

ENEI 2026

sergipe

X ENCONTRO NACIONAL DE ECONOMIA INDUSTRIAL E INOVAÇÃO

Indústria, Sustentabilidade e os
Desafios Regionais



19-22 MAIO DE 2026



LOCAL: Universidade Federal
de Sergipe. Avenida Marcelo
Chagas, s/n. Jardim Rosa Elze.
São Cristóvão (SE).

Realização: ABEIN

Associação Brasileira de
Economia Industrial e Inovação



PPGE



Patrocínio:



Estratégias empresariais de inovação ambiental no setor minerário: Implicações para a transição energética no Brasil

Antero Alves Pereira Neto¹
Lindomayara França Ferreira²
Virgínia Antunes Nobre³

Resumo: O setor minerário brasileiro ocupa posição estratégica na economia nacional e desempenha papel central na transição energética global. Nesse contexto, a inovação ambiental emerge como elemento-chave para compatibilizar competitividade, sustentabilidade e compromissos climáticos. As patentes verdes são amplamente utilizadas na literatura como *proxy* de esforços inovativos orientados para a sustentabilidade. Apesar de sua relevância econômica, ainda são escassos os estudos que analisam de forma sistemática as estratégias de inovação ambiental das empresas mineradoras no Brasil. Diante dessa lacuna, este trabalho tem como objetivo analisar as estratégias de inovação das empresas do setor minerário no Brasil. Para isso, utiliza patentes verdes como *proxy* de inovação ambiental e discute seu papel na transição energética e nos compromissos com o desenvolvimento sustentável. Metodologicamente, o estudo utiliza dados de patentes depositadas entre 1982 e 2025, classificadas segundo o *Cooperative Patent Classification* (CPC), e aplica técnicas de Análise de Redes Sociais (ARS) para examinar as relações entre empresas, parceiros e campos tecnológicos, com ênfase na distribuição espacial das interações e a identificação de padrões colaborativos. Os resultados indicam que o setor minerário brasileiro apresenta forte concentração patentária, sugerindo que cada empresa atua como um ecossistema inovativo relativamente fechado. As patentes verdes são escassas e, quando presentes, concentram-se majoritariamente em soluções voltadas a problemas específicos das firmas, sobretudo em áreas como tratamento de rejeitos e água. Observa-se ainda que o núcleo tecnológico da mineração permanece majoritariamente internalizado, enquanto as parcerias com universidades e inventores independentes se concentram em atividades complementares, o que limita a difusão de inovações ambientais no setor. O estudo oferece evidências

¹ Doutorando pelo Programa de Pós-graduação em Economia na Universidade Federal de Uberlândia (UFU). E-mail: teroneto@ufu.br.

² Pesquisadora de pós-doutorado no Instituto de Tecnologia e Pesquisa (ITP). E-mail: lindomayara@hotmail.com.

³ Doutoranda pelo Programa de Pós-graduação em Economia na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). E-mail: virginianobre@cedeplar.ufmg.br.

ENEI 2026

sergipe

X ENCONTRO NACIONAL DE ECONOMIA INDUSTRIAL E INOVAÇÃO

Indústria, Sustentabilidade e os
Desafios Regionais



19-22 MAIO DE 2026



LOCAL: Universidade Federal
de Sergipe. Avenida Marcelo
Chagas, s/n. Jardim Rosa Elze,
São Cristóvão (SE).

Realização: **ABEIN**

Associação Brasileira de
Economia Industrial e Inovação



PPGE



Patrocínio:



relevantes para políticas de inovação voltadas à difusão de tecnologias sustentáveis no contexto da transição energética.

Palavras-chave: Mineração; Inovação ambiental; Estratégias empresariais; Transição energética.

Código JEL: O34; Q55; L72.

Área Temática: Inovação, desenvolvimento e sustentabilidade.

Business strategies for environmental innovation in the mining sector: Implications for the energy transition in Brazil

The Brazilian mining sector occupies a strategic position in the national economy and plays a central role in the global energy transition. In this context, environmental innovation emerges as a key element to reconcile competitiveness, sustainability, and climate commitments. Green patents are widely used in literature as a proxy for innovative efforts oriented toward sustainability. Despite its economic relevance, there are still few studies that systematically analyze the environmental innovation strategies of mining companies in Brazil. Considering this gap, this study aims to analyze the innovation strategies of companies in the Brazilian mining sector. To this end, green patents are used as a proxy for environmental innovation and discuss their role in energy transition and in commitments to sustainable development. Methodologically, the study uses data on patents filed between 1982 and 2025, classified according to the Cooperative Patent Classification (CPC), and applies Social Network Analysis (SNA) techniques to examine the relationships among companies, partners, and technological fields, with emphasis on the spatial distribution of interactions and the identification of collaborative patterns. The results indicate that the Brazilian mining sector presents a strong concentration of patents, suggesting that each company operates as a relatively closed innovative ecosystem. Green patents are scarce and, when present, are mostly concentrated on solutions aimed at specific firm-level problems, particularly in areas such as tailings and water treatment. It is also observed that the technological core of mining remains largely internalized, while partnerships with universities and independent inventors tend to focus on complementary activities, which limits the diffusion of environmental innovations in the sector. The study provides relevant evidence for innovation policies aimed at promoting the diffusion of sustainable technologies in the context of energy transition.

Keywords: Mining; Environmental innovation; Business strategies; Energy transition.

1. Introdução

Em 1973, a economia mundial foi impactada por uma severa crise energética, desencadeada pela abrupta elevação dos preços do petróleo nos principais países produtores, afetando diretamente economias fortemente dependentes desse recurso para geração de energia (Bezerra et al., 2019). O episódio evidenciou a vulnerabilidade energética e desencadeou o debate internacional sobre segurança energética. Concomitantemente, emergiram, no âmbito das Nações Unidas, os primeiros resultados acerca dos efeitos nocivos das emissões de carbono no planeta (ONU, 1991; UNFCCC, 2020). Esse debate também levou governos a adotar medidas para conter o consumo de petróleo, reduzir emissões de gases de efeito estufa (GEE), e buscar atividades econômicas ambientalmente sustentáveis (Cordeiro; Losekann, 2018; Pereira Neto; Botelho, 2025).

Diante da agenda de desenvolvimento sustentável e dos desafios associados à transformação da atual dinâmica de produção e consumo em escala global, o setor minerário assume um papel estratégico ao fornecer insumos essenciais à transição energética (WEF, 2023; Flores-Castañeda et al., 2024). Ao mesmo tempo, o setor enfrenta a necessidade de se transformar de modo síncrono para atender à crescente demanda por recursos minerais sem reproduzir os padrões de exploração ambientalmente insustentáveis (Castro et al., 2024). O que torna a mineração um setor chave na transição energética, bem como um dos mais desafiados em razão de sua elevada responsabilidade ambiental (Carvalho et al, 2018; Dias, 2023).

Em 2024, o setor minerário brasileiro respondeu por 12,6% do valor total das exportações, gerando um saldo da balança comercial em torno de US\$ 32 bilhões e mais de 200 mil empregos diretos. Tradicionalmente orientada à produção de *commodities*, essa performance evidencia a relevância dessa atividade para a economia brasileira e a sua forte inserção no comércio externo (World Bank, 2025; MME, 2025). Na perspectiva ambiental, a mineração é reconhecida como uma atividade modificadora do meio físico e biótico (BRASIL, 1986), o que gera riscos ecológicos, pressões regulatórias de mercado, e reforça a necessidade de incorporação de conhecimento e tecnologia para atender à agenda futura de transformação produtiva (Carvalho et al., 2017). No âmbito social, o setor também é marcado por diferentes conflitos, especialmente associados aos impactos sobre a rotina e a qualidade de vida das populações localizadas no entorno dos empreendimentos (Mesquita et al., 2016).

Por se tratar de um setor fortemente condicionado por especificidades geológicas e caracterizado por elevada concentração de mercado, as empresas do setor tendem a apresentar baixa propensão ao risco associado à inovação. Tal situação, em partes, cria um cenário de resistência à transformação, o que reforça o papel do Estado como regulador e formulador de políticas públicas indutoras da inovação na mineração (Carmignano, 2023; Dias, 2023; Fragoso, 2024).

Essa literatura tem se expandido significativamente nos últimos anos, com destaque para diferentes frentes de análise. Entre elas, ressaltam-se as oportunidades de desenvolvimento e inovação no setor de mineração e metais, diante dos atuais vetores de mudança econômicos, socioambientais e tecnológicos (Mesquita et al., 2016). Para os fatores que contribuem na participação da indústria de mineração nas cadeias globais de valor (CGVs) (Martins et al, 2020). Para o contexto geopolítico e a crescente dependência de minerais críticos no processo de transição energética (Castro et al., 2024). Para a formação de um sistema regional de inovação associados à atividade extrativa mineral

(Carmignano, 2021); e, por fim, para os benefícios e vantagens associados à adoção de tecnologias da Mineração 4.0 pelas empresas do setor (Dias, 2023).

Historicamente, a mineração apresenta menor dinamismo inovador em comparação a setores intensivos em tecnologia. Em geral, as empresas desse setor são de grande porte e intensivas em capital, beneficiando-se de economias de escala. Embora tradicionalmente não seja considerada um setor altamente inovador, a mineração vem ampliando esforços de inovação, sobretudo em atividades relacionadas à sustentabilidade, processamento mineral e ao aumento da eficiência produtiva (Mesquita et al., 2016). Do volume de gastos globais com pesquisa e desenvolvimento (P&D) na mineração, desde 2010, a China tem liderado com 47%, seguida pelos EUA com 22%. Somente na Europa, em 2015, a mineração movimentou cerca de US\$ 657 milhões em P&D, o que corresponde a 5% do total; embora, em termos relativos, esse volume ainda seja inferior ao de outros setores – como o farmacêutico, a indústria química e até mesmo o agrícola –, ainda assim sinaliza que transformações estão em curso (Daily et al., 2019).

O objetivo deste trabalho é analisar as estratégias de inovação das empresas do setor minerário no Brasil. Para isso, utiliza patentes verdes como *proxy* de inovação ambiental e discute seu papel na transição energética e nos compromissos com o desenvolvimento sustentável. Em específico, pretende-se: i) analisar o perfil e as estratégias de inovação das empresas de mineração com base no registro de patentes verdes, distinguindo entre inovação aberta e fechada; e ii) avaliar o papel das patentes verdes como instrumento estratégico para a promoção da sustentabilidade e para a adaptação do setor às exigências impostas pela transição energética. Para atender aos objetivos, este trabalho utiliza a combinação de Análise de Redes Sociais (ARS) com dados de patentes verdes, durante o período de 1982 a 2025.

Além desta introdução e das considerações finais, este trabalho se subdivide em mais quatro seções. Os conceitos teóricos sobre a temática são abordados na segunda seção. A metodologia de ARS e o banco de dados utilizado estão presentes na terceira seção. Os resultados obtidos com este estudo e suas perspectivas políticas são apresentados na quarta seção.

2. Fundamentação teórica da inovação e sustentabilidade

Esta seção discute a fundamentação teórica da presente temática que se subdivide em três subseções, a saber: i) conceitos, tipologias da inovação (aberta e fechada), e tipos de estratégias (colaborativas e internalização); ii) fundamentação de patentes verdes como *proxy* de inovação ambiental e sua relação com a regulação ambiental e as políticas indutoras da transição energética; iii) caracterização do setor minerário, especificidades tecnológicas, barreiras de incentivos à inovação e evidências empíricas.

2.1. Conceitos e Tipologias da inovação

A inovação é entendida como um elemento-chave para promover o desenvolvimento econômico (Schumpeter, 1985) e crescimento das firmas (Nelson; Winter, 1982). Conceitualmente consiste em um processo interativo de geração e aplicação do conhecimento e da tecnologia (Rosenberg, 1982), e pode ser tanto uma atividade quanto o resultado de uma atividade, isto é, um produto ou processo novo ou aprimorado (ou combinação de ambos) que difere significativamente dos anteriores e é disponibilizado a potenciais usuários (produto) ou colocado em uso pela unidade (processo) (OECD, 2018).

Para as firmas, a capacidade de absorver e acumular o conhecimento de fontes externas é fundamental para reconfigurar sua base interna de ativos, especialmente adquirida por meio da gestão da P&D (Bell; Pavitt, 1995). Nesse processo, a parceria entre as instituições de pesquisas, a formação de redes e o desenvolvimento de sistemas tecnológicos têm sido apontados como estratégias para acelerar a inovação interna (Garcia; Suzigan, 2021).

Esse modelo de interação sistêmica, denominada como inovação aberta, contrapõe modelos anteriores em que o laboratório de P&D interno era visto como um ativo estratégico e uma barreira à entrada de novos concorrentes, sendo altamente concentrado em grandes empresas (Chesbrough 2003; Stal et al., 2014). Embora muitas empresas adotem ambos os modelos em etapas distintas do processo de inovação, ainda assim os elevados custos e o alto grau de incerteza associados ao encurtamento do ciclo de vida dos produtos têm motivado as empresas a intensificar processos de colaboração e compartilhamento de conhecimento, característicos do modelo de inovação aberta (Vivona et al., 2023).

Nesse sentido, a literatura sobre geografia da inovação destaca que os processos de geração e difusão do conhecimento são influenciados por diferentes formas de proximidade – tais como geográfica, organizacional, social, institucional e cognitiva – entre os agentes envolvidos na inovação (Boschma, 2005; Garcia, 2021). A interação entre empresas, universidades e instituições de pesquisa tende a ser favorecida não apenas pela proximidade geográfica, mas também pela proximidade cognitiva, institucional e organizacional, que facilitam a troca de conhecimento e a construção de capacidades tecnológicas (Oliveira et al., 2018; Audretsch; Belitski, 2019). Essas interações são multifacetadas e frequentemente se materializam em redes de inovação e em sistemas regionais de inovação, que facilita o aprendizado coletivo e a difusão do conhecimento (Garcia, 2021; Vivona et al., 2023).

No Brasil, em parte, esse modelo de inovação aberta teve rápida disseminação devido aos incentivos direcionados para a hélice tripla (interação entre universidade-empresa-governo), dentre os quais desatacam-se: Criação dos Fundos Setoriais, Lei de Inovação, Lei do Bem, o Programa de Subvenção Econômica; Lei de Informática e outros (Ferreira et al., 2023). No entanto, a Propriedade Intelectual (PI) passa a ter uma atenção especial nesse modelo, na medida em que os ativos intelectuais – tais como patentes, marcas e segredos industriais – podem estar sujeitos ao furto de propriedade (Stal et al., 2014; Garcia; Suzigan, 2021). Para a OCDE (2008) esse tópico é de extrema relevância nos países em desenvolvimento, pois geralmente apresentam menor apoio legal.

2.2. Patentes verdes como *proxy* para a inovação ambiental

A inovação ambiental refere-se ao desenvolvimento de novos produtos ou processos que promovem melhorias nos fatores ambientais, abrangendo desde a redução da poluição do ar, da água, do solo e da poluição sonora gerada pelas atividades humanas, até a preservação dos recursos naturais e da biodiversidade (Paunov et al., 2025). A utilização de patentes verdes como *proxy* de inovação ambiental parte da premissa de que o registro de invenções com conteúdo ambiental oferece evidências observáveis tanto da capacidade tecnológica das firmas quanto da orientação estratégica de seus investimentos em ecoinovação. Além disso, apresenta vantagens quando comparadas com outra métricas de inovação – como gastos com P&D e número de pesquisadores científico – uma vez que a informação sobre patentes permite a desagregação por campos tecnológicos (Agnelli et al., 2023).

É importante ressaltar que invenção e inovação não são conceitos equivalentes. O requisito de implementação diferencia esses termos, enquanto a patente registra um novo resultado técnico, a inovação pressupõe a implementação ou aplicação econômica, organizacional ou produtiva desse conhecimento. Isto é, a inovação é mais do que uma nova ideia ou invenção, pois requer implementação (OECD, 2018).

Nesse sentido, os estudos mobilizados por esta pesquisa analisam o papel das patentes verdes não apenas como indicadores mensuráveis do esforço tecnológico, mas também como instrumentos para mapear trajetórias tecnológicas, capacidades organizacionais e direções estratégicas. Esses trabalhos enfatizam que a simples contagem de patentes é insuficiente, devendo ser complementada por análises qualitativas que considerem o conteúdo tecnológico, o potencial de aplicação e sua articulação com os recursos internos e as estratégias das empresas.

O que se convencionou chamar de “tecnologias verdes” ou “inovações ambientais” refere-se, no contexto da análise de patentes, às invenções vinculadas a tecnologia de mitigação e adaptação às mudanças climáticas (*Climate Change Mitigation and Adaptation Technologies* – CCMTs), incluindo tecnologias de captura e armazenamento de CO₂, energia solar, eólica, geotérmica, hídrica, marinha e de biocombustíveis (Haščič et al., 2010). Essas tecnologias abrangem um amplo espectro de soluções que visam controlar, reduzir ou prevenir as emissões antrópicas de GEE, bem como permitir a adaptação aos efeitos adversos das mudanças climáticas em atividades humanas, industriais (incluindo agricultura e pecuária) e econômicas (CPC, 2026).

Não existe, contudo, uma taxonomia única ou formalmente universal que defina, de maneira exclusiva, o que constitui ou não uma “tecnologia verde”. A própria natureza dinâmica e transversal da inovação ambiental torna desafiadora a criação de um sistema de classificação estático e consensual (Antal, 2024). Diante dessa dificuldade, o Escritório Europeu de Patentes (EPO), em colaboração com o Escritório de Patentes e Marcas dos Estados Unidos (USPTO), desenvolveu uma solução inovadora no âmbito da Classificação Cooperativa de Patentes (CPC): o esquema de classificação Y02.

A seção Y da CPC foi criada especificamente para monitorar novos desenvolvimentos tecnológicos e marcar tecnologias transversais que não se enquadram em uma única seção da Classificação Internacional de Patentes (IPC). Dentro desta seção, a classe Y02 é dedicada a “tecnologias ou aplicações para mitigação ou adaptação contra as mudanças climáticas”, em conformidade com os compromissos assumidos no âmbito do Protocolo de Kyoto e do Acordo de Paris (Antal, 2024; CPC, 2026).

A escolha da classificação CPC Y02 nesta pesquisa justifica-se por sua natureza padronizada, abrangente e reconhecida na identificação de tecnologias relacionadas à mitigação das mudanças climáticas. Trata-se de uma metodologia sistemática que categoriza patentes associadas a diferentes domínios tecnológicos – como captura de gases de efeito estufa (Y02C), energia (Y02E), transportes (Y02T), eficiência energética em edificações (Y02B) e tecnologias de mitigação nos processos de produção ou processamento de bens (Y02P), particularmente relevantes para este estudo (CPC, 2026). Diferentemente de iniciativas como o IPC *Green Inventory* da WIPO, a classificação CPC Y02 opera como um sistema de “marcação” que se sobrepõe às classificações tradicionais de patentes, permitindo uma recuperação mais precisa e abrangente das patentes com potencial de contribuição para a mitigação climática.

Em suma, a ausência de uma definição única para “inovação verde” (Koeller et al., 2020) é frequentemente contornada pelo uso do esquema da classificação CPC Y02 como *proxy* padronizada e operacionalmente viável. Ao adotar essa classificação, a pesquisa alinha-se às práticas internacionais de análise de tecnologias ambientais em base

de patentes, garantindo a robustez metodológica necessária para investigar as redes de colaboração do setor minerário no desenvolvimento de tecnologias sustentáveis.

Estudos anteriores reforçam a utilidade dessa abordagem ao empregar o esquema Y02. Nessa linha, Andersson (2025) analisa a estrutura temática e a maturidade de tecnologias de mitigação, demonstrando seu valor analítico para compreender o cenário da inovação verde. Os autores Cui et al., (2022) e Fabrizi, Guarini e Meliciani, (2018) mostram que uma regulação ambiental bem desenhada pode induzir inovação verde, isto é, aumentar a produção de patentes ambientais, especialmente quando a política combina pressão regulatória com instrumentos de apoio à pesquisa e financiamento. Em particular, Cui et al. (2022) fornecem evidências em painel de que programas de auditoria de produção limpa exercem impacto positivo sobre patentes verdes, corroborando a hipótese de Porter e Van Der Linde (1995) de que a regulação ambiental pode estimular inovação quando as firmas dispõem de capacidades tecnológicas para responder aos incentivos regulatórios.

No entanto, a simples existência de patentes verdes não assegura retorno econômico nem a efetiva aplicabilidade desses inventos. Análises desagregadas indicam que o valor econômico das patentes verdes varia conforme sua qualidade tecnológica, o setor de atuação e a capacidade de comercialização das firmas (Hoang et al., 2020). Assim, a utilização de patentes verdes como *proxy* requer o emprego de métricas complementares, tais como citações, família de patentes, co-patentes e vínculos com redes de pesquisa, que permitam distinguir invenções com maior potencial de difusão daquelas que permanecem tecnologicamente inertes.

Nesse sentido, Scarpellini et al. (2019) enfatizam que recursos e capacidades internas, como investimentos em P&D e competências gerenciais, bem como a participação em redes de cooperação, são determinantes tanto da geração quanto do sucesso de patentes verdes, o que sugere que políticas públicas devem combinar instrumentos de regulação com estímulos à cooperação e ao fortalecimento de capacidades tecnológicas.

A governança corporativa emerge como um fator moderador central, na medida em que firmas com estruturas de governança mais sólidas e sistemas de incentivos alinhados tendem a transformar a pressão regulatória em patentes verdes de maior qualidade (Amore; Bennedsen, 2016). De forma complementar, Fabrizi et al. (2018) mostram que políticas voltadas ao fortalecimento de rede de pesquisa amplificam os efeitos da regulação ambiental, sugerindo que instrumentos que fomentem parcerias universidade empresa e plataformas de inovação aberta aumentam a produtividade e impacto de patentes verdes.

No domínio da transição energética, evidências recentes apontam que patentes ambientais contribuem para a adoção e avanço de tecnologias renováveis (Ferreira et al., 2024), especialmente quando acompanhadas por políticas de difusão, como subsídios e mercados piloto, e por infraestrutura regulatória que reduz riscos de investimento (Esmaeilpour Moghadam; Karami, 2024). Assim, no processo de transição energética, o desenvolvimento de patentes ambientais pode elevar as capacidades internas e apresentar ganhos marginais para os países que a desenvolvem (Ferreira et al., 2024).

Conclui-se, portanto, que as patentes verdes constituem uma *proxy* útil, ainda que condicional, para a identificação da inovação ambiental. Sua validade analítica depende da incorporação de métricas que considerem a qualidade e a conectividade das patentes, bem como de uma caracterização adequada do desenho regulatório, incluindo o tipo, a intensidade e a complementaridade de políticas. Ademais, variáveis organizacionais que determinam a capacidade de resposta das firmas desempenham papel central. Nesse contexto, a classificação CPC Y02 é utilizada como uma *proxy* para identificar as

tecnologias ambientais, com destaque para a subclassificação Y02P, relevante para a análise de processos produtivos e do processamento mineral (Scarpellini et al., 2017; Fabrizi et al., 2018; Esmailpour Moghadam; Karami, 2024).

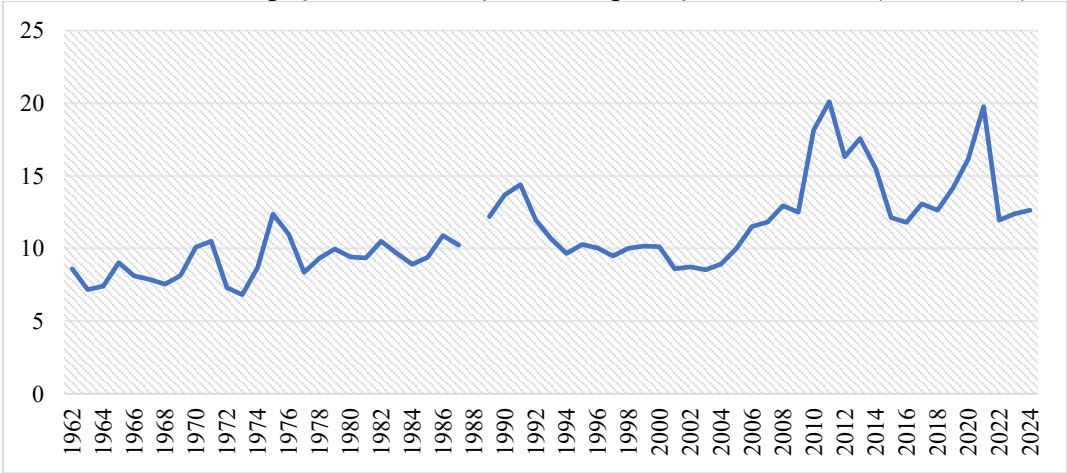
2.3. Caracterização do setor minerário

O setor minerário abrange atividades de prospecção, extração, beneficiamento, refino e serviços de apoio ao longo do ciclo de vida da mina, sendo responsável pelo fornecimento de insumos básicos para cadeias industriais, infraestrutura e a produção de bens de consumo duráveis (Daly et al., 2022). Além disso, o setor desempenha papel estratégico na transição energética, caracterizando-se pela predominância de grandes empresas intensivas em capital, que buscam economias de escala em mercados de *commodities* pouco diferenciadas, incluindo minerais críticos como cobre, cobalto, cromo, níquel, lítio, zinco, alumínio, manganês, molibdênio, terras raras, elementos platinoides, silício e grafite (Leão et al., 2024).

Historicamente, os esforços inovativos desse setor concentraram-se em melhorias de processo, redução de custos e aumento de produtividade, frequentemente por meio de tecnologias incorporadas em equipamentos e serviços fornecidos por empresas do setor de METS (*mining equipment, technology and services em tradução literal Equipamentos, Tecnologia e Serviços para Mineração*). Contudo, estudos recentes documentam um aumento dos investimentos em P&D a partir dos anos 2000, principalmente no patenteamento de tecnologias de mineração nas áreas de exploração, transporte, automação e tecnologias ambientais, indicando que o setor se tornou mais inovador do que sugeriam avaliações anteriores (Daly et al., 2022).

No contexto brasileiro, a cadeia produtiva da economia mineral tem representado, nas últimas décadas, uma parcela relevante do Produto Interno Bruto (PIB), considerando não apenas o valor adicionado direto da extração e da transformação, mas também os efeitos diretos sobre manufaturas, construção civil, transporte, energia, comércio e serviços (Leão e Rabelo, 2023). Dentro dessa cadeia, a extração de minério de ferro e a siderurgia aparecem como segmentos centrais, tanto em participação direta no PIB quanto na capacidade de induzir produção e valor adicionado em outros setores, o que reforça o peso estrutural do setor minerário na economia e a relevância de suas escolhas tecnológicas e ambientais para a agenda de desenvolvimento sustentável (Leão e Rabelo, 2023; Daly et al., 2022)

Gráfico 1: Participação da mineração nas exportações nacionais (1960-2024)

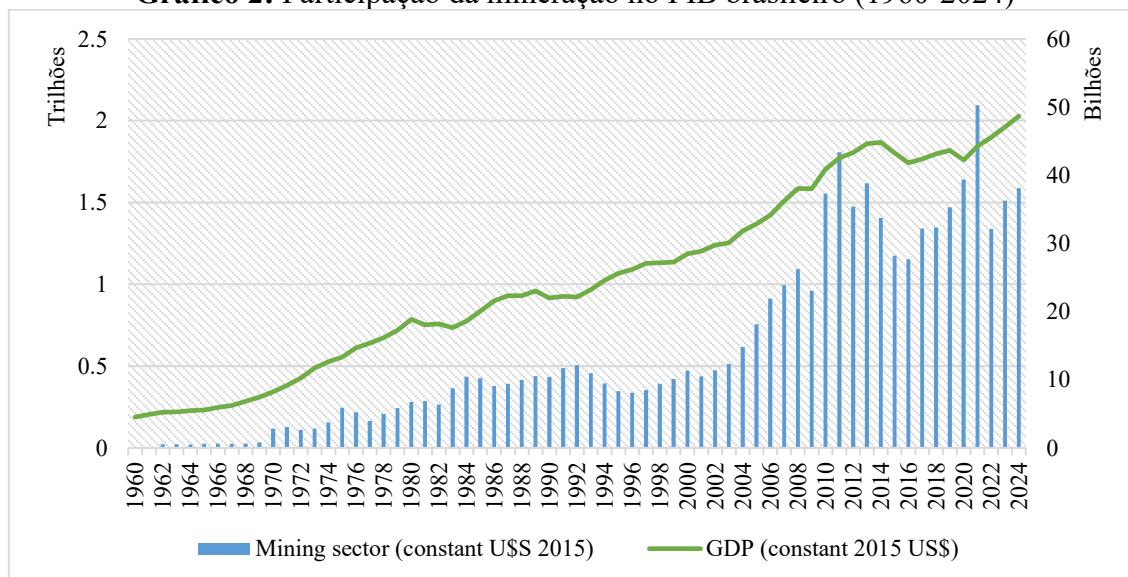


Fonte: Elaboração dos autores, a partir dos dados do World Bank, 2025.

Atualmente, a atividade de mineração é responsável pela extração e pelo processamento inicial de *commodities* minerais, responde por aproximadamente 12,6% do volume total das exportações brasileiras (World Bank, 2025). Durante o período de 1960 a 2024, observa-se que, embora o setor apresente uma trajetória ascendente na participação nas exportações totais, essa evolução é marcada por forte volatilidade, principalmente a partir de 2011, conforme ilustra o Gráfico 1.

Nesse período, o volume exportado do setor minerário brasileiro alternou-se entre expansão e retração, especialmente ao longo da década de 2010. A participação do setor minerário no PIB apresenta crescimento contínuo desde a década de 1970, quando representava 0,78% do produto, alcançando 1,05% em 2018. Contudo, a severa crise econômica e sanitária que se estendeu entre 2015 e 2022 altera esse padrão, ampliando a posição relativa do setor, que passa a representar mais de 3% do PIB brasileiro em 2023 (Calaes, 2009; SENADO, 2023). Essa evolução da participação do setor minerário é apresentada no Gráfico 2, que mostra o volume do produto a preços constantes de 2015 (em dólares) ao longo do período de 1960 a 2024.

Gráfico 2: Participação da mineração no PIB brasileiro (1960-2024)



Fonte: Elaboração dos autores, a partir dos dados do World Bank, 2025.

Segundo Leão et al. (2024) o cobre, em todo o período, foi o mineral mais relevante para explicar a atuação do país nesse período. Embora se esperasse que um setor fortemente orientado pela demanda internacional apresentasse crescimento contínuo, entre 2010 e 2020 observa-se volatilidade. A crise econômica nacional entre 2014 e 2019 parece ter impacto sobre o setor, resultado que se mostra contraintuitivo considerando que o comércio internacional permaneceu relativamente estável.

Além do cobre, entre os principais produtos exportados do Brasil destacam-se o minério de ferro – segmento no qual a Vale S.A se posiciona como uma das líderes globais em produção e comercialização (VALE, 2025) – o ouro, a bauxita e o nióbio (ANM, 2023). Segundo Cravalho et al. (2018), o minério de ferro passou por grande instabilidade durante 2016, mas se recuperou a partir do anúncio de políticas de incentivo aos investimentos e recomposição de estoques na China. Em 2019, o lítio e o níquel também apresentaram uma trajetória de expansão, chegando a representar, em 2022, 7,7% e 8,4% das exportações brasileiras, respectivamente (Leão et al. 2024).

Cabe destacar que o Brasil também detém a oitava maior reserva de urânio, a segunda maior reserva de terras raras e a terceira maior reserva de níquel, minerais considerados estratégicos para o processo de transição energética. Além dessas posições de destaque, o país tem se consolidado como detentor de vantagem comparativas nesse processo, devido a participação majoritária de fontes renováveis em sua matriz energética (MME 2025; Castro et al., 2024). Parte desse potencial pode ser atribuído a criação de instituições reguladoras do setor e ao impulso de diversos instrumentos financeiros e regulatórios, direcionados para o setor, tais como a criação do Serviço Geológico do Brasil (SGB-CPRM), em 1970; do Plano Nacional de Mineração 2030, em 2011; da Agência Nacional de Mineração (ANM), em 2017; do Conselho Nacional de Política Mineral (CNPM), em 2022; da Política Nacional de Minerais Críticos e Estratégicos, em 2024 (BRASIL, 2022; MME, 2024).

Diante da relevância econômica e estratégica do setor minerário para a transição energética, estudos têm analisado a atividade sob diferentes perspectivas. Mesquita et al. (2016) investigam as oportunidades de desenvolvimento e inovação nos setores de mineração e metais, considerando os principais vetores de mudança de natureza econômica, socioambiental e tecnológica. Carvalho et al. (2018) discutem os fatores que tendem a orientar a organização dessas indústrias no longo prazo. Martins et al. (2020) examinam os determinantes da inserção da indústria mineral nas cadeias globais de valor (CGVs). Castro (2020) destaca a importância da mineração para o país e analisa sua relação com os impactos decorrentes da atividade, que se manifestam de forma diferenciada entre as regiões. Carmignano (2021) discute as razões pelas quais tecnologias desenvolvidas para o reaproveitamento de rejeitos de minério de ferro ainda não são aplicadas em escala industrial, além de analisar o sistema regional de inovação da mineração de minério de ferro em Minas Gerais, com ênfase na utilização desses rejeitos. Dias (2023) aborda o setor sob a perspectiva da Indústria 4.0, enquanto Fragozo (2024) mapeia as tecnologias desenvolvidas por universidades públicas de Minas Gerais nas áreas de mineração e metalurgia. No entanto, poucos estudos abordam essa temática sob a perspectiva das estratégias voltadas à geração de patentes verdes, lacuna que este trabalho busca preencher e que constitui sua principal contribuição.

3. Metodologia e descrição dos dados

A Análise de Redes Sociais (ARS) consolidou-se como um campo interdisciplinar a partir dos estudos pioneiros de Moreno (1953), ao introduziu o conceito de sociometria e evidenciar as interações entre indivíduos formam estruturas relacionais complexas, nas quais alguns atores (nós) ocupam posições de maior influência dentro da rede. Essa percepção foi aprofundada por Wasserman e Faust (1994) e Freeman (2009), ao demonstrar que a conectividade entre os nós determina o grau de centralidade e a relevância dos atores na rede.

A visualização de redes sociais constitui uma etapa crucial da ARS, pois permite interpretar padrões de relacionamento e interpretar a estrutura das interações. As ferramentas utilizadas nesse processo lidam com diferentes tipos de dados – unidimensionais (como séries temporais e matrizes), bidimensionais (coordenadas geográficas, gráficos de dispersão) e fluxos computacionais (algoritmos, depuração de processos) – e exigem atenção à disposição espacial dos nós, sua “geografia”, que influencia diretamente a análise, combinando representações gráficas e cálculos microanalíticos para compreender as dinâmicas da rede (Verspagen, 2007; Freeman, 2009).

Segundo Jackson (2010), a análise de uma rede social implica avaliar métricas estruturais, como centralidade (grau, proximidade, intermediação), medidas topológicas (excentricidade, densidade, comprimento médio dos caminhos) e agrupamentos (modularidade), que permitem identificar o papel e influência de cada ator na rede.

A centralidade por grau expressa o número de conexões diretas de um nó, enquanto a centralidade de proximidade indica a rapidez com que um ator pode ser alcançado pelos demais. No caso específico desta pesquisa, como as firmas são os nós centrais de cada uma das estimações que as remetem, a centralidade de proximidade ($C_c = 1$) indica que todos os atores são equidistantes, sem a presença de *outliers*, caracterizando uma rede altamente integrada. Já a centralidade de intermediação mede a importância de um nó como ponte nos caminhos mais curtos, evidenciando sua função estratégica de conexão (Freeman, 1979; Brandes, 2001; Borgatti et al., 2018).

A excentricidade, relacionada ao diâmetro de um vértice, deve ser superior ao comprimento médio dos caminhos para garantir eficiência na circulação de informações. Essa relação assegura que, mesmo com variações amostrais, a rede mantenha sua capacidade de comunicação fluida (Newman, 2008; Borgatti et al., 2018). Outra métrica relevante é a centralidade de Eigenvector, ou centralidade de prestígio, que atribui maior peso a nós com base na importância dos seus vizinhos, sendo calculada pelo vetor próprio associado ao maior autovalor da matriz de adjacência. Em termos práticos, um nó é considerado influente se estiver conectado a outros nós igualmente influentes (Newman, 2008; Christian et al., 2018).

Por fim, a modularidade é empregada para identificar comunidades dentro da rede, agrupando “nós” com características comuns. Nesta pesquisa, empregam-se algoritmos de particionamento propostos por Newman (2004), Gilvan e Newman (2002; 2004) e Zhang e Peixoto (2020), que permitem revelar estruturas latentes e otimizar a visualização dos *clusters* formados. O conjunto de dados, embora relativamente grande, com um total de 1.721 observações, após ser filtrado para captar as patentes características de inovações ambientalmente responsáveis (CPC Y02), reduz-se para 412 registros. Com o objetivo de analisar os setores em que as firmas patenteiam e eventuais mudanças associadas aos atores com os quais se relacionam, incluindo as regiões de depósito, adota-se uma distribuição espacial circular, conforme proposto por Fruchterman e Reingold (1991).

Os dados foram extraídos do agregador patentário australiano *Lens.org*, que tem por característica a agregação de informações de diversas oficinas de patentes do mundo, incluindo o *United States Patent and Trademark Office* (USPTO), o *World Intellectual Property Organization* (WIPO) e o Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI), além de outros escritórios regionais, especialmente latino-americanos (LENS, 2024; Ishar et al., 2024; Afia et al., 2024; Pereira Neto et al., 2025).

Na etapa inicial da investigação, a análise do conjunto de patentes obtido na plataforma *Lens.org*, a partir da distinção entre “patentes citadas”⁴ e “patentes citantes”⁵, constatou-se que, ao contrário da expectativa de uma rede de conhecimento integrada em escala global, o cenário revela agrupamentos isolados. Esses *clusters* interagem predominantemente dentro de seus próprios domínios tecnológicos, limitando a interconectividade entre diferentes patentes. Essa configuração demanda abordagens alternativas capazes de explorar a base de dados de forma mais abrangente. Do total de

⁴ Patentes citadas referem-se aos documentos de patente que são mencionados como referência em um pedido de patente posterior. Quando um inventor ou examinador de patentes elabora um novo pedido, ele deve indicar o “estado da técnica/estado da arte”, que é constituído por tudo aquilo que já foi tornado acessível ao público antes da data de depósito (Pavanelli, 2018).

⁵ Patentes citantes, por sua vez, são os documentos de patente depositados posteriormente que fazem referência a uma patente anterior (Pavanelli, 2018).

1.721 patentes da amostra, apenas 289 apresentam vínculos relevantes, seja por citar outras patentes ou por serem citadas, o que inviabiliza a formação de uma rede coesa. Evidências semelhante são discutidas por Archibugi e Filippetti (2018) e Adam et al. (1993), ao apontarem que a fragmentação temática em sistemas de patentes pode dificultar a difusão do conhecimento e a identificação de fluxos tecnológicos entre campos distintos.

Diante desse cenário, torna-se fundamental compreender a classificação ambiental da *Cooperative Patent Classification* (CPC), onde as invenções relacionadas à sustentabilidade são agrupadas na categoria Y e podem reunir desenvolvimentos tecnológicos recentes, tecnologias transversais a diferentes classes e áreas de conhecimento, bem como temas de natureza intersetorial (USPTO, 2025). Com base nessa classificação, o conjunto de patentes das empresas analisadas e o grupo associado ao desenvolvimento tecnológico sustentável podem ser sumarizados na Tabela 1. Destaca-se que, embora entre as maiores empresas mineradoras que atuem no Brasil estejam o grupo canadense Kinross, Salobo Metais e Mineração Paragominas, não foram identificados dados patentários dessas empresas no país (JAZIDA, 2025).

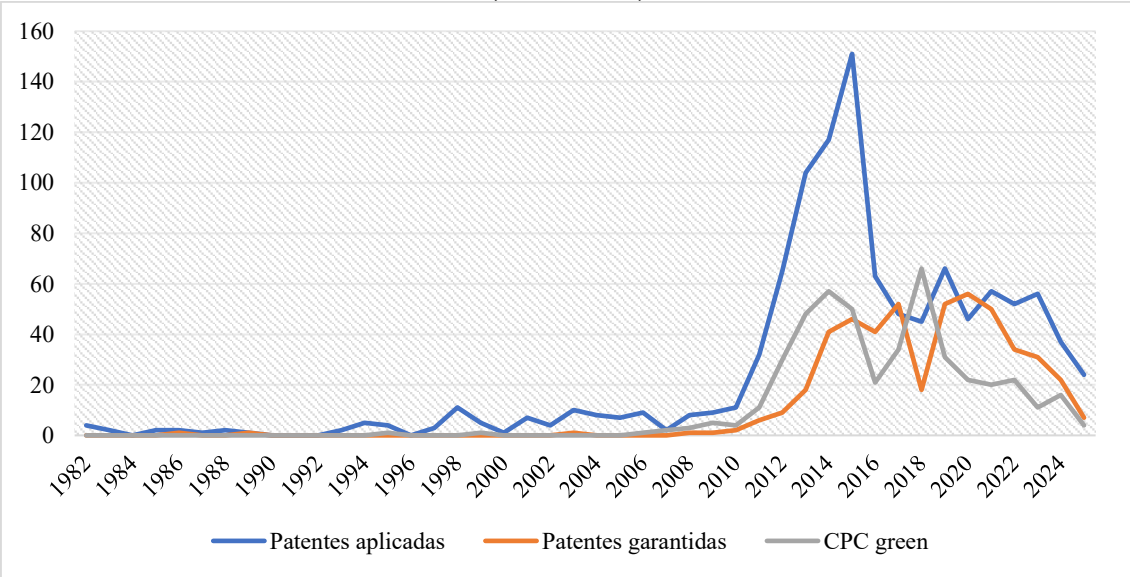
Tabela 1: Resumo dos dados encontrados nas respectivas firmas (1982-2025)

	VALE	CBMM	Anglo American	CSN mineração	Samarco	Usiminas	TOTAL
Patentes aplicadas	920	11	12	40	55	60	1098
Patentes garantidas	468	2	3	0	6	38	517
CPC green	391	0	0	8	5	8	412

Fonte: Elaboração dos autores, a partir dos dados da Lens.org.

Adicionalmente, a evolução temporal dos depósitos patentários, bem como o movimento de publicações associadas a tecnologias “verdes”, é apresentada no Gráfico 4, que evidencia um impulso significativo dessas tecnologias a partir de 2010. Período caracterizado tanto pelas tendências globais de inovação verde quanto mudanças estruturais e políticas de incentivo à inovação na economia brasileira.

Gráfico 1: Volume e característica das patentes depositadas pelo conjunto de firmas (1982-2025)



Fonte: Elaboração dos autores, a partir dos dados da Lens (2025).

Em linhas gerais, o movimento de depósitos pode ser explicado pelo avanço das discussões ambientais, iniciadas com a Conferência de Estocolmo em 1972 e que ganharam maior relevância no cenário global no início do século XXI, além disso é comum o salto no depósito de patentes nas mais diversas áreas no início do século XXI, que pode ser explicado tanto por variações institucionais quanto decorrentes do maior volume comercial e consequente estratégia empresarial de setores que se tornaram mais competitivos (Fink et al., 2015; Berkes et al., 2022).

Em adendo, o estudo considerou as patentes aplicadas e as garantidas pois as patentes aplicadas (depositadas) capturam a intenção estratégica e a atividade inovadora emergente das organizações, refletindo o esforço tecnológico bruto e sua orientação estratégica. As patentes aplicadas constituem um indicador mais sensível e precoce da direção da inovação, já que registram decisões de investimento em P&D antes mesmo que os escritórios de patentes determinem se a invenção atende aos critérios de novidade, atividade inventiva e aplicação industrial (Fink et al., 2015). Por outro lado, as patentes garantidas (concedidas) indicam qualidade e valor tecnológico validado, o que tende a garantir maior valor econômico e tecnológico, sendo mais frequentemente citadas por patentes posteriores e associadas a inovações efetivamente comercializadas (Hall et al., 2005).

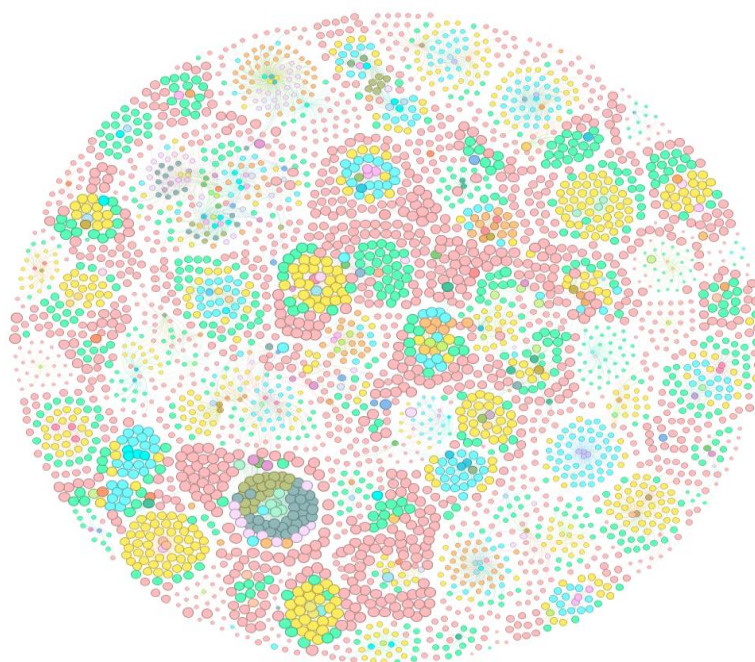
O uso de ambas as modalidades decorre do intervalo entre o depósito e a concessão que pode se estender por até cinco anos, dependendo do escritório e da complexidade da tecnologia. Neste sentido, analisar apenas patentes concedidas em um período recente significa capturar a atividade inovadora de anos anteriores, perdendo a visibilidade das tendências mais atuais. Por outro lado, considerar apenas depósitos recentes significa trabalhar com um conjunto de dados cujo desfecho – concessão ou não – ainda é incerto (OECD, 2009). Diante disso, e considerando a fronteira analítica do estudo, optou-se por analisar simultaneamente ambas as informações.

4. Resultados e Discussão: Estratégias de Inovação Verde na Mineração Brasileira

Conforme indicado pelos dados metodológicos, a distribuição espacial de trajetórias patentárias, além de limitada, implica na perda de uma parcela significativa das observações e não demonstra boa capacidade na criação de uma rede coesa. Em vez disso, esse tipo de representação tende a revelar *clusters* informativos, caracterizados por um conjunto de patentes focadas em resoluções de problemas específicos (Verspagen, 2009). Esse padrão fica evidente na distribuição espacial de Frutcherman-Reingold, apresentada na Figura 1, que revela uma marcação de *clusters* bem definidos, embora represente apenas 18,8% da amostra total.

Diante disso, o estudo avança para uma abordagem que vai além da relação entre patentes citadas e citantes, uma vez que essa estrutura não apresentou resultados significativos. Adota-se, portanto, uma distribuição espacial que relaciona inventores e códigos patentários, com destaque às patentes verdes. Essa estratégia permite analisar a totalidade da base de dados e extrair informações por área tecnológica, o grau de associação das firmas a cada áreas e se as relações estabelecidas pelas firmas, como parcerias, influenciam o tipo de patente depositada.

Figura 1: *Clusters* identificados na distribuição patente citadas-patentes citantes



Fonte: Elaboração dos autores, a partir dos dados Lens.org, gráfico gerado no *software* Gephi.

De modo preliminar, as patentes caracterizadas como inovações fechadas somam 1.562 registros, correspondendo a 90,8% das 1.721 patentes analisadas, indicando que a maior parte dos inventos é desenvolvida internamente pelas próprias empresas. Porém, ao considerar apenas as 412 patentes verdes, esse percentual se reduz para 75,48%, indicando uma maior propensão à adoção de estratégias de inovação aberta nesse tipo de tecnologia.

Em termos proporcionais, a empresa Samarco destaca-se com o maior conjunto de invenções abertas, apoiando-se principalmente em parceria com a Universidade Federal de Ouro Preto, com a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais e com empresas parceiras, como a Vale e a BMD Têxteis. Em termos absolutos, dado o maior volume de depósitos, a Vale S.A destaca-se pelas 128 patentes registradas com coinventores, realizadas majoritariamente com apoio universitário, com representações na Universidade de São Paulo, na Universidade Federal de Minas Gerais, na Universidade Federal de Ouro Preto, na Universidade Federal do Espírito Santo, na Universidade Federal do Rio de Janeiro, no Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) no Estado da Bahia e com outras empresas, como a Samarco e a JFE Steel (Japão).

No conjunto total de patentes, observam-se dois grupos tecnológicos predominantes, ambos fortemente relacionados à atividade minerária. O grupo C22B1, relacionado ao tratamento preliminar de minérios e sucatas é o mais abundante, respondendo por mais de 50% dos registros, seguido pelas tecnologias vinculadas ao tratamento de água, rejeitos, esgotos ou lodo, que corresponde a aproximadamente 30% da amostra. Esse padrão também se mantém no subconjunto de patentes sustentáveis.

No caso das patentes verdes, foco deste artigo, observa-se que os depósitos colaborativos, assumem maior relevância em termos absolutos. Ainda assim, chama a atenção a ausência de patentes classificadas como verde, segundo o CPC, em empresas como Anglo American e CBMM. Duas explicações ajudam a compreender esse resultado: no caso da Anglo American, o core tecnológico da firma concentra-se nas unidades localizadas no exterior; embora a empresa apresente poucos depósitos

patentários no Brasil, esse padrão se altera ao considerar as patentes registradas na União Europeia. A CBMM, por sua vez, concentra seus esforços tecnológicos predominantemente no uso dos minerais que extrai, com destaque ao nióbio, e não nas atividades diretamente associadas à mineração, o que explica a ausência de inventos de característica ambientalmente sustentável nesse segmento.

Em situação semelhante, Samarco e Usiminas possuem um conjunto bastante restrito de patentes verdes – duas e cinco, respectivamente –, o que faz com que a análise das patentes verdes na mineração se concentre majoritariamente na Vale S.A, apesar de as cinco empresas apresentadas sejam líderes do setor no Brasil.

Este resultado sugere que a noção de mineração sustentável tem se materializado mais por meio de práticas operacionais e estratégias de gestão do que pelo desenvolvimento de inventos, materiais ou tecnologias sustentáveis propriamente ditas no âmbito da atividade minerária.

Tabela 2: Principais CPC's utilizados em aplicações verdes, frequência e grau

CPC	Frequência	Grau
Y02P10/20	552	192
C22B1/2406	289	88
C22B1/14	89	77
C22B1/00	110	59
C22B1/243	261	57
C02F2101/20	112	56
G01V3/16	47	51
G01V3/12	33	51
C22B1/24	112	49
G01V3/38	38	49
C22B3/42	138	48

Fonte: Elaboração dos autores, a partir dos dados Lens.org.

As dez principais classes CPC, com suas respectivas frequências e grau ponderados na rede, são apresentadas na Tabela 2. A análise do conjunto de patentes verdes – considerando tanto inventos individuais quanto aqueles desenvolvidos em parceria – mostram a prevalência de inventos baseados em “tratamento preliminar de minérios ou sucata/ ligação; briquetagem/ peletização” (C22B1/24, 14 e 00). Esse resultado é esperado, uma vez que tais atividades integram o núcleo operacional da mineração, voltado à extração e à redução de partículas para facilitar transporte e processamento. Destacam-se também, as atividades vinculadas ao “tratamento de água, águas residuais, esgoto ou lodo” (C02F) principalmente vinculados a rejeitos de mineração (metais pesados e componentes (2101/20). Por fim, outra categoria comum encontrada foram os depósitos relacionados a “prospecção ou detecção elétrica ou magnética; Medição das características do campo magnético da Terra, por exemplo, declinação, desvio” (G01V/3) com destaque aos das categorias 12 e 16, relacionados ao uso de ondas eletromagnéticas e aplicações aéreas.

Os resultados também revelam que, os principais parceiros organizam-se como inventores independentes, empresas e universidades. Novamente, a restrição dos dados e o peso maior da Vale S.A são determinantes para os resultados, uma vez que, nas 7 patentes verdes da Usiminas e Samarco, os depósitos ocorreram sem parceiros. Assim, esta etapa da análise reflete predominantemente a atuação da Vale S.A, que, entre os 128 depósitos realizados em parceria, contou 32 vezes com a expertise da Universidade Federal do Espírito Santo, 29 da Universidade de São Paulo, 19 com seu próprio instituto

de tecnologia e, majoritariamente, com inventores independentes associados diretamente às aplicações da empresa. Essas informações são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Principais parceiros em aplicações verdes por frequência e grau ponderado.

Aplicante	Frequência	Grau
VALE S.A	1354	1064
UNIV FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO (UFES)	32	37
UNIV SAO PAULO (USP)	29	40
PEREIRA ANTONIO CLARETI	20	38
BERNI TIAGO VALENTIM	19	33
ASSOCIACAO INST TECNOLOGICO VALE	19	61
UNIV FEDERAL DE MINAS GERAIS (UFMG)	15	33
GUIMARAES FELIPE HILARIO	13	29
STEGMILLER LEONIDIO	10	61
DONG JIE	10	35
UNIV FEDERAL DE OURO PRETO (UFOP)	9	33

Fonte: Elaboração dos autores, a partir dos dados Lens.org.

Para além da simples relação entre a empresa e parceiros, bem como das conexões tecnológica advinda – que mostrou-se relacionar a atividade central da empresa –, chama a atenção a ausência de patentes compartilhadas de forma central com outras firmas. Esse padrão sugere que as soluções desenvolvidas permanecem voltadas a problemas específicos de cada firma, o que dificulta a difusão de inovações em escala setorial. Mesmo quando realizadas em parceiros, as patentes se mostram-se predominantemente autocentradas, com os parceiros contribuindo mais para o aprofundamento tecnológico dos inventos do que para a geração de soluções generalistas ao setor.

Ao considerar a distribuição espacial somente com as patentes depositadas pela Vale S.A em parceria, observa-se que a empresa opta por realizar inovações com parceiros de áreas secundárias à sua atividade central de mineração e processamento dos minérios. Observa-se que a maior parte das patentes do grupo C22B diretamente associadas ao núcleo do negócio, é depositada de forma individual, enquanto as patentes relacionadas a tratamento de rejeitos apresentam maior prevalência de depósitos em conjunto, principalmente com universidades (C02F).

Uma hipótese por trás desse padrão, particularmente no caso da Vale e Samarco, é que os depósitos colaborativos em tecnologias de tratamento de rejeitos, quando tornados públicos, sinalizam uma preocupação da empresa em adotar um caminho distinto daquelas associadas aos desastres de Mariana e Brumadinho. No entanto, a ausência de comportamento semelhante da Samarco enfraquece essa interpretação, indicando a necessidade de cautela na generalização desses resultados.

Além disso, devido o baixo volume de patentes publicadas em parceria com universidades, esta pesquisa examinou a base de dados para identificar, entre os inventores de patentes publicadas exclusivamente por empresas, indivíduos vinculados ao meio acadêmico, seja como professores ou pesquisadores. Os resultados indicam alta participação de profissionais qualificados formados nos grandes centros de produção científica do Brasil – como UFOP, UFMG, UFRJ, UNICAMP, PUC-Rio, UFU, UFRN, UNIFEI, UnB, UFES, IFMA, USP – muitos com mestrado e pós-graduação em áreas correlatas à química, engenharias e mineração. No entanto, a quase totalidade desses profissionais são sediados na própria empresa. Algumas publicações recentes ainda envolvem esses indivíduos, mas não como pesquisadores de universidades, e sim como empregados das firmas, principalmente da Vale S.A.

Por mais que este resultado indique certa capilaridade na relação universidade-empresa, não há evidências de um aumento significativo na participação de inovações

abertas. Os resultados sugerem que as empresas do setor buscam preservar seu núcleo de negócios, evitando a abertura tecnológica mesmo diante de potenciais parceiros, ao mesmo tempo, há maior disposição para estabelecer associações com outras empresas e universidades quando os inventos estão direcionados às atividades de inovação ambiental, principalmente em áreas que envolvem passivos socioambientais e que podem impactar sua imagem pública.

Diferentemente do observado em setores como o agroindustrial, universidades e inventores independentes não atuam nos domínios tecnológicos centrais da mineração, concentrando-se em áreas secundárias da atividade, sem que isso impliquem necessariamente menor complexidade tecnológica. Além disso, o expressivo volume de dados associados à Vale S.A., principalmente frente às patentes verdes, torna a análise inevitavelmente concentrada na empresa, constituindo uma limitação relevante dos resultados.

5. Considerações finais

Considerando a relevância do Brasil no setor minerário e do papel estratégico dessa atividade no processo de transição energética, este estudo analisou as estratégias de inovação das empresas do setor minerário no Brasil, utilizando patentes verdes como *proxy* de inovação ambiental. Para isso, foi utilizado o procedimento de Análise de Redes Sociais (ARS) com dados de patentes verdes, durante o período de 1982 a 2025.

Os resultados apontam que a inovação ambiental patenteada na mineração brasileira é escassa e altamente concentrada em poucas empresas. Esse perfil confirma o que foi observado na literatura acadêmica, em relação ao baixo investimento de P&D das mineradoras brasileiras. De fato, análises dos dados mostram que quase todas as patentes do setor mineral foram depositadas por fornecedores externos, com firmas multinacionais dominando o patenteamento em mineração.

A distribuição espacial obtida pelas ARS, juntamente com as interações analisadas para a obtenção dos resultados, evidenciou-se que o depósito de patentes no setor minerário apresenta elevada concentração, com cada empresa atuando predominantemente dentro de seu próprio ecossistema inovativo. Assim, o espaço para parcerias tecnológicas é relativamente restrito, concentrando-se principalmente ao redor das grandes empresas e limitando geograficamente o campo de colaboração na mineração brasileira. Dessa forma, observa-se uma certa “autossuficiência” tecnológica, de modo que quando ocorrem parcerias externas, elas se dão preferencialmente em regiões próximas às sedes dessas empresas, destacando o papel da proximidade geográfica na facilitação da colaboração e do fluxo do conhecimento.

Os resultados também revelam que o conhecimento inovador e estratégico tende a se concentrar em um conjunto restrito de atores, refletindo redes de cooperação densas em torno dessas grandes empresas. Observa-se, entretanto, que os inventos relacionados ao núcleo do negócio são desenvolvidos majoritariamente internamente, enquanto as parcerias com universidades, firmas e inventores independentes concentram-se em áreas secundárias da atividade, como melhorias no tratamento de rejeitos ou para prospecção de novas jazidas. O predomínio da inovação fechada sugere que ampliar parcerias entre empresas, universidades e *startups* seria fundamental para ampliar a difusão do conhecimento e fomentar o desenvolvimento de inovações ambientais.

Essas constatações podem ter implicações importantes para as políticas públicas e estratégias empresariais. Em consonância com pesquisas sobre geografia da inovação, recomenda-se fortalecimento de programas que incentivem as redes de colaboração tecnológica nas cadeias produtivas. Além disso, destaca-se a necessidade de estimular

patentes verdes, complementando-as com incentivos a outros mecanismos de inovação aberta.

Esse estudo evidencia que, embora as patentes verdes sejam ferramentas úteis, seu potencial depende de redes colaborativas e de políticas específicas que ampliem o ecossistema de inovação sustentável na mineração brasileira. A análise a partir das patentes depositados por empresas brasileiras revela uma tarefa complexa, dado o número ainda reduzido de patentes verdes no setor. Além de escassas, essas patentes concentram-se majoritariamente na solução de problemas internos das próprias empresas, evidenciando que a baixa articulação setorial constitui uma barreira à disseminação mais ampla de tecnologias e práticas sustentáveis na mineração brasileira.

Por fim, destaca-se como limitação relevante deste artigo a concentração da análise nas patentes da Vale S.A, decorrentes do baixo volume de patentes verdes depositadas pelas demais empresas consideradas. Estudos futuros podem contribuir de forma substantiva para a presente temática ao ampliar a base de dados, incorporando patentes depositadas por empresas mineradoras brasileiras em escritórios internacionais, como o EPO e o USPTO. Adicionalmente, realizar análises comparativas com países líderes no setor mineral, bem como investigar como as inovações ambientais nesse setor se articulam com outros setores industriais e com cadeias globais de valor.

Referências

- Andersson, O. (2025). *Uncovering Green Innovation: A Topic Modeling Analysis of Climate Change Mitigation Patents* (Master's thesis). University of Gothenburg. <http://hdl.handle.net/2077/89126>
- Antal, A. (2024). Industries Leading Sustainable Patent Innovation: A Quantitative and Qualitative Analysis of Top Sustainability Filers. *Sagacious Research*.
- Archibugi, D.; Filippetti, A. (2018). *Innovation and economic crisis: Lessons and prospects from the economic downturn*. Routledge.
- Adam B.; Jaffe, M.; Rebecca Henderson. (1993). *Geographic Localization of Knowledge Spillovers as Evidenced by Patent Citations*. The Quarterly Journal of Economics, 108(3), p. 577–598. <https://doi.org/10.2307/2118401>
- ANM – Agência Nacional de Mineração. (2023). *Anuário Mineral Brasileiro: principais substâncias metálicas – Ano base 2021 (Versão 1)*. Brasília: ANM.
- Amore, M.; Bannedsen, M. (2016). Corporate governance and green innovation. *Journal of Environmental Economics and Management*, 75, 54–72. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2015.11.003>
- Audretsch, D. B.; Belitski, M. (2019). The limits to collaboration across four of the most innovative UK Industries. *British Journal of Management*.
- Agnelli, A.; et al. (2023). The economic benefits of early green innovation: Evidence from the automotive sector. *OECD Environment Working Papers* No. 209.
- Berkes, E., Manyasheva, K.; Mestieri, M. (2022). Global innovation spillovers and productivity: Evidence from 100 years of world patent data. *Working Paper No. 2022-15, Federal Reserve Bank of Chicago*. <https://doi.org/10.21033/wp-2022-15>
- Brandes, U. (2001). A faster algorithm for betweenness centrality. *Journal of mathematical sociology*, 25(2), 163-177.
- Borgatti, S. P.; Everett, M. G.; Johnson, J. C. (2018). *Analyzing Social Networks*. London: SAGE Publications.
- BRASIL. DECRETO Nº 11.108, DE 29 DE JUNHO DE 2022. *Institui a Política Mineral Brasileira e o Conselho Nacional de Política Mineral*. Disponível em:

- https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2022/Decreto/D11108.htm
- CPC – Cooperative Patent Classification. (2026). *Y02 - Technologies or applications for mitigation or adaptation against climate change*. United States Patent and Trademark.
- Cui, J., Dai, J., Wang, Z.; Zhao, X. (2022). Does environmental regulation induce green innovation? A panel study of Chinese listed firms. *Technological Forecasting and Social Change*, 176, 121492. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121492>
- Cordeiro, A.; Losekann, L. Os desafios do processo de difusão do carro elétrico no Brasil. In: Encontro Nacional de Economia Industrial e Inovação, 3., 2018, Uberlândia, MG. Anais [...]. São Paulo: Blucher, 2018. <http://doi.org/10.5151/enei2018-41>.
- Chesbrough, H. (2006). *Open Business Models: How to Thrive in the New Innovation Landscape*. Boston: Harvard Business School Press.
- Carmignano, O. (2023). *Inovação no setor de mineração de ferro em Minas Gerais com foco na destinação de rejeitos*. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Química (Inovação Tecnológica e Biofarmacêutica).
- Carvalho, P.; et al. (2017). Panoramas setoriais 2030: mineração e metalurgia. In: Panoramas setoriais 2030: desafios e oportunidades para o Brasil. Rio de Janeiro : Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2017. p. [43]-58.
- Calaes, G. (2009). *Evolução do mercado mineral no Brasil a longo prazo* (Relatório Técnico 04). Ministério de Minas e Energia – MME, Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral – SGM, Projeto ESTAL.
- Castro, F.; et al. *Transição energética para fontes de energia renováveis e sua dependência por minerais críticos : aspectos geoeconômicos*. Fernando Ferreira de Castro ... [et al.]. – Brasília, DF: Ipea, 2024.
- Dahlander, L.; Gann, D. (2010). How open is innovation? *Research Policy*. 39, 699-709.
- Daly, A.; Valacchi, G.; Raffo, J. D. Recent trends of innovation in the mining sector. *Global Challenges for Innovation in Mining Industries*. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. p. 25-48.
- Dias, A. *Mineração 4.0: a evolução e os benefícios da indústria 4.0 no setor da mineração*. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Esmailpour Moghadam, H.; Karami, A. (2024). Green innovation: exploring the impact of environmental patents on the adoption and advancement of renewable energy. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 35(8), 1815–1835. <https://doi.org/10.1108/MEQ-10-2023-0360>
- Fabrizi, A., Guarini, G.; Meliciani, V. (2018). Green patents, regulatory policies and research network policies. *Research Policy*, 47(6), 1018–1031. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2018.03.005>
- Fink, C., Khan, M.; Zhou, H. (2015). Exploring the worldwide patent surge. *Economics of Innovation and New Technology*, 25(2), 114–142. <https://doi.org/10.1080/10438599.2015.1055087>
- Fruchterman, T. M. J.; Reingold, E. M. (1991). Graph Drawing by Force-Directed Placement. *Software: Practice and Experience*, 21(11), 1129-1164. <https://doi.org/10.1002/spe.4380211102>.
- Freeman, L. C. (1979). Centrality in Social Networks: Conceptual Clarification. *Social Networks*, 1(3), 215-239.
- Freeman, L. C. (2009) Methods of Social Network Visualization. *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, 1-17.

- Fragoso, Aline. *Mapeamento das tecnologias desenvolvidas no setor de mineração-metalurgia: um estudo de inovações desenvolvidas por universidades públicas do estado de Minas Gerais*. Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia de Produção .
- Ferreira, L.; et al. (2023). Instituições e financiamento para pesquisa Avanços e desafios para as energias renováveis no Brasil. In: *Prêmio ABDE-BID* [recurso eletrônico] : Edição 2022 / Associação Brasileira de Desenvolvimento. - Rio de Janeiro: ABDE Editorial, 2023.
- Ferreira, L.; et al. (2024). O papel da Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) na transição energética: uma análise comparativa para os países da OCDE. *Geosul*, v. 39, n. 90, p. 235-265. 2024.<https://doi.org/10.5007/2177-5230.2024.e95363>.
- Garcia, R.; Suzigan, W. (2021). As Relações Universidade-Empresa. *Texto para Discussão, 405 – UNICAMP*, ISSN 0103-9466.
- Garcia, R. (2021). Geografia da inovação. *Texto para Discussão, 402 – UNICAMP*, ISSN 0103-9466.
- Girvan, M.; Newman, M. (2002). Community Structure in Social and Biological Networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(12), 7821-7826.
- Hall, B. H.; Jaffe, A.; Trajtenberg, M. (2005). Market value and patent citations. *RAND Journal of Economics*, 36(1), 16–38.
- Hoang, T. H. V., Przychodzen, W., Przychodzen, J., & Segbotangni, E. A. (2020). Does it pay to be green? A disaggregated analysis of US firms with green patents. *Business Strategy and the Environment*, 29(3), 1331–1361. <https://doi.org/10.1002/bse.2437>
- Haščič, I.; et al. (2010). Climate Policy and Technological Innovation and Transfer: An Overview of Trends and Recent Empirical Results. *OECD Environment Working Paper No. 30*.
- Leão, R.; Rabelo, R. A Extensão da cadeia produtiva da economia mineral no PIB brasileiro. Rio de Janeiro: Ipea, dez. 2023. 88 p. il. (*Texto para Discussão*, n. 2950). <http://dx.doi.org/10.38116/td2950-port>.
- Leão, R.; et al. (2024). O posicionamento do Brasil no comércio internacional de minerais críticos para a transição energética. *Radar*, 76 – IPEA.
- Ishar, N.; et al. (2024). Bibliometric Analysis on Digital Payment Using Lens. org and Vosviewers: A Comparison of Research Between Malaysia and Poland. *Open Research Europe*, 4(191), 191.
- JAZIDA (2025). As 10 Maiores Empresas de Mineração no Brasil em 2024.
- Jackson, M. (2010). Social and Economic Networks. *Princeton: Princeton University Press*.
- Lens (2025). *Patent search*. Disponível em: The Lens - Free & Open Patent and Scholarly Search. Acesso em: 25, set. 2025.
- Moreno, J. (1953) *Who Shall Survive? Foundations of sociometry*, group psychotherapy and psychodrama, Beacon House Inc., New York.
- Newman, M. E., & Girvan, M. (2004). Finding and evaluating community structure in networks. *Physical review E*, 69(2), 026113.
- Newman, M. E. (2008). The mathematics of networks. *The new palgrave encyclopedia of economics*, 2(2008), 1-12.
- ONU - Organização das Nações Unidas. Comissão Mundial Sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento: Nosso Futuro Comum. Rio de Janeiro: Editora da Fundação Getúlio Vargas, 1991.

- MME – Ministério de Minas e Energia. (2025). *Plano Nacional de Mineração 2050*. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/pnm-2050>
- MME – Ministério de Minas e Energia. (2024). *Serviço Geológico do Brasil*. Disponível em: <https://www.sgb.gov.br/>
- Martins, F.; et al. (2020). Fatores determinantes de inserção nas cadeias globais de valor: Uma análise da participação da indústria mineral. *Revista Eletrônica de Negócios Internacionais: Internext*, 15(3).
- Nelson, R. (2006). *As Fontes do Crescimento Econômico*. Campinas: Editora da Unicamp.
- OECD - Organization for Economic Co-operation and Development (2008). Open innovation in global networks. Report. New York: OECD
- OECD - Organization for Economic Co-operation and Development. (2018). *Oslo Manual 2018: Guidelines for Collecting, Reporting and Using Data on Innovation*, 4th Edition, The Measurement of Scientific, Technological and Innovation Activities, OECD Publishing, Paris/Eurostat, Luxembourg. <https://doi.org/10.1787/9789264304604-en>
- OECD - Organization for Economic Co-operation and Development. (2009). *OECD patent statistics manual*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264056442-en>
- Oliveira, V.; et al. Fatores direcionadores da cooperação de pequenas e médias empresas com a universidade: evidências a partir de quatro estudos de caso. *Econômica – Niterói*, v. 20, n. 2, p. 85–106, 2018.
- Pavanelli, M. (2018). *A internacionalização das patentes das universidades brasileiras: um estudo de impacto a partir da base de dados Derwent (2000-2016)* (Tese de doutorado, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Faculdade de Filosofia e Ciências). Marília.
- Porter, M. E.; VAN, C. (1995). Toward a New Conception of the Environment-Competitiveness Relationship. *Journal of Economic Perspectives*, 9(4), p. 97-118.
- Pereira Neto, A.; Botelho, M. D. R. A. (2025). Políticas industriais de fomento aos veículos elétricos em países selecionados. *Revista de Economia Contemporânea*, 29, e252910. <http://dx.doi.org/10.1590/19805527252910>
- Pereira Neto, A.; et al. (2025) A contribuição da Embrapa para o desenvolvimento de tecnologias verdes: uma análise com base em patentes. *LALICS 2025*. Rio de Janeiro. 2025.
- Scarpellini, S., Portillo-Tarragona, P., Vinuesa, L. M. M., & Moneva, J. M. (2017). Green patents in the manufacturing sector: The influence of businesses' resources and capabilities. *Universia Business Review*, (56), 18–35. <https://doi.org/10.3232/UBR.2017.V14.N4.01>
- Scarpellini, S., Portillo-Tarragona, P.; Marin-Vinuesa, L. M. (2019). Green patents: a way to guide the eco-innovation success process? *Academia Revista Latinoamericana de Administración*, 32(2), 225–243. <https://doi.org/10.1108/ARLA-07-2017-0233>
- Schumpeter, J. A. (1985). *Teoria do desenvolvimento econômico: Uma investigação sobre lucros, capital, crédito, juro e o ciclo econômico*. São Paulo: Nova Cultural.
- Stal, A.; et al. (2014). Os conceitos da inovação aberta e o desempenho de empresas brasileiras inovadoras. *RAI – Revista de Administração e Inovação*. 10.5773/rai.v11i2.1352
- SENADO. (2023). *Responsável por 4% do PIB, mineração encontra maneiras de ser mais sustentável no Brasil*. Disponível em: Responsável por 4% do PIB,

- mineração encontra maneiras de ser mais sustentável no Brasil - TV Senado. Acesso em 11, nov. 2025.
- USPTO. *Classification Resources*. Disponível em: <https://www.uspto.gov/web/patents/classification/cpc/html/cpc.html>. Acesso em: 25, set. 2025.
- UNFCCC. *O que é o Protocolo de Kyoto?* Disponível em: https://unfccc.int/kyoto_protocol Acesso em: 16 jun. 2021.
- Verspagen, B. (2007). Mapping technological trajectories as patent citation networks: A study on the history of fuel cell research. *Advances in complex systems*, 10(01), 93115.
- Vivona, R.; et al. (2023). The costs of collaborative innovation. *The Journal of Technology Transfer*, 48:873–899. <https://doi.org/10.1007/s10961-022-09933-1>
- Vale S.A. (2025). *O que fazemos*. Disponível em: <https://vale.com/pt/o-que-fazemos> Acesso em 11, nov. 2025.
- Wasserman, S.; Faust, K. (1994). *Social Network Analysis: Methods and Applications*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Zhang, L; Peixoto, T (2020). Statistical inference of assortative community structures *Phys. Rev. Research* <https://dx.doi.org/10.1103/PhysRevResearch.2.043271>. 2 043271.