M. T.; GARCIA, G. F. Geração de drenagem ácida e de contaminação por metais pesados em perfis de solos construídos em área de mineração de carvão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 6, p. 1821–1834, 2015.
- COSTA, S.; ZOCHE, J. J. Fertilidade de solos construídos em áreas de mineração de carvão na região sul de Santa Catarina. **Revista Árvore**, v. 33, n. 4, p. 665–674, 2009.
- DIAS, Sérgio da Costa. **Estudo pioneiro da restauração de solos minerados em uma cronosequência de 10,6 anos na mina de carvão de Moatize – Moçambique**. 2024. 111 f. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas.
- HUSSAIN, R.; LUO, K.; CHAO, Z.; XIAOFENG, Z. Trace elements concentration and distributions in coal and coal mining wastes and their environmental and health impacts in Shaanxi, China. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 20, p. 19566–19584, 2018.
- KRECHETOV, P.; CHERNITSOVA, O.; SHARAPOVA, A.; TERSKAYA, E. Technogenic geochemical evolution of chernozems in the sulfur coal mining areas. **Journal of Soils and Sediments**, v. 19, n. 8, p. 3139–3154, 2019.
- MIGUEL, P.; STUMPF, L.; PINTO, L. F. S.; PAULETTO, E. A.; RODRIGUES, M. F.; BARBOZA, L. S.; LEIDEMER, J. D.; DUARTE, T. B.; PINTO, M. A. B.; BERTASO DE GARCIA FERNANDEZ, M.; ISLABÃO, L. O.; DA SILVEIRA, L. M.; ROCHA, J. V. P. Physical restoration of a minesoil after 10.6 years of revegetation. **Soil and Tillage Research**, v. 227, p. 105599, 2023.
- RIVAS-PÉREZ, I. M.; FERNÁNDEZ-SANJURJO, M. J.; NÚÑEZ-DELGADO, A.; MONTERROSO, C.; MACÍAS, F.; ÁLVAREZ-RODRÍGUEZ, E. Evolution of Chemical Characteristics of Technosols in an Afforested Coal Mine Dump over a 20-year Period. **Land Degradation & Development**, v. 27, n. 6, p. 1640–1649, 2016.
- ROUHANI, A.; GUSIATIN, M. Z.; HEJCMAN, M. An overview of the impacts of coal mining and processing on soil: assessment, monitoring, and challenges in the Czech Republic. **Environmental Geochemistry and Health**, v. 45, n. 11, p. 7459–7490, 2023.
- ROUHANI, A.; SKOUSEN, J.; TACK, F. M. G. An Overview of Soil Pollution and Remediation Strategies in Coal Mining Regions. **Minerals**, v. 13, n. 8, p. 1064, 2023.
- SCHAD, P. Technosols in the World Reference Base for Soil Resources – history and definitions. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 64, n. 2, p. 138–144, 2018.
- STUMPF, L.; DOS ANJOS LEAL, O.; PAULETTO, E. A.; PINTO, L. F. S.; REIS, D. A.; PINTO, M. A. B.; TUCHTENHAGEN, I. K. Tensile strength and organic matter fractions in aggregates of a grass-covered mined soil under early stage recovery. **Soil and Tillage Research**, v. 176, p. 69–76, 2018.
- VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. **Scientometrics**, v. 84, n. 2, p. 523–538, 2010.
- WEC. **World Energy Trilemma Index**. 2021. Disponível em: [https://www.worldenergy.org/assets/downloads/WE\\_Trilemma\\_Index\\_2021.pdf?v=1634811254](https://www.worldenergy.org/assets/downloads/WE_Trilemma_Index_2021.pdf?v=1634811254). Acesso em: 26 ago. 2024.
- ZOCHE, J. J.; SEHN, L. M.; PILLON, J. G.; SCHNEIDER, C. H.; OLIVO, E. F.; RAUPP-PEREIRA, F. Technosols in coal mining areas: Viability of combined use of agro-industry waste and synthetic gypsum in the restoration of areas degraded. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 13, p. 100618, 2023.