v7.n9.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

TERRAS RARAS, INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E PODER GEOPOLÍTICO: PROPOSIÇÃO DO MODELO DE CONVERSÃO GEOAMBIENTAL DO PODER TECNOLÓGICO (MCGPT) E DO ÍNDICE GEOAMBIENTAL DE POTENCIAL ESTRATÉGICO PARA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL (IGPE-IA)

RARE EARTHS, ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND GEOPOLITICAL POWER: PROPOSAL OF THE GEOENVIRONMENTAL CONVERSION MODEL OF TECHNOLOGICAL POWER (MCGPT) AND THE GEOENVIRONMENTAL INDEX OF STRATEGIC POTENTIAL FOR ARTIFICIAL INTELLIGENCE (IGPE-IA)

TIERRAS RARAS, INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y PODER GEOPOLÍTICO: PROPUESTA DEL MODELO DE CONVERSIÓN GEOAMBIENTAL DEL PODER TECNOLÓGICO (MCGPT) Y DEL ÍNDICE GEOAMBIENTAL DE POTENCIAL ESTRATÉGICO PARA LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL (IGPE-IA)

Davis Souza Alves[1], Márcio Magera Conceição[2]

e799024
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i9.9024

PUBLICADO: 09/2026

RESUMO

A expansão da Inteligência Artificial (IA) amplia a relevância estratégica das terras raras, cuja disponibilidade, processamento e integração às cadeias tecnológicas influenciam a soberania dos Estados e a configuração do poder geopolítico. Este estudo objetiva analisar como as terras raras, compreendidas como ativos geoambientais estratégicos, podem ser convertidas em capacidade industrial, soberania tecnológica e influência geopolítica no contexto da expansão mundial da IA. A pesquisa possui abordagem qualitativa, caráter exploratório e finalidade teórico-conceitual, fundamentando-se em pesquisa documental, revisão bibliográfica integrativa, análise temática e síntese interpretativa. Os resultados demonstram que a posse de reservas minerais, isoladamente, não assegura vantagem estratégica, uma vez que o poder tecnológico depende da articulação entre extração sustentável, processamento, manufatura avançada, capacidade científica, infraestrutura de IA, segurança cibernética e governança. Evidências documentais mostram a crescente concentração da cadeia nas etapas de maior valor agregado, especialmente refino e fabricação de ímãs. Como contribuições originais, propõem-se o Modelo de Conversão Geoambiental do Poder Tecnológico (MCGPT), que sistematiza a transformação dos recursos geoambientais em poder tecnológico, e o Índice Geoambiental de Potencial Estratégico para Inteligência Artificial (IGPE-IA), concebido como *framework* multidimensional para futura avaliação comparativa. Conclui-se que a soberania tecnológica depende menos da disponibilidade mineral isolada do que da capacidade sistêmica, sustentável e institucional de converter recursos em competências tecnológicas estratégicas.

PALAVRAS-CHAVE: Terras raras. Inteligência Artificial. Soberania tecnológica.

[1] Doutor em Administração de TI - Ph.D na Florida Christian University (EUA) convalidado no Brasil, Mestre em Administração com foco em TI Verde (2015), Extensão em Gestão de TI pela FGV/SP (2011), Pós-graduado em Gerenciamento de Projetos (2009), Graduado em Redes de Computadores e Internet (2008).

[2] Economista pela PUC-Campinas, mestre em Administração e em Ciências Sociais, doutor em Ciências Sociais e em Administração. Professor da Universidade Paulista (UNIP) e Pró-Reitor de Pesquisa e Extensão da Universidade de Guarulhos, onde também atua no stricto sensu. Possui experiência em gestão do ensino superior, planejamento urbano e regional, cooperativismo, resíduos sólidos, gestão de negócios e crescimento econômico. É avaliador do MEC/INEP desde 2006, foi Coordenador-Geral da pesquisa TALIS/OCDE no Brasil em 2012 e desenvolveu o aplicativo VERDES-PT para cálculo de resíduos urbanos. Atua ainda como Editor-Chefe da Editora RECIMA21.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

ABSTRACT
The expansion of Artificial Intelligence (AI) increases the strategic relevance of rare earth elements, whose availability, processing, and integration into technological value chains influence state sovereignty and the configuration of geopolitical power. This study aims to analyze how rare earth elements, understood as strategic geoenvironmental assets, can be converted into industrial capacity, technological sovereignty, and geopolitical influence in the context of the global expansion of AI. The research adopts a qualitative, exploratory, and theoretical-conceptual approach, based on documentary research, an integrative literature review, thematic analysis, and interpretative synthesis. The results demonstrate that mineral reserves alone do not ensure strategic advantage, since technological power depends on the articulation of sustainable extraction, processing, advanced manufacturing, scientific capacity, AI infrastructure, cybersecurity, and governance. Documentary evidence indicates increasing concentration of the value chain in higher-value-added stages, particularly refining and magnet manufacturing. As original contributions, the study proposes the Geoenvironmental Conversion Model of Technological Power (MCGPT), which systematizes the transformation of geoenvironmental resources into technological power, and the Geoenvironmental Index of Strategic Potential for Artificial Intelligence (IGPE-IA), conceived as a multidimensional framework for future comparative assessment. It is concluded that technological sovereignty depends less on isolated mineral availability than on the systemic, sustainable, and institutional capacity to convert resources into strategic technological capabilities.

KEYWORDS: *Rare earth elements; Artificial Intelligence; Technological sovereignty.*

RESUMEN
La expansión de la Inteligencia Artificial (IA) aumenta la relevancia estratégica de las tierras raras, cuya disponibilidad, procesamiento e integración en las cadenas tecnológicas influyen en la soberanía de los Estados y en la configuración del poder geopolítico. Este estudio tiene como objetivo analizar cómo las tierras raras, entendidas como activos geoambientales estratégicos, pueden convertirse en capacidad industrial, soberanía tecnológica e influencia geopolítica en el contexto de la expansión mundial de la IA. La investigación adopta un enfoque cualitativo, exploratorio y teórico-conceptual, fundamentado en investigación documental, revisión bibliográfica integrativa, análisis temático y síntesis interpretativa. Los resultados demuestran que la posesión de reservas minerales, por sí sola, no garantiza una ventaja estratégica, ya que el poder tecnológico depende de la articulación entre extracción sostenible, procesamiento, manufactura avanzada, capacidad científica, infraestructura de IA, ciberseguridad y gobernanza. Las evidencias documentales muestran una creciente concentración de la cadena en las etapas de mayor valor agregado, especialmente el refinado y la fabricación de imanes. Como contribuciones originales, se proponen el Modelo de Conversión Geoambiental del Poder Tecnológico (MCGPT), que sistematiza la transformación de los recursos geoambientales en poder tecnológico, y el Índice Geoambiental de Potencial Estratégico para Inteligencia Artificial (IGPE-IA), concebido como un framework multidimensional para futuras evaluaciones comparativas. Se concluye que la soberanía tecnológica depende menos de la disponibilidad mineral aislada que de la capacidad sistémica, sostenible e institucional para convertir recursos en capacidades tecnológicas estratégicas.

PALABRAS CLAVE: *Tierras raras; Inteligencia Artificial; Soberanía tecnológica.*

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

1. INTRODUÇÃO

A expansão da Inteligência Artificial constitui uma das transformações tecnológicas mais relevantes do século XXI. Sua incorporação aos processos produtivos, às infraestruturas digitais, aos sistemas de defesa, à gestão pública, à pesquisa científica e aos mecanismos de tomada de decisão vem modificando as bases da competitividade econômica e da soberania dos Estados. Diferentemente de abordagens que apresentam a IA como um fenômeno predominantemente lógico, algorítmico ou imaterial, seu funcionamento depende de uma infraestrutura física extensa, composta por centros de processamento de dados, semicondutores, equipamentos de telecomunicações, sistemas energéticos, dispositivos eletrônicos e cadeias industriais de alta complexidade.

Essa materialidade demonstra que a expansão da economia digital não elimina a dependência dos recursos naturais. Ao contrário, desloca parte dessa dependência para minerais dotados de propriedades físicas e químicas indispensáveis às tecnologias avançadas. Nesse conjunto encontram-se os elementos de terras raras — os quinze lantanídeos, acrescidos do escândio e do ítrio — utilizados em ímãs permanentes, catalisadores, componentes ópticos, sistemas eletrônicos, ligas metálicas e outras aplicações de alto desempenho (Balaram, 2019). A Agência Internacional de Energia reconhece que esses elementos desempenham funções estratégicas em tecnologias energéticas, transportes, Inteligência Artificial, indústria aeroespacial, medicina e defesa, razão pela qual passaram ao centro das políticas de segurança econômica e tecnológica (IEA, 2026).

A designação “terras raras” não significa necessariamente que esses elementos sejam escassos na crosta terrestre. Sua criticidade decorre, em grande medida, da ocorrência em concentrações economicamente exploráveis, da complexidade de sua separação química, da intensidade tecnológica do processamento e da elevada concentração geográfica das cadeias de produção. Por isso, a análise estratégica desses recursos não pode ser limitada ao volume das reservas existentes. Deve considerar o domínio das atividades de extração, beneficiamento, separação, refino, produção de ligas, fabricação de ímãs permanentes e integração desses materiais em produtos tecnológicos.

O *Mineral Commodity Summaries 2026*, do Serviço Geológico dos Estados Unidos, evidencia que a oferta mundial das terras raras permanece marcada por elevada concentração produtiva e por diferentes níveis de dependência externa. O relatório demonstra que a posição estratégica dos países varia não apenas conforme suas reservas e produção mineral, mas também segundo a capacidade industrial e tecnológica instalada ao longo da cadeia de valor

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

(USGS, 2026). Essa distinção é fundamental: a posse do recurso no subsolo não se converte automaticamente em autonomia tecnológica ou influência geopolítica.

A relevância desse debate foi ampliada pela convergência entre transição energética, digitalização econômica, automação industrial, Inteligência Artificial e telecomunicações de nova geração. Kalantzakos (2020) argumenta que a descarbonização da economia e a Quarta Revolução Industrial desencadearam uma corrida internacional pelo acesso contínuo aos minerais críticos, cuja concentração geográfica pode produzir novas zonas de tensão e reorganizar as relações entre as potências industriais. Essa corrida não está relacionada somente à disponibilidade geológica, mas ao controle político, econômico e tecnológico das redes que transformam minerais em componentes industriais de elevado valor agregado.

Nesse sentido, as terras raras deixaram de ser tratadas exclusivamente como insumos industriais e passaram a integrar políticas de segurança econômica, defesa, inovação tecnológica e soberania nacional. Estudos empíricos demonstram que os riscos geopolíticos afetam os preços, os valores importados e a estabilidade dos mercados de terras raras. A análise realizada por Fan, Omura e Roca (2023), a partir de mais de trinta anos de dados das importações japonesas, identificou relações estatisticamente significativas entre risco geopolítico e mercado de terras raras, com destaque para os riscos associados à China. Tal evidência reforça a compreensão de que a oferta desses elementos não obedece apenas às dinâmicas convencionais de demanda e preço, estando sujeita a decisões políticas, restrições comerciais e disputas estratégicas.

O caso da China é particularmente relevante porque demonstra a diferença entre possuir recursos minerais e dominar uma cadeia tecnológica. Sua posição foi construída mediante políticas industriais de longo prazo, investimentos em processamento, produção de materiais, desenvolvimento de competências técnicas e integração entre mineração e manufatura avançada. A concentração do beneficiamento e da fabricação de componentes permite que o controle exercido nas etapas intermediárias seja tão ou mais estratégico do que a extração mineral propriamente dita. Estudos recentes sobre a reorganização das cadeias de terras raras indicam que tensões entre China e Estados Unidos estimulam políticas de diversificação, relocalização industrial e redução de dependências, embora a construção de cadeias alternativas envolva custos elevados, barreiras tecnológicas e longos períodos de maturação (Zhao, Cheng e Xu, 2026).

Essa realidade sustenta a necessidade de uma interpretação geoambiental ampliada. O conceito de ativo geoambiental adotado neste trabalho não se limita à existência física do minério. Abrange a combinação entre localização territorial, características geológicas,

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

viabilidade econômica, condições de extração, impactos ecológicos, infraestrutura industrial, regulação ambiental, conhecimento científico e capacidade de inserção em cadeias tecnológicas. Sob essa perspectiva, o valor estratégico das terras raras resulta da interação entre natureza, território, tecnologia, instituições e poder.

A dimensão ambiental é inseparável dessa discussão. Embora as terras raras sejam empregadas em tecnologias relacionadas à descarbonização e à modernização dos sistemas energéticos, sua mineração e seu processamento podem gerar impactos expressivos. Entre os principais problemas encontram-se o elevado consumo de energia e água, a produção de rejeitos, a geração de efluentes, a acidificação dos solos, a contaminação hídrica, a dispersão de metais e a presença de materiais radioativos associados a determinados depósitos minerais. Edahbi, Plante e Benzaazoua (2019) observam que a mineração e o refino produzem quantidades significativas de rejeitos sólidos e líquidos e que a ausência de técnicas adequadas de gestão pode provocar contaminação de águas de drenagem por terras raras e elementos radioativos.

Estudos mais recentes confirmam a permanência desse desafio. Han *et al*. (2025) identificaram uma tensão estrutural entre a eficiência das técnicas convencionais de extração e os seus custos ambientais, incluindo acidificação, contaminação por metais pesados e riscos associados a urânio e tório presentes em determinados minérios. Diao *et al*. (2024), por sua vez, destacam que a expansão das aplicações tecnológicas das terras raras ocorre paralelamente a problemas ambientais, volatilidade de mercado e concentração da cadeia produtiva. Isso significa que qualquer estratégia de soberania mineral e tecnológica precisa incorporar critérios de sustentabilidade, avaliação do ciclo de vida, recuperação ambiental, economia circular e responsabilidade social.

Lee e Wen (2018) demonstraram que a produção de terras raras possui uma pegada ambiental significativa, mas que a adoção de processos mais limpos, controle de emissões e melhorias tecnológicas pode reduzir os custos ambientais da indústria. A sustentabilidade, portanto, não deve ser compreendida como uma limitação externa à capacidade estratégica. Ela constitui uma variável interna da própria continuidade da cadeia produtiva, influenciando sua legitimidade social, estabilidade regulatória, acesso a investimentos e resiliência no longo prazo.

A economia circular também apresenta potencial para reduzir vulnerabilidades, embora não elimine, no curto prazo, a necessidade de extração primária. Wang *et al*. (2024), em modelo que integrou estoques geológicos e materiais em uso em dez regiões entre 2021 e 2050, identificaram desequilíbrios entre oferta e demanda, especialmente em elementos pesados como disprósio e térbio. Os autores concluíram que estratégias circulares podem ampliar a oferta

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

secundária e reduzir a demanda acumulada, contribuindo para uma distribuição menos polarizada dos recursos, mas sua implementação depende de cooperação internacional e mecanismos de governança.

A dependência mineral associada à Inteligência Artificial não deve, contudo, ser interpretada como uma relação linear segundo a qual todo sistema de IA contém diretamente grandes volumes de terras raras. A conexão ocorre em múltiplas camadas. Ela envolve os equipamentos que suportam computação, armazenamento, transmissão de dados, geração e gestão de energia, refrigeração, automação, sensores, robótica, veículos autônomos, sistemas aeroespaciais e infraestruturas de defesa. Assim, a expansão da IA contribui para aumentar o valor estratégico de cadeias industriais que dependem, em diferentes graus, de minerais críticos e terras raras.

A IEA (2026) inclui explicitamente as tecnologias de IA entre as aplicações estratégicas relacionadas às terras raras. Essa associação revela que a disputa contemporânea não se restringe ao software ou à superioridade algorítmica. Ela alcança a capacidade de produzir e manter a infraestrutura material que torna possível treinar, operar e disseminar sistemas inteligentes. A liderança em IA depende, portanto, da interação entre capital científico, disponibilidade energética, semicondutores, infraestrutura digital, recursos minerais, capacidade industrial e segurança das cadeias de abastecimento.

Além da competitividade econômica, a IA adquiriu relevância crescente para a segurança cibernética. Sistemas baseados em aprendizagem de máquina podem ser empregados no reconhecimento de padrões anômalos, automação de auditorias, identificação de vulnerabilidades, gestão de riscos, prevenção de fraudes e monitoramento de infraestruturas digitais. Alves e Conceição (2025) demonstram que a aplicação da IA às auditorias de conformidade pode ampliar a precisão, a continuidade e a capacidade preventiva dos processos de governança, risco e conformidade. Essa contribuição é relevante para o presente estudo porque evidencia que a capacidade nacional em IA não constitui apenas uma vantagem econômica, mas também um recurso de proteção institucional e de gestão das infraestruturas digitais.

Entretanto, a utilização da IA em ambientes críticos requer transparência, governança, explicabilidade e supervisão humana. Santana *et al*. (2026) observam que o aumento do desempenho dos modelos de *machine learning* e *deep learning* foi acompanhado pela ampliação da opacidade algorítmica, tornando necessária a evolução das abordagens de Inteligência Artificial Explicável. Essa discussão demonstra que soberania tecnológica não significa apenas

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

possuir sistemas avançados, mas também compreender, governar, auditar e proteger seus processos decisórios.

A articulação entre minerais críticos, IA e segurança cibernética permite identificar uma cadeia estratégica mais abrangente. Recursos geoambientais sustentam processos de extração e beneficiamento; estes alimentam a indústria de materiais e componentes; a indústria fornece a infraestrutura necessária ao desenvolvimento tecnológico; e a capacidade tecnológica pode fortalecer a autonomia digital, a defesa cibernética e a influência internacional. Contudo, a literatura tende a investigar separadamente cada uma dessas dimensões.

Os estudos geoambientais concentram-se, com frequência, na ocorrência mineral, na viabilidade da extração e nos seus impactos ecológicos. As pesquisas econômicas analisam preços, oferta, demanda e dependência comercial. Os trabalhos de Relações Internacionais enfatizam a competição entre Estados, enquanto a literatura tecnológica discute Inteligência Artificial, semicondutores e transformação digital. Ainda são limitados os modelos capazes de integrar, numa única estrutura explicativa, a transformação de recursos geoambientais em capacidade industrial, autonomia tecnológica, segurança cibernética e poder geopolítico.

Essa fragmentação constitui a lacuna central desta investigação. Embora já esteja estabelecido que as terras raras são relevantes para indústrias tecnológicas e que suas cadeias estão sujeitas a riscos geopolíticos, permanece insuficientemente explicada a forma pela qual diferentes capacidades nacionais se combinam para converter recursos minerais em poder estratégico. A disponibilidade geológica, isoladamente, não explica a liderança tecnológica. De igual modo, a excelência científica, sem segurança material e industrial, pode permanecer dependente de fornecedores externos.

Dessa forma, o estudo parte da seguinte tese: “Na era da Inteligência Artificial, as terras raras deixaram de constituir apenas recursos minerais estratégicos e passaram a atuar como ativos geoambientais capazes de influenciar a soberania tecnológica, a segurança cibernética e a redistribuição do poder geopolítico mundial.”

Essa tese não pressupõe uma relação automática entre reservas minerais e poder estatal. Propõe-se que a influência geopolítica resulte da capacidade de realizar uma conversão sistêmica do recurso: transformar disponibilidade mineral em extração sustentável; extração em processamento; processamento em indústria de elevada intensidade tecnológica; indústria em infraestrutura de Inteligência Artificial; capacidade digital em defesa cibernética; e domínio dessas etapas em soberania tecnológica.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

1.1. Problema de investigação

A partir da lacuna identificada, formula-se o seguinte problema de investigação:

De que maneira a capacidade de converter terras raras, compreendidas como ativos geoambientais, em infraestrutura industrial e tecnológica influencia a soberania tecnológica, a segurança cibernética e a reconfiguração do poder geopolítico mundial na era da Inteligência Artificial?

1.2. Hipótese de investigação

Adota-se como hipótese principal que: O poder geopolítico relacionado às terras raras não é determinado exclusivamente pela dimensão das reservas ou pelo volume da extração, mas pela capacidade integrada dos Estados de converter recursos geoambientais em produtos de elevado valor tecnológico por meio de extração sustentável, processamento industrial, inovação científica, infraestrutura de Inteligência Artificial, defesa cibernética e governança estratégica.

Dessa hipótese principal derivam três proposições complementares:

P1: países que controlam as etapas de processamento, fabricação de componentes e integração tecnológica possuem maior capacidade estratégica do que países limitados à exportação do minério bruto;

P2: práticas ambientalmente insustentáveis reduzem a resiliência da cadeia, ampliam conflitos sociais e regulatórios e comprometem a continuidade da vantagem estratégica;

P3: a soberania tecnológica na era da IA depende da combinação entre segurança mineral, capacidade industrial, domínio científico, infraestrutura digital, governança da IA e defesa cibernética.

1.3. Objetivo geral

Analisar como as terras raras, compreendidas como ativos geoambientais estratégicos, podem ser convertidas em capacidade industrial, soberania tecnológica e influência geopolítica no contexto da expansão mundial da Inteligência Artificial.

1.4. Objetivos específicos

a) caracterizar a importância geológica, ambiental, industrial e tecnológica das terras raras;
b) examinar a concentração geográfica das etapas de extração, processamento e fabricação de componentes;

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

c) analisar a relação entre minerais críticos, infraestrutura tecnológica e expansão da Inteligência Artificial;
d) discutir a sustentabilidade ambiental como condição da resiliência das cadeias de terras raras;
e) investigar as conexões entre Inteligência Artificial, soberania tecnológica e segurança cibernética;
f) identificar as capacidades que permitem transformar recursos geoambientais em influência geopolítica;
g) propor o Modelo de Conversão Geoambiental do Poder Tecnológico (MCGPT);
h) desenvolver o Índice Geoambiental de Potencial Estratégico para Inteligência Artificial (IGPE-IA) como instrumento teórico de análise comparativa.

1.5. Justificação e relevância científica

A relevância científica deste estudo encontra-se na integração de campos que normalmente permanecem separados: Ciências Geoambientais, Economia Mineral, Política Industrial, Inteligência Artificial, Segurança Cibernética e Geopolítica. A originalidade não decorre apenas da reunião desses temas, mas da proposição de um mecanismo explicativo destinado a demonstrar como os recursos naturais podem ser convertidos em poder tecnológico.

Essa abordagem supera duas interpretações reducionistas. A primeira associa poder mineral exclusivamente à existência de reservas. A segunda trata a IA como capacidade predominantemente algorítmica, desconsiderando sua infraestrutura física, energética e industrial. O presente estudo sustenta que a soberania tecnológica depende de uma cadeia integrada de capacidades e que falhas em qualquer etapa podem limitar a conversão do potencial geoambiental em influência estratégica.

A investigação também possui relevância política e prática. Governos podem utilizar o modelo proposto para identificar gargalos nas suas cadeias de valor; instituições científicas podem empregá-lo para organizar programas interdisciplinares; e empresas podem adaptá-lo à avaliação de riscos de abastecimento, sustentabilidade e dependência tecnológica.

1.6. Contribuições originais do estudo

A primeira contribuição consiste na proposição do Modelo de Conversão Geoambiental do Poder Tecnológico (MCGPT), estruturado preliminarmente da seguinte forma:

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Recursos geoambientais
↓
Disponibilidade de terras raras
↓
Capacidade de extração sustentável
↓
Capacidade de processamento e separação
↓
Indústria de materiais e componentes avançados
↓
Infraestrutura tecnológica e de Inteligência Artificial
↓
Capacidade de defesa cibernética
↓
Soberania tecnológica
↓
Influência e poder geopolítico

O modelo parte do princípio de que cada etapa funciona simultaneamente como mecanismo de agregação de valor e possível ponto de estrangulamento. Um país pode possuir reservas significativas, mas permanecer tecnologicamente dependente caso não disponha de capacidade de processamento. Da mesma forma, pode apresentar capacidade industrial e científica avançada, porém permanecer vulnerável quando depende excessivamente de fornecedores externos concentrados.

A segunda contribuição é o Índice Geoambiental de Potencial Estratégico para Inteligência Artificial (IGPE-IA). O índice baseia-se nas dimensões do MCGPT e é concebido, neste artigo, como um *framework* analítico multidimensional. Sua finalidade é estruturar a avaliação do potencial de países ou regiões para converter recursos geoambientais em capacidade tecnológica estratégica.

O IGPE-IA não é apresentado, nesta etapa, como instrumento estatisticamente validado nem como ranking de países. Sua contribuição consiste na proposição fundamentada das dimensões, variáveis e relações que poderão ser operacionalizadas e testadas em pesquisas futuras. Essa delimitação evita atribuir ao *framework* uma capacidade de medição que ainda depende de ponderação, normalização, aplicação comparativa e validação empírica.

1.7. Delimitação do estudo

A pesquisa concentra-se nas relações entre terras raras, sustentabilidade da cadeia produtiva, infraestrutura tecnológica, Inteligência Artificial, segurança cibernética, soberania tecnológica e geopolítica. Não pretende realizar avaliação geológica detalhada de depósitos específicos nem estimar economicamente projetos individuais de mineração.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Também não sustenta que as terras raras sejam os únicos minerais relevantes para a IA. Semicondutores e infraestruturas digitais dependem de diversos materiais, como cobre, silício, gálio, germânio, cobalto, níquel, lítio e grafite. A escolha das terras raras decorre de suas propriedades singulares, da concentração das etapas de processamento, da relevância para tecnologias avançadas e do seu valor analítico para compreender a relação entre recursos naturais e poder.

1.8. Estrutura do artigo

Além desta introdução, o artigo está organizado em quatro seções subsequentes. A Seção 2 apresenta o referencial teórico sobre terras raras, criticidade mineral, sustentabilidade, Inteligência Artificial, segurança cibernética, soberania tecnológica e geopolítica. A Seção 3 explicita o percurso metodológico, incluindo a análise documental, a revisão integrativa e a síntese temática. A Seção 4 reúne os resultados e a discussão, desenvolvendo o MCGPT e o IGPE-IA. A Seção 5 apresenta as considerações finais, as contribuições, as limitações e a agenda de validação futura.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. A evolução da importância estratégica dos recursos naturais

A relação entre recursos naturais e poder político acompanha a evolução das sociedades industriais. Em diferentes períodos históricos, matérias-primas específicas assumiram posição central na organização das economias, na expansão territorial dos Estados e na consolidação de vantagens militares e tecnológicas. Carvão, ferro, petróleo, urânio e minerais críticos ilustram como determinados recursos podem ultrapassar a condição de mercadorias e tornar-se elementos estruturantes da ordem internacional (Yergin, 1991; Bridge, 2009; Klare, 2012).

Durante a Primeira Revolução Industrial, o carvão mineral funcionou como base energética da mecanização, da siderurgia e das ferrovias. Na Segunda Revolução Industrial, o petróleo assumiu papel decisivo na mobilidade, na aviação, na indústria química e na projeção militar. A história do petróleo evidencia que a segurança do abastecimento, a localização das reservas, a infraestrutura de transporte e a capacidade de refino podem alterar alianças, conflitos e estratégias nacionais (Yergin, 1991).

A economia digital não eliminou a materialidade das relações de poder. A transição energética, a eletrificação, a automação e a IA aumentaram a importância de materiais com propriedades magnéticas, ópticas e eletroquímicas específicas. Kalantzakos (2020) sustenta que

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

a descarbonização e a Quarta Revolução Industrial desencadearam uma corrida pelo acesso a minerais críticos, enquanto a IEA (2025, 2026) identifica forte concentração tanto na mineração quanto no refino de diversos materiais estratégicos.

Essa mudança não representa simples substituição do petróleo por minerais críticos. Trata-se de uma diversificação da base material do poder. A segurança energética continua relevante, mas passa a coexistir com segurança mineral, segurança industrial, segurança digital e capacidade científica. O Estado que depende de terceiros para processar materiais, fabricar componentes, construir infraestruturas digitais ou operar sistemas estratégicos encontra-se exposto a riscos que não são explicados apenas pela geologia de seu território.

Sob a ótica geoambiental, os recursos naturais devem ser interpretados como parte de sistemas sociotécnicos. Seu valor não é fixo: depende de conhecimento geológico, tecnologia de extração, infraestrutura, regulação, custos ambientais, aceitação social, logística, capacidade de processamento e integração a mercados. Essa leitura aproxima a geografia dos recursos da economia política internacional e permite compreender por que países com grandes reservas podem permanecer exportadores de baixo valor agregado.

Tabela 1. Evolução histórica da relação entre recursos naturais e poder

Período	Recurso dominante	Base tecnológica	Expressão geopolítica	
Primeira Revolução Industrial	Carvão e ferro	Máquinas a vapor, siderurgia e ferrovias	Industrialização e expansão imperial	
Século XX	Petróleo e urânio	Transportes, petroquímica, aviação e energia nuclear	Segurança energética e poder militar	
Transição energético-digital	Minerais críticos e terras raras	Eletrificação, energias renováveis, sensores, robótica e IA	Soberania tecnológica e segurança das cadeias	

Fonte: elaboração do autor com base em Yergin (1991), Bridge (2009), Klare (2012), Kalantzakos (2020) e IEA (2025).

2.2. Terras raras como ativos geoambientais

Os elementos de terras raras correspondem aos quinze lantanídeos, normalmente considerados em conjunto com escândio e ítrio devido às semelhanças geoquímicas e às aplicações industriais. Apesar da denominação, vários desses elementos não são excepcionalmente escassos na crosta terrestre. O principal desafio está na baixa concentração em depósitos economicamente viáveis e na dificuldade de separação entre elementos de comportamento químico semelhante (Balaram, 2019; Haque *et al*., 2014).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A literatura costuma distinguir terras raras leves e pesadas. A classificação pode variar conforme o critério adotado, mas é útil porque os elementos apresentam diferenças em abundância, mineralogia, disponibilidade e aplicação. Neodímio e praseodímio são relevantes para ímãs permanentes; disprósio e térbio aumentam o desempenho desses ímãs em temperaturas elevadas; európio, térbio e ítrio são empregados em fósforos e sistemas ópticos; lantânio e cério possuem ampla utilização em catalisadores, ligas e polimento (Balaram, 2019; Demir *et al*., 2026).

Considerá-las ativos geoambientais significa integrar dimensões físicas, territoriais, ecológicas, econômicas, industriais e institucionais. O ativo não é apenas o corpo mineral, mas a combinação de reserva, qualidade do minério, tecnologia disponível, infraestrutura, água e energia, licenciamento, capacidade de tratamento dos rejeitos, acesso logístico e legitimidade social. A criticidade resulta dessa combinação e não de uma propriedade geológica isolada (Nassar *et al*., 2015).

A mineração e o processamento podem produzir impactos significativos. Métodos convencionais demandam reagentes, água e energia; certos depósitos estão associados a tório e urânio; e as etapas de separação podem gerar efluentes e rejeitos de tratamento complexo. Haque *et al*. (2014) e Edahbi *et al*. (2019) demonstram que a sustentabilidade da cadeia exige avaliação de ciclo de vida, gestão de resíduos, recuperação de áreas e monitoramento de água e solo.

A dimensão social também deve ser considerada. Projetos minerais dependem de relações com comunidades, transparência, repartição de benefícios e conformidade regulatória. A ausência desses elementos pode provocar oposição, atrasos e perda de licença social para operar. Portanto, a sustentabilidade não é variável periférica; ela interfere diretamente na continuidade produtiva e na capacidade de converter um recurso geológico em vantagem estratégica.

Tabela 2. Dimensões constitutivas das terras raras como ativos geoambientais

Dimensão	Questões centrais	Efeito estratégico
Geológica	Teor, mineralogia, tamanho e localização do depósito	Define potencial físico e complexidade técnica
Ambiental	Água, energia, rejeitos, radioatividade e recuperação	Afeta custos, licenciamento e continuidade
Industrial	Separação, refino, ligas, ímãs e componentes	Determina agregação de valor
Institucional	Regulação, política industrial e governança	Coordena investimento e reduz incerteza
Social	Participação, benefícios e licença social	Condiciona legitimidade e estabilidade

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Dimensão	Questões centrais	Efeito estratégico
Geopolítica	Dependência, comércio e controles de exportação	Converte concentração em influência

Fonte: elaboração do autor com base em Nassar *et al*. (2015), Balaram (2019), Edahbi *et al*. (2019) e Demir *et al*. (2026).

2.3. Cadeias globais de valor dos minerais críticos

A cadeia das terras raras compreende etapas sucessivas e tecnologicamente distintas: prospecção, mineração, concentração, separação química, produção de óxidos e metais, fabricação de ligas, ímãs ou outros materiais funcionais e incorporação em produtos finais. A vulnerabilidade não depende apenas da concentração da extração; pode ser ainda maior no refino, na separação e na manufatura de componentes (IEA, 2025; Demir *et al*., 2026).

A IEA (2025) estimou que, em 2024, os três maiores países concentravam 86% da mineração e 97% do refino dos principais elementos utilizados em ímãs permanentes. Mesmo em cenários com novos projetos, a concentração do refino permanece elevada até 2030 e 2040. Isso demonstra que a diversificação das minas não produz automaticamente diversificação da cadeia.

O domínio das etapas intermediárias gera vantagens cumulativas: escala, experiência operacional, redes de fornecedores, disponibilidade de reagentes, infraestrutura, conhecimento tácito e proximidade com fabricantes de componentes. Novos projetos fora dos centros dominantes enfrentam custos de capital elevados, volatilidade de preços, licenciamento demorado e dificuldade de garantir compradores de longo prazo.

A resiliência exige estratégias complementares. Entre elas estão diversificação geográfica, contratos de longo prazo, estoques estratégicos, parcerias internacionais, rastreabilidade, pesquisa em substituição, reciclagem e expansão da capacidade de processamento. Contudo, a circularidade possui limites temporais: a quantidade de material disponível para reciclagem depende do estoque em uso e da vida útil dos produtos (Wang *et al*., 2024).

A cadeia também é sensível a decisões políticas. Controles de exportação, sanções, exigências de licenciamento e restrições sobre tecnologias de processamento podem afetar indústrias muito além do setor mineral. A IEA (2026) demonstra que interrupções amplas poderiam comprometer setores de alto valor, incluindo automóveis, eletrônica, defesa e centros de dados.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 1. Cadeia global de valor das terras raras



Fonte: elaboração do autor com base em IEA (2025, 2026) e Demir *et al*. (2026).

2.4. Inteligência Artificial e sua infraestrutura física

A Inteligência Artificial é frequentemente descrita a partir de algoritmos, dados e modelos computacionais. Entretanto, sua operação depende de uma infraestrutura material e energética: semicondutores, servidores, redes, sistemas de armazenamento, equipamentos de energia, refrigeração, motores, sensores e dispositivos de automação. Essa base física conecta a economia digital às cadeias de minerais críticos.

As terras raras não são o único conjunto material relevante para a IA, e sua função varia entre equipamentos. Elas aparecem de forma especialmente importante em ímãs permanentes de alto desempenho, motores, atuadores, discos, sensores, componentes ópticos, sistemas de energia, telecomunicações, robótica e equipamentos auxiliares de centros de dados. A relação entre IA e terras raras é, portanto, sistêmica e distribuída, não uma correspondência simples entre um algoritmo e um elemento mineral.

A IEA (2026) incluiu expressamente tecnologias de IA e centros de dados entre as aplicações estratégicas expostas a riscos nas cadeias de terras raras. O crescimento do uso de IA também eleva a demanda por energia, infraestrutura de transmissão e equipamentos de refrigeração, ampliando a interdependência entre segurança digital, segurança energética e segurança mineral.

Do ponto de vista econômico, a liderança em IA depende de um ecossistema que combina pesquisa, capital, dados, energia, chips, equipamentos, talento e capacidade industrial. Um país pode desenvolver modelos avançados e, simultaneamente, permanecer vulnerável por depender de componentes, materiais ou tecnologias de fabricação controladas externamente.

Essa materialidade impõe uma revisão do conceito de soberania digital. Não basta controlar dados ou dispor de legislação. A autonomia exige capacidade de operar infraestruturas,

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

garantir abastecimento, manter equipamentos, auditar algoritmos e responder a interrupções. Assim, a soberania da IA deve ser entendida como capacidade sociotécnica apoiada em recursos físicos e institucionais.

Estudos recentes de atenção pública e visibilidade acadêmica reforçam essa convergência. O IICTEC Research Report No. 001/2026 identificou que o interesse global por IA passou a alcançar, de modo mais evidente, semicondutores, GPUs, minerais críticos e centros de dados (IICTEC, 2026). Em análise complementar, Alves e Conceição (2026) encontraram associações fortes entre atenção pública e visibilidade acadêmica explicitamente vinculada à IA para semicondutores, minerais críticos e data centers, embora tenham ressaltado que as contagens estimadas do Google Scholar não equivalem a números exatos de publicações.

Tabela 3. Materialidade da infraestrutura de Inteligência Artificial

Camada da IA	Infraestrutura associada	Dependência material ou industrial
Treino e inferência	Servidores, aceleradores e armazenamento	Semicondutores, metais, energia e refrigeração
Conectividade	Redes, cabos, antenas e equipamentos ópticos	Materiais eletrônicos, ópticos e magnéticos
Automação	Robôs, motores, atuadores e sensores	Ímãs permanentes e materiais funcionais
Energia	Geração, transmissão, UPS e refrigeração	Cobre, ímãs, materiais de potência e equipamentos
Segurança	Monitoramento, resposta e redundância	Infraestrutura confiável, manutenção e componentes

Fonte: elaboração do autor com base em IEA (2026), Balaram (2019) e Demir *et al*. (2026).

2.5. Segurança cibernética e soberania tecnológica

A soberania tecnológica pode ser compreendida como a capacidade de uma sociedade decidir, desenvolver, operar, auditar e proteger tecnologias consideradas essenciais. O conceito não implica autossuficiência absoluta, mas redução de dependências críticas e manutenção de alternativas suficientes para preservar autonomia decisória.

A segurança cibernética integra essa capacidade porque infraestruturas críticas, serviços públicos, cadeias industriais e sistemas de defesa dependem de redes e aplicações digitais. A IA pode ampliar a detecção de anomalias, a correlação de eventos, a automação de auditorias e a resposta a incidentes. Alves e Conceição (2025) destacam o potencial da IA para tornar auditorias de conformidade mais contínuas e preventivas.

Por outro lado, a adoção de IA cria riscos relacionados a opacidade, vieses, ataques adversariais, manipulação de dados e dependência de plataformas. Santana *et al*. (2026) observam que o avanço do desempenho dos modelos intensificou a necessidade de

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

explicabilidade e governança. Soberania tecnológica, portanto, requer simultaneamente capacidade de inovação e capacidade de controle.

A resposta a esses riscos exige governança verificável e competências de investigação. Correia *et al*. (2026) sistematizam normas e regulamentações internacionais aplicáveis à governança de IA, enquanto Santana (2026) destaca técnicas assistidas por IA para análise de autenticidade, rastreamento de evidências e investigação de desinformação. Em conjunto com a explicabilidade discutida por Santana *et al*. (2026), essas contribuições mostram que a autonomia tecnológica depende tanto de capacidade operacional quanto de transparência, auditabilidade e responsabilização humana.

A dependência de componentes ou materiais concentrados pode gerar risco cibernético indireto. Uma interrupção física pode limitar reposição de equipamentos; componentes não confiáveis podem introduzir vulnerabilidades; e a ausência de capacidade industrial pode dificultar atualização ou recuperação de infraestruturas. A segurança digital começa antes do software e alcança toda a cadeia de fornecimento.

A articulação entre segurança mineral, industrial e cibernética sustenta o argumento de que o poder tecnológico é resultado de capacidades combinadas. O Estado estrategicamente preparado precisa conhecer seus pontos de dependência, diversificar fornecedores, desenvolver competência técnica, proteger propriedade intelectual, manter estoques ou redundâncias e adotar governança responsável da IA.

Tabela 4. Dimensões da soberania tecnológica

Capacidade	Pergunta de soberania	Risco da ausência
Material	Há acesso seguro a minerais e componentes?	Interrupção e dependência externa
Industrial	É possível processar, fabricar e reparar?	Baixa agregação de valor e fragilidade
Científica	Há conhecimento para inovar e substituir?	Obsolescência e dependência tecnológica
Digital	Infraestruturas e dados podem ser operados localmente?	Perda de autonomia operacional
Cibernética	Sistemas podem ser auditados, protegidos e recuperados?	Exposição a ataques e coerção
Regulatória	A tecnologia é governada de forma legítima?	Opacidade, abuso e perda de confiança

Fonte: elaboração do autor com base em Alves e Conceição (2025), Santana *et al*. (2026) e IEA (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

2.6. Geopolítica das terras raras

A geopolítica das terras raras deriva da interação entre distribuição territorial, concentração industrial, comércio internacional, políticas públicas e valor estratégico das aplicações. Kalantzakos (2020) demonstra que a competição por minerais críticos acompanha realinhamentos geopolíticos mais amplos, enquanto Klare (2012) situa a disputa por recursos no contexto da crescente pressão sobre materiais essenciais.

A posição dominante da China não se limita às reservas ou à mineração. Ela inclui separação, refino, produção de metais e ligas, fabricação de ímãs e integração com cadeias industriais. A IEA (2025, 2026) mostra que essa concentração cria exposição significativa para economias que dependem de importações e para setores *downstream* de elevado valor.

Os Estados Unidos, a União Europeia, o Japão, a Austrália e outros atores vêm adotando políticas de diversificação, acordos, incentivos à produção, estoques e apoio à reciclagem. A União Europeia reforçou esse movimento com o Critical Raw Materials Act, que combina metas de extração, processamento, reciclagem e limites de dependência de um único país terceiro.

A África, a América Latina e outras regiões com potencial mineral podem adquirir maior importância, mas enfrentam risco de repetir modelos extrativistas de baixo valor agregado. A conversão de reservas em desenvolvimento depende de infraestrutura, negociação de conteúdo local, qualificação, proteção ambiental, governança e acesso a tecnologias de processamento.

A geopolítica também pode utilizar o comércio como instrumento de pressão. Restrições de exportação, controles sobre equipamentos e licenças podem transformar concentração industrial em poder de barganha. A resposta de países importadores tende a combinar diversificação, friend-shoring, inovação, reciclagem e formação de alianças minerais.

Entretanto, a fragmentação excessiva das cadeias pode elevar custos e retardar objetivos ambientais e tecnológicos. A cooperação internacional permanece necessária para padrões ambientais, transparência, financiamento e circulação de materiais secundários. A segurança mineral deve equilibrar resiliência, sustentabilidade e eficiência.

A competição geopolítica também possui uma dimensão informacional. O IICTEC (2026) e Alves e Conceição (2026) demonstram que a atenção pública e a visibilidade acadêmica podem acompanhar a crescente incorporação de componentes materiais à agenda da IA. Silva (2026), ao analisar a economia da atenção, acrescenta que os sinais de interação se convertem em dados que retroalimentam sistemas algorítmicos e condicionam exposições futuras. Essa camada não substitui a base mineral e industrial do poder, mas ajuda a explicar como infraestruturas, riscos e dependências ganham saliência social e política.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Tabela 5. Posições estruturais na geopolítica das terras raras

Ator ou região	Vantagem ou potencial	Vulnerabilidade principal
China	Escala, processamento e integração industrial	Pressão externa por diversificação e restrições comerciais
Estados Unidos	Mercado, inovação e capacidade financeira	Dependência em etapas intermediárias
União Europeia	Regulação, tecnologia e mercado	Baixa produção doméstica e dependência elevada
Austrália	Recursos e experiência em mineração	Necessidade de ampliar etapas *downstream*
África e América Latina	Potencial geológico e novos projetos	Risco de exportação primária e fragilidade institucional

Fonte: elaboração do autor com base em Kalantzakos (2020), IEA (2025, 2026), USGS (2026) e Demir *et al*. (2026).

2.7. Lacunas da literatura

A revisão evidencia literatura robusta sobre geologia, aplicações, impactos ambientais, criticidade, comércio e geopolítica. Contudo, os campos permanecem parcialmente fragmentados. Estudos ambientais raramente acompanham o recurso até sua conversão em capacidade tecnológica; análises geopolíticas frequentemente agregam minerais diferentes sem examinar os gargalos específicos; e trabalhos sobre IA tendem a tratar infraestrutura e matérias-primas como variáveis externas.

A primeira lacuna é explicativa: falta um modelo que descreva as etapas e condições mediante as quais recursos geoambientais se convertem em soberania tecnológica. A posse de reservas é frequentemente utilizada como indicador de potencial, mas não explica por que alguns países extraem valor estratégico e outros permanecem fornecedores primários.

A segunda lacuna é multidimensional. Os índices de criticidade avaliam risco de oferta, vulnerabilidade ou impacto ambiental, porém nem sempre integram sustentabilidade, processamento, indústria, ciência, infraestrutura de IA, cibersegurança e governança num mesmo quadro comparativo.

A terceira lacuna refere-se ao vínculo entre sustentabilidade e poder. Parte da literatura trata requisitos ambientais como custos ou restrições. Este artigo propõe interpretá-los como condições de resiliência: cadeias ambientalmente degradantes podem sofrer rejeição social, sanções, passivos, atrasos e perda de competitividade.

A quarta lacuna reside na materialidade da IA. A expansão dos sistemas inteligentes é geralmente discutida em termos de dados e algoritmos, sem integração suficiente com os recursos, equipamentos e cadeias industriais que sustentam sua operação.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Por fim, há lacuna metodológica entre modelos conceituais e instrumentos mensuráveis. O MCGPT busca oferecer mecanismo causal organizado, enquanto o IGPE-IA traduz suas dimensões em uma futura arquitetura de indicadores. A combinação pretende construir ponte entre interpretação teórica e comparação empírica.

Tabela 6. Síntese das lacunas e contribuições do estudo

O que a literatura já explica	Limitação identificada	Avanço proposto
Criticidade e risco de oferta	Ênfase mineral ou comercial	Integração com capacidade tecnológica e cibernética
Impactos ambientais da mineração	Separação entre ambiente e geopolítica	Sustentabilidade como condição de resiliência
Concentração da cadeia	Pouca explicação da conversão do recurso em poder	MCGPT como mecanismo de transformação
Infraestrutura e expansão da IA	Materialidade mineral pouco integrada	Relação sistêmica entre IA e cadeia industrial
Índices de criticidade	Dimensões incompletas para IA	IGPE-IA multidimensional

Fonte: elaboração do autor (2026).

2.8. Síntese do referencial teórico

O referencial demonstra que a importância das terras raras emerge da interação entre propriedades físico-químicas, concentração da oferta, complexidade do processamento, aplicações de alto desempenho e relevância para setores estratégicos. Sua análise requer abordagem que ultrapasse a geologia e incorpore ambiente, indústria, tecnologia, instituições e relações internacionais.

A evolução histórica dos recursos estratégicos mostra que o poder nunca derivou apenas da posse física. O carvão exigiu máquinas e transporte; o petróleo exigiu refino e infraestrutura; e as terras raras exigem separação sofisticada, materiais funcionais, manufatura avançada e integração tecnológica. A etapa decisiva é a capacidade de conversão.

A infraestrutura de IA reforça essa conclusão. Algoritmos dependem de equipamentos, energia, redes, sensores e cadeias industriais. A autonomia digital está ligada à segurança mineral e industrial, enquanto a segurança cibernética depende da capacidade de operar, auditar, manter e recuperar sistemas críticos.

A sustentabilidade atravessa todas essas dimensões. Impactos ambientais e sociais podem limitar projetos e comprometer a legitimidade das cadeias. Reciclagem, recuperação, substituição e eficiência reduzem riscos, mas não dispensam mineração responsável e cooperação internacional.

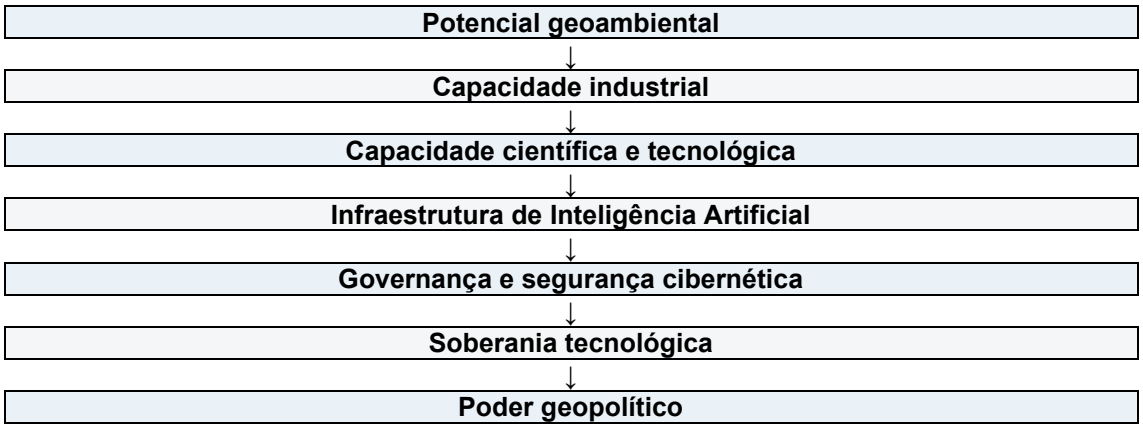
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A literatura, entretanto, ainda não oferece estrutura integrada que represente de forma explícita a sequência pela qual um recurso geoambiental pode tornar-se capacidade de processamento, indústria, infraestrutura de IA, defesa cibernética, soberania e influência geopolítica. Essa lacuna fundamenta a proposição do MCGPT.

O referencial também sustenta a necessidade do IGPE-IA. Um país não deve ser avaliado apenas por reservas ou produção. É necessário observar sustentabilidade, processamento, manufatura, ciência, energia, infraestrutura digital, governança e segurança cibernética. Essas dimensões são desenvolvidas analiticamente na Seção 4.

Em síntese, o argumento teórico pode ser expresso pela seguinte relação: recursos naturais possuem potencial estratégico; capacidades industriais convertem esse potencial em valor tecnológico; capacidades digitais e cibernéticas transformam o valor tecnológico em autonomia; e instituições e políticas convertem autonomia em influência duradoura. A Seção 3 apresenta o método utilizado para consolidar essa estrutura e fundamentar os dois instrumentos propostos.

Figura 2. Síntese da arquitetura teórica do estudo



Fonte: elaboração do autor (2026).

3. METODOLOGIA

3.1. Natureza e abordagem da investigação

A presente investigação possui natureza qualitativa, caráter exploratório e finalidade teórico-conceitual. A abordagem qualitativa foi selecionada porque o objetivo do estudo não consiste em mensurar estatisticamente a produção ou as reservas mundiais de terras raras, mas em interpretar as relações existentes entre recursos geoambientais, cadeias produtivas,

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

sustentabilidade, Inteligência Artificial, segurança cibernética, soberania tecnológica e poder geopolítico.

A pesquisa qualitativa permite analisar fenômenos complexos a partir de seus significados, contextos, relações e mecanismos explicativos. Essa abordagem é especialmente adequada quando o problema investigado envolve diferentes campos do conhecimento e requer uma compreensão integrada, em vez da verificação isolada de variáveis quantitativas. Lim (2024) destaca que a investigação qualitativa favorece a análise aprofundada de fenômenos complexos, oferecendo perspectivas contextuais e holísticas, embora exija transparência metodológica e reflexividade para reduzir possíveis vieses interpretativos.

No presente estudo, a abordagem qualitativa foi utilizada para construir uma interpretação teórica acerca da transformação das terras raras em ativos estratégicos. Partiu-se do entendimento de que a disponibilidade mineral não produz automaticamente soberania tecnológica. Entre a existência do recurso e sua conversão em poder geopolítico encontram-se capacidades ambientais, industriais, científicas, digitais, institucionais e cibernéticas que precisaram ser identificadas e organizadas analiticamente.

A investigação não pretende testar relações causais por meio de modelos econométricos nem atribuir pesos estatísticos definitivos às dimensões propostas. Seu propósito é desenvolver uma estrutura explicativa fundamentada na literatura e em documentos institucionais, resultando na proposição do Modelo de Conversão Geoambiental do Poder Tecnológico (MCGPT) e das dimensões preliminares do Índice Geoambiental de Potencial Estratégico para Inteligência Artificial (IGPE-IA).

3.2. Pesquisa documental

A pesquisa documental foi empregada para examinar relatórios, regulamentos, estratégias governamentais, bases estatísticas, planos industriais e documentos de organizações nacionais e internacionais relacionados às terras raras, aos minerais críticos, à Inteligência Artificial, à segurança econômica e à soberania tecnológica.

Bowen (2009) define a análise documental como um procedimento sistemático de exame e interpretação de documentos impressos ou eletrônicos, mediante o qual os dados são organizados e analisados para produzir compreensão e conhecimento empírico. Morgan (2022) acrescenta que a investigação documental qualitativa deve considerar a autenticidade, a finalidade, o contexto de produção e as limitações dos documentos selecionados, evitando tratá-los como fontes neutras ou independentes dos interesses das instituições que os produziram.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

O *corpus* documental compreendeu, prioritariamente:

a) relatórios da Agência Internacional de Energia, do Serviço Geológico dos Estados Unidos, da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico e de organismos multilaterais;

b) documentos da União Europeia, dos Estados Unidos, da China e de outros países com políticas específicas para minerais críticos;

c) estratégias nacionais de Inteligência Artificial, segurança cibernética, mineração e política industrial;

d) bases públicas sobre reservas, produção, processamento, comércio e dependência de importações;

e) regulamentos relativos à sustentabilidade, rastreabilidade e segurança das cadeias de matérias-primas críticas.

Foram incluídos documentos cuja autoria institucional, data de publicação, finalidade e conteúdo puderam ser identificados. Foram excluídos materiais promocionais sem indicação metodológica, publicações sem autoria verificável, conteúdos duplicados e documentos sem relação direta com o problema de investigação.

A análise documental não se limitou à reprodução dos números e das posições oficiais. Os documentos foram interpretados criticamente, considerando o contexto geopolítico em que foram elaborados, os interesses dos seus produtores, as prioridades declaradas e as possíveis divergências entre objetivos políticos, capacidade industrial e disponibilidade efetiva de recursos.

3.3. Revisão bibliográfica

A pesquisa documental foi complementada por revisão bibliográfica de caráter integrativo e orientada à construção teórica. Snyder (2019) sustenta que a revisão da literatura pode constituir uma metodologia de pesquisa quando realizada de maneira transparente e sistematicamente organizada, permitindo sintetizar conhecimentos fragmentados, identificar lacunas e desenvolver modelos conceituais.

A busca bibliográfica abrangeu artigos científicos, revisões, livros e capítulos especializados publicados, preferencialmente, entre 2000 e julho de 2026. Obras anteriores foram incorporadas quando apresentaram relevância histórica ou teórica indispensável, especialmente nos campos da geopolítica dos recursos naturais, da economia política internacional e das transições tecnológicas.

A recuperação bibliográfica foi realizada até 24 de julho de 2026 por meio do Consensus, mecanismo de busca sobre literatura científica indexada, com verificação complementar de

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

autoria, ano, periódico e DOI nas páginas dos periódicos e editoras. Para os dados institucionais, foram consultadas fontes primárias da IEA, do USGS e da União Europeia. As buscas foram conduzidas em inglês, português e espanhol, utilizando combinações dos seguintes termos:

"rare earth elements", "critical minerals", "artificial intelligence", "geopolitics", "technological sovereignty", "cybersecurity", "supply chain", "mineral security", "environmental sustainability", "critical raw materials", "terras raras", "minerais críticos", "soberania tecnológica" e "segurança cibernética".

A auditoria retrospectiva da matriz bibliográfica registrou 51 itens potencialmente elegíveis. Na etapa de identificação, três registros duplicados foram eliminados; os 48 registros únicos remanescentes foram submetidos à leitura integral e à verificação de elegibilidade. Não houve exclusões adicionais após essa etapa, de modo que o corpus final foi constituído por 48 fontes científicas e institucionais. Esse fluxo numérico corresponde aos itens efetivamente registrados na matriz de trabalho e não deve ser interpretado como estimativa do universo de resultados retornados pelos mecanismos de busca.

A qualidade e a pertinência das fontes foram avaliadas por quatro critérios: (a) autoridade e rastreabilidade da autoria; (b) revisão por pares ou caráter oficial da instituição emissora; (c) transparência metodológica e verificabilidade dos dados; e (d) relação direta com pelo menos uma dimensão do MCGPT ou do IGPE-IA. Obras clássicas anteriores ao recorte temporal foram mantidas somente quando indispensáveis à fundamentação histórica ou teórica. Fontes promocionais, sem autoria verificável, sem método identificável ou apenas tangenciais ao problema foram consideradas inelegíveis.

Em todo o artigo, a denominação "índice" designa uma proposição conceitual: o IGPE-IA ainda não possui validação empírica, pesos, escala, escore composto ou capacidade de produzir *rankings.*

Foram incluídos trabalhos com relação direta com pelo menos uma das dimensões do estudo: disponibilidade mineral; extração e sustentabilidade; processamento e refino; indústria de materiais avançados; infraestrutura de IA; segurança cibernética; soberania tecnológica; ou influência geopolítica. Foram priorizados estudos revisados por pares, documentos metodologicamente transparentes e publicações de reconhecida relevância científica ou institucional.

A revisão não foi conduzida como meta-análise, pois o corpus reuniu evidências heterogêneas, provenientes de estudos ambientais, geológicos, econômicos, tecnológicos e geopolíticos. Sua finalidade foi construir uma síntese interdisciplinar capaz de identificar

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

relações, convergências, divergências e lacunas entre campos que frequentemente analisam o fenômeno de forma fragmentada.

3.4. Análise temática

Os materiais selecionados foram submetidos à análise temática, compreendida como método de identificação, organização e interpretação de padrões de significado presentes em dados qualitativos. Clarke e Braun (2017) explicam que a análise temática oferece flexibilidade para trabalhar com diferentes perspectivas teóricas, desde que o investigador explicite os critérios de codificação e reconheça seu papel ativo na construção dos temas.

A análise foi desenvolvida em cinco etapas:

1. leitura integral e familiarização com os artigos e documentos;
2. identificação e codificação das unidades de significado relacionadas ao problema da investigação;
3. agrupamento dos códigos em categorias temáticas preliminares;
4. revisão das categorias, com comparação entre fontes científicas e institucionais;
5. definição dos temas centrais e das relações existentes entre eles.

As categorias iniciais foram orientadas pelo referencial teórico, mas permaneceram abertas à incorporação de dimensões emergentes. Entre as categorias preliminares encontravam-se: disponibilidade geoambiental; sustentabilidade da extração; capacidade de processamento; agregação industrial de valor; infraestrutura tecnológica; Inteligência Artificial; segurança cibernética; soberania tecnológica; dependência externa; e poder geopolítico.

A codificação não teve como finalidade apenas contabilizar a frequência dos termos. Determinada categoria pôde ser considerada teoricamente relevante mesmo quando apareceu em número reduzido de fontes, desde que contribuísse para explicar os mecanismos de transformação dos recursos geoambientais em capacidade estratégica.

3.5. Síntese interpretativa

Após a análise temática, foi realizada uma síntese interpretativa destinada a articular os resultados documentais e bibliográficos. Dixon-Woods (2011) observa que a síntese qualitativa baseada em estruturas conceituais pode utilizar um modelo inicial como referência de codificação, modificando-o à medida que novos fatores e relações são identificados no corpus analisado.

Neste estudo, a síntese ocorreu mediante comparação entre as categorias, identificação de relações causais ou condicionais e organização das etapas que conectam recursos naturais,

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

capacidades produtivas e influência geopolítica. O procedimento não buscou apenas resumir o que cada autor afirmou, mas produzir uma interpretação integradora que explicasse por que a existência de reservas minerais gera resultados estratégicos diferentes entre os países.

A síntese interpretativa fundamentou a construção do MCGPT. Cada componente do modelo apresenta correspondência com evidências identificadas na literatura ou nos documentos analisados. O mesmo procedimento orientou a formulação das dimensões preliminares do IGPE-IA, sem que isso implique, nesta etapa, validação estatística ou atribuição definitiva de pesos.

Para aumentar a confiabilidade do estudo, foram adotados os seguintes procedimentos: registro das estratégias de busca; explicitação dos critérios de inclusão e exclusão; comparação entre diferentes tipos de fontes; identificação de informações contraditórias; rastreabilidade entre categorias e evidências; e distinção entre resultados extraídos das fontes e interpretações propostas pelo autor.

Como a investigação utilizou exclusivamente documentos públicos e publicações científicas, não houve interação com participantes humanos nem coleta de dados pessoais. Ainda assim, foram observados os princípios de integridade científica, fidelidade às fontes, transparência metodológica e respeito à autoria.

3.6. Declaração de uso de Inteligência Artificial

Ferramentas de Inteligência Artificial generativa foram utilizadas exclusivamente como apoio linguístico, de tradução e de revisão formal. Os autores verificaram integralmente o conteúdo, as citações e as referências, assumem responsabilidade pela versão final e não delegaram à IA decisões de autoria, interpretação científica ou avaliação das evidências. A declaração observa princípios internacionais de transparência, supervisão humana, responsabilização e integridade editorial (MIAO; HOLMES, 2023; ZIELINSKI *et al*., 2023; INTERNATIONAL COMMITTEE OF MEDICAL JOURNAL EDITORS, 2026).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Síntese interpretativa das evidências

A análise temática produziu um resultado central: a posição estratégica de um país na economia das terras raras não pode ser inferida a partir de uma variável isolada, como reserva, produção mineral ou número de patentes. As evidências convergem para uma arquitetura de capacidades complementares, na qual o valor geopolítico emerge da articulação entre base geoambiental, extração sustentável, processamento, manufatura avançada, ciência,

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

infraestrutura de Inteligência Artificial, governança e resiliência. A disponibilidade mineral constitui condição de possibilidade; a conversão tecnoindustrial determina quanto desse potencial se transforma em autonomia e poder.

Os dados mais recentes tornam visível essa diferença entre dotação e conversão. O USGS estimou a produção mundial de terras raras em 390 mil toneladas de óxido de terras raras (REO) em 2025, das quais 270 mil toneladas foram produzidas pela China, aproximadamente 69,2% do total. O mesmo levantamento registrou 44 milhões de toneladas de reservas chinesas e 21 milhões de toneladas no Brasil; contudo, a produção brasileira foi estimada em apenas 2 mil toneladas. O contraste não demonstra, por si só, causalidade entre industrialização e poder, mas constitui evidência descritiva de que uma base geológica expressiva pode coexistir com baixa conversão produtiva (USGS, 2026).

A assimetria aumenta à medida que a cadeia avança. Para os quatro elementos de terras raras utilizados em ímãs (neodímio, praseodímio, disprósio e térbio), a IEA calculou que a China respondeu, em 2024, por 60% da mineração, 91% do refino e 94% da produção de ímãs permanentes sinterizados. A progressão dos percentuais ao longo da cadeia demonstra que o principal centro de gravidade estratégico se encontra nas etapas de separação, metalização, fabricação de ligas e ímãs, e não apenas na extração (IEA, 2026). Esse padrão é coerente com Zhang *et al*. (2022), cuja análise de redes e regressão em painel mostrou que a competição internacional varia conforme o estágio da cadeia e que a posição nas atividades *downstream* é decisiva para a elevação do *status* nas cadeias globais de valor.

A demanda reforça o caráter estrutural do problema. Segundo a IEA (2026), a demanda pelos quatro elementos magnéticos duplicou desde 2015 e, sob as políticas atuais, deverá crescer cerca de um terço até 2030. Ímãs de NdFeB sustentam motores, atuadores, robótica, sistemas energéticos e equipamentos de centros de dados de IA; por isso, a dependência não decorre de o algoritmo conter terras raras, mas de a infraestrutura eletromecânica e energética que o suporta depender de materiais funcionais. Essa interpretação é consistente com Stacciarini e Gonçalves (2025) e Valdivia (2024), que tratam a IA como cadeia material, energética, territorial e laboral, e não como artefato exclusivamente imaterial.

A concentração também possui efeitos econômicos mensuráveis. Fan, Omura e Roca (2023) encontraram relações estatisticamente significativas entre risco geopolítico, preços e importações japonesas de terras raras. Em cenário de aplicação integral dos controles de exportação anunciados em 2025, a IEA (2026) estimou que US$ 6,5 trilhões de produção *downstream* anual fora da China ficariam expostos, com perdas diretas potenciais superiores a US$ 1,5 trilhão tanto nos Estados Unidos como na Europa. Trata-se de cenário de estresse, não

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

de previsão, mas sua magnitude evidencia a diferença entre o valor relativamente limitado do mercado mineral e o valor econômico dos sistemas que dele dependem.

A diversificação anunciada permanece desequilibrada. Para 2035, as capacidades existentes e anunciadas fora do produtor dominante cobririam aproximadamente 50% da demanda externa à China na mineração, 25% no refino e menos de 20% nos ímãs. Cobertura integral exigiria, além dos projetos já anunciados, multiplicar por cerca de dois a capacidade de mineração, por quatro a de refino e por seis a de ímãs, com necessidade estimada de US$ 60 bilhões de investimento na década (IEA, 2026). Portanto, abrir minas sem instalar separação, metalização e manufatura pode diversificar a origem do minério sem eliminar a dependência tecnológica.

A sustentabilidade emergiu como condição interna da resiliência. Han *et al*. (2025) sistematizam riscos de acidificação do solo, contaminação hídrica, metais pesados e materiais radioativos associados a determinados depósitos e processos. Lee e Wen (2018) estimaram custos ambientais líquidos da produção chinesa e demonstraram que fiscalização, produção legal e tecnologias mais limpas alteram significativamente o balanço ambiental e econômico. A IEA (2026) acrescenta que a reciclagem pode reduzir a necessidade de oferta primária de terras raras para ímãs em até 35% em 2050. Assim, licenciamento, rastreabilidade, gestão de rejeitos e circularidade não são apenas requisitos normativos: influenciam continuidade operacional, financiamento, aceitação social e capacidade de resposta a choques.

A Tabela 7 organiza as principais evidências documentais que deram origem ao modelo e ao *framework* propostos. A coluna final não reproduz literalmente as fontes; explicita a inferência teórica realizada pelo autor a partir da triangulação. Essa separação é necessária porque os dados sustentam a plausibilidade dos mecanismos, mas não validam estatisticamente o MCGPT nem o IGPE-IA.

Tabela 7. Matriz de rastreabilidade entre evidências e inferências analíticas

Evidência verificada	Resultado documental	Inferência para o modelo
USGS (2026)	Produção mundial de 390 mil t REO em 2025; China: 270 mil t. Reservas: China 44 milhões t; Brasil 21 milhões t, com produção brasileira de 2 mil t.	Reservas expressivas não asseguram capacidade de conversão produtiva.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Evidência verificada	Resultado documental	Inferência para o modelo
IEA (2026)	China: 60% da mineração, 91% do refino e 94% dos ímãs sinterizados para terras raras magnéticas em 2024.	O controle aumenta nas etapas *downstream*; processamento e manufatura são gargalos estratégicos.
IEA (2026)	Demanda dos elementos magnéticos duplicou desde 2015 e deverá crescer cerca de um terço até 2030.	A expansão tecnológica aumenta o valor de cadeias materiais associadas à IA, automação e energia.
Zhang *et al*. (2022)	A competição e a posição na cadeia global variam por estágio, com forte intensidade *downstream*.	Agregação de valor e complexidade industrial explicam melhor a vantagem do que a exportação bruta.
Fan, Omura e Roca (2023)	Risco geopolítico apresenta relações significativas com preços e importações japonesas de terras raras.	Dependência concentrada pode converter interdependência econômica em vulnerabilidade e influência.
Han *et al*. (2025); Lee e Wen (2018)	Extração e processamento produzem custos ambientais relevantes; práticas e fiscalização alteram esses custos.	Sustentabilidade é mecanismo de continuidade e resiliência, não variável externa ao poder.
Stacciarini e Gonçalves (2025); Valdivia (2024)	IA depende de centros de dados, energia, equipamentos, minerais, água e cadeias industriais.	Soberania em IA possui dimensão material e territorial além de software, modelos e dados.
Kumar e Mallipeddi (2022)	Digitalização e integração das cadeias ampliam riscos cibernéticos e exigem gestão interorganizacional.	Capacidade tecnológica só se converte em soberania quando sistemas e fornecedores são protegidos e recuperáveis.

Fonte: elaboração do autor com base nas fontes indicadas. Os valores do USGS referem-se a equivalentes de óxido de terras raras (REO); as percentuais da IEA relativas à cadeia mine-to-magnet abrangem Nd, Pr, Dy e Tb.

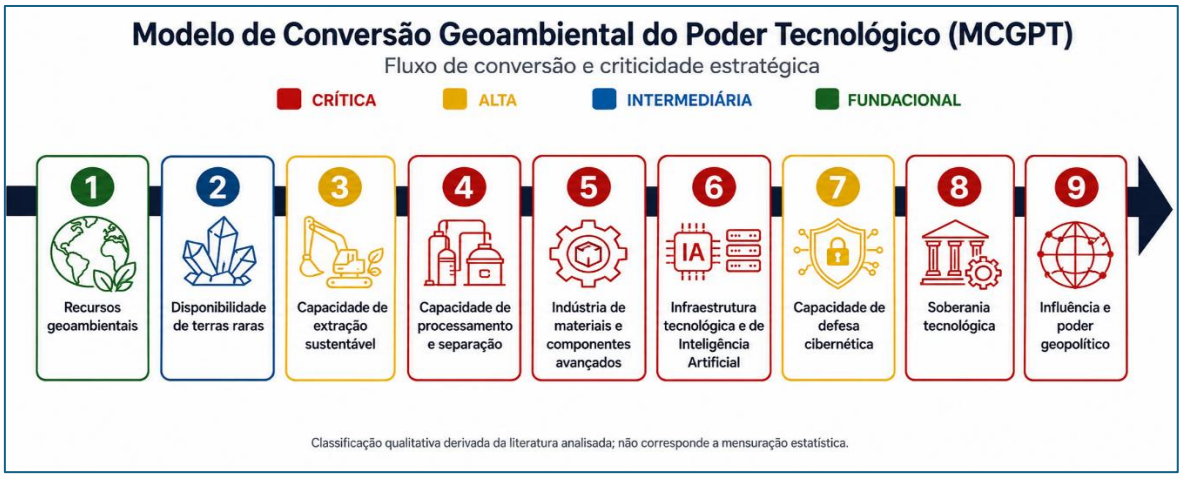
4.2. Modelo de Conversão Geoambiental do Poder Tecnológico (MCGPT)

O Modelo de Conversão Geoambiental do Poder Tecnológico (MCGPT) é uma estrutura teórico-explicativa destinada a representar como um recurso natural potencialmente estratégico pode ser transformado em capacidade tecnológica e influência geopolítica. O modelo responde à pergunta “por qual mecanismo a dotação geoambiental pode tornar-se poder?”, evitando o determinismo mineral. Sua unidade de análise pode ser um país, uma região ou uma aliança

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

produtiva, desde que as fronteiras analíticas sejam explicitadas. Dessa forma, o modelo é representado graficamente na Figura 3.

Figura 3. Modelo de Conversão Geoambiental do Poder Tecnológico (MCGPT)



Fonte: Elaboração própria (2026), com base na síntese da literatura analisada.

A classificação cromática da Figura 3 fundamenta-se inicialmente na teoria da criticidade mineral, segundo a qual a importância estratégica de um recurso não decorre apenas de sua existência geológica, mas da combinação entre risco de abastecimento, impactos ambientais e vulnerabilidade diante de restrições de oferta (Nassar, Du e Graedel, 2015). Por essa razão, os recursos geoambientais — etapa 1 — receberam a cor verde, pois representam uma condição fundacional, porém ainda potencial: possuir reservas não significa controlar sua exploração nem obter poder político ou econômico. A disponibilidade de terras raras — etapa 2 — foi classificada em azul, porque a presença de depósitos economicamente acessíveis aumenta o potencial estratégico, mas permanece insuficiente sem capacidades produtivas complementares. Haque *et al*. (2014) demonstram que, embora existam numerosos depósitos identificados, apenas uma pequena parcela se transforma efetivamente em minas operacionais. A capacidade de extração sustentável — etapa 3 — recebeu a cor amarela, pois consumo de água e energia, geração de rejeitos, radioatividade, licenciamento e aceitação social condicionam a continuidade da produção. Trata-se, portanto, de uma capacidade de elevada relevância, mas ainda situada no segmento primário da cadeia e anterior às etapas de maior agregação de valor.

A capacidade de processamento e separação — etapa 4, a indústria de materiais e componentes avançados — etapa 5 e a infraestrutura tecnológica e de Inteligência Artificial — etapa 6 receberam a cor vermelha por constituírem os principais gargalos de conversão do

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

recurso mineral em capacidade tecnológica. Essa interpretação encontra respaldo na teoria das cadeias globais de valor, de Gereffi, Humphrey e Sturgeon (2005), segundo a qual a complexidade das transações, a possibilidade de codificação do conhecimento e as capacidades dos fornecedores produzem diferentes estruturas de coordenação e assimetrias de poder. No caso das terras raras, separar elementos quimicamente semelhantes, produzir materiais funcionais e fabricar ímãs, sensores, semicondutores e componentes requer conhecimento tácito, escala industrial e infraestrutura especializada. Kalantzakos (2020) demonstra que a transição energético-digital e a Quarta Revolução Industrial transformaram o acesso contínuo aos minerais críticos em objeto de competição geopolítica. Liu *et al*. (2025) acrescentam evidências de que os segmentos intermediários e finais da cadeia apresentam forte sensibilidade às relações de cooperação e conflito entre os países. Assim, as etapas 4, 5 e 6 são críticas porque determinam quem controla a agregação de valor e consegue converter matéria-prima em computação, automação, infraestrutura digital e capacidade de defesa.

A capacidade de defesa cibernética — etapa 7 — foi classificada em amarelo, pois possui elevada importância para proteger, auditar e recuperar infraestruturas críticas, embora exerça função predominantemente protetiva: isoladamente, não substitui as capacidades industrial, científica e computacional anteriores. Calderaro e Blumfelde (2022) demonstram que a soberania meramente regulatória é insuficiente quando o país não dispõe de indústria avançada de IA e de uma estratégia coerente de defesa. A soberania tecnológica — etapa 8 — recebeu a cor vermelha porque representa a capacidade de controlar tecnologias, infraestruturas, dados e decisões estratégicas, em conformidade com a concepção de soberania digital desenvolvida por Floridi (2020). Finalmente, a influência e o poder geopolítico — etapa 9 — também foram representados em vermelho, por constituírem o resultado culminante do modelo: a capacidade de condicionar mercados, negociar a partir de posições menos dependentes e exercer influência sobre cadeias internacionais. A cor da etapa 9 indica sua centralidade como resultado estratégico, e não uma variável independente. Desse modo, a escala cromática é uma classificação teórico-qualitativa derivada da literatura, não correspondendo a pesos ou medições estatisticamente validados.

A noção de conversão é central. Cada passagem modifica simultaneamente a forma material, o valor econômico, a intensidade de conhecimento e a exposição ao risco. Minério concentrado não é equivalente a óxido separado; óxido separado não é equivalente a metal ou liga; e um ímã não é equivalente a um sistema tecnológico capaz de operar de forma segura. À medida que o recurso avança, a vantagem depende menos do volume físico bruto e mais de

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

conhecimento tácito, equipamento especializado, qualidade, propriedade intelectual, escala, energia, coordenação e acesso a mercados.

O MCGPT possui três blocos. O primeiro é a base geoambiental, composta pela existência e pelo conhecimento dos recursos, pela sua distribuição por elemento, pelas características mineralógicas e pelas condições territoriais de acesso. O segundo é a conversão tecnoindustrial, que abrange extração sustentável, beneficiamento, separação, refino, metalização, ligas, ímãs, componentes e integração na infraestrutura da IA. O terceiro reúne os resultados estratégicos: resiliência, soberania tecnológica e capacidade de influência. Ciência, energia, logística, financiamento, instituições, governança socioambiental, segurança cibernética e proteção de dados atravessam toda a cadeia.

Figura 4. Arquitetura sintética do MCGPT

BASE GEOAMBIENTAL	CONVERSÃO TECNOINDUSTRIAL	RESULTADOS ESTRATÉGICOS
Reservas e recursos por elemento Qualidade do depósito Acesso material e logístico	**Extração sustentável → separação e refino → metais, ligas e ímãs → equipamentos e infraestrutura de IA**	**Resiliência estratégica Soberania tecnológica Influência geopolítica**
CAPACIDADES TRANSVERSAIS: ciência e inovação | energia e logística | financiamento | governança ambiental e social | segurança cibernética, governança da IA e proteção de dados		
RETROALIMENTAÇÃO E CIRCULARIDADE: aprendizagem, receitas, reciclagem, substituição, política industrial e alianças reconfiguram as etapas anteriores; qualquer gargalo pode limitar a conversão.		

Fonte: elaboração do autor (2026), a partir da síntese documental e bibliográfica.

4.2.1 Componentes e mecanismos de conversão

O primeiro componente é o potencial geoambiental. Ele inclui reservas e recursos, mas não se limita ao volume agregado. Nassar, Du e Graedel (2015) demonstram que risco de oferta, implicações ambientais e vulnerabilidade à restrição variam entre os elementos. Kosajan, Wen e Wang (2025) reforçam que Pr, Nd e Dy apresentam perfis de criticidade distintos e que decisões agregadas podem produzir diagnósticos incorretos. Por isso, o MCGPT exige desagregação mínima dos elementos relevantes para a aplicação analisada e informação sobre teor, mineralogia, coprodução e maturidade do conhecimento geológico.

O segundo componente é a extração sustentável e socialmente legítima. O recurso só ingressa na cadeia quando há viabilidade técnica, licenciamento, água, energia, infraestrutura,

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

gestão de rejeitos e aceitação social. A sustentabilidade atua como variável de capacidade: impactos não controlados aumentam passivos, atrasos, oposição, custos de financiamento e probabilidade de interrupção. O modelo, portanto, rejeita a equivalência entre capacidade nominal e capacidade resiliente.

O terceiro componente é o processamento, entendido como beneficiamento, separação química, purificação e refino. A separação é tecnologicamente intensiva porque elementos de comportamento químico semelhante precisam alcançar especificações elevadas. A concentração de 91% do refino de terras raras magnéticas na China em 2024 mostra que esse estágio é um nó de poder. A mera existência de concentrado não garante acesso a óxidos individualizados nem reduz dependência de equipamento, reagentes ou conhecimento externo (IEA, 2026).

O quarto componente é a agregação de valor industrial. Ele inclui metalização, produção de pós e ligas, fabricação de ímãs, sensores, motores e componentes. O achado de Zhang *et al*. (2022) sobre competição *downstream* sustenta a proposição de que a densidade manufatureira altera a posição de um país na cadeia. Além do valor monetário, esse estágio gera aprendizagem, padrões técnicos, relações de fornecimento e capacidade de reparação, fatores dificilmente substituíveis no curto prazo.

O quinto componente é a capacidade científico-tecnológica. Laboratórios, pessoal qualificado, patentes, plantas-piloto, metrologia, pesquisa em separação, substituição e reciclagem permitem reduzir custos, adaptar minérios e responder a escassez. Essa capacidade não é um estágio isolado, mas um multiplicador que atua sobre toda a cadeia. A evidência de Zhao, Cheng e Xu (2026), segundo a qual a capacidade tecnológica dos fornecedores alternativos pesa mais do que a proximidade geopolítica na reconfiguração da cadeia, reforça essa função.

O sexto componente é a infraestrutura material da IA. Abrange centros de dados, redes, armazenamento, energia, refrigeração, robótica, sensores, sistemas de potência e manutenção. A IEA (2026) vincula ímãs de alto desempenho a centros de dados, automação e tecnologias digitais. O MCGPT não afirma que todo sistema de IA demande diretamente grande massa de terras raras; afirma que a escala da IA é sustentada por ecossistemas eletromecânicos e energéticos cujas dependências materiais devem ser rastreadas.

O sétimo componente é a governança e a segurança. Inclui política mineral e industrial, coordenação regulatória, avaliação de investimento, rastreabilidade, contratos, reservas estratégicas, governança responsável da IA, segurança cibernética e proteção de dados. A inclusão decorre de uma condição lógica: infraestrutura que não pode ser auditada, protegida ou

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

recuperada não produz autonomia confiável. Kumar e Mallipeddi (2022) mostram que a integração digital das operações cria riscos cibernéticos que ultrapassam fronteiras organizacionais, tornando fornecedores e terceiros parte da superfície de risco.

O oitavo componente é o resultado geopolítico. Influência não significa autarquia, mas capacidade de manter opções, reduzir coerção, participar de padrões, negociar alianças e sustentar setores críticos durante choques. O MCGPT distingue poder potencial de poder exercido: capacidades instaladas aumentam opções estratégicas, mas sua conversão em influência depende de estratégia estatal, coordenação entre atores e contexto internacional.

Tabela 8. Componentes do MCGPT e hipóteses de mecanismo

Componente	Função no processo	Falha ou gargalo típico	Resultado esperado
1. Potencial geoambiental	Define a base material e sua qualidade por elemento.	Dados geológicos frágeis; recurso sem viabilidade.	Opção material informada.
2. Extração sustentável	Transforma recurso em oferta licenciada e contínua.	Passivo ambiental; conflito social; falta de água/energia.	Produção resiliente.
3. Separação e refino	Produz óxidos individualizados e de elevada pureza.	Dependência tecnológica e de equipamento.	Segurança de materiais processados.
4. Indústria *downstream*	Converte óxidos em metais, ligas, ímãs e componentes.	Exportação primária; ausência de escala e compradores.	Valor agregado e aprendizagem.
5. Ciência e inovação	Melhora processos, substituição, reciclagem e adaptação.	Escassez de competências e plantas-piloto.	Capacidade dinâmica de resposta.
6. Infraestrutura de IA	Integra componentes, energia, computação e automação.	Dependência externa de sistemas e manutenção.	Capacidade tecnológica operacional.
7. Governança e segurança	Coordena riscos, dados, fornecedores e continuidade.	Fragmentação institucional; vulnerabilidades cibernéticas.	Autonomia confiável e legítima.
8. Resultado geopolítico	Converte autonomia em opções, alianças e influência.	Ausência de estratégia ou coerência externa.	Poder de negociação e menor exposição.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Fonte: elaboração do autor (2026). As relações são proposições teóricas fundamentadas, ainda não estimativas causais.

4.2.2. Propriedades analíticas do MCGPT

O modelo possui cinco propriedades. A primeira é a não linearidade: choques, inovação, reciclagem e políticas podem reconfigurar a cadeia, e o fluxo não ocorre uma única vez. A segunda é a complementaridade: recursos, indústria e conhecimento produzem resultados mais elevados quando combinados. A terceira é a lógica do elo limitante: grande dotação *upstream* não compensa automaticamente ausência de refino, ímãs ou ciber-resiliência. A quarta é a cumulatividade: escala, aprendizagem e redes de fornecedores podem reforçar vantagens existentes. A quinta é a multiescalaridade: nenhuma economia precisa internalizar todas as etapas, desde que alianças e contratos produzam acesso confiável, diversificado e governável.

Para fins formais, o resultado estratégico potencial pode ser representado apenas de modo heurístico como P* = f(GE, ES, PR, VA, CT, II, GS, RG), em que GE corresponde à base geoambiental; ES, à extração sustentável; PR, ao processamento e refino; VA, à agregação de valor; CT, à capacidade científico-tecnológica; II, à infraestrutura de IA; GS, à governança e segurança; e RG, à resiliência geopolítica. A expressão não constitui equação estimada, não fixa forma funcional e não autoriza cálculo. Sua função é tornar explícitas as dimensões e permitir que pesquisas futuras testem complementaridade, limiares, mediação e efeitos de gargalo.

4.3. Discussão do MCGPT à luz da literatura

O MCGPT aproxima três tradições que normalmente operam separadas. A literatura de criticidade modela risco de oferta, vulnerabilidade e implicações ambientais; a literatura de cadeias globais de valor examina agregação, concorrência e upgrading; e a literatura de soberania tecnológica discute autonomia decisória, infraestrutura e segurança. A contribuição do modelo consiste em organizar essas tradições como um mecanismo de conversão, e não apenas como lista de fatores.

Em relação aos modelos de criticidade, o MCGPT mantém a multidimensionalidade de Nassar, Du e Graedel (2015), mas desloca o foco do material para a capacidade sociotécnica que o transforma. O risco de oferta continua necessário, porém insuficiente para explicar por que países com disponibilidade semelhante alcançam posições distintas. Gemechu *et al.* (2016) demonstram que exposição comercial e concentração geopolítica podem ser incorporadas a indicadores de risco; o MCGPT acrescenta a pergunta sobre quais capacidades permitem reduzir essa exposição.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Em relação às cadeias de valor, o modelo converge com Zhang *et al*. (2022) ao reconhecer a heterogeneidade dos estágios. O seu avanço teórico é tratar a passagem *upstream-downstream* como conversão simultaneamente material e política. Processamento e manufatura não apenas capturam renda: geram conhecimento tácito, padrões, capacidade de manutenção e poder de interrupção. A concentração de 94% dos ímãs sinterizados num único país fornece evidência documental compatível com essa proposição (IEA, 2026).

Em relação à sustentabilidade, o MCGPT diverge de abordagens que a representam apenas como custo. Os resultados de Lee e Wen (2018), Han *et al*. (2025) e da IEA (2026) justificam tratá-la como atributo da capacidade produtiva. Cadeias que externalizam contaminação podem parecer competitivas no curto prazo, mas acumulam passivos e instabilidade. Por outro lado, padrões mais exigentes elevam custos iniciais, o que requer instrumentos de política e financiamento para evitar que a diversificação responsável seja inviabilizada por competição baseada em externalização.

Em relação à IA, o MCGPT adota uma interpretação infraestrutural. Stacciarini e Gonçalves (2025) e Valdivia (2024) demonstram que centros de dados e cadeias eletrônicas dependem de minerais, água, energia e território. O modelo especifica o lugar das terras raras nessa materialidade: sobretudo em ímãs, motores, atuadores, sensores e sistemas auxiliares. Essa precisão evita dois extremos — apresentar a IA como imaterial ou atribuir às terras raras um papel exclusivo que pertence a um conjunto mais amplo de minerais críticos.

Finalmente, o MCGPT interpreta soberania como resiliência governada, não como autossuficiência. A reestruturação analisada por Zhao, Cheng e Xu (2026) mostra que reduzir dependência pode aumentar custos e que fornecedores alternativos precisam de capacidade tecnológica. Diversificação, portanto, deve ser avaliada pela existência de rotas substitutas, interoperabilidade, qualidade e tempo de recuperação, e não apenas pelo número de países fornecedores.

4.4. Proposição do IGPE-IA como *framework* analítico

O Índice Geoambiental de Potencial Estratégico para Inteligência Artificial (IGPE-IA), cuja representação gráfica é apresentada na Figura 5, é proposto como *framework* analítico para avaliar, em pesquisas futuras, o potencial de um país, região ou aliança para converter ativos geoambientais em capacidade estratégica relacionada à IA. Neste artigo, o termo “índice” designa uma arquitetura conceitual de dimensões e indicadores candidatos. Não há pontuação, normalização, ponderação, agregação nem classificação de países.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 5. Arquitetura conceitual do Índice Geoambiental de Potencial Estratégico para Inteligência Artificial (IGPE-IA)



Fonte: elaboração do autor (2026).

A leitura da Figura 5 deve ser realizada da esquerda para a direita, acompanhando a passagem da base geoambiental para a capacidade de conversão tecnoindustrial e, finalmente, para a soberania e a resiliência. O IGPE-IA traduz o mecanismo explicativo do MCGPT em uma arquitetura diagnóstica constituída por três pilares e oito dimensões. Sua fundamentação combina a teoria multidimensional da criticidade mineral, que relaciona risco de oferta, implicações ambientais e vulnerabilidade às restrições (Nassar; Du; Graedel, 2015), a teoria das cadeias globais de valor, que explica como capacidades produtivas e assimetrias de coordenação determinam a apropriação de valor (Gereffi; Humphrey; Sturgeon, 2005), e a abordagem da soberania digital, centrada no controle legítimo de tecnologias, dados e infraestruturas (Floridi, 2020). Essas abordagens, entretanto, permanecem fragmentadas: nenhuma delas, isoladamente, permite avaliar como ativos geoambientais podem ser convertidos em infraestrutura de IA, segurança cibernética e influência geopolítica. No corpus documental analisado, essa é a lacuna integradora específica preenchida pelo IGPE-IA.

O Pilar A — Base geoambiental responsável reúne duas dimensões. A dimensão A1 — Potencial geoambiental e segurança material considera reservas e recursos desagregados por elemento, produção efetiva, teor, mineralogia, dependência importadora e concentração de fornecedores. Essa estrutura decorre da teoria da criticidade mineral, segundo a qual abundância geológica não equivale automaticamente à segurança de abastecimento, pois a criticidade depende também da substituibilidade, da concentração produtiva e da exposição geopolítica

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

(Nassar; Du; Graedel, 2015; Gemechu *et al*., 2016). A dimensão A2 — Sustentabilidade, licença social e circularidade acrescenta consumo de água e energia, emissões, rejeitos, materiais radioativos de ocorrência natural, rastreabilidade, conflitos sociais, reciclagem e recuperação. Haque *et al*. (2014) e Edahbi, Plante e Benzaazoua (2019) demonstram que os impactos ambientais podem comprometer a continuidade dos empreendimentos, enquanto Wang et *al*. (2024) evidenciam o potencial da economia circular para reduzir desequilíbrios de oferta. O avanço original do IGPE-IA consiste em reunir dotação mineral, exposição externa, sustentabilidade ambiental, legitimidade social e circularidade em uma única base analítica, evitando que grandes reservas sejam interpretadas, isoladamente, como vantagem estratégica.

O Pilar B — Capacidade de conversão tecnoindustrial representa o núcleo de agregação de valor. A dimensão B1 — Separação, refino e metalização observa capacidade por elemento e grau de pureza, rendimento, plantas operacionais e dependência de reagentes e equipamentos, reconhecendo que o processamento constitui um dos principais pontos de estrangulamento da cadeia (IEA, 2025, 2026; Demir *et al*., 2026). A dimensão B2 — Agregação de valor e manufatura avançada examina ligas, ímãs, motores, sensores, complexidade das exportações e contratos industriais, em consonância com a teoria das cadeias globais de valor de Gereffi, Humphrey e Sturgeon (2005). A dimensão B3 — Ciência, inovação e competências incorpora investigação e desenvolvimento, patentes, pessoal especializado, plantas-piloto, metrologia e cooperação universidade-indústria, pois a capacidade de aprender, adaptar e substituir tecnologias condiciona o domínio das etapas de maior complexidade. A dimensão B4 — Infraestrutura física, energética e digital da IA contempla computação, centros de dados, energia, redes, refrigeração, semicondutores, logística e manutenção, reconhecendo a materialidade da IA destacada por Calderaro e Blumfelde (2022). A lacuna preenchida pelo IGPE-IA está em analisar conjuntamente processamento mineral, manufatura, ciência e infraestrutura física da IA, dimensões normalmente estudadas em campos separados.

O Pilar C — Soberania e resiliência verifica se as capacidades anteriores podem ser governadas, protegidas e mantidas diante de choques. A dimensão C1 — Governança estratégica, cibersegurança e dados inclui coordenação institucional, gestão de terceiros, normas ISO e NIST, resposta a incidentes, governança da IA, proteção de dados e atuação efetiva do encarregado/DPO. Essa dimensão é sustentada pela concepção de soberania digital de Floridi (2020), pelos estudos de Calderaro e Blumfelde (2022) sobre a insuficiência de uma soberania exclusivamente regulatória, pelas aplicações de IA em auditorias de conformidade discutidas por Alves e Conceição (2025) e pela função de governança do encarregado apresentada por Lima e Alves (2021). A dimensão C2 — Resiliência geopolítica e opções estratégicas examina

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

concentração de fornecedores, rotas alternativas, estoques, alianças, contratos, exposição a controles de exportação, tempo de recuperação e testes de estresse, apoiando-se nos estudos de Kalantzakos (2020) e Adekoya, Oliyide e Oduyemi (2023) sobre dependência mineral e risco geopolítico. O diferencial do IGPE-IA é integrar segurança mineral, capacidade industrial, governança digital, proteção de dados, cibersegurança e resiliência geopolítica em um mesmo *framework.* Nesta etapa, porém, ele organiza constructos e indicadores candidatos, não produz pontuações, ponderações ou rankings de países.

A distinção entre os dois artefatos é funcional. O MCGPT é explicativo: representa o mecanismo e os pontos de estrangulamento. O IGPE-IA é diagnóstico: traduz os componentes do modelo em perguntas e variáveis observáveis. Um investiga “como ocorre a conversão”; o outro prepara “o que precisará ser observado para avaliar o potencial de conversão”. Essa relação impede que o *framework* seja confundido com ranking e preserva a coerência entre teoria e futura mensuração.

Delimitação epistemológica: o IGPE-IA não mede o poder atual dos países nesta investigação. Ele organiza constructos, indicadores candidatos e fontes potenciais. Qualquer escore futuro dependerá de validade de conteúdo, disponibilidade e comparabilidade dos dados, método de ponderação, testes de sensibilidade, análise de incerteza e validação externa.

Tabela 9. Diferenças e complementaridades entre MCGPT e IGPE-IA

Critério	MCGPT	IGPE-IA
Natureza	Modelo conceitual explicativo.	*framework* analítico orientado à futura operacionalização.
Pergunta	Como recursos se convertem em capacidade e influência?	Quais dimensões e evidências permitem avaliar o potencial de conversão?
Estrutura	Etapas, mecanismos, habilitadores e gargalos.	Pilares, constructos, indicadores candidatos e fontes.
Resultado neste artigo	Proposição teórica fundamentada.	Arquitetura conceitual sem pontuação ou ranking.
Validação futura	Estudos de caso, process tracing e testes de relações.	Delphi, análise fatorial, ponderação, sensibilidade e validação comparativa.

Fonte: elaboração do autor (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

4.4.1. Pilares, dimensões e indicadores candidatos

Conforme apresentado anteriormente, o IGPE-IA está organizado em três pilares e oito dimensões, porém de modo mais detalhado vale destacar a arquitetura conceitual do modelo, em que o Pilar A, Base geoambiental responsável, examina a qualidade da dotação e as condições ambientais de sua mobilização. O Pilar B, Capacidade de conversão tecnoindustrial, observa processamento, manufatura, ciência e infraestrutura de IA. O Pilar C, Soberania e resiliência, avalia governança, segurança, diversificação e preparação para choques. A arquitetura evita premiar reservas que não possam ser transformadas de modo sustentável e evita classificar como soberana uma infraestrutura digital materialmente frágil.

Os indicadores devem ser desagregados sempre que tecnicamente possível. Total de reservas de terras raras pode ocultar a ausência de Nd, Pr, Dy ou Tb; capacidade de refino pode ocultar baixa pureza ou dependência de equipamento; número de centros de dados pode ocultar fragilidade energética; e existência de legislação pode ocultar baixa capacidade de implementação. A orientação é combinar medidas de estoque, fluxo, qualidade, concentração, capacidade institucional e desempenho.

Tabela 10. Arquitetura conceitual do IGPE-IA

Pilar e dimensão	Constructo avaliado	Indicadores candidatos	Fontes potenciais
A1. Potencial geoambiental e segurança material	Base geológica utilizável e acesso a elementos relevantes.	Reservas/recursos por elemento; produção; teor e mineralogia; dependência importadora; concentração de fornecedores; maturidade dos levantamentos.	USGS; serviços geológicos; UN Comtrade; estatísticas nacionais.
A2. Sustentabilidade, licença social e circularidade	Capacidade de produzir com continuidade ambiental e social.	Intensidade hídrica/energética; emissões; gestão de rejeitos e NORM; rastreabilidade; conflitos; conteúdo reciclado; taxa de recuperação.	LCA; relatórios ambientais; EITI; agências reguladoras; IEA.
B1. Separação, refino e metalização	Capacidade de produzir materiais individualizados em especificação industrial.	Capacidade anual por elemento/pureza; rendimento; plantas operacionais; dependência de reagentes/equipamento; tempo de expansão.	IEA; associações industriais; ministérios; dados empresariais auditados.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Pilar e dimensão	Constructo avaliado	Indicadores candidatos	Fontes potenciais
B2. Agregação de valor e manufatura avançada	Conversão em ligas, ímãs, componentes e sistemas.	Capacidade de ímãs; produção de motores/sensores; valor agregado doméstico; complexidade das exportações; fornecedores e contratos *offtake.*	UNIDO; OCDE TiVA; Comtrade; IEA; estatísticas industriais.
B3. Ciência, inovação e competências	Capacidade de aprender, adaptar, substituir e reciclar.	I&D; patentes de qualidade; pessoal especializado; plantas-piloto; metrologia; colaboração universidade-indústria; investigação em substituição.	WIPO/PATSTAT; UNESCO; OCDE; bases científicas; agências de inovação.
B4. Infraestrutura física, energética e digital da IA	Capacidade de operar IA e automação de forma estável.	Computação e centros de dados; energia confiável; rede e refrigeração; semicondutores/equipamentos; logística; manutenção; intensidade carbónica.	IEA; ITU; Uptime Institute; reguladores de energia; estatísticas digitais.
C1. Governança estratégica, cibersegurança e dados	Capacidade de coordenar, auditar, proteger e legitimar sistemas.	Estratégias integradas; gestão de terceiros; normas ISO/NIST; maturidade de incidentes; governança da IA; proteção de dados; encarregado/DPO efetivo.	Leis e estratégias; autoridades de cibersegurança e de proteção de dados; auditorias; relatórios de maturidade.
C2. Resiliência geopolítica e opções estratégicas	Capacidade de manter operações durante choques e coerção.	HHI de fornecedores; rotas alternativas; estoques em dias; alianças/contratos; exposição a controles; tempo de recuperação; testes de estresse.	IEA; Comtrade; CRMA; inventários públicos; acordos internacionais.

Fonte: elaboração do autor (2026). A lista é preliminar e não implica disponibilidade uniforme nem equivalência entre as fontes.

4.4.2. Regras para futura operacionalização

A futura transformação do *framework* em instrumento quantitativo deverá começar pela validação de conteúdo. Um painel multidisciplinar — geologia, engenharia mineral, ambiente, economia industrial, IA, cibersegurança, proteção de dados e relações internacionais — deverá

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

avaliar pertinência, clareza e não redundância dos indicadores. Técnicas Delphi podem apoiar consenso; contudo, a composição do painel e os conflitos de interesse precisam ser publicados.

A segunda etapa deverá definir unidade, período e nível de desagregação. Países não são perfeitamente comparáveis quando reservas têm graus distintos de confiança, capacidade nominal difere de produção efetiva ou dados sobre ímãs são protegidos por segredo comercial. Recomenda-se distinguir capacidade instalada, produção real, qualidade e dependência externa, bem como utilizar séries temporais para evitar retratos de um único ano.

A terceira etapa será a normalização. Indicadores de benefício e de risco exigem direções opostas; distribuições assimétricas podem demandar transformação logarítmica; e valores extremos não devem dominar os resultados. A normalização min-max é simples, mas sensível a extremos; escores z pressupõem comparabilidade estatística; métodos por distância a referência exigem benchmarks justificáveis. O método escolhido deverá ser testado em cenários alternativos.

A quarta etapa será a ponderação. Pesos iguais são transparentes, porém implicam julgamento de equivalência. AHP ou Delphi tornam o julgamento explícito, mas podem reproduzir vieses de especialistas. Métodos estatísticos ou por entropia dependem da estrutura dos dados e não representam necessariamente importância normativa. A recomendação é publicar resultados com mais de um esquema e relatar estabilidade de posições, em vez de tratar um peso como verdade objetiva.

A quinta etapa será a agregação. Uma soma compensatória permitiria que excelente dotação geológica ocultasse deficiência crítica de cibersegurança ou refino, contrariando a lógica de gargalo do MCGPT. Por isso, pesquisas futuras devem comparar agregação aditiva com médias geométricas, regras não compensatórias ou limiares mínimos por pilar. A escolha deverá refletir a hipótese teórica e ser acompanhada de análise de sensibilidade e incerteza.

A sexta etapa será a validação externa. O índice operacionalizado deverá ser confrontado com resultados observáveis, como duração de interrupções, capacidade de substituir fornecedores, participação *downstream*, complexidade exportadora, tempo de recuperação e continuidade de infraestruturas críticas. Estudos longitudinais, estudos de caso e *process tracing* serão necessários antes de qualquer interpretação causal.

Tabela 11. Protocolo recomendado para validação futura do IGPE-IA

Etapa	Decisão metodológica	Teste mínimo de qualidade
1. Validade de conteúdo	Revisar dimensões e indicadores com painel multidisciplinar.	Índice de validade de conteúdo; justificação de inclusões e exclusões.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Etapa	Decisão metodológica	Teste mínimo de qualidade
2. Base de dados	Definir unidade, período, desagregação e regras para dados ausentes.	Dicionário de dados; proveniência; comparabilidade e cobertura temporal.
3. Normalização	Converter escalas sem apagar direção e incerteza.	Comparar métodos; examinar extremos e distribuições.
4. Ponderação	Escolher pesos coerentes com teoria e uso.	Cenários com pesos iguais, periciais e/ou empíricos.
5. Agregação	Decidir grau de compensação entre dimensões.	Comparar soma, média geométrica e limiares; análise de sensibilidade.
6. Validação externa	Relacionar escores com resultados estratégicos observáveis.	Convergência, validade preditiva, estudos de caso e robustez longitudinal.

Fonte: elaboração do autor (2026).

4.5. Discussão do IGPE-IA à luz dos modelos de criticidade

A arquitetura do IGPE-IA herda dos modelos de criticidade a ideia de que risco e importância são multidimensionais. Nassar, Du e Graedel (2015) organizam risco de oferta, implicações ambientais e vulnerabilidade à restrição; Kosajan, Wen e Wang (2025) atualizam a avaliação e demonstram a necessidade de diferenciar elementos. Gemechu *et al*. (2016) incorporam exposição importadora e risco geopolítico. O IGPE-IA não substitui essas abordagens: utiliza-as como base e acrescenta capacidades de processamento, manufatura, ciência, infraestrutura de IA, governança e segurança.

Essa ampliação altera a pergunta. Um índice de criticidade de materiais procura identificar quão crítica é uma matéria-prima para uma economia ou tecnologia. O IGPE-IA procura organizar o potencial de conversão de uma unidade territorial. O primeiro pode concluir que determinado elemento apresenta alto risco; o segundo deve examinar se a unidade possui acesso, capacidade de processamento, indústria, competências, resiliência e governança para responder a esse risco. As duas perspectivas são complementares, mas não intercambiáveis.

O *framework* também incorpora benchmarks de política sem transformá-los automaticamente em pesos. O Critical Raw Materials Act da União Europeia estabelece, para 2030, referências de 10% de capacidade extrativa, 40% de processamento, 25% de reciclagem e máximo de 65% da demanda anual proveniente de um único país terceiro (União Europeia, 2024). Esses valores demonstram a natureza sistêmica da segurança de suprimento e podem

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

servir de referência para cenários; contudo, não devem ser universalizados sem considerar geologia, escala econômica e estratégia de cada unidade analisada.

A principal contribuição do IGPE-IA é impedir diagnósticos unidimensionais. Reservas sem refino indicam potencial bloqueado; refino sem gestão ambiental indica capacidade frágil; centros de dados sem energia confiável indicam infraestrutura nominal; legislação sem implementação indica governança formal; e diversificação sem capacidade tecnológica dos fornecedores pode apenas redistribuir custos. O *framework* transforma essas insuficiências em hipóteses observáveis para investigação comparativa.

4.6. Vínculo com segurança cibernética e proteção de dados pessoais

A segurança cibernética e a proteção de dados integram o IGPE-IA apenas como capacidades de governança necessárias à operação confiável de infraestruturas ciberfísicas e sistemas de IA. Gestão de terceiros, resposta a incidentes, auditabilidade, explicabilidade, supervisão humana e atuação do encarregado/DPO reduzem vulnerabilidades institucionais (LIMA; ALVES, 2021; ALVES; CONCEIÇÃO, 2025; SANTANA *et al*., 2026). Esses elementos não deslocam o foco mineral e tecnoindustrial do estudo nem pressupõem que a proteção de dados, isoladamente, produza soberania: sua função é qualificar a dimensão C1 do *framework* conceitual.

4.7. Síntese da discussão e avaliação das proposições

Os resultados sustentam, em termos teórico-documentais, a hipótese principal: o poder associado às terras raras depende de capacidade integrada de conversão, e não exclusivamente de reservas ou extração. A hipótese não foi testada econometricamente; portanto, o verbo “sustentar” significa que a triangulação não a refutou e forneceu mecanismos e evidências compatíveis.

A proposição P1 recebeu suporte consistente. A concentração cresce de 60% na mineração para 91% no refino e 94% nos ímãs de terras raras magnéticas, enquanto a literatura sobre *upgrading* identifica maior competição *downstream*. A proposição P2 também é compatível com as evidências de custos ambientais, passivos, licenciamento e ganhos potenciais de reciclagem. A proposição P3 foi refinada: soberania na era da IA exige segurança material, industrial, científica, energética, digital, cibernética e regulatória, mas pode ser construída por capacidades domésticas e por interdependências diversificadas e confiáveis.

O avanço resultante é duplo. O MCGPT explica a transformação em termos de sequência, habilitadores, gargalos e retroalimentação. O IGPE-IA converte essa explicação

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

numa agenda de observação e futura mensuração, mantendo a fronteira entre modelo conceitual e índice validado. Essa separação preserva o rigor do artigo e oferece dois objetos reutilizáveis por outros investigadores.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta investigação analisou de que maneira a capacidade de converter terras raras, compreendidas como ativos geoambientais, em infraestrutura industrial e tecnológica influencia soberania, segurança cibernética e poder geopolítico na era da Inteligência Artificial. A resposta construída é que o recurso natural adquire valor estratégico por meio de uma cadeia de conversão. Reservas constituem potencial; extração sustentável torna o potencial mobilizável; separação e refino produzem materiais funcionais; manufatura e ciência agregam conhecimento; infraestrutura de IA converte componentes em capacidade operacional; e governança, segurança e resiliência tornam essa capacidade politicamente confiável.

Os dados documentais reforçam essa interpretação. Em 2025, a China respondeu por aproximadamente 69,2% da produção mundial de terras raras. Para os elementos magnéticos, sua participação em 2024 passou de 60% na mineração para 91% no refino e 94% nos ímãs sinterizados. A diferença mostra que o principal locus de vantagem não é apenas o subsolo, mas o ecossistema de conversão. O contraste entre grandes reservas e baixa produção em economias como o Brasil demonstra, de forma descritiva, que dotação geológica e capacidade estratégica são categorias distintas (USGS, 2026; IEA, 2026).

A primeira contribuição original é o MCGPT, que integra base geoambiental, sustentabilidade, processamento, agregação industrial, ciência, infraestrutura de IA, governança, segurança e resultado geopolítico. A segunda é o IGPE-IA, apresentado com a cautela requerida: um *framework* conceitual para futura avaliação do potencial estratégico, não um instrumento que já mede ou classifica países. Sua arquitetura poderá orientar pesquisas quantitativas, desde que os indicadores sejam validados, desagregados por elemento, normalizados, ponderados, submetidos a análise de sensibilidade e comparados com resultados observáveis.

As conclusões também requalificam a sustentabilidade. Gestão de rejeitos, água, energia, materiais radioativos, licenciamento, participação social, rastreabilidade e circularidade não são dimensões periféricas. Elas condicionam continuidade, financiamento, legitimidade e capacidade de adaptação. A reciclagem não elimina a extração primária no horizonte imediato, mas pode reduzir exposição, ampliar oferta secundária e criar competências industriais onde o estoque de produtos em uso é elevado.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

O vínculo final com segurança cibernética e proteção de dados amplia a noção de soberania. Infraestruturas de IA são ciberfísicas e dependem de fornecedores, dados, redes e pessoas. A proteção da confidencialidade, integridade, disponibilidade e recuperabilidade precisa acompanhar a segurança material. A função de governança do encarregado/DPO discutida por Lima e Alves (2021) oferece uma ponte institucional para responsabilização no tratamento de dados pessoais, embora não substitua gestão técnica de cibersegurança nem governança ampla da IA.

5.1. *Insights* e proposições autorais decorrentes da investigação

Para favorecer a cumulatividade científica, os principais *insight*s são formulados abaixo como proposições teórico-interpretativas. Elas sintetizam os resultados desta investigação e podem ser citadas, criticadas e testadas por pesquisas posteriores; não são apresentadas como leis universais nem como relações causalmente estimadas.

Insight 1 – A vantagem geopolítica das terras raras depende menos da magnitude isolada da reserva do que da densidade das capacidades instaladas entre o depósito mineral e a tecnologia final.

Insight 2 – Em cadeias intensivas em conhecimento, o controle do gargalo *downstream* pode produzir maior influência estratégica do que a abundância upstream.

Insight 3 – A sustentabilidade socioambiental funciona como infraestrutura de continuidade produtiva: práticas insustentáveis podem gerar capacidade aparente no curto prazo e fragilidade estratégica no longo prazo.

Insight 4 – A soberania em Inteligência Artificial é parcialmente mineral, industrial, energética, digital, cibernética e regulatória; não pode ser inferida apenas pelo desempenho de modelos ou pelo volume de computação.

Insight 5 – A conversão geoambiental possui lógica de elo limitante: uma deficiência crítica em separação, manufatura, energia, competências ou governança pode restringir o valor de capacidades abundantes nas demais etapas.

Insight 6 – Diversificar minas sem diversificar refino, metalização, equipamento e ímãs desloca a dependência geográfica, mas não elimina a dependência tecnoindustrial.

Insight 7 – Proteção de dados, auditabilidade e ciber-resiliência constituem a camada de confiança que converte infraestrutura digital em autonomia sustentável.

Insight 8 – Um índice sobre potencial estratégico deve diagnosticar capacidades e vulnerabilidades antes de ordenar países; rankings anteriores à validação podem transformar incerteza metodológica em falsa precisão.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Em conjunto, essas proposições permitem que o artigo seja utilizado como base para estudos sobre países ricos em recursos, potências industriais, alianças de fornecimento, corredores minerais e políticas de IA. A hipótese geral sugerida para teste é que a interação entre capacidades de conversão explica melhor resultados de autonomia e influência do que qualquer indicador isolado de reserva, produção ou investimento.

5.2. Implicações científicas e práticas

Cientificamente, o MCGPT oferece uma linguagem comum para conectar geociências, ecologia industrial, cadeias globais de valor, estudos de IA, segurança cibernética e relações internacionais. O IGPE-IA oferece uma ponte entre teoria e investigação empírica. Ambos podem ser aplicados comparativamente, mas a escolha da unidade de análise deve reconhecer que cadeias reais atravessam fronteiras e que alianças podem internalizar capacidades que nenhum país possui isoladamente.

Para governos, o modelo orienta diagnósticos de gargalos e evita políticas centradas exclusivamente em licenças de mineração. Estratégias coerentes precisam articular conhecimento geológico, padrões ambientais, processamento, energia, formação, demanda industrial, financiamento, contratos, reciclagem, segurança de fornecedores e cooperação internacional. Os benchmarks do CRMA europeu ilustram essa abordagem de cadeia completa, embora necessitem adaptação contextual.

Para empresas e investidores, a principal implicação é que viabilidade de projetos depende de ecossistema: equipamento, competências, compradores, coprodutos, requisitos de pureza, rastreabilidade e risco regulatório. Para instituições científicas, o *framework* identifica agendas de separação verde, materiais alternativos, recuperação de resíduos, metrologia, cibersegurança industrial e governança de dados.

5.3. Limitações e agenda de investigação futura

A primeira limitação decorre do desenho documental e qualitativo. As evidências foram produzidas por métodos, anos e unidades diferentes; por isso, a investigação identifica mecanismos plausíveis, mas não estima efeitos causais. A segunda é a assimetria de dados. Informações sobre refino, pureza, metalização, ímãs, estoques, equipamento e contratos são frequentemente incompletas ou comerciais. A terceira é o ritmo de mudança: controles de exportação, projetos e capacidades podem alterar-se rapidamente.

A quarta limitação é material. Terras raras constituem apenas uma parcela da infraestrutura da IA, que também depende de cobre, silício, gálio, germânio, lítio, níquel, grafite

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

e outros materiais. O MCGPT pode ser estendido, mas a inclusão indiscriminada de minerais exigirá módulos específicos para evitar perda de precisão. A quinta limitação é institucional: soberania e poder não são resultados automáticos de capacidade produtiva; dependem de decisões políticas, alianças, legitimidade e contexto.

A agenda futura deverá seguir quatro linhas. Primeiro, validar qualitativamente o MCGPT por estudos de caso contrastantes e *process tracing,* incluindo China, Brasil, Austrália, Estados Unidos, União Europeia e alianças minero-industriais. Segundo, submeter as dimensões do IGPE-IA a Delphi e análise de validade de conteúdo. Terceiro, construir base longitudinal desagregada por elemento e estágio da cadeia, com análise de incerteza e múltiplos esquemas de ponderação. Quarto, testar se escores de conversão predizem resultados como participação *downstream*, complexidade exportadora, continuidade diante de choques e tempo de recuperação.

Conclui-se que as terras raras são ativos geoambientais estratégicos porque articulam natureza, tecnologia, território, ambiente e poder. A vantagem competitiva depende da agregação de valor ao longo da cadeia; o MCGPT explica teoricamente essa transformação; e o IGPE-IA oferece uma base conceitual para que futuras pesquisas quantitativas a operacionalizem. O passo seguinte não é produzir um ranking prematuro, mas validar constructos, construir dados comparáveis e testar, com transparência, em que condições recursos naturais se convertem em soberania tecnológica e influência geopolítica.

REFERÊNCIAS

ALVES, D. S.; CONCEIÇÃO, M. M. A geopolítica da Inteligência Artificial: da atenção pública via Google Trends à produção acadêmica estimada pelo Google Scholar. Revista Científica SOL21 - Standard Open Literature, v. 2, n. 1, 2026. DOI: 10.67553/sol21.v2i1.29. Disponível em: https://doi.org/10.67553/sol21.v2i1.29. Acesso em: 28 ago. 2026.

ALVES, D. S.; CONCEIÇÃO, M. M. O impacto da Inteligência Artificial na automação de auditorias em conformidade com as leis de proteção de dados. RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar, v. 6, n. 1, e616167, 2025. DOI: 10.47820/recima21.v6i1.6167.

BALARAM, V. Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. Geoscience Frontiers, v. 10, n. 4, p. 1285–1303, 2019. DOI: 10.1016/j.gsf.2018.12.005.

BOWEN, G. A. Document analysis as a qualitative research method. Qualitative Research Journal, v. 9, n. 2, p. 27–40, 2009. DOI: 10.3316/QRJ0902027.

BRIDGE, G. Material worlds: Natural resources, resource geography and the material economy. Geography Compass, v. 3, n. 3, p. 1217–1244, 2009. DOI: 10.1111/j.1749-8198.2009.00233.x.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

CALDERARO, A.; BLUMFELDE, S. Artificial intelligence and EU security: the false promise of digital sovereignty. European Security, v. 31, n. 3, p. 415–434, 2022. DOI: 10.1080/09662839.2022.2101885. Disponível em: https://doi.org/10.1080/09662839.2022.2101885. Acesso em: 24 jul. 2026.

CLARKE, V.; BRAUN, V. Thematic analysis. The Journal of Positive Psychology, v. 12, n. 3, p. 297–298, 2017. DOI: 10.1080/17439760.2016.1262613.

CORREIA, U. A.; SOUZA, A. M. de; SANTANA, J. A.; ALVES, D. S.; CONCEIÇÃO, M. M.; SILVA, M. S. Protocolo de padronização da governança de Inteligência Artificial com base em normas e regulamentações internacionais: revisão de literatura. RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar, v. 7, n. 6, e768273, 2026. DOI: 10.47820/recima21.v7i6.8273. Disponível em: https://doi.org/10.47820/recima21.v7i6.8273. Acesso em: 28 ago. 2026.

DEMIR, I. *et al*. Rare earth elements in the global economy: Usage, recovery, and the quest for supply security – A review. Mining, Metallurgy & Exploration, v. 43, p. 2061–2092, 2026. DOI: 10.1007/s42461-026-01559-3.

DIAO, H.; YANG, H.; TAN, T.; REN, G.; YOU, M.; WU, L.; YANG, M.; BAI, Y.; XIA, S.; SONG, S.; QUINTANA, M.; LIU, L.; XUE, Q. Navigating the rare earth elements landscape: Challenges, innovations, and sustainability. Minerals Engineering, v. 216, art. 108889, 2024. DOI: 10.1016/j.mineng.2024.108889.

DIXON-WOODS, M. Using *framework* -based synthesis for conducting reviews of qualitative studies. BMC Medicine, v. 9, art. 39, 2011. DOI: 10.1186/1741-7015-9-39.

EDAHBI, M.; PLANTE, B.; BENZAAZOUA, M. Environmental challenges and identification of the knowledge gaps associated with REE mine wastes management. Journal of Cleaner Production, v. 212, p. 1232–1241, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.11.228.

FAN, J. H.; OMURA, A.; ROCA, E. Geopolitics and rare earth metals. European Journal of Political Economy, v. 78, art. 102356, 2023. DOI: 10.1016/j.ejpoleco.2022.102356.

FLORIDI, L. The fight for digital sovereignty: what it is, and why it matters, especially for the EU. Philosophy & Technology, v. 33, n. 3, p. 369–378, 2020. DOI: 10.1007/s13347-020-00423-6. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s13347-020-00423-6. Acesso em: 24 jul. 2026.

GEMECHU, E. D.; HELBIG, C.; SONNEMANN, G.; THORENZ, A.; TUMA, A. Import-based indicator for the geopolitical supply risk of raw materials in life cycle sustainability assessments. Journal of Industrial Ecology, v. 20, n. 1, p. 154–165, 2016. DOI: 10.1111/jiec.12279.

GEREFFI, G.; HUMPHREY, J.; STURGEON, T. The governance of global value chains. Review of International Political Economy, v. 12, n. 1, p. 78–104, 2005. DOI: 10.1080/09692290500049805. Disponível em: https://doi.org/10.1080/09692290500049805. Acesso em: 24 jul. 2026.

HAN, Y.-H.; CUI, X.-W.; ZHANG, Y.; ZHANG, H.; CHEN, Z. Environmental impacts of rare earth elements mining and strategies for sustainable management: A comprehensive review. Journal of Hazardous Materials, v. 500, art. 140400, 2025. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2025.140400.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

HAQUE, N.; HUGHES, A.; LIM, S.; VERNON, C. Rare earth elements: Overview of mining, mineralogy, uses, sustainability and environmental impact. Resources, v. 3, n. 4, p. 614–635, 2014. DOI: 10.3390/resources3040614. Disponível em: https://doi.org/10.3390/resources3040614. Acesso em: 24 jul. 2026.

INSTITUTO INTERNACIONAL DE CERTIFICAÇÕES PARA PROFISSIONAIS DE TECNOLOGIA. Global public attention to the geopolitics of Artificial Intelligence: evidence from Google Trends. IICTEC Research Report No. 001/2026. [S. l.]: IICTEC, 2026. Disponível em: https://iictec.org/document_library. Acesso em: 28 ago. 2026.

INTERNATIONAL COMMITTEE OF MEDICAL JOURNAL EDITORS. Use of Artificial Intelligence in publishing. In: Recommendations for the conduct, reporting, editing, and publication of scholarly work in medical journals. [S. l.]: ICMJE, 2026. Disponível em: https://www.icmje.org/recommendations/browse/artificial-intelligence/. Acesso em: 28 ago. 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Global Critical Minerals Outlook 2025. Paris: IEA, 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Rare Earth Elements: Pathways to secure and diversified supply chains. Paris: IEA, 2026.

KALANTZAKOS, S. The race for critical minerals in an era of geopolitical realignments. The International Spectator, v. 55, n. 3, p. 1–16, 2020. DOI: 10.1080/03932729.2020.1786926. Disponível em: https://doi.org/10.1080/03932729.2020.1786926. Acesso em: 24 jul. 2026.

KLARE, M. T. The Race for What's Left: The Global Scramble for the World's Last Resources. New York: Metropolitan Books, 2012.

KOSAJAN, V.; WEN, Z.; WANG, X. Criticality assessment and management policy analysis of rare earth elements. Journal of Industrial Ecology, v. 29, n. 1, p. 344–357, 2025. DOI: 10.1111/jiec.13601.

KUMAR, S.; MALLIPEDDI, R. R. Impact of cybersecurity on operations and supply chain management: Emerging trends and future research directions. Production and Operations Management, v. 31, n. 12, p. 4488–4500, 2022. DOI: 10.1111/poms.13859.

LEE, J. C. K.; WEN, Z. Pathways for greening the supply of rare earth elements in China. Nature Sustainability, v. 1, n. 10, p. 598–605, 2018. DOI: 10.1038/s41893-018-0154-5.

LIM, W. M. What is qualitative research? An overview and guidelines. Australasian Marketing Journal, v. 33, p. 199–229, 2024.

LIMA, A.; ALVES, D. Encarregados-Data Protection Officer-DPOs exigidos pela LGPD-Lei Geral de Proteção de Dados. São Paulo: Haikai Editora, 2021.

LIU, C.; ZHOU, F.; JIANG, J.; WEN, H. Sustainable governance of the global rare earth industry chains: perspectives of geopolitical cooperation and conflict. Sustainability, v. 17, n. 11, art. 4881, 2025. DOI: 10.3390/su17114881. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su17114881. Acesso em: 24 jul. 2026.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

MIAO, F.; HOLMES, W. Guidance for generative AI in education and research. Paris: UNESCO, 2023. Disponível em: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000386693. Acesso em: 28 ago. 2026.

MORGAN, H. Conducting a qualitative document analysis. The Qualitative Report, v. 27, n. 1, p. 64–77, 2022. DOI: 10.46743/2160-3715/2022.5044.

NASSAR, N. T.; DU, X.; GRAEDEL, T. E. Criticality of the rare earth elements. Journal of Industrial Ecology, v. 19, n. 6, p. 1044–1054, 2015. DOI: 10.1111/jiec.12237. Disponível em: https://doi.org/10.1111/jiec.12237. Acesso em: 24 jul. 2026.

SANTANA, J. A. Fake news: técnicas de investigação por Inteligência Artificial. [S. l.: s. n.], 2026. ISBN 978-65-018544-3-4. Disponível em: https://www.amazon.com.br/dp/6501854431. Acesso em: 28 ago. 2026.

SANTANA, J. A.; SOUZA, A. M.; SILVA, M. S.; ALVES, D. S.; CONCEIÇÃO, M. M. A evolução da Inteligência Artificial Explicável (IAE). RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar, v. 7, n. 3, e737438, 2026. DOI: 10.47820/recima21.v7i3.7438.

SILVA, M. S. Economia da atenção e transformação do comportamento do consumidor na era dos conteúdos digitais de curta duração: uma análise de estado da arte. Revista Científica SOL21 - Standard Open Literature, v. 2, n. 1, 2026. DOI: 10.67553/sol21.v2i1.27. Disponível em: https://doi.org/10.67553/sol21.v2i1.27. Acesso em: 28 ago. 2026.

SNYDER, H. Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. Journal of Business Research, v. 104, p. 333–339, 2019. DOI: 10.1016/j.jbusres.2019.07.039.

STACCIARINI, J. H. S.; GONÇALVES, R. J. A. F. Data Centers, Minerais Críticos, Energia e Geopolítica: as bases da Inteligência Artificial. Sociedade & Natureza, v. 37, n. 1, e77215, 2025. DOI: 10.14393/SN-v37-2025-77215.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. Mineral Commodity Summaries 2026. Reston, VA: U.S. Geological Survey, 2026. DOI: 10.3133/mcs2026.

UNIÃO EUROPEIA. Regulamento (UE) 2024/1252 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 11 de abril de 2024, que estabelece um regime para garantir um aprovisionamento seguro e sustentável de matérias-primas críticas. Jornal Oficial da União Europeia, 2024.

VALDIVIA, A. The supply chain capitalism of AI: A call to (re)think algorithmic harms and resistance through environmental lens. Information, Communication & Society, v. 28, p. 2118–2134, 2024. DOI: 10.1080/1369118X.2024.2420021.

WANG, P.; YANG, Y.-Y.; HEIDRICH, O.; CHEN, L.-Y.; CHEN, L.-H.; FISHMAN, T.; CHEN, W. Regional rare-earth element supply and demand balanced with circular economy strategies. Nature Geoscience, v. 17, p. 94–102, 2024. DOI: 10.1038/s41561-023-01350-9.

YERGIN, D. The Prize: The Epic Quest for Oil, Money, and Power. New York: Simon & Schuster, 1991.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

ZHANG, H.; WANG, X.; TANG, J.; GUO, Y. The impact of international rare earth trade competition on global value chain upgrading from the industrial chain perspective. Ecological Economics, v. 198, art. 107472, 2022. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2022.107472.

ZHAO, Y.; CHENG, J.; XU, D. Geopolitical shocks and the restructuring of the rare earth supply chain: Case of US-China decoupling. Sustainability, v. 18, n. 11, art. 5329, 2026. DOI: 10.3390/su18115329.

ZIELINSKI, C. *et al*. Chatbots, generative AI, and scholarly manuscripts: WAME recommendations on chatbots and generative Artificial Intelligence in relation to scholarly publications. Colombia Médica, v. 54, n. 3, e1015868, 2023. DOI: 10.25100/cm.v54i3.5868. Disponível em: https://doi.org/10.25100/cm.v54i3.5868. Acesso em: 28 ago. 2026.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.