

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

"Júlio de Mesquita Filho" - campus de Guaratinguetá

ANDERSON ADELSON DE MATOS

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE ECONOMIA CIRCULAR TERRESTRE E
MINERAÇÃO ESPACIAL: OURO COMO OBJETO DE ESTUDO.**

Guaratinguetá

2026

Anderson Adelson de Matos

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE ECONOMIA CIRCULAR TERRESTRE E
MINERAÇÃO ESPACIAL: OURO COMO OBJETO DE ESTUDO.**

Dissertação, apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), "Júlio de Mesquita Filho", Guaratinguetá, para obtenção do título de Mestre em ENGENHARIA.

Área de Concentração: Mecânica

Orientador: Profº Dr. José Antônio Perrella
Balestieri

Coorientador: Profº Dr. Ernesto Vieira Neto

Guaratinguetá

2026

M433a	Matos, Anderson Adelson de Análise comparativa entre economia circular terrestre e mineração espacial: ouro como objeto de estudo / Anderson Adelson de Matos - Guaratinguetá, 2026. 96 f : il. Bibliografia: f. 66-75 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2026. Orientador: Prof. Dr. José Antônio Perrella Balestieri Coorientador: Prof. Dr. Ernesto Vieira Neto 1. Minas e recursos minerais. 2. Economia circular. 3. Monte Carlo, métodos de. 4. Inovação tecnológica. I. Título.

CDU 622(043)

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Esta pesquisa busca oferecer contribuições científicas, técnicas e estratégicas para a gestão sustentável de recursos minerais críticos. O método híbrido desenvolvido, integrando Equações Diferenciais Ordinárias, modelo Lotka-Volterra e simulação Monte Carlo, é potencialmente aplicável a outras disputas tecnológicas emergentes, permitindo análise prospectiva em condições de incerteza.

Os resultados fornecem subsídios quantitativos para decisões de distribuição de investimentos em pesquisa e desenvolvimento, sugerindo que fatores econômicos podem exercer influência significativamente maior sobre trajetórias competitivas do que pressão ambiental isolada. A análise comparativa entre mineração urbana e mineração espacial pode contribuir para formulação de políticas públicas orientadas à economia circular e segurança de suprimento de metais estratégicos.

Para o contexto brasileiro, os resultados poderiam orientar decisões sobre investimento em infraestrutura metalúrgica para reciclagem de resíduos eletrônicos, considerando que o país gera volume significativo de resíduos eletrônicos, mas tem taxa de reciclagem formal ainda limitada. Internacionalmente, a pesquisa pode contribuir para discussões sobre governança de recursos espaciais e estabelecimento de marcos regulatórios para exploração sustentável de asteroides.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This research seeks to offer scientific, technical, and strategic contributions to the sustainable management of critical mineral resources. The hybrid methodology developed, integrating Ordinary Differential Equations, the Lotka-Volterra model, and Monte Carlo simulation, is potentially applicable to other emerging technological disputes, enabling prospective analysis under conditions of uncertainty.

The results provide quantitative support for research and development investment allocation decisions, suggesting that economic factors may exert significantly greater influence on competitive trajectories than environmental pressure alone. The comparative analysis between urban mining and space mining may contribute to formulation of public policies oriented toward circular economy and strategic metals supply security.

For the Brazilian context, the results could guide decisions on investment in metallurgical infrastructure for electronic waste recycling, considering that the country generates significant e-waste volume but has limited formal recycling rates. Internationally, the research may contribute to discussions on space resource governance and establishment of regulatory frameworks for sustainable asteroid exploitation.

ANDERSON ADELSON DE MATOS

**Análise comparativa entre Economia Circular Terrestre e Mineração Espacial:
ouro como objeto de estudo.**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Data da defesa: 23/06/2026

Banca Examinadora:

Prof. Dr. JOSE ANTONIO PERRELLA BALESTIERI

Orientador - UNESP

Prof. Dr. RAFAEL SFAIR DE OLIVEIRA

UNESP

Prof. Dr. ANTONIO FERNANDO BERTACHINI DE ALMEIDA PRADO

INPE

Aos meus pais e irmã, pelo amor e dedicação.

Aos meus professores, pelos ensinamentos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me guiar e fortalecer em cada etapa desta jornada, concedendo-me sabedoria, perseverança e saúde para alcançar este objetivo.

Aos meus pais, por serem meu alicerce, por acreditarem nos meus sonhos mesmo quando pareciam distantes, e por me ensinarem que o conhecimento é o maior patrimônio que podemos conquistar. Cada sacrifício de vocês está refletido nestas páginas.

À minha irmã, companheira de vida, por compreender minhas ausências, celebrar minhas conquistas e me lembrar sempre da importância de equilibrar dedicação e leveza.

Ao meu orientador, Prof. Perrella, expresso profunda gratidão pela confiança depositada em mim, pela orientação criteriosa e pelas discussões que transformaram ideias iniciais em conhecimento científico. Sua experiência e visão foram fundamentais para o amadurecimento deste trabalho.

Ao meu coorientador, Prof. Ernesto, agradeço imensamente pelas contribuições técnicas precisas, pelo rigor metodológico que elevou a qualidade desta pesquisa, e pela disponibilidade constante em compartilhar seu vasto conhecimento.

Ao Prof. Marco Rogério da Silva Richetto, agradeço de coração por acreditar em mim quando eu ainda duvidava. Foi em um simples jantar escolar que o senhor, ao saber do meu desejo de cursar o mestrado, não apenas me informou sobre o processo seletivo, mas me incentivou a dar esse passo decisivo. Aquele momento mudou minha trajetória. Obrigado por enxergar potencial quando eu via apenas um sonho distante.

A todos os professores, colegas e profissionais que, direta ou indiretamente, contribuíram para minha formação acadêmica e para a realização desta pesquisa. Cada conversa, sugestão e crítica construtiva foram essenciais para o resultado final.

À comunidade científica, cujo trabalho árduo e compartilhamento de conhecimento tornaram possível este estudo, reafirmando minha crença de que a ciência avança coletivamente.

Registro que esta dissertação incorpora resultados de pesquisas desenvolvidas durante o mestrado e submetidas à publicação em três artigos científicos: *Recycle Our Past or Mine a Celestial Future?*, *A Hybrid Simulation Approach to Technological Competition: Modeling Capital Allocation and Innovation Dynamics under Uncertainty* e *Dinâmica do Mercado Global de Ouro: Uma Análise Quantitativa de Oferta, Demanda e Precificação (2010-2025)*. A inclusão desses trabalhos está em conformidade com as políticas editoriais das respectivas editoras, conforme documentado no Anexo A.

*"A Terra é o berço da humanidade, mas não se pode viver no berço para sempre."
(Konstantin Tsiolkovsky)*

RESUMO

A mineração tradicional de ouro enfrenta desafios crescentes de sustentabilidade, incluindo altos custos ambientais, consumo energético elevado e esgotamento de reservas terrestres. Neste contexto, duas alternativas emergem como caminhos potencialmente viáveis para suprimento futuro: mineração urbana, fundamentada na economia circular por meio da recuperação de metais preciosos de resíduos eletrônicos, e mineração espacial, baseada na exploração de recursos em asteroides próximos à Terra. Este estudo desenvolveu uma estrutura metodológica de simulação híbrida integrando Equações Diferenciais Ordinárias, dinâmicas de competição Lotka-Volterra e simulação Monte Carlo para analisar a competição tecnológica entre estas alternativas em um horizonte prospectivo de 20 anos. A pesquisa fundamentou-se em revisão abrangente da literatura sobre mineração tradicional, economia circular e exploração espacial, combinando análise qualitativa com modelagem matemática quantitativa. Oito cenários prospectivos foram definidos, variando desde configurações extremas de validação até situações realistas calibradas com tendências de mercado observadas. Os resultados sugerem que, sob tendências atuais, mineração espacial apresenta maior probabilidade de dominância na maioria dos cenários plausíveis. A comparação entre modelos estático e dinâmico revelou efeito de amplificação temporal: a taxa de crescimento do capital de desenvolvimento parece importar mais que o capital absoluto inicial, com diferenças modestas em taxas de crescimento transformando-se em vantagens decisivas ao longo do tempo. A análise de sensibilidade identificou fatores econômicos, particularmente capital de desenvolvimento e demanda de consumidor, como determinantes primários da competição, com impacto significativamente maior que pressão ambiental. A análise Lotka-Volterra revelou amplificação competitiva como mecanismo central, no qual vantagens iniciais traduzem-se em posições desproporcionalmente mais fortes por meio da dinâmica de "o vencedor leva a maior parte". Para a mineração urbana manter competitividade, estratégias poderiam ser formuladas com foco em otimização de eficiência metalúrgica, estabelecimento de infraestrutura consolidada e criação de mercados estáveis para materiais reciclados. O estudo busca contribuir metodologicamente por meio da arquitetura híbrida de três camadas e oferece elementos para formulação de políticas públicas e decisões de investimento em pesquisa e desenvolvimento no setor de suprimento de metais estratégicos.

Palavras-Chave: mineração urbana; mineração espacial; economia circular; competição tecnológica; simulação híbrida; Lotka-Volterra; modelagem prospectiva.

ABSTRACT

Traditional gold mining faces growing sustainability challenges, including high environmental costs, elevated energy consumption, and depletion of terrestrial reserves. In this context, two alternatives emerge as potentially viable pathways for future supply: urban mining, grounded in the circular economy through recovery of precious metals from electronic waste, and space mining, based on exploration of resources in near-Earth asteroids. This study developed a hybrid simulation methodology integrating Ordinary Differential Equations, Lotka-Volterra competition dynamics, and Monte Carlo simulation to analyze technological competition between these alternatives over a 20-year prospective horizon. The research was based on comprehensive literature review covering traditional mining, circular economy, and space exploration, combining qualitative analysis with quantitative mathematical modeling. Eight prospective scenarios were defined, ranging from extreme validation configurations to realistic situations calibrated with observed market trends. Results indicate that under current trends, space mining presents higher dominance probability in most plausible scenarios. Comparison between static and dynamic models revealed a critical temporal amplification effect: development capital growth rate matters more than initial absolute capital, with modest differences in growth rates transforming into decisive advantages over time. Sensitivity analysis identified economic factors, particularly development capital and consumer demand, as primary determinants of competition, with significantly greater impact than environmental pressure. Lotka-Volterra analysis revealed competitive amplification as a central mechanism, where initial advantages translate into disproportionately stronger positions through a "winner-take-most" dynamic. For urban mining to maintain competitiveness, strategies could focus on metallurgical efficiency optimization, establishment of solid infrastructure, and creation of stable markets for recycled materials. The study contributes methodologically through the three-layer hybrid architecture and offers insights for public policy formulation and strategic decisions regarding research and development investment in the strategic metals supply sector.

Keywords: urban mining; space mining; circular economy; technological competition; hybrid simulation; Lotka-Volterra; prospective modeling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Consumo total, produção e reciclagem de ouro no período 2010–2022. . .	18
Figura 2	Evolução do lixo eletrônico gerado e coletado globalmente (2014–2022). .	19
Figura 3	Viabilidade financeira da mineração espacial por metal e custo de lançamento.	20
Figura 4	Diagrama de distribuição espacial dos NEOs e do Cinturão Principal. . . .	28
Figura 5	Arquitetura do modelo híbrido de simulação em três camadas.	33
Figura 6	Análise completa para o Cenário 0 (Default) – Modelo Estático.	47
Figura 7	Comparação de probabilidade de dominância urbana: Modelo Estático vs. Dinâmico.	50
Figura 8	Análise de sensibilidade dos parâmetros EDO (Modelo Estático).	52
Figura 9	Análise de sensibilidade dos parâmetros EDO (Modelo Dinâmico).	53
Figura B.1	Distribuição das variáveis de volume do mercado global de ouro (2010-2025).	86
Figura B.2	Balanço anual entre oferta total e demanda do mercado global de ouro, com cotação sobreposta (2010-2025).	87
Figura B.3	Matriz de correlação de Pearson entre as variáveis do mercado global de ouro (2010-2025).	88
Figura B.4	Gráficos de dispersão com linha de regressão simples para os pares de vari- áveis selecionados. As áreas sombreadas em torno das linhas representam o intervalo de confiança de 95%.	89
Figura B.5	Diagnóstico de resíduos do modelo de regressão linear múltipla: resíduos <i>versus</i> valores ajustados e distribuição dos resíduos padronizados.	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Modelo Estático - Parâmetros de Cenário: Capital de Desenvolvimento, Pressão Ambiental e Demanda de Consumidor.	40
Tabela 2 – Modelo Estático - Coeficientes EDO e Lotka-Volterra para cada Cenário. . .	42
Tabela 3 – Modelo Dinâmico - Parâmetros de Cenário: Valores Iniciais, Taxas de Crescimento e Intervalos de Pressão Ambiental.	42
Tabela 4 – Modelo Dinâmico - Coeficientes EDO e Lotka-Volterra para cada Cenário. .	44
Tabela 5 – Comparação de Níveis Tecnológicos Finais: EDO (Crescimento Isolado) vs. Lotka-Volterra (Crescimento Competitivo).	54
Tabela 6 – Matriz-síntese de viabilidade competitiva por cenário.	56
Tabela A.1 – Parâmetros do modelo Lotka-Volterra competitivo.	79
Tabela B.1 – Série histórica de oferta, demanda e cotação do ouro (2010-2025).	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABM	Agent-Based Modeling (Modelagem Baseada em Agentes)
CO ₂	Dióxido de Carbono
EDO	Equações Diferenciais Ordinárias
ISRU	In-Situ Resource Utilization (Utilização de Recursos In-Situ)
L-V	Lotka-Volterra
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NEAs	Near-Earth Asteroids (Asteroides Próximos à Terra)
NTP	Nuclear Thermal Propulsion (Propulsão Térmica Nuclear)
OAT	<i>One-at-a-Time</i> (análise de sensibilidade)
POM	Pattern-Oriented Modeling (Modelagem Orientada por Padrões)

LISTA DE SÍMBOLOS

T	Nível tecnológico (genérico)
T_{urbana}	Nível tecnológico da mineração urbana
$T_{espacial}$	Nível tecnológico da mineração espacial
$T(0)$	Nível tecnológico inicial normalizado
t	Tempo (anos)
K	Motor de crescimento (growth engine)
M_{urbana}	Nível tecnológico final EDO da mineração urbana
$M_{espacial}$	Nível tecnológico final EDO da mineração espacial
D	Capital de Desenvolvimento (US\$ bilhões/ano)
D_0	Valor inicial do Capital de Desenvolvimento
P	Pressão Ambiental (índice normalizado 0-100)
C	Demanda de Consumidor (toneladas/ano)
C_0	Valor inicial da Demanda de Consumidor
a	Coefficiente de sensibilidade ao capital de desenvolvimento
b	Coefficiente de sensibilidade à pressão ambiental
c	Coefficiente de sensibilidade à demanda de consumidor
α	Taxa de crescimento intrínseco da mineração urbana (Lotka-Volterra)
δ	Taxa de crescimento intrínseco da mineração espacial (Lotka-Volterra)
β	Coefficiente de competição (inibição de T_{urbana} por $T_{espacial}$)
γ	Coefficiente de competição (inibição de $T_{espacial}$ por T_{urbana})
r_D	Taxa de crescimento anual do capital de desenvolvimento (%)
r_C	Taxa de crescimento anual da demanda de consumidor (%)
k	Fator de escalonamento do modelo híbrido
Δt	Duração de passo (trajetórias estocásticas)

e Número de Euler (base do logaritmo natural)

US\$ Dólar americano (United States Dollar)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA	17
1.2	ALTERNATIVAS EMERGENTES PARA O SUPRIMENTO DE OURO . .	18
1.2.1	Mineração Urbana e Economia Circular	18
1.2.2	Mineração Espacial como Fronteira Tecnológica	19
1.3	COMPETIÇÃO TECNOLÓGICA E MODELAGEM	20
1.4	JUSTIFICATIVA	21
1.5	OBJETIVOS	21
1.5.1	Objetivo geral	21
1.5.2	Objetivos específicos	21
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	22
2	REVISÃO DE LITERATURA	23
2.1	MINERAÇÃO TRADICIONAL E IMPACTOS AMBIENTAIS	23
2.1.1	Custos Ambientais e Energéticos	23
2.1.2	Escassez de Reservas Terrestres	24
2.1.3	Dados Globais de Produção e Consumo do Ouro	24
2.2	ECONOMIA CIRCULAR E MINERAÇÃO URBANA	25
2.2.1	Conceitos de Economia Circular	25
2.2.2	Lixo Eletrônico como Fonte de Recursos	25
2.2.3	Tecnologias de Recuperação Metalúrgica	26
2.2.4	Viabilidade Econômica	27
2.3	MINERAÇÃO ESPACIAL: A FRONTEIRA FINAL	27
2.3.1	Asteroides como Reservatórios Minerais	27
2.3.2	Validação Tecnológica na Exploração de Asteroides	28
2.3.3	Avanços Tecnológicos	28
2.3.4	Análise de Viabilidade Econômica	29
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E METODOLÓGICA	30
3.1	TEORIA DA COMPETIÇÃO TECNOLÓGICA	30
3.2	EQUAÇÕES DIFERENCIAIS ORDINÁRIAS PARA CRESCIMENTO TEC- NOLÓGICO	30
3.2.1	Modelo estático	31
3.2.2	Modelo dinâmico	32
3.2.3	Arquitetura do modelo híbrido	32
3.3	MODELO LOTKA-VOLTERRA DE COMPETIÇÃO	34

3.4	MODELO HÍBRIDO INTEGRADO	35
3.4.1	Arquitetura de acoplamento	35
3.5	SIMULAÇÃO MONTE CARLO E QUANTIFICAÇÃO DE INCERTEZA .	36
3.6	VALIDAÇÃO DO MODELO	37
3.6.1	Testes de condições extremas	37
3.6.2	Calibração orientada por padrões	37
3.6.3	Testes estruturais e comportamentais adicionais	37
3.7	DEFINIÇÃO DE CENÁRIOS E PARAMETRIZAÇÃO	38
3.7.1	Estratégia de cenários	38
3.7.2	Descrição dos cenários	39
3.7.3	Parametrização do modelo estático	40
3.7.3.1	<i>Parâmetros de entrada</i>	40
3.7.3.2	<i>Coeficientes do modelo</i>	41
3.7.4	Parametrização do modelo dinâmico	41
3.7.4.1	<i>Especificação de parâmetros temporais</i>	41
3.7.4.2	<i>Trajétórias estocásticas de pressão ambiental</i>	43
3.7.4.3	<i>Coeficientes do modelo dinâmico</i>	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1	VALIDAÇÃO DO MODELO	46
4.2	RESULTADOS DO MODELO ESTÁTICO	46
4.3	RESULTADOS DO MODELO DINÂMICO	48
4.3.1	Desenvolvimento matemático e parametrização	48
4.3.2	Resultados e interpretação	49
4.4	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MODELOS	49
4.5	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	51
4.5.1	Sensibilidade do modelo estático	51
4.5.2	Sensibilidade do modelo dinâmico	52
4.6	DINÂMICAS DE COMPETIÇÃO LOTKA-VOLTERRA	53
4.7	DISCUSSÃO	55
4.7.1	Limitações metodológicas	58
4.7.1.1	<i>Limitações estruturais</i>	58
4.7.1.2	<i>Limitações temporais e de escala</i>	59
4.7.1.3	<i>Limitações conceituais e de escopo</i>	59
4.7.1.4	<i>Avaliação do impacto das limitações nos resultados</i>	60
5	CONCLUSÕES	62
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	62
	DISPONIBILIDADE DE DADOS E CÓDIGO	64

	REFERÊNCIAS	66
	GLOSSÁRIO	76
	APÊNDICE A – MODELO LOTKA-VOLTERRA: EXPOSIÇÃO DIDÁTICA COM DUAS TECNOLOGIAS	78
A.1	CONTEXTO E MOTIVAÇÃO	78
A.2	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA	78
A.3	INTERPRETAÇÃO DOS PARÂMETROS	79
A.4	COMPORTAMENTOS POSSÍVEIS	79
A.5	EXEMPLO NUMÉRICO	79
	APÊNDICE B – ARTIGO: DINÂMICA DO MERCADO GLOBAL DE OURO: UMA ANÁLISE QUANTITATIVA DE OFERTA, DEMANDA E PRECIFICAÇÃO (2010-2025)	81
B.1	INTRODUÇÃO	81
B.2	REFERENCIAL TEÓRICO	82
B.2.1	O mercado global de ouro: estrutura e componentes	82
B.2.2	Formação de preço e fatores determinantes	82
B.2.3	Métodos quantitativos aplicados ao mercado de commodities	83
B.3	MATERIAL E MÉTODO	84
B.3.1	Fonte e coleta dos dados	84
B.3.2	Procedimentos de análise	84
B.4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	85
B.4.1	Estatísticas descritivas	85
B.4.2	Balanco de mercado (oferta total vs. demanda)	87
B.4.3	Análise de correlação	87
B.4.4	Regressão linear múltipla	88
B.5	CONCLUSÃO	90
	ANEXO A – POLÍTICAS EDITORIAIS DAS EDITORAS	92
	DADOS CURRICULARES	96

1 INTRODUÇÃO

A escassez do ouro e dos metais estratégicos representa um desafio crescente para a sociedade moderna, agravado pelas limitações ambientais e econômicas da mineração convencional. Diante desse cenário, a economia circular (por meio da mineração urbana) e a mineração espacial emergem como alternativas promissoras, cuja análise comparativa constitui o objeto deste trabalho.

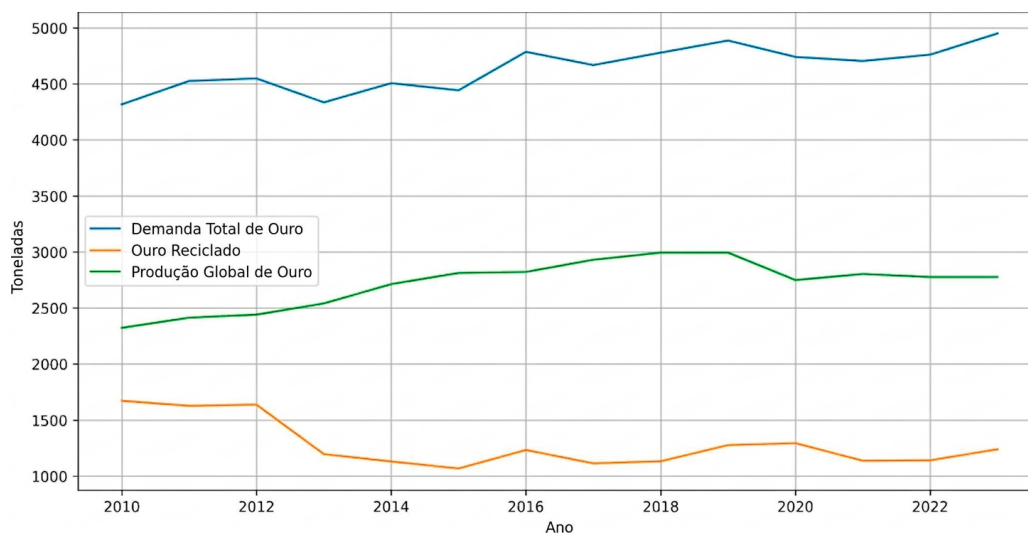
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

O ouro é um metal precioso com aplicações que se estendem desde artefatos históricos até componentes críticos em dispositivos aeroespaciais e eletrônicos (Africa, 2022; NASA, 1997). Este material estratégico enfrenta uma crescente escassez, com projeções indicando que as reservas terrestres podem se esgotar em aproximadamente 50 anos caso os padrões atuais de consumo persistam (Foundation, 2014; Hunt; Farmer; Clark, 2013).

No período entre 2010 e 2024, observou-se que o consumo mundial por ouro superou a produção de novas minas em quase 20 mil toneladas, lacuna que foi parcialmente preenchida por processos de reciclagem (Council, 2024). Durante esses anos, enquanto a produção global totalizou cerca de 50,7 mil toneladas, o consumo superou a marca de 69,9 mil toneladas, sendo que a reciclagem contribuiu com escassas 19,2 mil toneladas. Tais números sugerem que a produção primária já não consegue atender plenamente o crescente consumo global, o que reforça a relevância da busca por fontes alternativas de suprimento. A Figura 1 ilustra a evolução dessas três variáveis ao longo do período analisado. Destaca-se, em particular, a queda abrupta nos volumes de reciclagem de ouro a partir do ano de 2013. Esse movimento de contração pode estar intimamente ligado à desvalorização histórica do metal no mercado internacional, possivelmente motivada pelo fenômeno macroeconômico conhecido como *Taper Tantrum* (Sahay et al., 2014; Shin, 2017). Uma análise quantitativa mais detalhada das relações entre oferta, demanda e precificação do ouro, abrangendo o período estendido de 2010 a 2025, é apresentada no Apêndice B.

A mineração tradicional vem se tornando progressivamente mais desafiadora e controversa em função dos elevados custos ambientais associados, que incluem desmatamento, poluição por mercúrio e alto consumo energético (Aramendia et al., 2023; Soares et al., 2024). Diante desse cenário, torna-se necessário explorar abordagens alternativas capazes de garantir o fornecimento futuro de metais estratégicos de maneira mais sustentável.

Figura 1 – Consumo total, produção e reciclagem de ouro no período 2010–2022. A linha azul superior representa o consumo total do ouro, consistentemente acima da linha verde de produção global. A linha laranja inferior mostra a contribuição da reciclagem, menor mas consistente ao longo do período.



Fonte: Baseado em Council (2024).

1.2 ALTERNATIVAS EMERGENTES PARA O SUPRIMENTO DE OURO

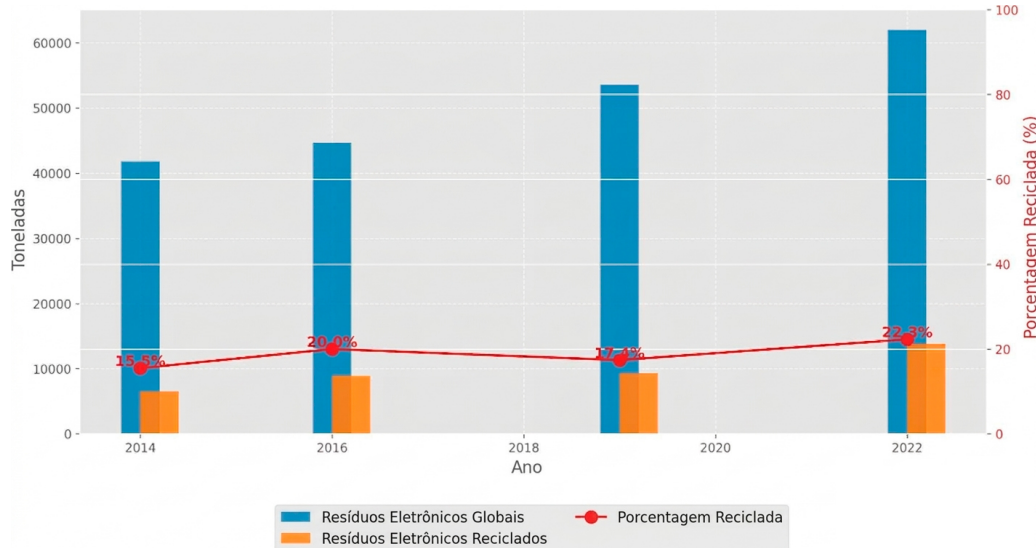
Frente ao desafio da escassez de ouro, duas abordagens competitivas emergiram: a mineração urbana e a mineração espacial. Embora ambas representem caminhos promissores, cada uma apresenta características, desafios e potenciais distintos.

1.2.1 Mineração Urbana e Economia Circular

Como elemento central da economia circular, a mineração urbana (Ouro-Salim, 2024) propõe transformar fluxos de resíduos em fontes valiosas de materiais (Woldeyes; Muffatto; Ferrati, 2025; Xavier; Ottoni; Lepawsky, 2021). Somente em 2022, a geração global de resíduos eletrônicos (e-waste) atingiu 62 milhões de toneladas, abrigando um valor estimado de US\$ 91 bilhões em metais, sendo US\$ 15 bilhões apenas em ouro (Baldé et al., 2024). Apesar desse valor expressivo, a taxa de reciclagem não ultrapassou 22,3% do total, o que evidencia uma significativa oportunidade ainda inexplorada de recuperação de recursos. A Figura 2 apresenta a evolução da geração de lixo eletrônico e das taxas de reciclagem entre 2014 e 2022.

A mineração urbana enfrenta limitações relacionadas ao volume de fluxos de resíduos disponíveis e requer infraestrutura metalúrgica sofisticada para lidar com processos químicos perigosos (Cui; Zhang, 2008). No entanto, análises demonstram que a reciclagem de ouro via Estruturas Covalentes de Triazina (CTFs, do inglês Covalent Triazine Frameworks) modificadas com grupos amino apresenta grande potencial de viabilidade econômica. O uso desses polímeros orgânicos porosos pode gerar uma margem bruta de até US\$ 52 por grama recuperado, embora o lucro prático final ainda dependa do desconto dos custos logísticos de coleta e do processamento prévio do lixo eletrônico (Kong et al., 2023).

Figura 2 – Evolução do lixo eletrônico gerado e coletado globalmente (2014–2022). As barras azuis mostram o aumento do e-waste global, ultrapassando 60.000 toneladas em 2022. As barras laranja menores indicam o volume reciclado. A linha vermelha indica que a porcentagem de reciclagem permaneceu baixa, em torno de 20%.



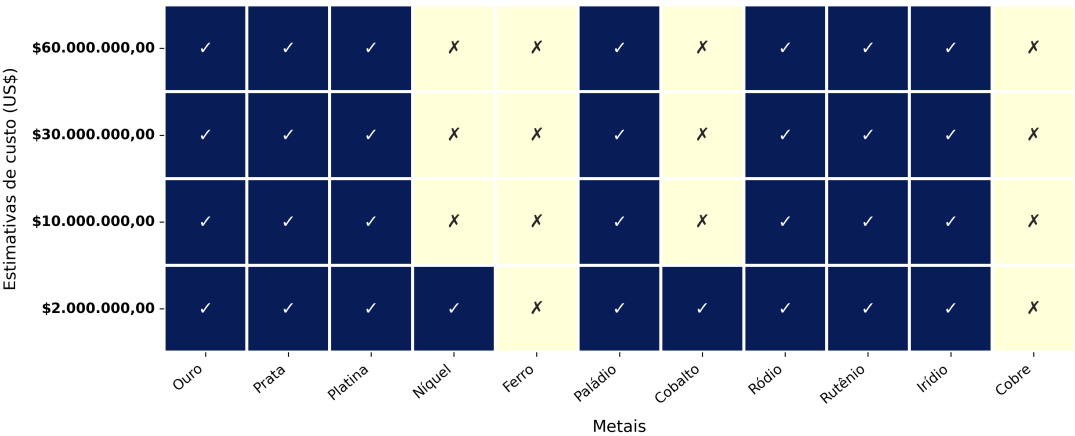
Fonte: Baseado em Baldé et al. (2017), Baldé et al. (2024), Baldé (2015), Forti et al. (2020).

1.2.2 Mineração Espacial como Fronteira Tecnológica

Como alternativa promissora, a mineração espacial volta-se para a exploração de asteroides próximos à Terra (Near-Earth Asteroids - NEAs) ricos em minerais (Xie; Bennett; Dempster, 2021). A viabilidade técnica dessa abordagem já foi demonstrada por missões bem-sucedidas de retorno de amostras, como a japonesa Hayabusa e a norte-americana OSIRIS-REx (Yoshikawa et al., 2006; NASA, n.d.c). Contudo, é importante ressaltar que essas missões retornaram apenas pequenos volumes na ordem de gramas, indicando que a transição para uma escala de mineração comercial ainda representa um desafio tecnológico substancial. Para ilustrar o potencial econômico, um único asteroide rico em platina com aproximadamente 200 metros de diâmetro poderia alcançar avaliação em torno de US\$ 30 bilhões (Elvis, 2012).

Dado o imenso valor potencial dessa abordagem, análises tecno-econômicas detalhadas, como a de Hein, Matheson & Fries (2020), modelaram a viabilidade e o orçamento de tais missões, concentrando-se nos fatores de custo e engenharia necessários para o sucesso de empreendimentos de mineração espacial. Estimativas indicam que o retorno potencial de 150 toneladas de ouro poderia alcançar aproximadamente US\$ 14 bilhões, considerando uma viagem com carga total e a cotação recente do metal (Price, 2025; Inc., 2025). Além disso, alguns autores estipulam que os custos de lançamento, em um ambiente de produção, poderão variar entre US\$ 2 milhões e US\$ 60 milhões, dependendo da tecnologia e da fonte (Elvis; Lawrence; Seager, 2023; Mann, 2020; Space, 2024). A Figura 3 apresenta uma análise comparativa da viabilidade financeira de mineração de diferentes metais considerando diversas faixas de custos de lançamento, baseando-se nos custos de fabricação de equipamentos estimados pelos autores e nas cotações de mercado dos metais.

Figura 3 – Mapa de calor que compara a viabilidade financeira de mineração de diversos metais com base em diferentes faixas de custos de lançamento (de US\$ 2 milhões a US\$ 60 milhões). O valor em azul escuro indica missão lucrativa. Metais como ouro e platina indicam lucratividade em todas as faixas de custo.



Fonte: Baseado em Price (2025), Elvis, Lawrence & Seager (2023), Inc. (2025), Mann (2020), Space (2024).

A mineração espacial enfrenta barreiras significativas relacionadas a custos, complexidade tecnológica e riscos inerentes às missões (Elvis; Lawrence; Seager, 2023). Apesar dessas dificuldades, os avanços recentes em tecnologia aeroespacial têm progressivamente reduzido esses obstáculos, tornando essa alternativa cada vez mais plausível.

1.3 COMPETIÇÃO TECNOLÓGICA E MODELAGEM

O sucesso na implementação tanto da mineração urbana quanto da mineração espacial depende fundamentalmente da forma como fatores econômicos, ambientais e tecnológicos influenciam sua evolução e potencial de dominância de mercado. Para compreender essa dinâmica competitiva, torna-se necessário recorrer a modelagem matemática capaz de capturar as interações complexas entre essas tecnologias.

A modelagem de competição tecnológica requer abordagens que integrem múltiplas dimensões analíticas. Modelos baseados em Equações Diferenciais Ordinárias (EDOs) permitem projetar o potencial de crescimento intrínseco de cada tecnologia, fundamentados em teorias de difusão de inovações, como o modelo Bass (Bass, 1969) e crescimento endógeno (Romer, 1990). Esses modelos capturam como fatores externos, como capital de desenvolvimento e demanda de mercado, combinam-se com mecanismos internos de retroalimentação positiva para acelerar o progresso tecnológico.

Adicionalmente, sistemas de competição como o modelo Lotka-Volterra permitem simular a interação direta entre tecnologias concorrentes no mercado, capturando efeitos de amplificação competitiva nos quais vantagens iniciais podem ser magnificadas ao longo do tempo. A incorporação de simulação Monte Carlo possibilita quantificar incertezas inerentes aos parâmetros econômicos e tecnológicos, fornecendo uma avaliação probabilística dos resultados competitivos.

A integração dessas abordagens em um modelo híbrido oferece uma ferramenta analítica rigorosa para avaliar cenários prospectivos de competição entre mineração urbana e mineração espacial, permitindo identificar os fatores determinantes que influenciam a trajetória de cada tecnologia.

1.4 JUSTIFICATIVA

A escassez iminente de ouro e outros metais estratégicos representa um desafio global que requer soluções simultaneamente inovadoras e fundamentadas cientificamente. Nesse contexto, compreender as dinâmicas competitivas entre diferentes abordagens tecnológicas mostra-se relevante para orientar decisões de políticas públicas, a distribuição de investimentos em pesquisa e desenvolvimento e estratégias industriais de longo prazo.

Enquanto a mineração urbana representa uma solução de implementação mais imediata, aproveitando infraestrutura existente e fluxos de resíduos já estabelecidos, sua capacidade é naturalmente limitada pelo volume de material disponível para reciclagem. Em contrapartida, a mineração espacial, apesar de tecnologicamente mais desafiadora, oferece potencial praticamente ilimitado de recursos minerais, o que a posiciona como possível solução de longo prazo para a escassez de materiais críticos.

A análise comparativa dessas abordagens, fundamentada em modelagem matemática rigorosa e dados empíricos, contribui para o avanço do conhecimento sobre transições tecnológicas em setores estratégicos, fornecendo subsídios para a formulação de estratégias sustentáveis de suprimento de recursos minerais.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo geral

Analisar comparativamente a mineração urbana e a mineração espacial como alternativas para o suprimento futuro de ouro, integrando revisão sistemática da literatura com modelagem matemática de competição tecnológica.

1.5.2 Objetivos específicos

- a) Revisar sistematicamente a literatura científica sobre mineração urbana e mineração espacial, identificando avanços tecnológicos, viabilidade econômica e impactos ambientais de cada abordagem;
- b) Desenvolver um modelo híbrido de simulação que integre Equações Diferenciais Ordinárias, sistema Lotka-Volterra e simulação Monte Carlo para analisar a competição tecnológica entre as duas abordagens;

- c) Avaliar cenários prospectivos de dominância de mercado, considerando fatores econômicos (capital de desenvolvimento, demanda de consumidor), ambientais (pressão regulatória) e tecnológicos (maturidade operacional);
- d) Identificar os fatores determinantes que influenciam a trajetória competitiva de cada tecnologia, por meio de análise de sensibilidade e comparação entre modelos estático e dinâmico;
- e) Discutir implicações estratégicas para políticas públicas e decisões de investimento em pesquisa e desenvolvimento no setor de suprimento de metais estratégicos.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. O Capítulo 2 desenvolve uma revisão da literatura sobre mineração tradicional, mineração urbana e mineração espacial, apresentando dados históricos de produção e demanda de ouro que fundamentam as análises subsequentes. O Capítulo 3 estabelece a fundamentação teórica e metodológica, detalhando os modelos matemáticos empregados (EDOs, Lotka-Volterra e simulação Monte Carlo) aplicados à competição entre mineração urbana e mineração espacial de ouro, os procedimentos de validação, e a definição de oito cenários prospectivos com parametrização calibrada a partir de dados empíricos para os modelos estático e dinâmico. O Capítulo 4 expõe os resultados obtidos e a discussão integrada, incluindo análise de sensibilidade, dinâmicas competitivas e limitações metodológicas. Por fim, o Capítulo 5 sintetiza as conclusões do estudo. O trabalho conta ainda com dois apêndices: o Apêndice A oferece uma exposição didática do modelo Lotka-Volterra com duas tecnologias hipotéticas, e o Apêndice B reproduz integralmente o artigo sobre a dinâmica do mercado global de ouro, desenvolvido como parte das atividades de pesquisa deste mestrado.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura sobre mineração tradicional de ouro, seus impactos ambientais e limitações de sustentabilidade, seguida pela análise dos fundamentos teóricos e empíricos da economia circular e mineração urbana, e culminando com a exploração das perspectivas científicas e tecnológicas da mineração espacial como fronteira emergente de suprimento de recursos.

2.1 MINERAÇÃO TRADICIONAL E IMPACTOS AMBIENTAIS

A mineração constitui uma atividade econômica e industrial fundamental que abrange o estudo, exploração, extração e processamento de minerais encontrados abaixo da superfície terrestre, influenciando significativamente a estrutura e o avanço socioeconômico da sociedade (Haldar, 2018). A contribuição direta inclui pagamento por serviços e trabalho realizado, investimento de recursos financeiros e humanos por empresários, além do cumprimento de obrigações tributárias (Radetzki, 1982).

O processo de mineração envolve diversas etapas, desde a exploração inicial para localização de depósitos, seguida pela extração, processamento e refinamento metalúrgico final para obtenção de metais puros (Worlanyo; Jiangfeng, 2021). Em 2010, mais de US\$ 12 bilhões foram gastos globalmente na busca por minerais não ferrosos (quase metade desse montante destinado ao ouro). Para comparação, no mesmo período foram gastos US\$ 440 bilhões em exploração e desenvolvimento de petróleo e gás natural (Rudenno, 2019), o gasto em prospecção de ouro corresponde à aproximadamente 2,7% deste montante.

2.1.1 Custos Ambientais e Energéticos

A mineração tradicional, tanto em escala industrial quanto artesanal, tornou-se ambientalmente insustentável, caracterizada por altos custos de exploração, consumo intensivo de energia, poluição por elementos tóxicos como mercúrio e desmatamento generalizado (Adu-Baffour; Daum; Birner, 2021; Aramendia et al., 2023; Soares et al., 2024). Na floresta amazônica, a mineração artesanal e em pequena escala é responsável pela emissão de mais de 181,44 toneladas de mercúrio por ano, o que corresponde a aproximadamente 27% das emissões globais e 80% das emissões totais da América do Sul (Soares et al., 2024).

As mudanças no uso da terra, especialmente o desmatamento, constituem a segunda maior fonte de emissões de CO₂, reduzindo o armazenamento de carbono nos ecossistemas e causando outros impactos ambientais, como perda de biodiversidade. O desmatamento ocorre em áreas florestais para extração de minerais (Soares et al., 2024). O consumo energético total da indústria mineradora poderia aumentar por um fator de 2 a 8 até 2060 sob cenários de alto crescimento

econômico, devido aos efeitos combinados do crescimento do consumo mineral, declínio dos teores de minério e requisitos da transição energética (Aramendia et al., 2023).

2.1.2 Escassez de Reservas Terrestres

Na mineração subterrânea, após centenas de anos de exploração, os recursos estão se esgotando; os recursos minerais próximos à superfície vêm sendo progressivamente exauridos (Cai; Brown, 2017). Como resultado, a mineração precisa avançar para profundidades maiores. Atualmente, o carvão é minerado a uma profundidade de cerca de 1.500 m e minérios metálicos a 4.350 m, com estimativas de que, com as técnicas atuais, não será possível minerar mais profundo que 6.000 m. Por outro lado, a exploração de petróleo e gás já ocorre em profundidades superiores a 12.000 m (Xie et al., 2017).

Dados da Espanha indicam que a mineração subterrânea apresenta taxas de acidentes mais altas em comparação com outras modalidades de mineração (Sanmiquel et al., 2024), e na China, as causas de tais acidentes estão ligadas a fatores humanos, materiais, ambientais, supervisão e eventos fortuitos (Miao et al., 2024).

2.1.3 Dados Globais de Produção e Consumo do Ouro

Os avanços em análise de dados e inteligência artificial, marcos da Indústria 4.0, aumentaram a complexidade dos equipamentos eletrônicos e, consequentemente, o consumo por matérias-primas críticas (Li; Ascani; Iammarino, 2024). O número de elementos utilizados em dispositivos de computação, por exemplo, aumentou quase 445% entre as décadas de 1980 e 2010 (Li; Ascani; Iammarino, 2024).

O ouro é um exemplo primordial dessa tendência, sendo indispensável em setores de alta tecnologia modernos. Por exemplo, suas propriedades únicas o tornam vital para aplicações aeroespaciais, como na proteção de satélites contra o calor solar e na blindagem de capacetes de astronautas contra a radiação (NASA, 1997). Esse papel crítico em tecnologias avançadas coloca o ouro em uma posição precária. Análises de escassez elementar indicam que vários materiais enfrentarão esgotamento nas próximas décadas. O ouro, por exemplo, está incluído na categoria de maior risco, com uma escassez estimada entre 5 e 50 anos (Foundation, 2014; Hunt; Farmer; Clark, 2013).

Entre 2010 e 2024, estima-se que 50,7 mil toneladas de ouro foram produzidas nas matrizes primárias, enquanto o consumo agregou 69,9 mil toneladas, com a reciclagem injetando cerca de 19,2 mil toneladas na cadeia mercadológica (Council, 2024). Considerando a quantidade de ouro que foi acumulada ao longo dos séculos, de 2010 a 2024, em apenas 14 anos, foram produzidos 47% desse total. Em média, a produção anual orbitou ao redor de 3,4 mil toneladas, o consumo total atingiu 4,7 mil toneladas e o processamento de ouro reciclado devolveu 1,3 mil toneladas por ciclo.

As reservas minerais são dinâmicas, diminuindo com a extração, mas potencialmente aumentando com descobertas e avanços tecnológicos. Criticamente, os suprimentos minerais futuros dependerão não apenas de depósitos a serem descobertos, mas também de materiais reciclados (Survey, n.d.). Este reconhecimento crescente da reciclagem como um fluxo primário de recursos forma a base da economia circular. Cabe destacar que o Apêndice B complementa esta discussão por meio de uma análise correlacional e regressiva que sugere que as variáveis físicas de oferta e demanda podem explicar pouco mais da metade da variação observada na cotação do ouro, indicando que fatores financeiros e macroeconômicos tendem a desempenhar papel relevante na formação de preço do metal.

2.2 ECONOMIA CIRCULAR E MINERAÇÃO URBANA

2.2.1 Conceitos de Economia Circular

Em contraste com o modelo linear insustentável de "extrair, fabricar e descartar" (Lacy; Rutqvist, 2015), uma economia circular é projetada para ser inerentemente restaurativa e regenerativa, mantendo produtos e materiais em uso em seu maior valor por meio de estratégias que expandem o princípio clássico de "reduzir, reutilizar e reciclar", como reparação e remanufatura (Foundation, 2014; Heras-Saizarbitoria; Boiral; Testa, 2023; Woldeyes; Muffatto; Ferrati, 2025). Esta abordagem transforma efetivamente bens em fim de vida em novos recursos, economizando energia e matérias-primas (Chandler, 1986; Stahel, 2016).

2.2.2 Lixo Eletrônico como Fonte de Recursos

A mineração urbana, utilizada principalmente para resíduos eletrônicos, transforma cidades em "minas urbanas" ricas em recursos e impulsiona a economia circular ao recuperar materiais valiosos de resíduos eletrônicos e produtos descartados, reduzindo assim a extração de recursos e promovendo a reutilização sustentável. Este método concentra-se na recuperação de metais valiosos como ouro, prata, cobre e paládio de eletrônicos descartados (Ouro-Salim, 2024). Tem o potencial de se tornar um padrão para gerenciar fluxos de resíduos eletrônicos alinhados com os princípios da economia circular (Xavier; Ottoni; Lepawsky, 2021).

A substituição contínua de dispositivos eletrônicos gera milhões de toneladas de resíduos eletrônicos (e-waste) a cada ano. Em muitos locais, esses resíduos contaminam água de irrigação e pesca, podendo envenenar fontes alimentares e comprometer a saúde pública (Fowler, 2017). A produção de resíduos eletrônicos é um dos problemas ambientais de crescimento mais rápido no mundo, devido ao aumento no consumo de dispositivos eletrônicos. Esses resíduos, encontrados principalmente em aterros sanitários em países em desenvolvimento, contêm metais como cobre, ferro e alumínio, além de metais preciosos como ouro e prata, e substâncias tóxicas como mercúrio e cádmio. Esses materiais podem poluir solo e água, representando sérios riscos ao meio ambiente (Rizki; Tanaka; Okibe, 2019).

Em 2022, foram geradas 62 milhões de toneladas de resíduos eletrônicos, mas apenas 22,3% desse total foi coletado e reciclado adequadamente. A geração de resíduos eletrônicos está crescendo a uma taxa de 2,6 milhões de toneladas por ano, e espera-se que atinja 82 milhões de toneladas até 2030, um aumento de 33% em comparação com 2022 (Baldé et al., 2024). Para comparação, China e Estados Unidos lideraram a geração de resíduos eletrônicos em 2022, sendo os maiores produtores em suas respectivas regiões, Ásia e Américas (Baldé et al., 2024).

O valor econômico dos metais em resíduos eletrônicos globais gerados em 2022 é estimado em US\$ 91 bilhões. As matérias-primas secundárias mais valiosas são cobre (US\$ 19 bilhões), ferro (US\$ 16 bilhões) e ouro (US\$ 15 bilhões) (Baldé et al., 2024).

2.2.3 Tecnologias de Recuperação Metalúrgica

Os mercados de telefones celulares e computadores geraram um consumo crescente por ouro no setor de eletrônicos. Em 2000, estimou-se que cerca de 280 toneladas do metal foram usadas em componentes eletrônicos e elétricos (Holliday; Goodman, 2002). Em aplicações automotivas, pode ser necessária uma espessura de revestimento de ouro de 2 micrômetros (μm) ou mais, enquanto conectores tipicamente requerem uma camada muito mais fina, variando de 0 a 1 μm (Holliday; Goodman, 2002). Trilhões de interconexões em componentes eletrônicos e semicondutores são realizadas todos os anos, e o ouro desempenha um papel crucial nesses processos devido à sua resistência à corrosão e capacidade de formar ligações metalúrgicas confiáveis, representando uma parcela significativa do consumo de ligas de ouro na indústria eletrônica (Ellis, 2004).

A recuperação de metais preciosos de resíduos eletrônicos frequentemente envolve técnicas hidrometalúrgicas, que utilizam uma série de lixiviações ácidas ou cáusticas para dissolver o material sólido. No entanto, esses processos, particularmente aqueles que usam agentes perigosos como cianeto, levantam preocupações ambientais significativas devido ao risco de contaminação de fontes de água (Cui; Zhang, 2008; Tuncuk et al., 2012).

Utilizando ouro modificado com amino (CTFs), a reciclagem de 1 g de ouro pode gerar um lucro de até US\$ 52,00, levando em conta custos como coleta de equipamentos elétricos e eletrônicos usados, preparação da solução a partir de resíduos eletrônicos, mão de obra e outras despesas relacionadas (Kong et al., 2023).

A concentração de metais preciosos em resíduos eletrônicos é frequentemente substancialmente maior do que em minérios convencionais (Manigandan; Rajmohan; Varjani, 2020). Os níveis de ouro em e-waste podem ser tão altos quanto 1.600 ppm, com prata e paládio atingindo até 20.000 ppm e 970 ppm, respectivamente. Em contraste, um minério de ouro de alto teor pode conter apenas 18 ppm de ouro, e um minério de prata cerca de 85 ppm de prata (Rao et al., 2020). Esta concentração varia com base no componente eletrônico, com itens como placas-mãe de computador sendo particularmente ricos nesses metais (Cui; Zhang, 2008; Zhang; Xu, 2016). A idade do dispositivo também desempenha um papel crucial; por exemplo, o revestimento de ouro

em contatos eletrônicos diminuiu ao longo das décadas, de cerca de $1,0 \mu\text{m}$ na década de 1980 para $0,3\text{-}0,6 \mu\text{m}$ nos anos 2000 (Rao et al., 2020).

2.2.4 Viabilidade Econômica

Uma economia circular não pode ser estabelecida para recuperar metais do grupo da platina, ouro e prata de dispositivos eletrônicos sem uma infraestrutura metalúrgica. Reciclar e recuperar ouro de recursos secundários e resíduos é um desafio termodinâmico, tecnológico e econômico complexo (Reuter; Schaik, 2016).

2.3 MINERAÇÃO ESPACIAL: A FRONTEIRA FINAL

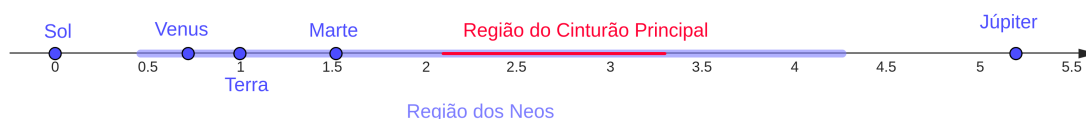
2.3.1 Asteroides como Reservatórios Minerais

A exploração espacial oferece uma solução para os limites de recursos terrestres ao acessar a vasta riqueza mineral do cosmos, cujos elementos foram originalmente sintetizados em ambientes astrofísicos (Arcones; Thielemann, 2023). Corpos celestes, particularmente asteroides do tipo M (metálicos), são considerados reservatórios significativos de materiais valiosos (Cannon; Gialich; Acain, 2023; Xie; Bennett; Dempster, 2021). Missões da NASA, como a exploração do asteroide Psyche, rico em metais, podem confirmar o potencial tangível da extração de recursos extraterrestres, estabelecendo uma base para futuros empreendimentos de mineração espacial (NASA, 2023).

Asteroides próximos da Terra (NEOs, do inglês *Near-Earth Objects*) são ricos em minerais e há muito tempo que são considerados reservatórios potenciais de materiais valiosos, como metais preciosos, água e semicondutores (Xie; Bennett; Dempster, 2021). Do ponto de vista da viabilidade tecno-econômica, o foco da mineração espacial recai sobre os NEOs em detrimento dos asteroides do Cinturão Principal (MBAs, do inglês *Main Belt Asteroids*) devido à sua extrema vantagem em termos de acessibilidade orbital (Sanchez; McInnes, 2011). Alcançar e, principalmente, trazer de volta material de um MBA exige tempos de missão prolongados e um Δv (variação de velocidade) substancialmente maior. Esses extensos tempos de trânsito (que levam anos em vez de meses) somados à alta complexidade na telemetria de operações em espaço profundo, acabam inviabilizando o retorno financeiro a curto e médio prazo frente aos parâmetros logísticos atuais (Elvis, 2014). A Figura 4 ilustra a diferença de acessibilidade e a proximidade das órbitas dos NEOs em comparação com o Cinturão Principal. Do ponto de vista da composição, os asteroides são classificados por tipo com base em suas características espectrais, com os asteroides do tipo M, comumente identificados como “metálicos” (Cannon; Gialich; Acain, 2023). Acredita-se que esses asteroides do tipo M sejam os núcleos expostos de planetesimais diferenciados que perderam seus mantos de silicato devido a colisões passadas (Lupishko; Belskaya, 1989).

Os tamanhos dos asteroides variam amplamente, com Vesta sendo o maior do cinturão principal com aproximadamente 530 quilômetros de diâmetro, enquanto muitos outros medem

Figura 4 – Diagrama linear das distâncias no Sistema Solar interior, em Unidades Astronômicas (UA). A faixa inferior indica a extensa região de influência orbital dos Objetos Próximos da Terra (NEOs), que transita pelas órbitas dos planetas terrestres. Em contraste, a faixa vermelha evidencia a localização concentrada do Cinturão Principal de asteroides, situado entre Marte e Júpiter.



Fonte: Elaborada pelo autor.

menos de 10 metros. Apesar de seus números, a massa combinada de todos os asteroides ainda é menor que a da Lua terrestre (Nasa, n.d.).

2.3.2 Validação Tecnológica na Exploração de Asteroides

É interessante notar a diferença entre missões estritamente científicas e aquelas voltadas à demonstração tecnológica - como a missão DART (*Double Asteroid Redirection Test*), focada em validar a viabilidade da defesa planetária por meio de impacto cinético (Daly et al., 2023). Até o momento, a mineração de asteroides ainda carece de missões de demonstração tecnológica focadas na extração em larga escala. No entanto, a base de engenharia para tais empreendimentos já foi demonstrada por operações de retorno de amostras. Missões científicas pioneiras, como a Hayabusa do Japão, que retornou com material de Itokawa em 2010, e a OSIRIS-REx dos Estados Unidos, que entregou material de Bennu em 2023 (NASA, n.d.b; NASA, n.d.c; Yoshikawa et al., 2006), validaram com sucesso a capacidade técnica de alcançar um asteroide, coletar material e trazê-lo com segurança, estabelecendo os precursores técnicos para a futura exploração comercial.

Os desafios logísticos de missões de espaço profundo, particularmente para destinos remotos como Marte, necessitam a prática de Utilização de Recursos In-Situ (ISRU), que envolve gerar produtos a partir de materiais locais. Esta abordagem é crítica, pois reduz a dependência de missões de reabastecimento custosas da Terra e promove maior independência da tripulação, tornando assim a exploração sustentada mais viável (NASA, n.d.a; NASA, n.d.d).

2.3.3 Avanços Tecnológicos

Elvis (2012) aponta que frequentemente é negligenciado que, além de objetivos científicos e estratégicos, um dos objetivos formais do programa espacial americano é avançar os interesses econômicos da nação. Por exemplo, um asteroide rico em platina com aproximadamente 200 metros de diâmetro poderia ser avaliado em cerca de US\$ 30 bilhões.

Segundo Hein, Matheson e Fries (2020), do ponto de vista da rentabilidade, alcançar um ponto de equilíbrio rápido depende em grande parte da taxa de rendimento e do desdobramento de múltiplas espaçonaves menores por missão. A viabilidade econômica da mineração de

asteroides depende do desenvolvimento de processos eficientes de extração e da produção em massa dessas pequenas espaçonaves. Embora a reutilização possa aumentar a rentabilidade, ela também restringe a frequência de missões consecutivas, pois as espaçonaves devem retornar e passar por reforma antes da redistribuição.

A pesquisa espacial está progredindo rapidamente. Avanços em propulsão, como Propulsão Térmica Nuclear (NTP), prometem reduzir significativamente os tempos de viagem para futuras missões à Lua e Marte usando fissão nuclear para gerar escape de alta velocidade, tornando a logística da mineração espacial mais viável (DeHart; Schunert; Labouré, 2022; Atomics, 2025).

Outro avanço significativo é um sistema de transporte espacial totalmente reutilizável, que aumenta a capacidade de carga útil para 150 toneladas em sua configuração reutilizável (SpaceX, n.d.). Isso representa um aumento substancial em relação à capacidade de aproximadamente 23 toneladas de décadas anteriores (Elvis; Lawrence; Seager, 2023).

2.3.4 Análise de Viabilidade Econômica

Estima-se que US\$ 3 bilhões foram investidos na construção da infraestrutura necessária para o desenvolvimento, teste e lançamento de veículos espaciais de próxima geração. A construção da instalação começou em 2014 e tornou-se operacional em 2019 (Space, 2024). O custo estimado por lançamento de um veículo de elevação pesada reutilizável de próxima geração varia amplamente, variando de US\$ 2 milhões a US\$ 10 milhões (Mann, 2020), US\$ 30 milhões (Space, 2024) e até US\$ 60 milhões (Elvis; Lawrence; Seager, 2023).

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E METODOLÓGICA

Este capítulo desenvolve a fundamentação teórica e metodológica da pesquisa, estabelecendo os fundamentos conceituais da competição tecnológica, detalhando os modelos matemáticos empregados (Equações Diferenciais Ordinárias, sistema Lotka-Volterra e simulação Monte Carlo), descrevendo a arquitetura híbrida de integração entre essas abordagens, apresentando os procedimentos de validação adotados, e definindo os cenários prospectivos e a parametrização dos modelos estático e dinâmico utilizados nas simulações.

3.1 TEORIA DA COMPETIÇÃO TECNOLÓGICA

A competição entre tecnologias emergentes representa um fenômeno central na economia da inovação, na qual diferentes alternativas tecnológicas disputam o domínio de mercado em contextos de incerteza e dependência de trajetória. Este processo competitivo é caracterizado por dinâmicas não lineares, nas quais pequenas vantagens iniciais podem ser amplificadas ao longo do tempo, eventualmente levando à dominância de uma tecnologia sobre as demais (Arthur, 1989).

A teoria do crescimento endógeno, desenvolvida por Romer (Romer, 1990), estabelece que o progresso tecnológico não é um fenômeno exógeno, mas resulta de investimentos deliberados em pesquisa e desenvolvimento, acumulação de conhecimento e *spillovers* tecnológicos (transbordamentos involuntários de conhecimento entre agentes). Nesta perspectiva, o desenvolvimento tecnológico é impulsionado por um "motor de crescimento" composto por fatores como capital de desenvolvimento, pressão ambiental (que estimula inovação) e demanda de consumidor. Esses fatores não atuam isoladamente, mas interagem de forma multiplicativa, criando trajetórias de crescimento que podem ser modeladas matematicamente (Romer, 1990).

O processo de difusão tecnológica foi sistematizado por Rogers (Rogers, 1962), que categorizou os adotantes em grupos desde inovadores até retardatários e descreveu a curva S característica da penetração de mercado. O Modelo de Difusão de Bass (1969) formalizou matematicamente essa perspectiva, postulando que a adoção tecnológica é impulsionada por dois mecanismos fundamentais: inovadores (adotantes iniciais influenciados por fatores externos) e imitadores (adotantes subsequentes influenciados por interação social). Esta estrutura tem sido aplicada para modelar a penetração de mercado de tecnologias emergentes (Rogers, 1962; Bass, 1969).

3.2 EQUAÇÕES DIFERENCIAIS ORDINÁRIAS PARA CRESCIMENTO TECNOLÓGICO

A estrutura matemática empregada neste estudo baseia-se em Equações Diferenciais Ordinárias (EDOs) para modelar a evolução temporal do nível tecnológico. A equação fundamental do

crescimento tecnológico, derivada da adaptação do Modelo de Bass e da teoria do crescimento endógeno (Bass, 1969; Romer, 1990), é expressa pela Equação (1):

$$\frac{dT}{dt} = K \cdot T \quad (1)$$

na qual T representa o nível tecnológico, t é o tempo e K é o motor de crescimento (*growth engine*). O nível tecnológico T é a variável dependente central do modelo: um índice adimensional que representa a viabilidade econômica e a maturidade operacional de um setor. Um valor crescente de T deve ser interpretado como reflexo de melhorias concretas, tais como redução no custo por quilograma de ouro recuperado, aumento na eficiência dos processos de extração e avanço geral na segurança e confiabilidade das operações. Esta métrica permite comparações padronizadas entre sistemas fundamentalmente distintos - mineração urbana, já estabelecida, e mineração espacial, ainda emergente - ao abstrair sua maturidade em uma estrutura quantitativa comum. O parâmetro K não é constante, mas uma função composta por três componentes principais, conforme a Equação (2):

$$K = a \cdot D + b \cdot P + c \cdot C \quad (2)$$

na qual D representa o Capital de Desenvolvimento (investimento em pesquisa e infraestrutura), P denota a Pressão Ambiental (índice normalizado de pressão regulatória que incentiva inovação tecnológica), C corresponde à Demanda de Consumidor (demanda de mercado por recursos), e a , b , c são coeficientes de sensibilidade que quantificam o impacto relativo de cada fator no crescimento tecnológico. As denominações Capital de Desenvolvimento, Pressão Ambiental e Demanda de Consumidor são adotadas como termos técnicos do modelo e serão utilizadas de forma padronizada ao longo de todo o trabalho.

3.2.1 Modelo estático

No modelo estático, todos os parâmetros (D , P , C) permanecem constantes ao longo do horizonte de simulação de 20 anos. Esta configuração simplificada permite isolar os efeitos da estrutura competitiva fundamental sem interferência de dinâmicas temporais complexas. A solução analítica da EDO com parâmetros constantes é dada pela Equação (3):

$$T(t) = T(0) \cdot e^{K \cdot t} \quad (3)$$

na qual $T(0) = 1$ representa o nível tecnológico inicial normalizado. Esta forma exponencial captura o crescimento tecnológico auto-reforçado característico de processos de inovação, nos quais avanços tecnológicos geram capacidade adicional para inovações subsequentes.

3.2.2 Modelo dinâmico

O modelo dinâmico introduz complexidade temporal ao permitir que os parâmetros de entrada evoluam ao longo do tempo, capturando condições de mercado em transformação. As trajetórias temporais são especificadas pelas Equações (4) e (5):

$$D(t) = D_0(1 + r_D \cdot t) \quad (4)$$

$$C(t) = C_0(1 + r_C \cdot t) \quad (5)$$

nas quais D_0 e C_0 são os valores iniciais de capital de desenvolvimento e demanda de consumidor, respectivamente, r_D e r_C são taxas de crescimento anual, e t é o tempo em anos. Estas funções lineares refletem tendências realistas de aumento em investimento em infraestrutura e expansão de demanda de mercado, calibradas a partir de dados históricos em setores tecnológicos análogos (Romer, 1990; Council, 2024).

A Pressão Ambiental $P(t)$ segue uma trajetória estocástica por partes (piecewise-constant) para simular mudanças regulatórias imprevisíveis. Para cada iteração Monte Carlo, uma trajetória única é gerada por meio de um algoritmo que sorteia durações de passo $\Delta t_i \sim \mathcal{U}(\Delta t_{\min}, \Delta t_{\max})$ e amplitudes correspondentes $A_i \sim \mathcal{U}(P_{\min}, P_{\max})$ até que a soma cumulativa das durações exceda 20 anos. Esta abordagem captura a natureza descontínua de mudanças em políticas ambientais.

No modelo dinâmico, o motor de crescimento torna-se dependente do tempo:

$$K(t) = a \cdot D(t) + b \cdot P(t) + c \cdot C(t) \quad (6)$$

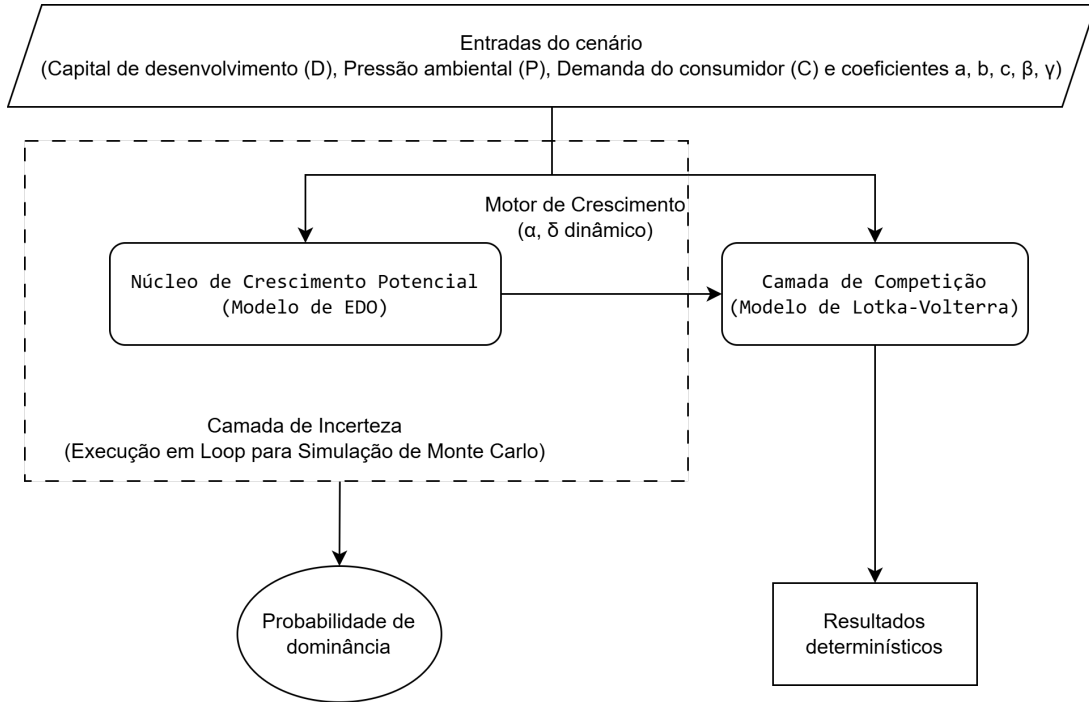
resultando numa EDO não-autônoma que, embora admita solução exata por separação de variáveis, é integrada computacionalmente para viabilizar a avaliação de milhares de trajetórias estocásticas na simulação Monte Carlo (Virtanen et al., 2020).

3.2.3 Arquitetura do modelo híbrido

A estrutura matemática descrita foi implementada como uma plataforma de simulação computacional em Python, utilizando NumPy e SciPy para computação numérica, e Matplotlib/Seaborn para visualização. A implementação integra três camadas analíticas (potencial de crescimento EDO, competição Lotka-Volterra e quantificação de incerteza Monte Carlo) em uma arquitetura computacional unificada, representada esquematicamente na Figura 5.

A característica arquitetônica central é o mecanismo de acoplamento dinâmico entre as camadas EDO e Lotka-Volterra. Nesta arquitetura, os parâmetros de crescimento intrínseco do sistema competitivo (α e δ) não são definidos de forma independente, mas derivados matematicamente dos resultados da camada EDO, estabelecendo uma dependência causal direta entre os fundamentos econômicos de cada tecnologia e sua capacidade competitiva.

Figura 5 – Arquitetura do modelo híbrido de simulação, ilustrando as três camadas interdependentes e seu fluxo de informação: a camada EDO calcula os motores de crescimento M_{urbana} e $M_{espacial}$, que determinam dinamicamente os parâmetros de crescimento intrínseco Lotka-Volterra (α , δ) por meio do fator de escala k . A camada Monte Carlo envolve esse núcleo determinístico, executando-o 10.000 vezes com parâmetros amostrados estocasticamente para gerar distribuições de probabilidade de dominância.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O mecanismo opera da seguinte forma. Primeiro, a camada EDO é resolvida independentemente para cada tecnologia, utilizando os parâmetros de entrada do cenário - capital de desenvolvimento D , pressão ambiental P e demanda de consumidor C - para calcular o motor de crescimento K conforme a Equação (2). A partir de K , obtém-se o nível tecnológico final M ao término do horizonte de simulação, conforme a Equação (3). Esse nível tecnológico final quantifica o potencial de crescimento que cada tecnologia alcançaria isoladamente, na ausência de competição direta. Em seguida, os valores de M_{urbana} e $M_{espacial}$ são utilizados para determinar os parâmetros de crescimento intrínseco do sistema Lotka-Volterra por meio das Equações (9) e (10), nas quais o fator de escalonamento k calibra a conversão entre as escalas dos dois modelos. Os coeficientes de competição β e γ , por sua vez, permanecem definidos estaticamente em cada cenário, pois representam a intensidade da interação competitiva direta entre as tecnologias, uma grandeza que depende da estrutura de mercado e não do potencial de crescimento individual.

A implicação prática desse acoplamento é que qualquer alteração em um fator econômico de entrada repercute automaticamente em toda a cadeia do modelo. Se, por exemplo, o capital de desenvolvimento D de uma tecnologia é aumentado, o motor de crescimento K correspondente se eleva, o que produz um nível tecnológico final M maior e, por consequência, uma taxa de

crescimento intrínseco (α ou δ) mais elevada no sistema competitivo. Dessa forma, a vantagem econômica traduz-se em vantagem competitiva sem que seja necessário ajustar manualmente os parâmetros entre camadas. Essa propriedade diferencia o modelo proposto de abordagens nas quais os parâmetros de crescimento e de competição são calibrados de forma independente.

A terceira camada - simulação Monte Carlo - envolve esse núcleo determinístico acoplado, executando-o 10.000 vezes. Em cada iteração, os valores de entrada são amostrados de distribuições probabilísticas: distribuição Log-Normal para variáveis econômicas (coeficientes EDO, capital de desenvolvimento e demanda de consumidor), cuja assimetria e não-negatividade são compatíveis com a natureza dessas grandezas, e distribuição Uniforme para a pressão ambiental, refletindo a incerteza fundamental sobre a magnitude futura de políticas regulatórias. O resultado de cada iteração - qual tecnologia atinge nível tecnológico superior ao final do horizonte - é registrado, e o conjunto das 10.000 realizações produz as distribuições de probabilidade de dominância reportadas nos resultados.

3.3 MODELO LOTKA-VOLTERRA DE COMPETIÇÃO

As equações que fundamentam este modelo têm origens independentes na década de 1920. Lotka (Lotka, 1925), em *Elements of Physical Biology*, formulou um sistema de equações diferenciais acopladas no contexto amplo da físico-química e da biologia teórica, abrangendo reações autocatalíticas e interações entre espécies. Volterra (Volterra, 1926), por sua vez, derivou equações matematicamente equivalentes motivado por um problema ecológico concreto: explicar por que, durante a Primeira Guerra Mundial, a redução da pesca no mar Adriático havia aumentado a proporção de peixes predadores em relação às espécies de presa, conforme observações do zoólogo Umberto D'Ancona. Enquanto Lotka partiu de princípios gerais da dinâmica de sistemas, Volterra partiu da relação específica entre predadores e presas. A convergência de ambos os trabalhos consolidou um modelo que, desde então, tem sido aplicado para além da ecologia, incluindo competição tecnológica e substituição de mercado (Morris; Pratt, 2003). O Apêndice A apresenta uma exposição didática do modelo utilizando duas tecnologias hipotéticas, ilustrando os mecanismos de crescimento e inibição mútua antes de sua aplicação ao caso específico deste estudo.

Enquanto as EDOs capturam o crescimento tecnológico intrínseco de cada alternativa, o modelo Lotka-Volterra incorpora as interações competitivas diretas entre as tecnologias. A necessidade dessa modelagem competitiva decorre do fato de que mineração urbana e mineração espacial disputam os mesmos recursos finitos (capital de investimento em P&D, atenção regulatória e participação no mercado de suprimento de ouro). Nesse contexto, o avanço de uma tecnologia não é independente da outra: o crescimento de uma tende a desviar recursos e reduzir a participação de mercado da concorrente, configurando uma dinâmica de inibição mútua que não é capturada pelas EDOs isoladas.

A formulação competitiva restringe-se a mineração urbana e mineração espacial (e não inclui

a mineração tradicional) por razões tanto empíricas quanto metodológicas. Conforme demonstrado na Seção 2.1, a mineração convencional constitui o *status quo* insustentável que motiva a busca por alternativas: seus custos ambientais crescentes, o esgotamento progressivo das reservas terrestres (Cai; Brown, 2017) e o déficit acumulado de aproximadamente 19.000 toneladas entre produção primária e consumo no período 2010-2024 (Council, 2024) a posicionam como a origem do problema investigado, e não como uma alternativa competitiva. Do ponto de vista metodológico, o modelo Lotka-Volterra pressupõe taxas de crescimento intrínseco positivas ($\alpha, \delta > 0$), condição satisfeita por tecnologias emergentes em fase de expansão. A mineração tradicional, como tecnologia madura em declínio, não se enquadra nessa premissa. Assim, o modelo competitivo aqui proposto avalia qual dentre as alternativas emergentes apresenta maior potencial de dominância futura, pressupondo que a mineração convencional continuará operando como fonte complementar, porém estruturalmente insuficiente, durante o horizonte de análise.

O sistema de equações para duas tecnologias competindo (T_{urbana} para mineração urbana, $T_{espacial}$ para mineração espacial) é representado pelas Equações (7) e (8):

$$\frac{dT_{urbana}}{dt} = \alpha \cdot T_{urbana} - \beta \cdot T_{urbana} \cdot T_{espacial} \quad (7)$$

$$\frac{dT_{espacial}}{dt} = \delta \cdot T_{espacial} - \gamma \cdot T_{urbana} \cdot T_{espacial} \quad (8)$$

na qual α e δ são parâmetros de crescimento intrínseco (intrinsic growth rates), enquanto β e γ são coeficientes de competição que quantificam a inibição mútua entre as tecnologias. O termo $-\beta \cdot T_{urbana} \cdot T_{espacial}$ representa o efeito inibitório da mineração espacial ($T_{espacial}$) sobre a mineração urbana (T_{urbana}), e $-\gamma \cdot T_{urbana} \cdot T_{espacial}$ captura o efeito inverso.

Esta formulação captura matematicamente o conceito de "competição por recursos limitados" (market share competition), na qual o crescimento de uma tecnologia ocorre parcialmente às custas da outra. A dinâmica resultante é não linear e pode produzir comportamentos complexos, incluindo coexistência estável, exclusão competitiva ou oscilações (Strogatz, 2015).

3.4 MODELO HÍBRIDO INTEGRADO

Uma contribuição metodológica proposta neste estudo consiste na integração das duas estruturas matemáticas em um modelo híbrido de três camadas, que busca combinar as vantagens de ambas as abordagens: as EDOs capturam fatores econômicos e ambientais exógenos, enquanto o sistema Lotka-Volterra modela a interação competitiva endógena (Stermann, 2000).

3.4.1 Arquitetura de acoplamento

O mecanismo de acoplamento dinâmico opera da seguinte forma: primeiro, as EDOs são resolvidas independentemente para cada tecnologia, produzindo trajetórias de crescimento livre de competição. Em seguida, os níveis tecnológicos finais das EDOs são utilizados para calibrar os

parâmetros de crescimento intrínseco do sistema Lotka-Volterra por meio das relações expressas nas Equações (9) e (10):

$$\alpha = M_{urbana} \cdot k_{utilizado} \quad (9)$$

$$\delta = M_{espacial} \cdot k_{utilizado} \quad (10)$$

na qual M_{urbana} e $M_{espacial}$ são os níveis tecnológicos finais obtidos das EDOs, e $k_{utilizado}$ é um fator de escalonamento calibrado para garantir que os valores resultantes de α e δ permaneçam dentro de um intervalo teoricamente plausível [0,055, 0,115], correspondendo a uma expansão tecnológica de 3 a 10 vezes ao longo de 20 anos (Bass, 1969; Romer, 1990).

Esta arquitetura de três camadas garante que as consequências de políticas de capital de desenvolvimento sejam tratadas como dinâmicas internas do sistema, ao invés de fatores exógenos, capturando a retroalimentação fundamental entre potencial econômico e capacidade competitiva (Sberman, 2000).

3.5 SIMULAÇÃO MONTE CARLO E QUANTIFICAÇÃO DE INCERTEZA

Dada a natureza prospectiva deste estudo e a ausência de séries temporais históricas para calibração estatística formal, a incerteza paramétrica é tratada por meio de Simulação Monte Carlo com 10.000 iterações (Law, 2015). Para cada iteração, os valores de entrada são sorteados de distribuições probabilísticas teoricamente fundamentadas:

- Capital de Desenvolvimento (D) e Demanda de Consumidor (C): distribuições Log-Normal, refletindo a assimetria característica de variáveis econômicas que não podem assumir valores negativos e tendem a apresentar caudas superiores longas (Law, 2015).
- Pressão Ambiental (P): distribuições Uniformes dentro de intervalos específicos por cenário, capturando a incerteza fundamental sobre a magnitude de pressões regulatórias futuras.

A distribuição Log-Normal para variáveis econômicas é justificada teoricamente pela natureza multiplicativa dos processos econômicos e pela não-negatividade inerente a grandezas como capital e demanda (Law, 2015). Os parâmetros das distribuições são calibrados para que os valores médios correspondam aos pontos centrais dos intervalos especificados em cada cenário.

A convergência estatística da simulação Monte Carlo foi verificada por meio de análise de convergência em múltiplos tamanhos amostrais (1.000, 5.000, 10.000 e 25.000 simulações). Convergência foi considerada satisfatória quando o coeficiente de variação das probabilidades de dominância calculadas permaneceu abaixo de 2% entre execuções consecutivas, garantindo que os resultados finais sejam estáveis e independentes do número de iterações (Law, 2015; Sberman, 2000).

3.6 VALIDAÇÃO DO MODELO

A validação do modelo seguiu práticas recomendadas em modelagem de sistemas complexos (Sargent, 2010; Sterman, 2000), combinando múltiplas estratégias complementares:

3.6.1 Testes de condições extremas

Dois cenários de controle com parâmetros extremos foram projetados para validar a lógica competitiva central. O Cenário 1 ("Urban Dominant") configura capital de desenvolvimento e pressão ambiental intensamente favoráveis à mineração urbana (US\$ 15 bilhões/ano urbana vs US\$ 8 bilhões/ano espacial; pressão 75-95 para urbana vs 20-45 para espacial no modelo dinâmico), enquanto o Cenário 2 ("Space Dominant") inverte esta configuração (US\$ 6 bilhões/ano urbana vs US\$ 20 bilhões/ano espacial; pressão 40-70 para urbana vs 50-80 para espacial). Estes testes verificam se o modelo responde apropriadamente quando uma tecnologia é esmagadoramente favorecida (Sterman, 2000).

3.6.2 Calibração orientada por padrões

Na ausência de dados históricos para estimação estatística formal, foi empregada uma abordagem alinhada com Modelagem Orientada por Padrões (Pattern-Oriented Modeling - POM) (Grimm et al., 2005). Esta estratégia, validada para calibração de modelos de sistemas complexos, sugere que parâmetros devem ser ajustados para garantir que o modelo reproduza padrões comportamentais característicos do sistema real, ao invés de focar exclusivamente em correspondência ponto-a-ponto com dados históricos.

Neste estudo, o padrão macroscópico de referência foi uma taxa de crescimento tecnológico plausível, consistente com a teoria de difusão de inovação (Bass, 1969; Romer, 1990). O ajuste iterativo dos coeficientes a , b e c para gerar parâmetros de crescimento intrínseco Lotka-Volterra α e δ dentro do intervalo teoricamente justificado $[0,055, 0,115]$ (correspondendo a avanço tecnológico de 3 a 10 vezes ao longo de 20 anos) representa uma calibração orientada por padrões. Este intervalo é derivado de estudos empíricos sobre taxas de difusão tecnológica em setores emergentes de alta tecnologia (Bass, 1969).

3.6.3 Testes estruturais e comportamentais adicionais

Testes complementares incluíram (Sterman, 2000; Sargent, 2010):

- **Teste de Adequação de Fronteira:** o modelo internaliza a retroalimentação central entre potencial econômico (camada EDO) e capacidade competitiva (camada Lotka-Volterra), garantindo que as consequências de políticas de capital de desenvolvimento sejam tratadas como dinâmicas internas do sistema.

- **Teste de Erro de Integração:** o modelo dinâmico emprega a função `odeint` da biblioteca SciPy (Virtanen et al., 2020), que utiliza um solver adaptativo de passo variável que ajusta automaticamente o tamanho do passo de integração para manter o erro local abaixo de um limiar de precisão algorítmica predefinido, garantindo que os resultados sejam produto da dinâmica do modelo e não de artefatos computacionais.
- **Análise de Sensibilidade:** foi conduzida análise de sensibilidade *One-at-a-Time* (OAT) (Hamby, 1994) nos parâmetros centrais das EDOs (a , b , c), além de testes de sensibilidade dos parâmetros de calibração do acoplamento híbrido (intervalo alvo para α/δ e limites do fator k), produzindo variações inferiores a 5% nas conclusões principais.
- **Teste de Comportamento de Equilíbrio:** em configurações simétricas (Cenário 3 - Balanced), o modelo produz resultados de coexistência competitiva, confirmando que não há viés estrutural favorecendo artificialmente uma tecnologia sobre a outra quando condições iniciais são equivalentes.
- **Teste de Sensibilidade de Distribuição:** simulações-chave foram replicadas utilizando distribuições alternativas plausíveis (Beta e Gamma no lugar de Normal e Log-Normal), confirmando que as conclusões centrais não são contingentes às escolhas distribucionais iniciais (Sterman, 2000).

A validação seguiu o princípio de que confiança é construída não ao provar que um modelo é "verdadeiro", mas ao submetê-lo a testes projetados para descobrir limitações e avaliar adequação ao propósito pretendido (Law, 2015; Sterman, 2000).

3.7 DEFINIÇÃO DE CENÁRIOS E PARAMETRIZAÇÃO

A aplicação do modelo híbrido requer a especificação de cenários que representem diferentes condições de mercado plausíveis, desde configurações extremas utilizadas para validação até situações realistas que refletem tendências observadas. Esta seção apresenta a definição sistemática de oito cenários prospectivos e a parametrização completa dos modelos estático e dinâmico.

3.7.1 Estratégia de cenários

Os cenários foram projetados para explorar de forma abrangente o conjunto de parâmetros de entrada do modelo, capturando desde condições de validação extrema até configurações de mercado balanceadas e realistas. A estratégia de cenários segue duas funções complementares:

- **Cenários de Validação (Cenários 1 e 2):** configurações extremas nas quais uma tecnologia recebe vantagens intensivas em capital de desenvolvimento e pressão ambiental, destinadas a verificar se o modelo responde logicamente a condições assimétricas inequívocas.

- **Cenários Exploratórios (Cenários 0, 3-7):** configurações que representam diferentes narrativas estratégicas de evolução de mercado, variando desde competição balanceada até mercados de alto crescimento ou alta incerteza.

3.7.2 Descrição dos cenários

Cada cenário é caracterizado por uma narrativa estratégica específica que reflete diferentes futuros possíveis para a competição entre mineração urbana e mineração espacial:

- **Cenário 0 ("Default"):** representa uma trajetória de desenvolvimento assimétrico moderado, com níveis de capital de desenvolvimento favorecendo a mineração espacial (US\$ 8 bilhões/ano para mineração urbana, US\$ 12 bilhões/ano para mineração espacial), refletindo uma configuração de "business-as-usual" na qual investimentos em exploração espacial recebem prioridade estratégica.
- **Cenário 1 ("Urban Dominant"):** teste de validação extrema na qual a mineração urbana recebe capital de desenvolvimento significativamente superior (US\$ 15 bilhões/ano mineração urbana vs US\$ 8 bilhões/ano mineração espacial), valores de pressão ambiental mais elevados favorecendo adoção urbana (75-95 para mineração urbana vs 20-45 para mineração espacial no modelo dinâmico), e coeficientes EDO favoráveis. Este cenário verifica se o modelo responde logicamente quando a mineração urbana é esmagadoramente favorecida.
- **Cenário 2 ("Space Dominant"):** teste de validação extrema na qual a mineração espacial recebe capital de desenvolvimento substancialmente superior (US\$ 6 bilhões/ano mineração urbana vs US\$ 20 bilhões/ano mineração espacial), valores de pressão ambiental mais elevados favorecendo adoção espacial (50-80 para mineração espacial vs 40-70 para mineração urbana no modelo dinâmico), e coeficientes EDO favoráveis. Este cenário verifica se o modelo responde apropriadamente quando a mineração espacial é fortemente vantajada.
- **Cenário 3 ("Balanced"):** representa competição balanceada com níveis de capital de desenvolvimento quase simétricos (US\$ 10 bilhões/ano mineração urbana, US\$ 12 bilhões/ano mineração espacial) e pressões ambientais similares para ambos os setores, explorando dinâmicas competitivas em condições de paridade.
- **Cenário 4 ("High Uncertainty"):** teste de estresse simulando um mercado avesso a risco com os menores níveis de capital de desenvolvimento no modelo (US\$ 6 bilhões/ano mineração urbana, US\$ 8 bilhões/ano mineração espacial) e coeficientes EDO simétricos para ambas as tecnologias, representando condições de austeridade e incerteza econômica.

- **Cenário 5 ("Realistic"):** parâmetros calibrados com base em tendências de mercado atuais (US\$ 9 bilhões/ano mineração urbana, US\$ 15 bilhões/ano mineração espacial), refletindo o momentum observado para mineração espacial em análises de mercado contemporâneas.
- **Cenário 6 ("Competitive Test"):** representa competição intensa com níveis elevados de capital de desenvolvimento (US\$ 12 bilhões/ano mineração urbana, US\$ 18 bilhões/ano mineração espacial), alta pressão regulatória e interação competitiva mais forte para ambos os setores, simulando um mercado hipercompetitivo.
- **Cenário 7 ("Accelerated Growth"):** mercado em "boom" com os mais altos níveis de capital de desenvolvimento no modelo (US\$ 14 bilhões/ano mineração urbana, US\$ 25 bilhões/ano mineração espacial) e taxas de crescimento elevadas, representando expansão tecnológica rápida em ambos os setores.

3.7.3 Parametrização do modelo estático

No modelo estático, todos os parâmetros de entrada permanecem constantes ao longo do horizonte de simulação de 20 anos. Esta configuração permite isolar os efeitos da estrutura competitiva fundamental sem a complexidade adicional de dinâmicas temporais.

3.7.3.1 Parâmetros de entrada

Os parâmetros de entrada para o modelo estático incluem Capital de Desenvolvimento, Pressão Ambiental e Demanda de Consumidor. A Tabela 1 apresenta os valores especificados para cada cenário.

Tabela 1 – Modelo Estático - Parâmetros de Cenário: Capital de Desenvolvimento, Pressão Ambiental e Demanda de Consumidor.

Cenário	Nome	Capital de Desenv. (US\$ bilhões/ano) (Urbana, Espacial)	Pressão Amb. (Índice 0-100) (Urbana, Espacial)	Demanda Cons. (ton/ano)
0	Default	(8,0; 12,0)	(70; 45)	4.663
1	Urban Dominant	(15,0; 8,0)	(85; 35)	4.663
2	Space Dominant	(6,0; 20,0)	(55; 65)	4.663
3	Balanced	(10,0; 12,0)	(65; 55)	4.663
4	High Uncertainty	(6,0; 8,0)	(60; 40)	4.663
5	Realistic	(9,0; 15,0)	(75; 42)	4.663
6	Competitive Test	(12,0; 18,0)	(80; 60)	4.663
7	Accelerated Growth	(14,0; 25,0)	(85; 55)	4.663

Nota: Todos os parâmetros permanecem constantes ao longo da simulação de 20 anos. O valor de Demanda de Consumidor (4.663 toneladas/ano) representa a média real de demanda global de ouro no período 2010-2024 (Council, 2024).

O valor de Capital de Desenvolvimento varia de US\$ 6 bilhões a US\$ 15 bilhões anuais para mineração urbana e de US\$ 8 bilhões a US\$ 25 bilhões anuais para mineração espacial. Estes

intervalos foram justificados por ordens de magnitude derivadas de custos de projetos análogos e do valor de mercado dos recursos, conforme documentado na literatura (Baldé et al., 2024; General, 2021; Rudenno, 2019; Office, 2021). Para mineração espacial, o parâmetro representa o custo do ciclo completo da missão - desenvolvimento tecnológico, lançamento, navegação e rendez-vous com o asteroide, extração e processamento *in-situ*, e retorno do material à Terra - bem como a distribuição de capital dentro da cadeia tecnológica que possibilita tais operações, incluindo investimentos em tecnologias de lançamento de baixo custo, melhorias em satélites e robótica, e pesquisa científica associada, que funcionam como pré-requisitos e impulsionadores do "motor de crescimento" do setor (Elvis; Lawrence; Seager, 2023).

A Pressão Ambiental é representada como um índice normalizado (escala 0-100), estabelecido relacionadamente com base em tendências qualitativas documentadas na literatura (Baldé et al., 2024; Elvis; Lawrence; Seager, 2023). A metodologia adota o princípio de que modelos devem incorporar "variáveis suaves- fatores qualitativos importantes para a dinâmica do sistema (Forrester, 1961; Sterman, 2000).

A Demanda de Consumidor foi fixada em 4.663 toneladas/ano, correspondendo à média real de demanda global de ouro entre 2010 e 2024 (Council, 2024).

3.7.3.2 Coeficientes do modelo

Os coeficientes das EDOs e do sistema Lotka-Volterra foram calibrados seguindo a abordagem de Modelagem Orientada por Padrões (Grimm et al., 2005). A Tabela 2 apresenta os coeficientes para cada cenário no modelo estático.

Os coeficientes a , b e c das EDOs quantificam a sensibilidade do crescimento tecnológico a cada fator. O ajuste iterativo destes coeficientes foi realizado para garantir que os parâmetros de crescimento intrínseco Lotka-Volterra α e δ resultantes permaneçam dentro do intervalo $[0,055; 0,115]$, correspondendo a um avanço tecnológico de 3 a 10 vezes ao longo de 20 anos, consistente com a teoria de difusão de inovação (Bass, 1969; Romer, 1990).

Os coeficientes de competição β e γ foram definidos por meio de calibração qualitativa para refletir a narrativa de cada cenário. Em cenários balanceados (Cenário 3), $\beta = \gamma$, refletindo simetria competitiva, enquanto em cenários extremos (Cenários 1 e 2), os valores são ajustados para favorecer a tecnologia dominante (Grimm et al., 2005).

3.7.4 Parametrização do modelo dinâmico

O modelo dinâmico introduz complexidade temporal ao permitir que parâmetros de entrada evoluam ao longo do horizonte de 20 anos, capturando condições de mercado em transformação.

3.7.4.1 Especificação de parâmetros temporais

A Tabela 3 apresenta os valores iniciais, taxas de crescimento e intervalos de Pressão Ambiental para o modelo dinâmico.

Tabela 2 – Modelo Estático - Coeficientes EDO e Lotka-Volterra para cada Cenário.

Cenário	Nome	Tecnologia	Coeficientes EDO (a, b, c) $\times 10^{-3}$	β	γ
0	Default	Urbana	(0,25; 2,0; 1,0)	0,022	0,018
		Espacial	(0,30; 2,0; 1,0)	0,022	0,018
1	Urban Dominant	Urbana	(0,30; 3,0; 1,5)	0,018	0,022
		Espacial	(0,34; 1,5; 0,8)	0,018	0,022
2	Space Dominant	Urbana	(0,32; 1,5; 0,8)	0,022	0,018
		Espacial	(0,35; 3,0; 1,8)	0,022	0,018
3	Balanced	Urbana	(0,28; 2,5; 1,2)	0,016	0,016
		Espacial	(0,28; 2,5; 1,2)	0,016	0,016
4	High Uncertainty	Urbana	(0,16; 1,5; 0,8)	0,014	0,012
		Espacial	(0,16; 1,5; 0,8)	0,014	0,012
5	Realistic	Urbana	(0,28; 2,5; 1,2)	0,020	0,018
		Espacial	(0,33; 2,5; 1,2)	0,020	0,018
6	Competitive Test	Urbana	(0,36; 3,0; 1,5)	0,022	0,020
		Espacial	(0,40; 3,0; 1,5)	0,022	0,020
7	Accelerated Growth	Urbana	(0,40; 4,0; 2,0)	0,020	0,018
		Espacial	(0,44; 4,0; 2,0)	0,020	0,018

Nota: Coeficientes EDO: a (sensibilidade ao capital de desenvolvimento), b (sensibilidade à pressão ambiental), c (sensibilidade à demanda de consumidor). Competição Lotka-Volterra: β mede como mineração espacial inibe mineração urbana (T_{urbana}), e γ mede como mineração urbana inibe mineração espacial ($T_{espacial}$). Os parâmetros de crescimento intrínseco (α , δ) são calculados dinamicamente a partir do motor de crescimento.

Tabela 3 – Modelo Dinâmico - Parâmetros de Cenário: Valores Iniciais, Taxas de Crescimento e Intervalos de Pressão Ambiental.

Cenário	Nome	Capital Desenv. Inicial (US\$ bilhões/ano) (Urbana, Espacial)	Taxas Crescimento (% ao ano) (Urb., Esp., Dem.)	Pressão Ambiental Intervalo (Mín-Máx) (Urbana, Espacial)
0	Default	(8,0; 12,0)	(3,0; 5,0; 2,0)	(60-85; 30-60)
1	Urban Dominant	(15,0; 8,0)	(4,0; 2,0; 2,5)	(75-95; 20-45)
2	Space Dominant	(6,0; 20,0)	(1,5; 7,0; 3,0)	(40-70; 50-80)
3	Balanced	(10,0; 12,0)	(3,5; 3,5; 2,5)	(55-75; 45-65)
4	High Uncertainty	(6,0; 8,0)	(1,0; 1,5; 1,5)	(45-70; 25-50)
5	Realistic	(9,0; 15,0)	(2,5; 4,5; 2,2)	(65-85; 30-55)
6	Competitive Test	(12,0; 18,0)	(4,0; 6,0; 3,5)	(70-90; 50-75)
7	Accelerated Growth	(14,0; 25,0)	(5,0; 8,0; 4,0)	(80-95; 55-85)

Nota: Capital de Desenvolvimento e Demanda de Consumidor crescem linearmente; Pressão Ambiental segue trajetórias estocásticas por partes.

Capital de Desenvolvimento e Demanda de Consumidor evoluem segundo funções de crescimento linear definidas pelas Equações (4) e (5), na qual D_0 e C_0 são valores iniciais e r_D e r_C são taxas de crescimento anual. As taxas de crescimento de capital de desenvolvimento (por exemplo, 3% para mineração urbana, 5% para mineração espacial no Cenário 0) refletem aumentos anuais realistas em financiamento de pesquisa e investimento em infraestrutura, calibradas a partir de tendências históricas em setores tecnológicos análogos (Romer, 1990) - cuja teoria do crescimento endógeno, reconhecida com o Prêmio Nobel de Economia em 2018 (The Committee for the Prize in Economic Sciences in Memory of Alfred Nobel, 2018), permanece como estrutura padrão para modelagem de inovação tecnológica. As taxas de crescimento de demanda de consumidor (por exemplo, 2% no Cenário 0) baseiam-se em projeções de crescimento populacional global e padrões de desenvolvimento econômico (Council, 2024).

As taxas diferenciais de crescimento (por exemplo, 5% espacial vs 3% urbana no Cenário 0) refletem a premissa estratégica de que mineração espacial recebe investimento acelerado como setor emergente de alto risco e alto retorno. Este crescimento diferencial cria trajetórias divergentes ao longo do período de 20 anos: $D_{espacial}(20) = D_0(1 + 0,05 \times 20)$ cresce para o dobro do valor inicial, enquanto $D_{urbana}(20) = D_0(1 + 0,03 \times 20)$ cresce apenas 60%.

3.7.4.2 Trajetórias estocásticas de pressão ambiental

Pressão Ambiental segue trajetórias estocásticas por partes para simular mudanças regulatórias imprevisíveis. Para cada iteração Monte Carlo, uma trajetória única é gerada por meio do seguinte algoritmo:

1. Sortear uma duração de passo $\Delta t_i \sim \mathcal{U}(\Delta t_{\min}, \Delta t_{\max})$ de uma distribuição uniforme.
2. Sortear uma amplitude de pressão correspondente $A_i \sim \mathcal{U}(P_{\min}, P_{\max})$ do intervalo específico do cenário.
3. Repetir até que a soma cumulativa das durações $\sum \Delta t_i$ exceda 20 anos.

O número de passos N varia entre iterações Monte Carlo ao invés de ser fixo. Os limites de duração de passo $(\Delta t_{\min}, \Delta t_{\max})$ são dependentes do cenário para refletir diferentes dinâmicas de mudança de política: passos mais curtos (0,5-2,0 anos) em cenários voláteis (1, 2, 6, 7) representam mudanças regulatórias frequentes, enquanto passos mais longos (1,0-5,0 anos) em cenários estáveis (0, 3, 4, 5) representam evolução gradual de políticas.

3.7.4.3 Coeficientes do modelo dinâmico

A Tabela 4 apresenta os coeficientes EDO e Lotka-Volterra para o modelo dinâmico. Alguns parâmetros, notadamente os coeficientes de competição, foram calibrados independentemente para os modelos estático e dinâmico. Esta escolha baseia-se em considerações teóricas sobre a natureza das dinâmicas competitivas em diferentes condições de mercado. No modelo dinâmico,

o mecanismo de crescimento composto causa aumento das taxas de crescimento intrínseco (α , δ) ao longo do tempo conforme o capital de desenvolvimento cresce, alterando fundamentalmente o equilíbrio entre termos de crescimento e termos de interação competitiva nas equações Lotka-Volterra.

Tabela 4 – Modelo Dinâmico - Coeficientes EDO e Lotka-Volterra para cada Cenário.

Cenário	Nome	Tecnologia	Coeficientes EDO (a, b, c) $\times 10^{-3}$	β	γ
0	Default	Urbana	(0,25; 2,0; 1,0)	0,022	0,018
		Espacial	(0,30; 2,0; 1,0)	0,022	0,018
1	Urban Dominant	Urbana	(0,30; 3,0; 1,5)	0,018	0,022
		Espacial	(0,34; 1,5; 0,8)	0,018	0,022
2	Space Dominant	Urbana	(0,32; 1,5; 0,8)	0,022	0,018
		Espacial	(0,35; 3,0; 1,8)	0,022	0,018
3	Balanced	Urbana	(0,28; 2,5; 1,2)	0,020	0,020
		Espacial	(0,28; 2,5; 1,2)	0,020	0,020
4	High Uncertainty	Urbana	(0,16; 1,5; 0,8)	0,025	0,025
		Espacial	(0,16; 1,5; 0,8)	0,025	0,025
5	Realistic	Urbana	(0,28; 2,5; 1,2)	0,019	0,015
		Espacial	(0,33; 2,5; 1,2)	0,019	0,015
6	Competitive Test	Urbana	(0,35; 3,0; 1,5)	0,024	0,020
		Espacial	(0,38; 3,5; 1,8)	0,024	0,020
7	Accelerated Growth	Urbana	(0,40; 3,5; 2,0)	0,018	0,015
		Espacial	(0,45; 4,0; 2,5)	0,018	0,015

Nota: Coeficientes EDO: a (sensibilidade ao capital de desenvolvimento), b (sensibilidade à pressão ambiental), c (sensibilidade à demanda de consumidor). Competição Lotka-Volterra: β mede como mineração espacial inibe mineração urbana (T_{urbana}), e γ mede como mineração urbana inibe mineração espacial ($T_{espacial}$). Os parâmetros de crescimento intrínseco ($\alpha(t)$, $\delta(t)$) são recalculados a cada passo temporal a partir do motor de crescimento em evolução.

O ajuste dos coeficientes de competição reflete uma mudança na natureza da própria competição de mercado. Em ambientes dinâmicos de alto crescimento (particularmente Cenários 5, 6 e 7), empresas competindo por mercados emergentes tipicamente focam recursos estratégicos em capturar participação de mercado em rápida expansão por meio de inovação e construção de capacidade (refletido nos parâmetros de crescimento intrínseco α , δ) ao invés de deslocar diretamente competidores de posições de mercado estabelecidas (termos de interação competitiva β , γ) (Agarwal, 1998). Esta distinção entre "expansão de mercado vs roubo de mercado" é bem documentada na literatura de adoção tecnológica (Geroski, 2000). Inversamente, em cenários balanceados ou de baixo crescimento (Cenários 3 e 4), nos quais o potencial de expansão de mercado é limitado, interações competitivas se intensificam à medida que empresas devem capturar participação de mercado de rivais, justificando coeficientes de competição mais elevados.

Esta abordagem de calibração específica por cenário garante que cada cenário mantenha sua narrativa estratégica distinta dentro da estrutura matemática do modelo dinâmico, ao invés de permitir que o mecanismo de composição homogeneíze todos os resultados em direção à dominância de mineração espacial. A calibração segue o princípio de que parâmetros de estrutura de mercado (β , γ) devem refletir o regime competitivo (expansão de mercado vs deslocamento

competitivo), não meramente escalar com taxas de crescimento intrínseco (Agarwal, 1998; Geroski, 2000).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação do método de simulação ao conjunto de cenários definidos produziu resultados que validam a lógica interna do modelo e revelam as dinâmicas de competição tecnológica sob diferentes condições. As propriedades estatísticas dos resultados da simulação Monte Carlo foram avaliadas por meio de testes de convergência, conforme detalhado na validação do modelo.

4.1 VALIDAÇÃO DO MODELO

Para estabelecer a validade da lógica competitiva central, dois cenários de controle com parâmetros extremos foram projetados. Tanto o modelo estático quanto o dinâmico responderam conforme esperado, confirmando que a arquitetura de simulação reage corretamente aos parâmetros de entrada.

No Cenário 1 ("Urban Dominant"), no qual capital de desenvolvimento e pressão ambiental favoreceram esmagadoramente a mineração urbana, o modelo projetou 100% de probabilidade de dominância para este setor. No Cenário 2 ("Space Dominant"), configurado com capital de desenvolvimento intensivo no setor espacial, a simulação resultou em 0% de probabilidade de dominância para mineração urbana. Esta resposta consistente valida a estrutura interna do modelo e constrói confiança para análise dos demais cenários exploratórios.

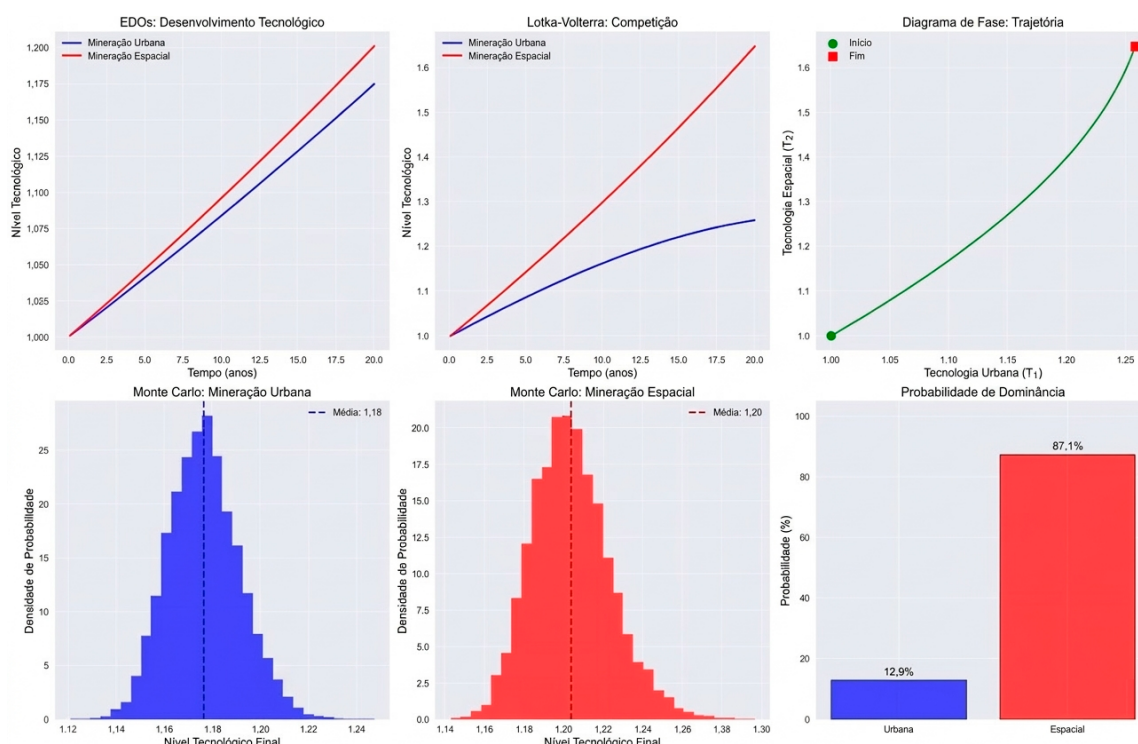
4.2 RESULTADOS DO MODELO ESTÁTICO

Sob as premissas do modelo estático, a mineração espacial mantém maior probabilidade de dominância na maioria dos cenários. No cenário base "Default"(Cenário 0), a mineração urbana alcança apenas 12,9% de probabilidade de dominância, enquanto no cenário "Realistic"(Cenário 5), este valor cai ainda mais para 10,8%. O cenário "High Uncertainty"(Cenário 4) exhibe as dinâmicas competitivas mais balanceadas, com 48,1% de probabilidade de dominância urbana, demonstrando que quando o capital de desenvolvimento é baixo e simétrico, os resultados competitivos tornam-se mais equilibrados.

A análise gráfica completa para o Cenário 0 ("Default") sob o modelo estático revela como a competição tecnológica se desenrola sob premissas de parâmetros constantes. O resultado é consequência direta da lógica híbrida do modelo, que traduz entradas de cenário em força competitiva. No cenário "Default", por exemplo, o maior capital de desenvolvimento alocado à mineração espacial resulta em uma taxa de crescimento intrínseco dinamicamente calculada (δ) que supera a da mineração urbana (α), justificando sua probabilidade dominante. Inversamente, a competição torna-se mais balanceada no cenário "High Uncertainty"(Cenário 4). Aqui, os níveis de capital de desenvolvimento baixos e quase iguais para ambos os setores levam a taxas

de crescimento quase idênticas, resultando em um resultado próximo ao equilíbrio. A Figura 6 apresenta a saída gráfica completa desta análise.

Figura 6 – Análise Completa para o Cenário 0 (Default) - Modelo Estático. **Painéis superiores:** desenvolvimento tecnológico EDO (esquerda), interação competitiva Lotka-Volterra (centro), e diagrama de fase mostrando a trajetória no espaço de estados (T_{urbana} , $T_{espacial}$) das condições iniciais (verde) às finais (vermelho) (direita). **Painéis inferiores:** distribuições de probabilidade Monte Carlo para níveis tecnológicos finais de mineração urbana (esquerda) e espacial (centro-direita), e probabilidades de dominância agregadas (direita).



Fonte: Elaborado pelo autor.

A saída gráfica detalhada ilustra a estrutura em três camadas do modelo. A linha superior apresenta o núcleo determinístico: o painel esquerdo mostra trajetórias de crescimento EDO isoladas para ambas as tecnologias ao longo do horizonte de 20 anos, em que as curvas exponenciais definidas pela Equação (3) revelam potencial de crescimento intrínseco sem competição. A mineração espacial exibe uma trajetória mais íngreme devido ao maior capital de desenvolvimento (US\$ 12 bilhões/ano vs US\$ 8 bilhões/ano para mineração urbana), que supera sua menor pressão ambiental (45 vs 70 na escala normalizada). O motor de crescimento definido pela Equação (2) produz níveis tecnológicos finais de aproximadamente 1,20 para mineração espacial versus 1,18 para mineração urbana, mostrando que a vantagem de capital (ponderada pelo coeficiente a) domina sobre a desvantagem de pressão (ponderada pelo coeficiente b).

O painel central introduz dinâmicas competitivas por meio do sistema Lotka-Volterra. A interação direta de mercado amplifica a vantagem inicial: a lacuna tecnológica se amplia de 2,6% (EDO) para 31% (Lotka-Volterra), com níveis finais atingindo 1,65 para mineração espacial e 1,26 para mineração urbana. O painel direito apresenta o diagrama de fase no espaço de estados

$(T_{urbana}, T_{espacial})$, traçando a trajetória desde condições iniciais simétricas (ponto verde em (1,0; 1,0)) até o estado final assimétrico (ponto vermelho). A trajetória curvada para cima mostra a mineração espacial acelerando ($T_{espacial}$ cresce mais rápido) enquanto a mineração urbana é suprimida (T_{urbana} cresce mais lentamente) devido aos termos de interação competitiva presentes nas Equações (7) e (8).

A linha inferior quantifica incerteza por meio de análise Monte Carlo. Os painéis esquerdo e central exibem distribuições de densidade de probabilidade de níveis tecnológicos finais após 10.000 iterações estocásticas, nas quais valores de parâmetros são amostrados aleatoriamente de suas distribuições para cada iteração. A distribuição da mineração urbana (esquerda, azul) concentra-se em torno de 1,18 com variância relativamente baixa, refletindo o potencial de crescimento limitado do menor capital de desenvolvimento. A distribuição da mineração espacial (centro, laranja) exibe uma média superior (1,20) e dispersão similar, indicando posição competitiva superior impulsionada por maior capital de desenvolvimento de base.

O painel direito sintetiza estas distribuições em probabilidades de dominância: o modelo estático projeta 12,9% de probabilidade de dominância de mineração urbana versus 87,1% para mineração espacial neste cenário base. Este resultado reflete as 1.290 iterações Monte Carlo (de 10.000) em que as combinações aleatórias de parâmetros favoreceram mineração urbana apesar da vantagem estrutural da mineração espacial em capital de desenvolvimento (US\$ 12 bilhões vs US\$ 8 bilhões anualmente).

4.3 RESULTADOS DO MODELO DINÂMICO

Esta seção apresenta os resultados do modelo dinâmico, no qual os parâmetros de entrada evoluem ao longo do horizonte de simulação. Antes da análise dos resultados propriamente ditos, descreve-se o desenvolvimento matemático que fundamenta a extensão dinâmica, incluindo a solução analítica da EDO com motor de crescimento variável, a parametrização numérica utilizada e os procedimentos de simulação Monte Carlo adotados.

4.3.1 Desenvolvimento matemático e parametrização

O modelo dinâmico preserva a equação fundamental $dT/dt = K(t) \cdot T$ (Equação (1)), porém com motor de crescimento variável no tempo conforme a Equação (6). Apesar de $K(t)$ não ser constante, a EDO permanece separável e admite solução exata:

$$T(t) = T(0) \cdot \exp\left(\int_0^t K(\tau) d\tau\right) \quad (11)$$

na qual a integral acumula o efeito do motor de crescimento ao longo do tempo. No modelo estático, K é constante e a integral reduz-se a $K \cdot t$, recuperando a Equação (3). No modelo dinâmico, as parcelas de $K(t)$ evoluem conforme as Equações (4), (5) e pela trajetória estocástica $P(t)$.

Para o sistema Lotka-Volterra (Equações (7) e (8)), não existe solução analítica geral devido ao acoplamento não-linear entre as duas espécies tecnológicas. A integração numérica é realizada pela função `odeint` da biblioteca SciPy (Virtanen et al., 2020).

Tomando o Cenário 0 ("Default") como exemplo de referência, a parametrização de entrada é a seguinte. Capital de desenvolvimento: $D_0^{urbana} = 8,0$ bilhões US\$/ano com taxa de crescimento $r_D^{urbana} = 3\%/ano$, e $D_0^{espacial} = 12,0$ bilhões US\$/ano com $r_D^{espacial} = 5\%/ano$. Demanda de consumidor: $C_0 = 4663$ toneladas/ano com $r_C = 2\%/ano$. Pressão ambiental: $P_{urbana}(t) \in [60; 85]$ com degraus de 0,5 a 3,0 anos, e $P_{espacial}(t) \in [30; 60]$ com degraus de 1,0 a 4,0 anos. Coeficientes EDO: $a_{urbana} = 0,000250$, $b_{urbana} = 0,002$, $c_{urbana} = 0,001$ (mineração urbana) e $a_{espacial} = 0,000300$, $b_{espacial} = 0,002$, $c_{espacial} = 0,001$ (mineração espacial). Condições iniciais: $T_{urbana}(0) = T_{espacial}(0) = 1,0$.

A simulação foi implementada em Python, utilizando NumPy para computação vetorial, SciPy para integração numérica, e Matplotlib/Seaborn para visualização. Para cada cenário, 10.000 iterações Monte Carlo são executadas: em cada iteração, os coeficientes EDO (a, b, c), o capital de desenvolvimento (D_0) e a demanda (C_0) são amostrados de distribuições Log-Normal, e uma trajetória $P(t)$ independente é gerada estocasticamente. A probabilidade de dominância é calculada como a fração das iterações em que $T_{urbana}(20) > T_{espacial}(20)$.

4.3.2 Resultados e interpretação

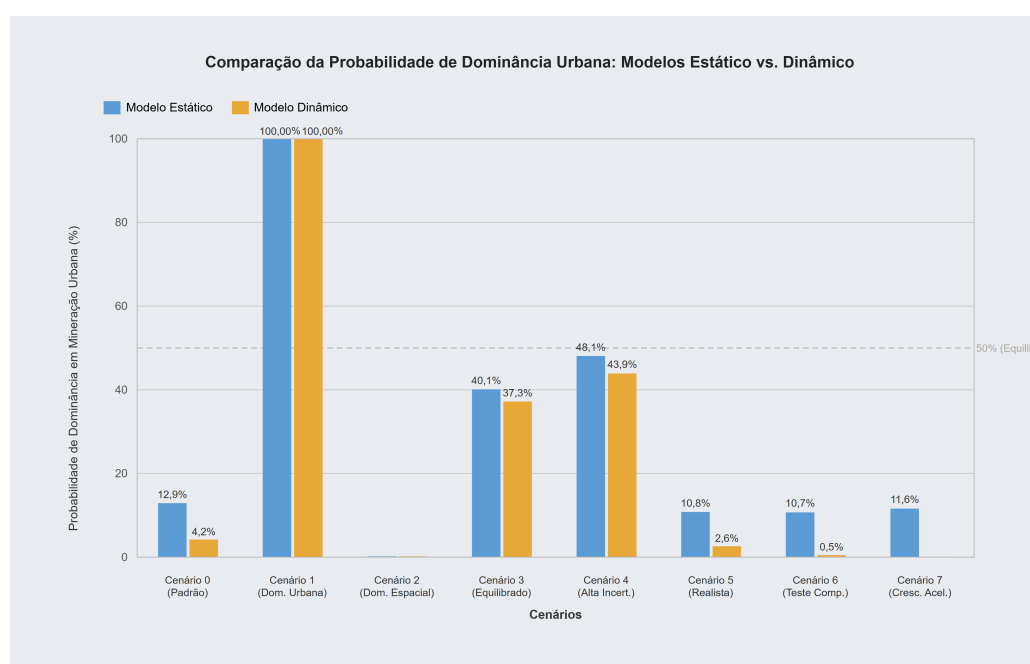
A introdução de parâmetros evolutivos no tempo altera consideravelmente o panorama competitivo. A tendência geral é uma amplificação dos resultados do modelo estático: a tecnologia que mantinha vantagem inicial torna-se ainda mais dominante. Este efeito é especialmente evidente nos cenários "Default"(Cenário 0) e "Realistic"(Cenário 5), nos quais a probabilidade de dominância urbana decresce acentuadamente em comparação com o modelo estático. O modelo dinâmico sugere que não é apenas a magnitude do capital de desenvolvimento, mas sua taxa de crescimento que determina o sucesso a longo prazo. Uma tecnologia com maior capital de desenvolvimento inicial e taxa de crescimento superior beneficia-se de um efeito composto ao longo do horizonte de 20 anos, ampliando a lacuna tecnológica e tornando sua dominância mais decisiva.

4.4 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MODELOS

A comparação direta entre os dois modelos quantifica o impacto da introdução de dinâmicas temporais. A observação principal é um "efeito de amplificação": o modelo dinâmico não inverte a tendência do vencedor na maioria dos cenários, mas torna a vitória mais decisiva. A Figura 7 ilustra essa comparação para todos os cenários simulados. O gráfico é um diagrama de barras agrupadas no qual cada cenário (eixo horizontal, Cenários 0 a 7) é representado por um par de barras lado a lado: a barra azul corresponde ao modelo estático e a barra laranja ao modelo dinâmico. O eixo vertical indica a probabilidade de dominância da mineração urbana

(%). Assim, barras mais altas indicam maior probabilidade de a mineração urbana superar a mineração espacial ao final do horizonte de 20 anos; quando ambas as barras são baixas, a mineração espacial prevalece.

Figura 7 – Comparação de Probabilidade de Dominância Urbana entre Cenários Simulados: Modelo Estático (barras azuis) vs. Modelo Dinâmico (barras laranja). O eixo horizontal apresenta os oito cenários (0 a 7) e o eixo vertical a probabilidade de dominância urbana (%). Para cada cenário, a diferença entre as duas barras evidencia o efeito de amplificação introduzido pelas dinâmicas temporais. Os Cenários 1 e 2 servem como testes extremos de validação (100% e 0% respectivamente). O Cenário 4 (High Uncertainty) exhibe a competição mais balanceada em ambos os modelos, enquanto cenários favorecendo mineração espacial (0, 5, 6, 7) mostram reduções expressivas de probabilidade no modelo dinâmico devido a efeitos de crescimento composto.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Quantitativamente, a comparação revela mudanças dramáticas nos resultados competitivos. Em cenários-chave como "Default"(0) e "Realistic"(5), a probabilidade de dominância urbana cai substancialmente do modelo estático (12,9% e 10,8%, respectivamente) para o modelo dinâmico (4,2% e 2,6%, respectivamente). Este declínio é consequência direta do efeito composto de taxas de crescimento de capital de desenvolvimento mais altas para mineração espacial (por exemplo, 5% para espacial vs 3% para urbana no Cenário Default), que amplifica sua vantagem inicial de capital apesar de ter menor pressão ambiental que a mineração urbana. Conforme apresentado na parametrização do modelo dinâmico, as trajetórias de capital de desenvolvimento divergem ao longo de 20 anos: a trajetória espacial dobra de valor enquanto a urbana cresce apenas 60%.

Adicionalmente, o refinamento metodológico implementando trajetórias dinâmicas de pressão ambiental $P(t)$ (ao invés de médias estáticas) introduz variabilidade estocástica que pode amplificar ou amortecer vantagens competitivas dependendo da trajetória específica realizada em cada simulação. Exceções notáveis são os cenários "Balanced"(Cenário 3) e "High Uncer-

tainty"(Cenário 4), que permanecem competitivos em ambos os modelos. O Cenário 4 exibe a competição mais balanceada com probabilidades de dominância urbana de 48,1% (estático) e 43,9% (dinâmico), enquanto o Cenário 3 mantém 40,1% (estático) e 37,3% (dinâmico). Os níveis baixos e simétricos de capital de desenvolvimento nestes cenários impedem que qualquer tecnologia estabeleça uma vantagem composta significativa, resultando em resultados próximos ao equilíbrio. Em contraste, cenários extremos como Accelerated Growth (Cenário 7) e Space Dominant (Cenário 2) atingem dominância de mineração espacial quase absoluta com 0% de probabilidade urbana no modelo dinâmico, demonstrando como dinâmicas temporais amplificam assimetrias.

4.5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

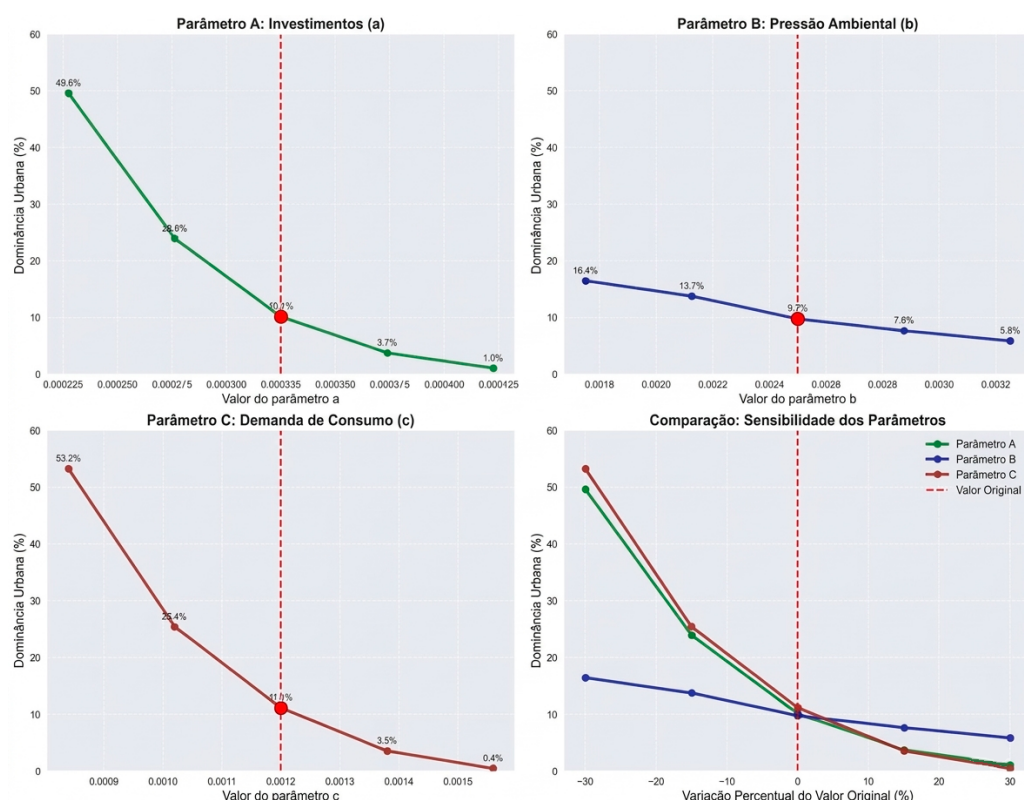
Para melhor compreender os fatores governantes do sistema e testar a confiabilidade das conclusões, foi conduzida análise de sensibilidade *one-at-a-time* (OAT) (Hamby, 1994; Sargent, 2010). Este método envolve variar parâmetros individualmente enquanto mantém outros constantes para avaliar sua influência no resultado (Hamby, 1994; Law, 2015). Utilizando o Cenário 5 ("Realistic") como caso base, cada um dos três principais coeficientes EDO - "a"(sensibilidade ao capital de desenvolvimento), "b"(sensibilidade à pressão ambiental), e "c"(sensibilidade à demanda de consumidor) - foi variado individualmente em $\pm 30\%$ de seu valor original. Este intervalo foi escolhido para avaliar a sensibilidade política do modelo variando suas premissas centrais sobre um intervalo plausível de incerteza, garantindo que percepções estratégicas derivadas do modelo permaneçam válidas (Law, 2015; Sterman, 2000).

4.5.1 Sensibilidade do modelo estático

Os resultados para o modelo estático sugerem que o sistema é altamente sensível aos parâmetros "a" e "c". Uma variação de 30% no parâmetro de capital de desenvolvimento ("a") ou demanda de consumidor ("c") pode alterar a probabilidade de dominância em aproximadamente 48-53 pontos percentuais, reforçando a hipótese de que os impulsionadores econômicos parecem ser os fatores decisivos na determinação da competitividade tecnológica. Esta preponderância de fatores econômicos sobre pressão regulatória é consistente com a teoria da mudança técnica direcionada (Acemoglu, 2002), segundo a qual a direção da inovação responde primariamente a incentivos de mercado e à rentabilidade relativa dos investimentos em P&D, e não apenas a mandatos regulatórios. A contribuição desta análise reside não na constatação de que capital importa (o que seria esperado em economias de mercado) mas na quantificação da assimetria: pressão ambiental isolada parece insuficiente para reverter vantagens competitivas consolidadas por investimento estratégico em desenvolvimento tecnológico. A Figura 8 sumariza esses resultados em uma grade de quatro painéis. Nos três primeiros painéis (superior esquerdo, superior direito e inferior esquerdo), cada curva mostra o efeito da variação isolada de um coeficiente (*a*, *b* ou *c*, respectivamente) sobre a probabilidade de dominância urbana (eixo vertical, em %). O

eixo horizontal representa o valor absoluto do coeficiente variado, e a linha vertical vermelha tracejada indica o valor original do Cenário 5. O quarto painel (inferior direito) sobrepõe as três curvas em escala normalizada (variação percentual em relação ao valor original no eixo horizontal), permitindo comparar diretamente a sensibilidade do sistema a cada coeficiente: quanto mais inclinada a curva, maior a influência do parâmetro sobre o resultado competitivo.

Figura 8 – Análise de Sensibilidade dos Parâmetros EDO (Modelo Estático). Os três primeiros painéis mostram, individualmente, o efeito da variação dos coeficientes a (capital de desenvolvimento, em verde), b (pressão ambiental, em azul) e c (demanda de consumidor, em vermelho) sobre a probabilidade de dominância urbana (%). A linha tracejada vermelha indica o valor original do parâmetro. O quarto painel sobrepõe as três curvas em escala normalizada (variação percentual), evidenciando que os fatores econômicos (a e c) apresentam sensibilidade substancialmente maior que a pressão ambiental (b).



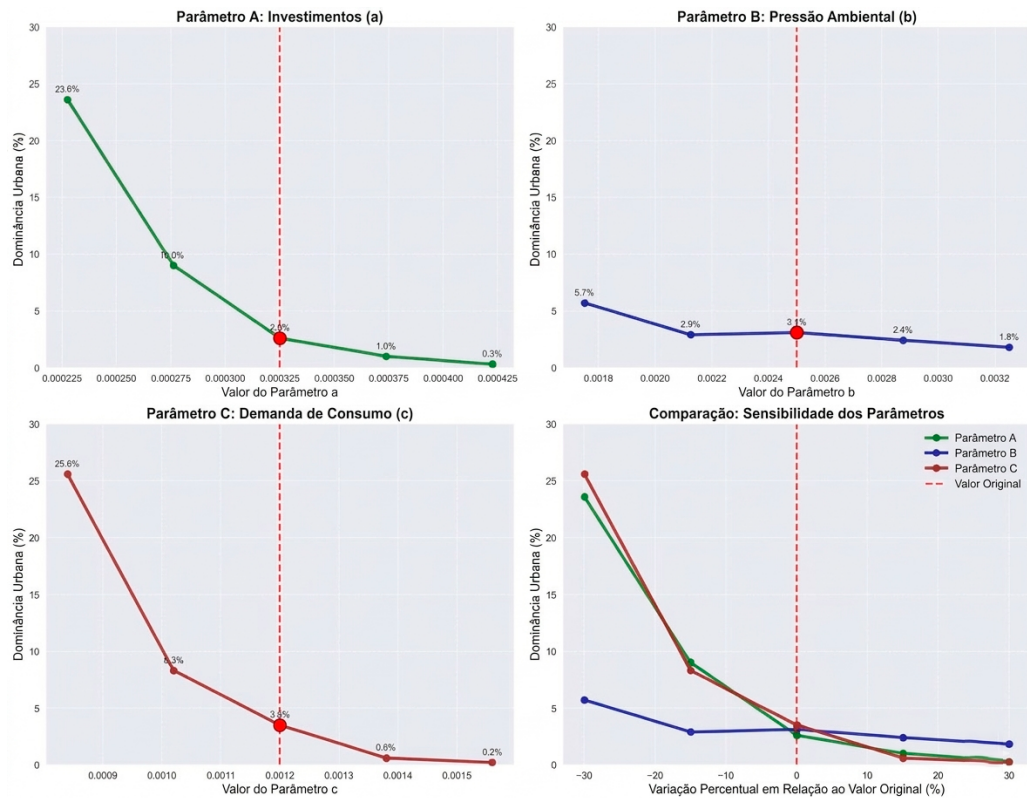
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5.2 Sensibilidade do modelo dinâmico

A mesma análise foi replicada utilizando o modelo dinâmico estendido. Os resultados reforçam a constatação original: os parâmetros econômicos " a " e " c " permanecem as alavancas mais influentes no modelo dinâmico. A importância do capital de desenvolvimento e demanda de consumidor aparenta ser uma característica fundamental do sistema competitivo sob estudo, não um artefato do modelo mais simples. A Figura 9 apresenta os resultados desta análise. A estrutura visual é idêntica à da Figura 8: três painéis individuais (coeficientes a , b e c) com o valor

original marcado pela linha tracejada, e um quarto painel comparativo em escala normalizada. A leitura segue a mesma lógica: curvas mais inclinadas indicam maior sensibilidade do resultado competitivo ao parâmetro em questão.

Figura 9 – Análise de Sensibilidade dos Parâmetros EDO (Modelo Dinâmico). Estrutura análoga à Figura 8: os três primeiros painéis mostram o efeito individual da variação dos coeficientes a (verde), b (azul) e c (vermelho) sobre a probabilidade de dominância urbana (%), com a linha tracejada vermelha indicando o valor original. O quarto painel sobrepõe as três curvas em escala normalizada (variação percentual). Os parâmetros econômicos (a e c) confirmam-se como os mais influentes também no modelo dinâmico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.6 DINÂMICAS DE COMPETIÇÃO LOTKA-VOLTERRA

A camada Lotka-Volterra revela mecanismos competitivos não visíveis em probabilidades de dominância agregadas. A análise dos níveis tecnológicos finais alcançados por cada setor após competição direta revela padrões de amplificação competitiva e divergência.

A análise sugere amplificação competitiva como mecanismo central. Tomando o cenário Accelerated Growth (Cenário 7) no modelo dinâmico como exemplo (Tabela 5), o crescimento EDO isolado produz níveis tecnológicos finais de $T_{urbana} = 1,63$ e $T_{espacial} = 2,19$, resultando em uma razão espacial-para-urbana de $2,19/1,63 \approx 1,34$ - ou seja, a mineração espacial atinge nível 34% superior ao da mineração urbana quando cada tecnologia cresce isoladamente, sem interação competitiva. Após incorporar competição direta por meio das dinâmicas Lotka-

Tabela 5 – Comparação de Níveis Tecnológicos Finais: EDO (Crescimento Isolado) vs. Lotka-Volterra (Crescimento Competitivo).

Cenário	Modelo Estático			Modelo Dinâmico		
	EDO U/E	L-V U/E	Razão E/U	EDO U/E	L-V U/E	Razão E/U
0 Default	1,17/1,20	1,26/1,65	1,31	1,21/1,27	1,27/1,65	1,30
3 Balanced	1,22/1,23	1,74/1,81	1,04	1,28/1,29	1,60/1,66	1,04
4 High Uncertainty	1,12/1,12	1,26/1,33	1,06	1,13/1,13	1,04/1,05	1,01
5 Realistic	1,22/1,26	1,50/1,99	1,33	1,27/1,35	1,51/2,15	1,42
6 Competitive Test	1,32/1,38	1,80/2,76	1,53	1,42/1,63	1,52/3,30	2,17
7 Accelerated Growth	1,44/1,53	2,14/3,46	1,62	1,63/2,19	1,70/5,01	2,95

Nota: U = Mineração Urbana, E = Mineração Espacial. Razão E/U é calculada como (L-V Espacial)/(L-V Urbana), quantificando a vantagem competitiva da mineração espacial sobre mineração urbana após competição direta de mercado. Valores próximos a 1,0 indicam competição balanceada.

Volterra, os níveis finais passam a $T_{urbana} = 1,70$ e $T_{espacial} = 5,01$, elevando a razão para $5,01/1,70 \approx 2,95$. O fator de amplificação competitiva, definido como a razão entre as duas proporções, é $2,95/1,34 \approx 2,20$. Este fator quantifica como a competição de mercado amplifica vantagens iniciais: a vantagem de $1,34\times$ em crescimento isolado torna-se uma vantagem de $2,95\times$ sob dinâmicas competitivas, mais que dobrando a lacuna relativa por meio de ciclos de retroalimentação de captura de recursos, aquisição de talentos e momentum político.

O efeito de amplificação competitiva é mais pronunciado no modelo dinâmico. No Cenário 6 (Competitive Test), o modelo estático produz uma razão espacial-para-urbana de 1,53 (calculada como $2,76/1,80$), enquanto o modelo dinâmico produz 2,17 (calculada como $3,30/1,52$), representando um aumento de 42% na vantagem competitiva devido a dinâmicas temporais. No Cenário 7 (Accelerated Growth), a razão aumenta de 1,62 no modelo estático ($3,46/2,14$) para 2,95 no modelo dinâmico ($5,01/1,70$), um aumento de 82%. Estas amplificações sugerem que quando capital de desenvolvimento e demanda de consumidor crescem ao longo do tempo ao invés de permanecerem constantes, vantagens competitivas podem se compor por meio de ciclos de retroalimentação positivo inerentes aos termos de interação Lotka-Volterra.

O cenário High Uncertainty (Cenário 4) exhibe amplificação competitiva mínima, com razões próximas à unidade em ambos os modelos (1,06 e 1,01, respectivamente). Níveis baixos e simétricos de capital de desenvolvimento impedem que qualquer tecnologia estabeleça momentum suficiente para dominar. Este resultado próximo ao equilíbrio reflete-se em níveis tecnológicos finais quase iguais e probabilidades de dominância balanceadas.

A relação entre valores finais EDO e Lotka-Volterra revela dinâmicas competitivas contrastantes dependendo das características do cenário. Em cenários de alto crescimento (0, 5, 6, 7), a competição amplifica o desenvolvimento tecnológico: as dinâmicas Lotka-Volterra produzem níveis finais mais altos que crescimento EDO isolado, à medida que pressão competitiva por participação de mercado impulsiona inovação acelerada. Este padrão de amplificação também aparece no cenário Balanced (Cenário 3), no qual crescimento EDO isolado produz níveis tecnológicos de 1,28/1,29, mas competição direta por meio de dinâmicas Lotka-Volterra

aumenta valores finais para 1,60/1,66, demonstrando que mesmo em condições balanceadas com parâmetros quase simétricos, dinâmicas competitivas podem impulsionar maior realização absoluta quando existem oportunidades de expansão de mercado.

Entretanto, no cenário de baixo crescimento High Uncertainty (Cenário 4), a competição exibe um efeito de supressão. Aqui, os níveis mais baixos de capital de desenvolvimento no modelo levam a valores Lotka-Volterra (1,04/1,05) substancialmente abaixo do crescimento EDO isolado (1,13/1,13), com uma razão próxima à unidade indicando quase estagnação sob competição intensa com recursos limitados. Esta supressão ocorre porque quando tecnologias têm condições iniciais quase simétricas e motores de crescimento severamente restritos, os termos de interação competitiva ($-\beta T_{urbana} T_{espacial}$ e $-\gamma T_{urbana} T_{espacial}$) agem como forças de arrasto mútuo que desaceleram o desenvolvimento de ambas as tecnologias. Recursos investidos em posicionamento competitivo (captura de mercado, pesquisa e desenvolvimento defensivo) desviam capital de inovação produtiva, resultando em menor realização tecnológica absoluta para ambos os setores. Estas dinâmicas contrastantes indicam que competição de mercado não é universalmente promotora de crescimento - seu efeito depende criticamente do ambiente de recursos e assimetrias competitivas iniciais.

Estes resultados validam a arquitetura híbrida. Um modelo utilizando apenas a camada EDO subestimaria sistematicamente o grau de concentração de mercado, enquanto um modelo Lotka-Volterra com parâmetros estáticos perderia como decisões de política econômica traduzem-se em força competitiva. A integração de ambas as camadas captura impulsionadores econômicos moldando potencial (EDO), que determina resultados competitivos (Lotka-Volterra), que afeta disponibilidade de recursos para capital de desenvolvimento futuro, fechando o ciclo de retroalimentação.

4.7 DISCUSSÃO

A coerência interna entre as camadas do modelo foi assegurada por um refinamento metodológico: tanto a análise determinística (EDO/Lotka-Volterra) quanto a estocástica (Monte Carlo) utilizam a mesma função dinâmica de pressão ambiental $P(t)$, gerada como trajetória estocástica por passos. A análise determinística apresenta uma realização representativa, enquanto a Monte Carlo explora 10.000 trajetórias independentes, quantificando a incerteza regulatória. Esta abordagem unificada fortalece a confiança nos resultados consolidados a seguir.

Para integrar os resultados das diferentes camadas analíticas em uma visão de conjunto, a Tabela 6 apresenta uma matriz-síntese de viabilidade competitiva. Os cenários estão ordenados por probabilidade decrescente de dominância urbana no modelo dinâmico, e a escala de cores indica quatro níveis de viabilidade: verde para dominância urbana, amarelo para competição aberta, laranja para vantagem espacial e vermelho para dominância espacial. As colunas de probabilidade indicam a fração das 10.000 iterações Monte Carlo em que $T_{urbana}(20) > T_{espacial}(20)$, e a Razão L-V corresponde ao quociente entre os níveis tecnológicos finais espacial

e urbano após competição Lotka-Volterra (valores maiores que 1 indicam vantagem espacial).

Tabela 6 – Matriz-síntese de viabilidade competitiva por cenário.

Cenário	Dom. Urbana (%)		Razão L-V (E/U)		Classificação
	Est.	Din.	Est.	Din.	
1 Urban Dominant [†]	100,0	100,0	0,33	0,33	Viabilidade Urbana
4 High Uncertainty	48,1	43,9	1,06	1,01	Competição Aberta
3 Balanced	40,1	37,3	1,04	1,04	Competição Aberta
0 Default	12,9	4,2	1,31	1,30	Vantagem Espacial
5 Realistic	10,8	2,6	1,33	1,42	Vantagem Espacial
6 Competitive Test	10,7	0,5	1,53	2,17	Dominância Espacial
7 Accelerated Growth	11,6	0,0	1,62	2,95	Dominância Espacial
2 Space Dominant [†]	0,0	0,0	5,31	5,31	Dominância Espacial

Nota: [†] Cenários de validação com parâmetros extremos. Razão L-V (E/U) = nível tecnológico final Espacial / Urbana após competição Lotka-Volterra. Valores > 1 indicam vantagem espacial; valores < 1 indicam vantagem urbana.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A leitura da matriz revela três regiões de comportamento competitivo distintas (excluídos os cenários de validação (1 e 2), cujo papel é confirmar a coerência lógica do modelo) que estruturam a discussão a seguir.

Competição Aberta (Cenários 3 e 4). Os cenários Balanced e High Uncertainty apresentam probabilidades de dominância urbana de 37,3% e 43,9% no modelo dinâmico, com razões Lotka-Volterra próximas à unidade (1,04 e 1,01). Ambos compartilham uma característica central: níveis de capital de desenvolvimento baixos e aproximadamente simétricos entre as duas tecnologias. Quando nenhuma tecnologia detém vantagem expressiva em investimento, a competição torna-se genuinamente aberta e a probabilidade de dominância aproxima-se de 50%. A passagem do modelo estático para o dinâmico produz variação modesta (de 40,1% para 37,3% no Cenário 3; de 48,1% para 43,9% no Cenário 4), confirmando que, na ausência de assimetrias de capital, o efeito de amplificação temporal é limitado.

Vantagem Espacial (Cenários 0 e 5). Nos cenários Default e Realistic, a probabilidade de dominância urbana situa-se entre 2,6% e 4,2% no modelo dinâmico, com razões Lotka-Volterra de 1,30 e 1,42, respectivamente. A vantagem é impulsionada por assimetrias moderadas de capital de desenvolvimento (US\$ 12 bilhões vs US\$ 8 bilhões no Cenário 0) e, crucialmente, por taxas de crescimento diferenciadas (5% para espacial vs 3% para urbana). A transição do modelo estático para o dinâmico é reveladora: a probabilidade urbana cai de 12,9% para 4,2% (Cenário 0) e de 10,8% para 2,6% (Cenário 5), reduções de 67% e 76%, respectivamente. Estes declínios refletem o efeito de crescimento composto: ao longo de 20 anos, a trajetória espacial dobra seu capital enquanto a urbana cresce apenas 60%, amplificando vantagens que seriam modestas em análise estática. A dinâmica observada alinha-se com a visão de que substituição tecnológica depende fundamentalmente da capacidade de manter taxa de crescimento superior à tecnologia concorrente (Bhargava, 1989).

Dominância Espacial (Cenários 6 e 7). Os cenários Competitive Test e Accelerated Growth configuram o extremo do espectro, com probabilidades urbanas de 0,5% e 0,0%, razões Lotka-Volterra de 2,17 e 2,95, e fatores de amplificação competitiva de até 2,20 (Cenário 7). Nestes cenários, a combinação de capital assimétrico elevado com taxas de crescimento acentuadamente desiguais produz dominância virtualmente absoluta. O mecanismo é duplo: crescimento composto via EDO ($T_{espacial}$ atinge 5,01 no Cenário 7, contra 2,19 em crescimento isolado) combinado com supressão competitiva via termos de interação Lotka-Volterra ($-\beta T_{urbana} T_{espacial}$), que redistribuem recursos de mercado para a tecnologia líder. A competição opera como dinâmica de “o vencedor leva a maior parte” (*winner-take-most*), consistente com padrões observados na teoria de competição tecnológica (Geroski, 2000). A transição do nível estático (10,7% e 11,6%) para o dinâmico (0,5% e 0,0%) representa reduções de 95% e 100%, ilustrando que modelos estáticos podem subestimar sistematicamente o grau de concentração de mercado.

Um padrão transversal emerge da leitura horizontal da Tabela 6: o efeito de amplificação temporal é proporcional à assimetria de capital. Em cenários balanceados (3, 4), a transição estático→dinâmico altera probabilidades em menos de 5 pontos percentuais. Em cenários de assimetria moderada (0, 5), a redução é de 8 a 9 pontos percentuais. Em cenários de assimetria elevada (6, 7), a redução atinge 10 a 12 pontos, eliminando qualquer viabilidade urbana residual. Esta progressão demonstra que o modelo dinâmico não apenas amplifica resultados, mas revela uma dependência não-linear entre assimetria de capital e resultado competitivo - propriedade emergente do acoplamento entre crescimento endógeno (Romer, 1990) e dinâmicas de competição ecológica (Auger; Poggiale, 1998).

A análise de sensibilidade (Figuras 8 e 9) complementa esta visão ao identificar os impulsionadores fundamentais. Em ambos os modelos, os parâmetros econômicos - capital de desenvolvimento (a) e demanda de consumidor (c) - dominam o resultado, com variações de $\pm 30\%$ alterando probabilidades em 48 a 53 pontos percentuais, enquanto pressão ambiental (b) produz alteração inferior a 5 pontos. Esta preponderância é consistente com a teoria da mudança técnica direcionada (Acemoglu, 2002), segundo a qual a direção da inovação responde primariamente a incentivos de mercado e rentabilidade, e não apenas a mandatos regulatórios. A contribuição desta análise reside na quantificação da assimetria: pressão ambiental isolada parece insuficiente para reverter vantagens competitivas consolidadas por investimento estratégico em desenvolvimento tecnológico.

As implicações estratégicas derivadas da Tabela 6 são diretas. Para que mineração urbana transite da zona vermelha (dominância espacial) para a amarela (competição aberta), seria necessário reduzir a assimetria de capital - por meio de investimento sustentado em P&D para eficiência de recuperação metalúrgica (parâmetro a) e criação de mercados estáveis para materiais reciclados (parâmetro c) (Reuter; Schaik, 2016). Políticas focadas exclusivamente em pressão regulatória (parâmetro b) tendem a ser insuficientes, conforme quantificado pela análise de sensibilidade. O desafio fundamental é de engenharia econômica: não basta que mineração urbana seja tecnicamente viável; é necessário que seu capital de desenvolvimento cresça a taxas

competitivas com as do setor espacial. Decisões estratégicas de alocação de capital tomadas hoje poderão determinar em qual região do espectro de viabilidade o futuro do suprimento de ouro se posicionará.

Um aspecto central que emerge desta análise merece ênfase: mineração urbana não precisa ser ativamente impedida para perder competitividade - basta que mineração espacial seja mais atrativa ao capital. O mecanismo dominante não é a supressão direta de uma tecnologia pela outra, mas sim o custo de oportunidade na alocação de investimento. Quando investidores, governos e agências de fomento percebem retornos esperados superiores no setor espacial (seja por taxas de crescimento mais elevadas, maior potencial de escala, ou narrativas de inovação mais atrativas) o capital migra naturalmente nessa direção, esvaziando o setor de mineração urbana não por bloqueio, mas por inanição de investimento. Este fenômeno é visível nos resultados: mesmo nos cenários em que mineração urbana é tecnicamente viável (Cenários 0 e 5), sua probabilidade de dominância é baixa porque o diferencial de atratividade de capital ($r_D^{espacial} > r_D^{urbana}$) desvia recursos ao longo do tempo. A implicação para formuladores de política é que proteger mineração urbana por meio de barreiras à mineração espacial seria menos eficaz do que tornar o próprio setor urbano mais atrativo ao investimento - por meio de ganhos de eficiência metalúrgica, redução de custos operacionais e criação de cadeias de valor estáveis para materiais reciclados.

4.7.1 Limitações metodológicas

Embora este estudo ofereça contribuições valiosas, diversas limitações merecem reconhecimento, pois abrem caminhos para pesquisas futuras.

4.7.1.1 Limitações estruturais

- **Pressão Ambiental Agregada:** o modelo abstrai pressão ambiental em um único índice agregado, simplificando a natureza multifacetada de política ambiental e percepção pública. Na realidade, diferentes aspectos regulatórios (por exemplo, emissões, uso de água, gestão de resíduos) poderiam ter impactos dinâmicos distintos sobre cada tecnologia.
- **Omissão de Externalidades de Rede:** o modelo não incorpora explicitamente efeitos de rede ou economias de escala. Estes fatores poderiam influenciar significativamente a trajetória de adoção de tecnologias intensivas em capital como mineração espacial, na qual o valor e eficiência de custo podem aumentar com a escala de infraestrutura e operações.
- **Ausência de Retroalimentação de Custos e Preços:** o modelo trata o preço do ouro e a demanda de consumidor como variáveis exógenas, sem retroalimentação endógena da oferta sobre o preço. Na realidade, a maior penetração de mercado de uma tecnologia — especialmente a mineração espacial, cujo potencial de extração em escala asteroidal poderia introduzir volumes sem precedente — tenderia a reduzir o preço do ouro, o que por sua vez

diminuiria a rentabilidade e o incentivo ao investimento em capital de desenvolvimento de ambos os setores. Este ciclo de retroalimentação negativa (maior oferta → menor preço → menor $D(t)$) poderia moderar as projeções de dominância espacial obtidas no modelo atual e constitui uma extensão natural para trabalhos futuros.

4.7.1.2 *Limitações temporais e de escala*

- **Horizonte Temporal Fixo:** a análise está confinada a um horizonte de 20 anos, padrão em previsão tecnológica e prospectiva estratégica (Kott; Perconti, 2018; Streit et al., 2021), mas pode não capturar completamente ciclos de desenvolvimento tecnológico mais longos, como a curva de adoção em "taco de hóquei" frequentemente vista em inovações disruptivas.
- **Agregação Global:** o modelo opera em escala global agregada, negligenciando heterogeneidades regionais em regulação, disponibilidade de recursos e preferências de mercado que poderiam influenciar significativamente a competição.

4.7.1.3 *Limitações conceituais e de escopo*

- **Competição Binária:** a representação da competição como estritamente binária (urbana vs espacial) negligencia cenários potenciais de coexistência, complementaridade ou formação de mercados de nicho especializados.
- **Ausência de Atores Estratégicos:** o modelo não incorpora comportamento estratégico de atores-chave (por exemplo, governos, corporações) que podem alterar deliberadamente o panorama competitivo por meio de políticas e investimentos direcionados.
- **Evolução Contínua:** o modelo assume evolução contínua de parâmetros e não contabiliza eventos disruptivos potenciais, como avanços tecnológicos radicais ou choques geopolíticos, que poderiam alterar fundamentalmente as dinâmicas competitivas.
- **Risco de Missão e Falha Catastrófica - Assimetria Crítica:** esta representa talvez a assimetria mais fundamental entre as duas tecnologias. Enquanto mineração urbana enfrenta riscos operacionais (perigos químicos, desafios logísticos, conformidade regulatória), mineração espacial enfrenta um perfil de risco qualitativamente diferente: falha catastrófica de missão com perda de capital quase total (falha de lançamento, erros de navegação, falha de recuperação de asteroide). Esta categoria de risco de "baixa probabilidade, consequência extrema" (Taleb, 2007) não é explicitamente modelada no modelo atual.
- **Indefinição do Regime Jurídico de Exploração Espacial:** o modelo assume implicitamente que a mineração espacial pode operar sem restrições jurídicas de acesso a recursos. Contudo, o quadro regulatório internacional permanece ambíguo. O Tratado do Espaço Exterior de 1967 (United Nations, 1967) estabelece que nenhuma nação pode reivindicar

soberania sobre corpos celestes, mas não trata explicitamente da apropriação de recursos extraídos por entidades privadas. Legislações nacionais recentes (como o *U.S. Commercial Space Launch Competitiveness Act* (2015) (United States Congress, 2015) e o *Luxembourg Space Resources Act* (2017) (Grand-Duché de Luxembourg, 2017)) buscaram criar direitos de propriedade sobre materiais extraídos no espaço, porém a sua validade perante o direito internacional não está consolidada (Dunk, 2017). Esta incerteza jurídica poderia funcionar como barreira regulatória adicional ao capital de desenvolvimento espacial, elevando custos de conformidade e risco de investimento, efeitos não capturados pelo parâmetro $P(t)$ do modelo atual.

- **Ausência de Choques Estocásticos Assimétricos:** o modelo incorpora estocasticidade por meio da amostragem Monte Carlo de parâmetros e da trajetória de pressão ambiental $P(t)$, mas não inclui funções de penalidade ou facilitação aleatórias que atuem de forma assimétrica sobre cada tecnologia ao longo do tempo. Na realidade, eventos discretos e imprevisíveis (como um acidente industrial grave que paralise temporariamente a reciclagem em uma região, uma descoberta científica que reduza drasticamente o custo de lançamento, ou a aprovação súbita de subsídios governamentais para um dos setores) podem introduzir choques positivos (facilitadores) ou negativos (penalidades) sobre o motor de crescimento $K(t)$ de uma tecnologia específica, sem afetar simetricamente a concorrente. A incorporação de termos de choque estocásticos assimétricos (por exemplo, processos de Poisson com magnitude aleatória adicionados a $K(t)$ (Merton, 1976; Dixit; Pindyck, 1994)) permitiria capturar esta classe de eventos e avaliar a solidez das conclusões frente a perturbações exógenas não antecipadas.
- **Premissa de Maturidade Tecnológica Inicial:** o modelo, ao focar em dinâmicas de competição em escala industrial, assume implicitamente que a fase de capital de desenvolvimento ($D(t)$) tem início após missões de prospecção inicial terem reduzido suficientemente a incerteza tecnológica, tornando racional a implantação de capital em larga escala. Essa premissa corresponde a uma progressão natural desde missões exploratórias como Hayabusa e OSIRIS-REx até operações em escala comercial, de modo análogo ao que ocorre no setor de petróleo, no qual campanhas de exploração inicial reduzem o risco e viabilizam investimentos subsequentes em extração.

4.7.1.4 Avaliação do impacto das limitações nos resultados

A confiabilidade das conclusões foi avaliada em relação a estas limitações. Limitações de alto impacto, como o horizonte temporal fixo e omissão de economias de escala, sugerem que resultados devem ser interpretados como indicadores de tendências relativas ao invés de previsões precisas de participação de mercado, consistente com o princípio de que modelos servem para gerar compreensão e orientar política ao invés de prever resultados exatos (Stermann, 2000). Limitações de impacto moderado, como o índice de pressão ambiental agregada, espera-se

que afetem primariamente precisão quantitativa mas são improváveis de alterar a constatação qualitativa principal sobre dominância de impulsionadores econômicos. Limitações de baixo impacto, como a premissa de independência de parâmetros na simulação Monte Carlo, foram encontradas por meio de testes preliminares como não alterando resultados agregados de forma importante (Hamby, 1994).

5 CONCLUSÕES

À medida que escassez de recursos intensifica-se e preocupações de sustentabilidade crescem, a competição entre mineração urbana fundamentada em circularidade terrestre e mineração espacial baseada em extração extraterrestre pode definir trajetórias futuras de suprimento de metais estratégicos. Este estudo sugere que resultados competitivos não são predeterminados por inevitabilidades tecnológicas ou ambientais, mas podem ser moldados fundamentalmente por decisões estratégicas de distribuição de capital, políticas regulatórias e prioridades tecnológicas.

A dominância de impulsionadores econômicos, particularmente trajetórias de crescimento de capital de desenvolvimento, parece representar a constatação principal. Enquanto pressão ambiental e demanda de consumidor desempenham papéis, capital de desenvolvimento - sua magnitude inicial, taxa de crescimento e sustentabilidade ao longo do tempo - emergiu como fator decisivo nas simulações realizadas. O efeito de amplificação competitiva identificado implica que vantagens modestas iniciais, se sustentadas, transformam-se em dominância decisiva por meio de ciclos de retroalimentação positivo inerentes à competição de mercado.

Os resultados sugerem que o futuro do suprimento de metais estratégicos não é predeterminado por inevitabilidades tecnológicas, mas pode ser moldado por decisões de alocação de capital e políticas públicas. A questão central não é necessariamente qual tecnologia vencerá, mas como recursos serão mobilizados estrategicamente para diferentes alternativas competitivas.

Este estudo oferece uma estrutura quantitativa para informar tais decisões, revelando não apenas tendências competitivas prováveis sob diferentes condições, mas os mecanismos causais subjacentes que as impulsionam. Ao integrar teoria de crescimento endógeno, dinâmicas de competição ecológica e quantificação de incerteza, a metodologia híbrida desenvolvida oferece uma lente por meio da qual formuladores de política e tomadores de decisão estratégica podem avaliar intervenções alternativas e antecipar suas consequências de longo prazo. À medida que humanidade enfrenta o duplo desafio de escassez de recursos e sustentabilidade ambiental, tais ferramentas analíticas tornam-se não apenas úteis, mas essenciais para navegação de futuros complexos e incertos.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As limitações metodológicas identificadas neste estudo apontam direções promissoras para pesquisas futuras que podem expandir significativamente a compreensão das dinâmicas competitivas entre tecnologias de mineração:

1. **Incorporação de Economias de Escala e Externalidades de Rede:** pesquisas futuras poderiam estender o modelo para incluir explicitamente efeitos de rede e economias de escala, particularmente relevantes para mineração espacial, na qual infraestrutura compartilhada (estações orbitais, rotas de transporte, capacidade de processamento) pode criar ciclos

de retroalimentação positivo não capturados no modelo atual. Esta extensão permitiria avaliar como investimentos iniciais em infraestrutura podem alterar fundamentalmente a viabilidade econômica de longo prazo.

2. **Modelagem Espacialmente Desagregada:** desenvolvimento de modelos regionalmente diferenciados que capturem heterogeneidades em regulação ambiental, disponibilidade de recursos, custos de mão de obra e preferências de mercado. Esta abordagem revelaria como políticas nacionais ou blocos econômicos regionais podem criar vantagens competitivas assimétricas e identificaria oportunidades para estratégias de nicho geográfico.
3. **Quantificação Explícita de Riscos Catastróficos e Eventos Disruptivos:** extensão do modelo para incorporar explicitamente riscos de falha catastrófica de missão (particularmente críticos para mineração espacial) por meio de modelagem probabilística de eventos extremos, bem como choques disruptivos (avanços tecnológicos radicais, mudanças geopolíticas). Esta extensão permitiria análise de risco-retorno mais completa e avaliação de estratégias de mitigação de risco por meio de portfólios tecnológicos diversificados.
4. **Riscos de Contaminação Reversa por Material Extraterrestre:** a importação de material asteroidal para a Terra introduz uma dimensão de risco não abordada no modelo atual: a possibilidade de introdução de elementos estranhos (substâncias químicas, compostos mineralógicos ou agentes biológicos desconhecidos) no ecossistema terrestre. Protocolos de proteção planetária, como os definidos pelo Committee on Space Research (COSPAR), abordam primariamente o retorno de amostras de corpos com potencial biológico (Marte, luas geladas), mas a mineração asteroidal em escala industrial ampliaria significativamente o volume e a diversidade de material extraterrestre introduzido na biosfera (COSPAR Panel on Planetary Protection, 2024). Pesquisas futuras poderiam modelar o impacto deste risco sobre a viabilidade competitiva da mineração espacial, incorporando custos adicionais de quarentena, análise e certificação de segurança do material retornado, bem como o efeito potencial de restrições regulatórias de proteção planetária sobre as taxas de crescimento do setor espacial (parâmetro $r_D^{espacial}$).
5. **Funções de Crescimento com Saturação Temporal:** o modelo atual emprega crescimento exponencial ($dT/dt = K \cdot T$), que assume expansão ilimitada do nível tecnológico ao longo do horizonte de simulação. Contudo, a literatura de difusão tecnológica demonstra consistentemente que tecnologias seguem trajetórias sigmodais (curvas tipo S): crescimento lento na fase inicial, aceleração durante a fase de adoção, e saturação à medida que o mercado amadurece e os ganhos marginais de eficiência se reduzem (Geroski, 2000). Pesquisas futuras poderiam substituir a EDO exponencial por formulações logísticas (por exemplo, $dT/dt = K \cdot T \cdot (1 - T/T_{\max})$, na qual $T_{\max}$ representa um teto tecnológico específico de cada setor) ou por funções de Gompertz (Gompertz, 1833), que capturam assimetria entre as fases de aceleração e desaceleração. Esta extensão permitiria avaliar

se a saturação temporal da mineração urbana (tecnologia mais madura) ocorre antes da saturação da mineração espacial (tecnologia emergente), alterando potencialmente as conclusões sobre dominância de longo prazo e introduzindo a possibilidade de janelas temporais de ultrapassagem competitiva não visíveis no modelo exponencial.

- 6. Impactos Macroeconômicos do Aumento da Oferta sobre Preço e Demanda:** o modelo atual trata preço e demanda como variáveis sem retroalimentação da oferta sobre o preço (limitação reconhecida na Subseção anterior). Contudo, o sucesso de qualquer das tecnologias modeladas (particularmente da mineração espacial, cuja exploração de um único asteroide poderia introduzir grandes volumes de novos materiais) tenderia a provocar redução significativa no preço, por exemplo, do ouro. Tal queda de preço poderia gerar efeitos em cascata ainda não explorados, como: viabilização de novas aplicações tecnológicas e industriais nas quais o custo atual do ouro é proibitivo (eletrônica avançada, medicina, energia renovável); extensibilidade a outros metais estratégicos (platina, paládio, terras raras), cujas cadeias de suprimento enfrentam pressões análogas de escassez e concentração geopolítica. Pesquisas futuras poderiam incorporar um módulo de equilíbrio de mercado ao modelo, acoplando oferta, preço e demanda como variáveis interdependentes, permitindo avaliar cenários nos quais o próprio sucesso tecnológico redefine as condições econômicas que o viabilizaram.

Estas direções de pesquisa não apenas abordariam limitações do modelo atual, mas também contribuiriam para uma teoria mais abrangente de competição tecnológica em setores emergentes de alto risco e capital intensivo.

DISPONIBILIDADE DE DADOS E CÓDIGO

Em conformidade com princípios de ciência aberta e reprodutibilidade, todos os dados de simulação, código-fonte Python e notebooks de análise utilizados nesta pesquisa estão disponibilizados publicamente no repositório Zenodo (Matos; Neto; Balestieri, 2025):

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17245959>

O repositório contém:

- Scripts de implementação do modelo híbrido (EDO + Lotka-Volterra + Monte Carlo)
- Conjuntos de dados de entrada parametrizados para os 8 cenários prospectivos
- Dados de saída completos das 10.000 simulações Monte Carlo
- Documentação técnica detalhada de implementação e reprodução dos resultados

Esta disponibilização visa facilitar a verificação independente dos resultados, extensão da metodologia para outros sistemas competitivos, e reutilização dos componentes do modelo em pesquisas futuras.

REFERÊNCIAS

- ACEMOGLU, D. Directed technical change. **The Review of Economic Studies**, [Oxford University Press, Review of Economic Studies, Ltd.], Oxford, v. 69, n. 4, p. 781–809, 2002. ISSN 00346527, 1467937X. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/1556722>. Acesso em: 15 mar. 2026.
- ADU-BAFFOUR, F.; DAUM, T.; BIRNER, R. Governance challenges of small-scale gold mining in ghana: insights from a process net-map study. **Land Use Policy**, Amsterdam, v. 102, p. 105271, mar. 2021. ISSN 02648377. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264837720326090>. Acesso em: 29 jul. 2024.
- AFRICA, M. C. S. **Uses of gold**. Johannesburg: [s.n.], 2022. Disponível em: <https://www.miningforschools.co.za/lets-explore/gold/uses-of-gold>. Acesso em: 10 jan. 2026.
- AGARWAL, R. Evolutionary trends of industry variables. **International Journal of Industrial Organization**, Amsterdam, v. 16, n. 4, p. 511–525, 1998. ISSN 0167-7187. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167718797000040>. Acesso em: 10 jan. 2026.
- ARAMENDIA, E. et al. Global energy consumption of the mineral mining industry: exploring the historical perspective and future pathways to 2060. **Global Environmental Change**, Amsterdam, v. 83, p. 102745, dez. 2023. ISSN 09593780. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959378023001115>. Acesso em: 30 jul. 2024.
- ARCONES, A.; THIELEMANN, F.-K. Origin of the elements. **The Astronomy and Astrophysics Review**, Berlin, v. 31, n. 1, p. 1, dez. 2023. ISSN 0935-4956, 1432-0754. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s00159-022-00146-x>. Acesso em: 16 dez. 2024.
- ARTHUR, W. B. Competing technologies, increasing returns, and lock-in by historical events. **The Economic Journal**, Oxford, v. 99, n. 394, p. 116–131, 03 1989. ISSN 0013-0133. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/2234208>. Acesso em: 10 jan. 2026.
- ATOMICS, G. **General atomics successfully tests nuclear thermal propulsion reactor fuel at NASA marshall space flight center**. San Diego: [s.n.], 2025. Disponível em: <https://www.ga.com/ga-successfully-tests-nuclear-thermal-propulsion-reactor-fuel-at-nasa-marshall-space-flight-center>. Acesso em: 10 jan. 2026.
- AUGER, P.; POGGIALE, J.-C. Aggregation and emergence in systems of ordinary differential equations. **Mathematical and Computer Modelling**, Amsterdam, v. 27, n. 4, p. 1–21, fev. 1998. ISSN 08957177. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0895717798000028>. Acesso em: 27 jul. 2025.
- BALDÉ, C. P. et al. **The global e-waste monitor 2017: quantities, flows, and resources**. Geneva: International Telecommunication Union, 2017. OCLC: 1099992936. ISBN 978-92-808-9053-2. Disponível em: <https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2020/11/Global-E-waste-Monitor-2017-electronic-spreads.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2026.

BALDÉ, C. P. et al. **The global e-waste monitor 2024**. Geneva: International Telecommunication Union (ITU) and United Nations Institute for Training and Research (UNITAR), 2024. ISBN 978-92-61-38781-5. Disponível em: https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2024/03/GEM_2024_18-03_web_page_per_page_web.pdf. Acesso em: 10 jan. 2026.

BALDÉ, K. (Ed.). **The global e-waste monitor 2014: quantities, flows and resources**. Bonn: United Nations Univ., Inst. for the advanced study on sustainability, 2015. ISBN 978-92-808-4556-3. Disponível em: <https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2020/11/GEM-2014-UNU-1stGlobal-E-Waste-Monitor-small.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2026.

BASS, F. M. A new product growth for model consumer durables. **Management Science**, Catonsville, v. 15, n. 5, p. 215–227, jan. 1969. ISSN 0025-1909, 1526-5501. Publisher: Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS). Disponível em: <https://pubsonline.informs.org/doi/10.1287/mnsc.15.5.215>. Acesso em: 21 jul. 2025.

BAUR, D. G.; MCDERMOTT, T. K. Is gold a safe haven? international evidence. **Journal of Banking & Finance**, Amsterdam, v. 34, n. 8, p. 1886–1898, ago. 2010. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378426609003343>. Acesso em: 10 jan. 2026.

BHARGAVA, S. Generalized lotka-volterra equations and the mechanism of technological substitution. **Technological Forecasting and Social Change**, Amsterdam, v. 35, n. 4, p. 319–326, jul. 1989. ISSN 0040-1625. Publisher: Elsevier BV. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0040162589900681>. Acesso em: 27 jul. 2025.

BOX, G. E. P. et al. **Time series analysis: forecasting and control**. 5th ed.. ed. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2016. Disponível em: https://www.google.com.br/books/edition/Time_Series_Analysis/1WVHAAAAMAAJ?hl=pt-BR&gbpv=0&bsq=Time%20series%20analysis. Acesso em: 28 jul. 2025.

CAI, M.; BROWN, E. T. Challenges in the mining and utilization of deep mineral resources. **Engineering**, Amsterdam, v. 3, n. 4, p. 432–433, ago. 2017. ISSN 20958099. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2095809917305994>. Acesso em: 20 ago. 2024.

CANNON, K. M.; GIALICH, M.; ACAIN, J. Precious and structural metals on asteroids. **Planetary and Space Science**, Amsterdam, v. 225, p. 105608, jan. 2023. ISSN 00320633. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0032063322001945>. Acesso em: 17 dez. 2024.

CAPIE, F.; MILLS, T. C.; WOOD, G. Gold as a hedge against the dollar. **Journal of International Financial Markets, Institutions and Money**, Amsterdam, v. 15, n. 4, p. 343–352, out. 2005. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1042443104000794>. Acesso em: 10 jan. 2026.

CHANDLER, W. U. Materials recycling: the virtue of necessity. **Conservation & Recycling**, Amsterdam, v. 9, n. 1, p. 87–109, jan. 1986. ISSN 03613658. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0361365886901372>. Acesso em: 23 set. 2024.

COHEN, J. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. 2. ed. New York, NY: Psychology Press, 1988. Disponível em: https://www.google.com.br/books/edition/Statistical_Power_Analysis_for_the_Behav/rEe0BQAAQBAJ?hl=pt-BR&gbpv=0. Acesso em: 28 jul. 2025.

COSPAR Panel on Planetary Protection. Cospar policy on planetary protection. **Space Research Today**, Elsevier, Amsterdam, v. 220, p. 15–31, July 2024. Disponível em: <https://cosparhq.cnes.fr/cospar-policy-on-planetary-protection/>. Acesso em: 10 jan. 2026.

COUNCIL, W. G. **Historical demand and supply**. 2024. Disponível em: <https://www.gold.org/goldhub/data/gold-demand-by-country>. Acesso em: 10 jan. 2026.

CUI, J.; ZHANG, L. Metallurgical recovery of metals from electronic waste: a review. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 158, n. 2-3, p. 228–256, out. 2008. ISSN 03043894. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304389408002161>. Acesso em: 2 dez. 2024.

DALY, R. T. et al. Successful kinetic impact into an asteroid for planetary defence. **Nature**, Nature Publishing Group, London, v. 616, n. 7957, p. 443–447, 2023. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41586-023-05810-5>. Acesso em: 10 jan. 2026.

DANCEY, C. P.; REIDY, J. **Statistics without maths for psychology**. 5. ed. Harlow: Pearson, Prentice Hall, 2011. ISBN 0132051605. Disponível em: https://www.google.com.br/books/edition/Statistics_Without_Maths_for_Psychology/QjfQ0_DqyNQC?hl=pt-BR. Acesso em: 28 jul. 2025.

DEHART, M. D.; SCHUNERT, S.; LABOURÉ, V. M. Nuclear thermal propulsion. In: POPE, C. L. (Ed.). **Nuclear Reactors - Spacecraft Propulsion, Research Reactors, and Reactor Analysis Topics**. IntechOpen, 2022. ISBN 978-1-83969-939-9 978-1-83969-940-5. Disponível em: <https://www.intechopen.com/chapters/81555>. Acesso em: 20 fev. 2025.

DIXIT, A. K.; PINDYCK, R. S. **Investment under uncertainty**. Princeton University Press, 1994. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/j.ctt7sncv>. Acesso em: 10 jan. 2026.

DUNK, F. G. von der. Asteroid mining: international and national legal aspects. **Michigan State International Law Review**, East Lansing, v. 26, n. 1, p. 83–101, 2017.

DURBIN, J.; WATSON, G. S. Testing for serial correlation in least squares regression. i. In: KOTZ, S.; JOHNSON, N. L. (Ed.). **Breakthroughs in Statistics**. New York, NY: Springer New York, 1992, (Springer Series in Statistics). p. 237–259.

ELLIS, T. W. The future of gold in electronics. **Gold Bulletin**, Berlin, v. 37, n. 1-2, p. 66–71, mar. 2004. ISSN 0017-1557, 2190-7579. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/BF03215518>. Acesso em: 11 nov. 2024.

ELVIS, M. Let's mine asteroids — for science and profit. **Nature**, London, v. 485, n. 7400, p. 549–549, maio 2012. ISSN 0028-0836, 1476-4687. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/485549a>. Acesso em: 19 dez. 2024.

ELVIS, M. How many ore-bearing asteroids? **Planetary and Space Science**, Amsterdam, v. 91, p. 20–26, 2014. ISSN 0032-0633. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032063313003206>. Acesso em: 10 jan. 2026.

ELVIS, M.; LAWRENCE, C.; SEAGER, S. Accelerating astrophysics with the spacex starship. **Physics Today**, College Park, v. 76, n. 2, p. 40–45, fev. 2023. ISSN 0031-9228, 1945-0699. Disponível em: <https://pubs.aip.org/physicstoday/article/76/2/40/2869438/Accelerating-astro-physics-with-the-SpaceX>. Acesso em: 21 fev. 2025.

ENDERS, W. **Applied econometric time series**. 4. ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2015.

ERB, C. B.; HARVEY, C. R. The golden dilemma. **Financial Analysts Journal**, London, v. 69, n. 4, p. 10–42, jul. 2013. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.2469/faj.v69.n4.1>. Acesso em: 10 jan. 2026.

FORRESTER, J. W. **Industrial dynamics**. MIT Press, 1961. Disponível em: https://openlibrary.org/books/OL25168043M/Industrial_Dynamics. Acesso em: 10 jan. 2026.

FORTI, V. et al. **The global e-waste monitor 2020**. Geneva: International Telecommunication Union (ITU) and United Nations Institute for Training and Research (UNITAR), 2020. ISBN 978-92-808-9114-0. Disponível em: https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2020/11/GEM_2020_def_july1_low.pdf. Acesso em: 10 jan. 2026.

FOUNDATION, E. M. **Towards the circular economy vol. 3: accelerating the scale-up across global supply chains**. [S.l.], 2014. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-3-accelerating-the-scale-up-across-global>. Acesso em: 10 jan. 2026.

FOWLER, B. A. Magnitude of the global e-waste problem. In: **Electronic Waste**. Elsevier, 2017. p. 1–15. ISBN 978-0-12-803083-7. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128030837000019>. Acesso em: 10 out. 2024.

GENERAL, N. O. of I. **Nasa's management of the artemis missions**. [S.l.], 2021. Disponível em: <https://oig.nasa.gov/wp-content/uploads/2024/02/IG-22-003.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2026.

GEROSKI, P. Models of technology diffusion. **Research Policy**, Amsterdam, v. 29, n. 4-5, p. 603–625, abr. 2000. ISSN 0048-7333. Publisher: Elsevier BV. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S004873339900092X>. Acesso em: 21 jul. 2025.

GOMPERTZ, B. On the nature of the function expressive of the law of human mortality, and on a new mode of determining the value of life contingencies. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, London, n. 2, p. 252–253, 1833.

Grand-Duché de Luxembourg. **Loi du 20 juillet 2017 sur l'exploration et l'utilisation des ressources de l'espace**. 2017. Journal Officiel du Grand-Duché de Luxembourg, Mémorial A, N° 674, 28 juillet 2017.

GRANGER, C. W. J.; NEWBOLD, P. Spurious regressions in econometrics. **Journal of Econometrics**, Amsterdam, v. 2, n. 2, p. 111–120, jul. 1974. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0304407674900347>. Acesso em: 10 jan. 2026.

GRIMM, V. et al. Pattern-oriented modeling of agent-based complex systems: lessons from ecology. **Science**, Washington, D.C., v. 310, n. 5750, p. 987–991, nov. 2005. ISSN 0036-8075, 1095-9203. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1116681>. Acesso em: 26 ago. 2025.

HAIR, J. F. et al. **Multivariate data analysis**. 8th ed.. ed. Australia: Cengage, 2019.

HALDAR, S. K. **Mineral exploration: principles and applications**. 2nd ed.. ed. Amsterdam, Netherlands ; Cambridge, MA: Elsevier, 2018. ISBN 978-0-12-814022-2. Disponível em: <https://shop.elsevier.com/books/mineral-exploration/haldar/978-0-12-814022-2>. Acesso em: 10 jan. 2026.

- HAMBY, D. M. A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models. **Environmental Monitoring and Assessment**, Berlin, v. 32, n. 2, p. 135–154, set. 1994. ISSN 0167-6369, 1573-2959. Publisher: Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/BF00547132>. Acesso em: 21 jul. 2025.
- HEIN, A. M.; MATHESON, R.; FRIES, D. A techno-economic analysis of asteroid mining. **Acta Astronautica**, Amsterdam, v. 168, p. 104–115, mar. 2020. ISSN 00945765. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0094576518316357>. Acesso em: 17 jan. 2025.
- HERAS-SAIZARBITORIA, I.; BOIRAL, O.; TESTA, F. Circular economy at the company level: an empirical study based on sustainability reports. **Sustainable Development**, Hoboken, v. 31, n. 4, p. 2307–2317, ago. 2023. ISSN 0968-0802, 1099-1719. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/sd.2507>. Acesso em: 22 abr. 2025.
- HOLLIDAY, R.; GOODMAN, P. Going for gold [gold in electronics industry]. **IEE Review**, London, v. 48, n. 3, p. 15–19, maio 2002. ISSN 0953-5683, 1741-0495. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1015789>. Acesso em: 11 nov. 2024.
- HUNT, A. J.; FARMER, T. J.; CLARK, J. H. Elemental sustainability and the importance of scarce element recovery. In: HUNT, A. (Ed.). **Element Recovery and Sustainability**. The Royal Society of Chemistry, 2013. p. 1–28. ISBN 978-1-84973-616-9 978-1-84973-734-0. Disponível em: <https://books.rsc.org/books/book/1034/chapter/845654/Elemental-Sustainability-and-the-Importance-of>. Acesso em: 1 out. 2024.
- INC., K. M. **Metal prices**. 2025. Disponível em: <https://www.kitco.com/>. Acesso em: 10 jan. 2026.
- KONG, H.-Y. et al. Efficient gold recovery from waste electronic and electric equipment by amino-modified covalent triazine frameworks. **Chemical Engineering Journal**, Amsterdam, v. 463, p. 142393, maio 2023. ISSN 13858947. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1385894723011245>. Acesso em: 27 nov. 2024.
- KOTT, A.; PERCONTI, P. Long-term forecasts of military technologies for a 20–30 year horizon: an empirical assessment of accuracy. **Technological Forecasting and Social Change**, Amsterdam, v. 137, p. 272–279, dez. 2018. ISSN 0040-1625. Publisher: Elsevier BV. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0040162518304438>. Acesso em: 21 jul. 2025.
- KUTNER, M. H. et al. **Applied linear statistical models**. 5. ed. Boston, Mass.: McGraw-Hill Irwin, 2005. Disponível em: https://openlibrary.org/books/OL3307115M/Applied_linear_statistical_models. Acesso em: 10 jan. 2026.
- LACY, P.; RUTQVIST, J. **Waste to wealth**. London: Palgrave Macmillan UK, 2015. ISBN 978-1-349-58040-8 978-1-137-53070-7. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1057/9781137530707>. Acesso em: 24 set. 2024.
- LAW, A. M. **Simulation modeling and analysis**. 5. ed. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2015. ISBN 978-0-07-340132-4. Disponível em: https://openlibrary.org/books/OL28510826M/Simulation_Modeling_and_Analysis. Acesso em: 10 jan. 2026.
- LI, G. Y.; ASCANI, A.; IAMMARINO, S. The material basis of modern technologies. a case study on rare metals. **Research Policy**, Amsterdam, v. 53, n. 1, p. 104914, jan. 2024. ISSN 00487333. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048733323001981>. Acesso em: 5 out. 2024.

LOTKA, A. J. Elements of physical biology. **Nature**, London, v. 116, n. 2917, p. 461–461, set. 1925. ISSN 0028-0836, 1476-4687. Publisher: Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/116461b0>. Acesso em: 23 jul. 2025.

LUPISHKO, D.; BELSKAYA, I. On the surface composition of the m-type asteroids. **Icarus**, Amsterdam, v. 78, n. 2, p. 395–401, abr. 1989. ISSN 00191035. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0019103589901863>. Acesso em: 20 dez. 2024.

MANIGANDAN, S.; RAJMOHAN, K.; VARJANI, S. Current trends in gold recovery from electronic wastes. In: **Current Developments in Biotechnology and Bioengineering**. Elsevier, 2020. p. 307–325. ISBN 978-0-444-64321-6. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780444643216000161>. Acesso em: 28 nov. 2024.

MANN, A. SpaceX now dominates rocket flight, bringing big benefits—and risks—to nasa. **Science**, Washington, D.C., maio 2020. ISSN 0036-8075, 1095-9203. Disponível em: <https://www.sciencemag.org/news/2020/05/spacex-now-dominates-rocket-flight-bringing-big-benefits-and-risks-nasa>. Acesso em: 21 fev. 2025.

MARQUES, C.; ANDRÉ, D. **O ouro é um hedge ou safe haven?** 2025.

MATOS, A. A. de; NETO, E. V.; BALESTIERI, J. A. P. **Urban mining vs space mining**: hybrid simulation code. 2025. Zenodo. Version 1.0.0. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17245959>. Acesso em: 10 jan. 2026.

MERTON, R. C. Option pricing when underlying stock returns are discontinuous. **Journal of Financial Economics**, Amsterdam, v. 3, n. 1, p. 125–144, 1976. ISSN 0304-405X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0304405X76900222>. Acesso em: 10 jan. 2026.

MIAO, D. et al. Coal mine roof accident causation modeling and system reliability research based on directed weighted network. **Process Safety and Environmental Protection**, Amsterdam, v. 183, p. 653–664, mar. 2024. ISSN 09575820. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957582024000636>. Acesso em: 29 ago. 2024.

MORRIS, S. A.; PRATT, D. Analysis of the lotka–volterra competition equations as a technological substitution model. **Technological Forecasting and Social Change**, Amsterdam, v. 70, n. 2, p. 103–133, fev. 2003. ISSN 0040-1625. Publisher: Elsevier BV. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0040162501001858>. Acesso em: 23 jul. 2025.

NASA. **Gold coating**. Washington: [s.n.], 1997. Disponível em: <https://spinoff.nasa.gov/spinoff1997/hm2.html>. Acesso em: 10 jan. 2026.

NASA. **Psyche science**. Washington: [s.n.], 2023. Disponível em: <https://science.nasa.gov/mission/psyche/science>. Acesso em: 10 jan. 2026.

NASA. **In-Situ resource utilization (ISRU)**. Washington: [s.n.], n.d. Disponível em: <https://www.nasa.gov/mission/in-situ-resource-utilization-isru/>. Acesso em: 10 jan. 2026.

NASA. **Itokawa**. Washington: [s.n.], n.d. Disponível em: <https://science.nasa.gov/solar-system/asteroids/25143-itokawa/>. Acesso em: 10 jan. 2026.

NASA. **OSIRIS-REx**. Washington: [s.n.], n.d. Disponível em: <https://science.nasa.gov/mission/osiris-rex>. Acesso em: 10 jan. 2026.

NASA. **Using space-based resources for deep space exploration**. Washington: [s.n.], n.d. Disponível em: <https://www.nasa.gov/overview-in-situ-resource-utilization/>. Acesso em: 10 jan. 2026.

NASA, S. **Asteroids**. Washington: [s.n.], n.d. Disponível em: <https://science.nasa.gov/solar-system/asteroids/>. Acesso em: 10 jan. 2026.

O'CONNOR, F. A. et al. The financial economics of gold — a survey. **International Review of Financial Analysis**, Amsterdam, v. 41, p. 186–205, out. 2015. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1057521915001325>. Acesso em: 10 jan. 2026.

OFFICE, U. G. A. **James Webb space telescope**: project nearing completion, but work to resolve challenges continues. 2021. Disponível em: <https://www.gao.gov/products/gao-21-406>. Acesso em: 10 jan. 2026.

OURO-SALIM, O. Urban mining of e-waste management globally: literature review. **Cleaner Waste Systems**, Amsterdam, v. 9, p. 100162, dez. 2024. ISSN 27729125. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2772912524000344>. Acesso em: 5 maio 2025.

PRICE, D. M. **Metal prices**. 2025. Disponível em: <https://www.dailymetalprice.com/>. Acesso em: 10 jan. 2026.

RADETZKI, M. Regional development benefits of mineral projects. **Resources Policy**, Amsterdam, v. 8, n. 3, p. 193–200, set. 1982. ISSN 03014207. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0301420792900369>. Acesso em: 29 jul. 2024.

RAO, M. D. et al. Challenges and opportunities in the recovery of gold from electronic waste. **RSC Advances**, London, v. 10, n. 8, p. 4300–4309, 2020. ISSN 2046-2069. Disponível em: <https://xlink.rsc.org/?DOI=C9RA07607G>. Acesso em: 25 nov. 2024.

REUTER, M.; SCHAIK, A. V. Gold – a key enabler of a circular economy. In: **Gold Ore Processing**. Elsevier, 2016. p. 937–958. ISBN 978-0-444-63658-4. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780444636584000530>. Acesso em: 7 jan. 2025.

RIZKI, I. N.; TANAKA, Y.; OKIBE, N. Thiourea bioleaching for gold recycling from e-waste. **Waste Management**, Amsterdam, v. 84, p. 158–165, fev. 2019. ISSN 0956053X. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X18306858>. Acesso em: 19 nov. 2024.

ROGERS, E. M. **Diffusion of innovations**. New York: Free Press, 1962.

ROMER, P. M. Endogenous technological change. **Journal of Political Economy**, Chicago, v. 98, n. 5, Part 2, p. S71–S102, out. 1990. ISSN 0022-3808, 1537-534X. Publisher: University of Chicago Press. Disponível em: <https://www.journals.uchicago.edu/doi/10.1086/261725>. Acesso em: 21 jul. 2025.

RUDENNO, V. **Mining valuation handbook 4e**: mining and energy valuation for investors and management. Milton, Queensland: JOHN WILEY & Sons AUSTRAL, 2019. OCLC: 1107331018. ISBN 978-0-7303-8145-7. Disponível em: https://books.google.com.br/books/about/The_Mining_Valuation_Handbook_4e.html?id=uMjn_ZIu_XIC&redir_esc=y. Acesso em: 10 jan. 2026.

S, M. I.; LAZAR, D. Does volume of gold consumption influence the world gold price? **Journal of Risk and Financial Management**, Basel, v. 15, n. 7, p. 273, jun. 2022.

- SAHAY, R. et al. **Emerging market volatility**: lessons from the taper tantrum. [S.l.], 2014. Disponível em: <https://www.imf.org/external/pubs/ft/sdn/2014/sdn1409.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2026.
- SANCHEZ, J. P.; MCINNES, C. Asteroid resource map for near-earth space. **J. Spacecr. Rockets**, American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), [S.l.], v. 48, n. 1, p. 153–165, jan. 2011.
- SANMIQUEL, L. et al. Data mining of accidents in spanish underground mines in the period 2003–2021 caused by a collision with a moving object. **Heliyon**, Amsterdam, v. 10, n. 2, p. e24716, jan. 2024. ISSN 24058440. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405844024007473>. Acesso em: 28 ago. 2024.
- SARGENT, R. G. Verification and validation of simulation models. In: **Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 166–183.
- SHAFIEE, S.; TOPAL, E. An overview of global gold market and gold price forecasting. **Resources Policy**, Amsterdam, v. 35, n. 3, p. 178–189, set. 2010. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301420710000243>. Acesso em: 10 jan. 2026.
- SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, Oxford, v. 52, n. 3–4, p. 591–611, dez. 1965. Disponível em: <https://academic.oup.com/biomet/article-lookup/doi/10.1093/biomet/52.3-4.591>. Acesso em: 10 jan. 2026.
- SHIN, K. Capital flow reversals during the taper tantrum in 2013: causes and consequences. **China Economic Journal**, Routledge, London, v. 10, n. 2, p. 226–243, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/17538963.2017.1319634>. Acesso em: 10 jan. 2026.
- SOARES, M. B. et al. Impact of climatic seasons on the dynamics of carbon, nitrogen and mercury in soils of brazilian biomes affected by gold mining. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 954, p. 176279, dez. 2024. ISSN 00489697. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969724064350>. Acesso em: 18 dez. 2024.
- SPACE, P. **The starship report**. [S.l.], 2024. Disponível em: <https://payloadspace.com/starship-report/>. Acesso em: 10 jan. 2026.
- SPACEX. **Starship**. n.d. Disponível em: <https://www.spacex.com/vehicles/starship/>. Acesso em: 10 jan. 2026.
- STAHEL, W. R. The circular economy. **Nature**, London, v. 531, n. 7595, p. 435–438, mar. 2016. ISSN 0028-0836, 1476-4687. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/531435a>. Acesso em: 26 set. 2024.
- STERMAN, J. **Business dynamics**: systems thinking and modeling for a complex world. Boston: Irwin/McGraw-Hill, 2000. ISBN 978-0-07-231135-8. Disponível em: https://openlibrary.org/books/OL14752748M/Business_dynamics. Acesso em: 10 jan. 2026.
- STREIT, J. M. K. et al. Leveraging strategic foresight to advance worker safety, health, and well-being. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, Basel, v. 18, n. 16, p. 8477, ago. 2021. ISSN 1660-4601. Publisher: MDPI AG. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1660-4601/18/16/8477>. Acesso em: 21 jul. 2025.

STROGATZ, S. H. **Nonlinear dynamics and chaos**: with applications to physics, biology, chemistry, and engineering. 2nd ed.. ed. Boulder, CO: Westview Press, a member of the Perseus Books Group, 2015. ISBN 978-0-8133-4910-7. Disponível em: https://openlibrary.org/books/OL26824551M/Nonlinear_Dynamics_and_Chaos. Acesso em: 10 jan. 2026.

SURVEY, U. G. **Gold statistics and information**. Reston: [s.n.], n.d. Disponível em: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/gold-statistics-and-information>. Acesso em: 10 jan. 2026.

TALEB, N. N. **The black swan**: the impact of the highly improbable. New York: Random House, 2007. Discusses low-probability, high-impact events and risk management in complex systems. ISBN 978-1-4000-6351-2. Disponível em: https://openlibrary.org/books/OL17969527M/The_Black_Swan. Acesso em: 10 jan. 2026.

The Committee for the Prize in Economic Sciences in Memory of Alfred Nobel. **Economic growth, technological change, and climate change**. 2018. Scientific Background on the Sveriges Riksbank Prize in Economic Sciences in Memory of Alfred Nobel 2018. Disponível em: <https://www.nobelprize.org/prizes/economic-sciences/2018/romer/facts/>. Acesso em: 10 jan. 2026.

TUNCUK, A. et al. Aqueous metal recovery techniques from e-scrap: hydrometallurgy in recycling. **Minerals Engineering**, Amsterdam, v. 25, n. 1, p. 28–37, jan. 2012. ISSN 08926875. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0892687511003669>. Acesso em: 21 nov. 2024.

United Nations. **Treaty on principles governing the activities of states in the exploration and use of outer space, including the moon and other celestial bodies**. 1967. Adopted by the General Assembly on 19 December 1966, opened for signature on 27 January 1967, entered into force on 10 October 1967. 610 UNTS 205.

United States Congress. **U.S. commercial space launch competitiveness act**. 2015. Public Law 114-90, 114th Congress, November 25, 2015.

U.S. Geological Survey. **Mineral commodity summaries**: gold. 2025. Reston, VA: U.S. Geological Survey. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025-gold.pdf>. Acesso em: 29 mar. 2026.

VIRTANEN, P. et al. Scipy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in python. **Nature Methods**, London, v. 17, n. 3, p. 261–272, mar. 2020. ISSN 1548-7091, 1548-7105. Publisher: Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41592-019-0686-2>. Acesso em: 21 jul. 2025.

VOLTERRA, V. Fluctuations in the abundance of a species considered mathematically1. **Nature**, London, v. 118, n. 2972, p. 558–560, out. 1926. ISSN 0028-0836, 1476-4687. Publisher: Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/118558a0>. Acesso em: 23 jul. 2025.

WOLDEYES, T. D.; MUFFATTO, M.; FERRATI, F. Emerging business model archetypes in the circular economy: a systematic literature review. **Sustainable Development**, Hoboken, p. sd.3348, jan. 2025. ISSN 0968-0802, 1099-1719. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/sd.3348>. Acesso em: 4 maio 2025.

WOOLDRIDGE, J. M. **Introductory econometrics**: a modern approach. 6th ed.. ed. Boston, Mass: Cengage Learning, 2016. Disponível em: https://openlibrary.org/books/OL28573325M/Introductory_Econometrics. Acesso em: 10 jan. 2026.

WORLANYO, A. S.; JIANGFENG, L. Evaluating the environmental and economic impact of mining for post-mined land restoration and land-use: a review. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 279, p. 111623, fev. 2021. ISSN 03014797. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479720315486>. Acesso em: 11 set. 2024.

World Gold Council. **Historical demand and supply**. 2026. Disponível em: <https://www.gold.org/goldhub/data/gold-demand-by-country>. Acesso em: 10 jan. 2026.

XAVIER, L. H.; OTTONI, M.; LEPAWSKY, J. Circular economy and e-waste management in the americas: Brazilian and canadian frameworks. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 297, p. 126570, maio 2021. ISSN 09596526. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652621007903>. Acesso em: 5 maio 2025.

XIE, H. et al. Groundbreaking theoretical and technical conceptualization of fluidized mining of deep underground solid mineral resources. **Tunnelling and Underground Space Technology**, Amsterdam, v. 67, p. 68–70, ago. 2017. ISSN 08867798. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0886779817300548>. Acesso em: 20 ago. 2024.

XIE, R.; BENNETT, N. J.; DEMPSTER, A. G. Target evaluation for near earth asteroid long-term mining missions. **Acta Astronautica**, Amsterdam, v. 181, p. 249–270, abr. 2021. ISSN 00945765. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0094576521000114>. Acesso em: 21 jan. 2025.

YOSHIKAWA, M. et al. The nature of asteroid itokawa revealed by hayabusa. **Proceedings of the International Astronomical Union**, Cambridge, v. 2, n. S236, p. 401–416, ago. 2006. ISSN 1743-9213, 1743-9221. Disponível em: https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S174392130700350X/type/journal_article. Acesso em: 18 dez. 2024.

ZHANG, L.; XU, Z. A review of current progress of recycling technologies for metals from waste electrical and electronic equipment. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 127, p. 19–36, jul. 2016. ISSN 09596526. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652616302451>. Acesso em: 2 dez. 2024.

GLOSSÁRIO

Amplificação competitiva: mecanismo dinâmico em que vantagens iniciais de uma tecnologia traduzem-se em posições competitivas desproporcionalmente mais fortes ao longo do tempo, por meio de dinâmicas de "o vencedor leva a maior parte".

Asteroide do tipo M: asteroides "metálicos" considerados núcleos expostos de planetas menores diferenciados que perderam seus mantos de silicato devido a colisões passadas, ricos em metais preciosos como ouro, platina e paládio.

Coefficientes de sensibilidade (a, b, c): parâmetros do modelo híbrido que quantificam o impacto relativo de capital de desenvolvimento, pressão ambiental e demanda de consumidor no crescimento tecnológico.

Competição Lotka-Volterra: modelo matemático originalmente desenvolvido para dinâmicas populacionais ecológicas, adaptado para descrever interações competitivas entre tecnologias concorrentes no mercado.

Esgotamento de elementos: exaurimento progressivo de reservas de elementos químicos na crosta terrestre acessível com tecnologias atuais de mineração.

Economia circular: sistema econômico restaurativo e regenerativo por design, que mantém produtos e materiais em uso pelo maior tempo possível por meio de estratégias de reparação, remanufatura e reciclagem.

E-waste (resíduo eletrônico): equipamentos elétricos e eletrônicos descartados que contêm metais valiosos recuperáveis como ouro, prata, cobre e paládio, além de substâncias tóxicas.

ISRU (*In-Situ Resource Utilization*): Utilização de Recursos *In-Situ*; prática de gerar produtos a partir de materiais locais em missões espaciais, reduzindo dependência de reabastecimento da Terra.

Mineração artesanal em pequena escala: atividade de mineração tradicional de baixa tecnologia, frequentemente associada a impactos ambientais significativos como poluição por mercúrio e desmatamento.

Mineração urbana: processo de recuperação de metais preciosos de produtos descartados, especialmente resíduos eletrônicos, transformando cidades em "minas urbanas" ricas em recursos

secundários.

Motor de crescimento (*growth engine*): função composta pelos fatores econômicos, ambientais e de demanda que impulsionam o desenvolvimento tecnológico no modelo híbrido ($K = aD + bP + cC$).

NEAs (*Near-Earth Asteroids*): asteroides próximos à Terra considerados alvos tecnicamente e economicamente viáveis para futuras missões de mineração espacial.

NTP (*Nuclear Thermal Propulsion*): Propulsão Térmica Nuclear; tecnologia avançada que utiliza fissão nuclear para gerar escape de alta velocidade, prometendo redução significativa de tempos de viagem espacial.

POM (*Pattern-Oriented Modeling*): Modelagem Orientada por Padrões; estratégia de calibração de modelos complexos baseada em reprodução de padrões comportamentais característicos do sistema real.

Recuperação metalúrgica: processos químicos para extrair e purificar metais valiosos de minérios ou resíduos, incluindo técnicas hidrometalúrgicas e pirometalúrgicas.

Simulação Monte Carlo: técnica computacional que utiliza amostragem aleatória repetida (neste estudo, 10.000 iterações) para quantificar incerteza paramétrica e gerar distribuições de probabilidade de resultados.

Taxa de crescimento intrínseco: parâmetro que representa a capacidade natural de expansão tecnológica de uma alternativa sem considerar efeitos competitivos diretos (para mineração urbana, para mineração espacial).

Teor (ppm): concentração de metal em minério ou resíduo, expressa em partes por milhão. *E-waste* pode conter até 1.600 ppm de ouro, comparado a 18 ppm em minérios de alto teor.

APÊNDICE A – MODELO LOTKA-VOLTERRA: EXPOSIÇÃO DIDÁTICA COM DUAS TECNOLOGIAS

Este apêndice apresenta o modelo Lotka-Volterra de competição aplicado a duas tecnologias hipotéticas, A e B, que disputam o mesmo mercado. O objetivo é ilustrar, de forma acessível, os mecanismos matemáticos de crescimento intrínseco e inibição mútua antes de sua aplicação ao caso específico da mineração urbana e mineração espacial desenvolvido no corpo da dissertação.

A.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO

Considere-se um mercado emergente no qual duas tecnologias concorrentes (Tecnologia A e Tecnologia B) competem por recursos compartilhados: financiamento, atenção regulatória e participação de mercado. Cada tecnologia possui uma capacidade intrínseca de crescer (desenvolver-se, ganhar adotantes), mas o crescimento de uma afeta negativamente o da outra, pois ambas disputam os mesmos recursos finitos.

Essa situação é análoga ao problema ecológico que motivou o trabalho original de Volterra (Volterra, 1926): duas espécies que coexistem em um ambiente com recursos limitados exercem pressão competitiva uma sobre a outra. Lotka (Lotka, 1925), de maneira independente, chegou a equações matematicamente equivalentes partindo de princípios gerais da dinâmica de sistemas físico-químicos.

A.2 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

Sejam $T_A(t)$ e $T_B(t)$ os níveis tecnológicos (ou participação de mercado) das tecnologias A e B no instante t . A evolução temporal de cada uma é governada pelo seguinte sistema de equações diferenciais:

$$\frac{dT_A}{dt} = \alpha \cdot T_A - \beta \cdot T_A \cdot T_B \quad (\text{A.1})$$

$$\frac{dT_B}{dt} = \delta \cdot T_B - \gamma \cdot T_A \cdot T_B \quad (\text{A.2})$$

Cada equação contém dois termos com papéis distintos:

- **Termo de crescimento intrínseco** ($\alpha \cdot T_A$ e $\delta \cdot T_B$): representa a capacidade de cada tecnologia se expandir na ausência de competição. Se a Tecnologia B não existisse, a Tecnologia A crescería exponencialmente segundo $T_A(t) = T_A(0) \cdot e^{\alpha t}$. O parâmetro α (ou δ) reflete o vigor inovador, o volume de investimento em P&D e a receptividade do mercado àquela tecnologia.

- **Termo de inibição competitiva** ($-\beta \cdot T_A \cdot T_B$ e $-\gamma \cdot T_A \cdot T_B$): captura como a presença de uma tecnologia prejudica a outra. Quando ambas coexistem ($T_A > 0$ e $T_B > 0$), o produto $T_A \cdot T_B$ é positivo, e o sinal negativo reduz a taxa de crescimento. O coeficiente β quantifica o quanto a Tecnologia B inibe a Tecnologia A, e γ quantifica o efeito inverso. Quanto maiores esses coeficientes, mais intensa é a competição.

A.3 INTERPRETAÇÃO DOS PARÂMETROS

A Tabela A.1 resume o significado de cada parâmetro do modelo.

Tabela A.1 – Parâmetros do modelo Lotka-Volterra competitivo.

Parâmetro	Nome	Interpretação
α	Crescimento intrínseco de A	Taxa com que a Tecnologia A se expande isoladamente (sem competição). Determinada por investimento, maturidade e demanda.
δ	Crescimento intrínseco de B	Taxa equivalente para a Tecnologia B.
β	Inibição de B sobre A	Intensidade com que a presença da Tecnologia B reduz o crescimento de A (desvio de recursos, perda de participação).
γ	Inibição de A sobre B	Intensidade com que a presença da Tecnologia A reduz o crescimento de B.

A.4 COMPORTAMENTOS POSSÍVEIS

O resultado da competição depende da relação entre os parâmetros. A análise matemática do sistema (Strogatz, 2015) identifica três cenários qualitativos principais:

1. **Dominância de A** ($\alpha/\beta > \delta/\gamma$ e $\alpha/\gamma > \delta/\beta$): a Tecnologia A cresce mais rápido do que B consegue inibi-la, e simultaneamente exerce inibição suficiente sobre B. A longo prazo, A domina o mercado enquanto B perde participação progressivamente.
2. **Dominância de B** (condição simétrica inversa): a Tecnologia B prevalece pela mesma lógica, com papéis invertidos.
3. **Coexistência** (quando a inibição mútua é fraca relativamente ao crescimento intrínseco de ambas): nenhuma tecnologia consegue suprimir a outra, e ambas compartilham o mercado com participações estáveis.

A.5 EXEMPLO NUMÉRICO

Suponha-se as seguintes condições iniciais e parâmetros:

- $T_A(0) = 1,0$, $T_B(0) = 1,0$ (tecnologias partindo de níveis equivalentes)

- $\alpha = 0,09$, $\delta = 0,07$ (A cresce intrinsecamente mais rápido que B)
- $\beta = 0,02$, $\gamma = 0,02$ (inibição mútua simétrica)

Nesta configuração, ambas as tecnologias partem do mesmo patamar e sofrem a mesma intensidade de inibição competitiva. A diferença reside no crescimento intrínseco: A possui $\alpha = 0,09$ contra $\delta = 0,07$ de B. Essa diferença aparentemente modesta de 0,02 produz, ao longo de 20 anos, uma divergência considerável. O crescimento intrínseco superior de A acumula-se exponencialmente e, ao mesmo tempo, o termo de inibição $-\gamma \cdot T_A \cdot T_B$ pesa cada vez mais sobre B à medida que T_A cresce. O resultado é um efeito de amplificação: a vantagem inicial de A traduz-se em uma posição competitiva desproporcionalmente mais forte com o passar do tempo.

Esse é precisamente o mecanismo explorado no corpo da dissertação. No modelo híbrido, os valores de α e δ não são arbitrários: eles são derivados dos motores de crescimento EDO de cada tecnologia (mineração urbana e mineração espacial), os quais, por sua vez, dependem de capital de desenvolvimento, pressão ambiental e demanda de consumidor. Assim, diferenças em investimento e condições de mercado traduzem-se automaticamente em diferenças de crescimento intrínseco, e a competição Lotka-Volterra amplifica essas diferenças ao longo do horizonte de simulação.

APÊNDICE B – ARTIGO: DINÂMICA DO MERCADO GLOBAL DE OURO: UMA ANÁLISE QUANTITATIVA DE OFERTA, DEMANDA E PRECIFICAÇÃO (2010-2025)

Este apêndice reproduz o artigo científico *Dinâmica do Mercado Global de Ouro: Uma Análise Quantitativa de Oferta, Demanda e Precificação (2010-2025)*, de autoria de Anderson Adelson de Matos, Ernesto Vieira Neto e José Antônio Perrella Balestieri, desenvolvido como parte das atividades de pesquisa do mestrado. Publicado originalmente na revista REVISTA DELOS, v. 19, n. 79, p. e9049, 7 abr. 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.55905/rdelosv19.n79-005>. Conteúdo reproduzido em conformidade com a licença Creative Commons CC BY.

B.1 INTRODUÇÃO

Poucos ativos combinam, como o ouro, funções tão distintas em um único mercado. Ao mesmo tempo em que serve de insumo para a indústria eletrônica e para a fabricação de joias, funciona como reserva de valor para bancos centrais e como instrumento de proteção patrimonial para investidores individuais (Africa, 2022). Essa sobreposição de papéis confere ao mercado aurífero uma dinâmica singular, que dificilmente se enquadra nos modelos convencionais de precificação de commodities (O'Connor et al., 2015).

Entre 2010 e 2025, o mercado global passou por transformações expressivas. A produção em minas cresceu de forma quase ininterrupta, alcançando 3.671,6 toneladas em 2025, ao passo que a demanda total superou a barreira das 5.000 toneladas anuais. O movimento mais pronunciado, no entanto, ocorreu nos preços: a cotação média saiu de aproximadamente USD 39.500/kg para USD 110.700/kg, valorização de cerca de 180% em quinze anos que não encontra explicação imediata nos fundamentos físicos do mercado (World Gold Council, 2026).

É justamente essa dissociação parcial entre volumes e preços que motivou o presente estudo. A literatura quantitativa em língua portuguesa ainda aborda o ouro predominantemente como ativo financeiro, focando na sua função de *hedge*, *safe haven* ou na modelagem da sua volatilidade (e.g., Marques & André (2025)), sem integrar de forma sistemática as variáveis de produção, reciclagem e demanda ao modelo analítico. Existe, portanto, espaço para contribuições que examinem as relações estruturais entre oferta, demanda e precificação com base em dados empíricos de longo prazo.

Com base nessa lacuna, este artigo tem por objetivo analisar quantitativamente a dinâmica do mercado global de ouro no período de 2010 a 2025. A análise foi organizada em quatro etapas sequenciais: (i) caracterização estatística das variáveis de oferta, demanda e preço; (ii) exame do balanço anual entre oferta total e demanda; (iii) mensuração das correlações lineares entre as variáveis; e (iv) estimação de um modelo de regressão linear múltipla para a cotação do ouro. Em paralelo, discutem-se os limites estatísticos inerentes ao trabalho com séries temporais curtas e variáveis com tendências de crescimento comuns.

B.2 REFERENCIAL TEÓRICO

A fundamentação teórica deste estudo está organizada em três eixos complementares. O primeiro trata da estrutura do mercado global de ouro, descrevendo os componentes da oferta e da demanda que delimitam o contexto empírico da análise. O segundo aborda os fatores determinantes da formação de preço, com ênfase na literatura que documenta o papel das variáveis macroeconômicas e financeiras na precificação do metal. O terceiro apresenta os métodos quantitativos aplicados ao estudo de *commodities*, discutindo as limitações específicas da regressão linear múltipla quando utilizada em séries temporais.

B.2.1 O mercado global de ouro: estrutura e componentes

Do lado da oferta, o mercado de ouro se estrutura em torno de duas fontes complementares: a produção primária em minas e a reciclagem de ouro já em circulação. A extração em minas responde a um conjunto complexo de determinantes: custos operacionais, disponibilidade de novas jazidas, regulação ambiental e, evidentemente, o próprio nível de preços (Survey, n.d.). A reciclagem, por sua vez, atua como um mecanismo de ajuste de curto prazo: quando a cotação sobe, torna-se economicamente atrativo reprocessar joias antigas, resíduos eletrônicos e outros materiais contendo ouro, ampliando temporariamente a oferta disponível no mercado (World Gold Council, 2026).

A demanda, por outro lado, é notavelmente diversificada. Joalherias, aplicações industriais, investimento em barras e moedas, fundos negociados em bolsa (ETFs) e compras institucionais de bancos centrais compõem um conjunto de fluxos que raramente se movem na mesma direção ao mesmo tempo (World Gold Council, 2026). Essa heterogeneidade funciona como amortecedor natural: retrações em um segmento costumam ser ao menos parcialmente compensadas por expansão em outro, o que contribui para a estabilidade relativa da demanda total ao longo do tempo (O'Connor et al., 2015).

B.2.2 Formação de preço e fatores determinantes

A formação do preço do ouro ocorre predominantemente no London Bullion Market, que domina o mercado global e estabelece cotações de forma contínua com base nos fluxos de negociação (S; Lazar, 2022). Embora o equilíbrio entre oferta e demanda físicas seja um ponto de partida teórico razoável, a literatura empírica sugere que esse mecanismo explica apenas parte do comportamento dos preços. Taxas de juros reais, variações no dólar americano, expectativas inflacionárias e episódios de aversão ao risco global costumam exercer influência mais imediata sobre a cotação do que os dados de produção e reciclagem (Baur; McDermott, 2010).

Esse comportamento tem sido objeto de análise na literatura financeira. Capie, Mills & Wood (2005) demonstraram empiricamente a função do ouro como proteção contra a inflação e a desvalorização cambial. Na mesma linha, Erb & Harvey (2013) argumentaram que o preço do metal responde mais ao seu papel como reserva de valor do que ao balanço físico de oferta e

demanda, o que o distingue fundamentalmente de outras *commodities* industriais, cujos preços tendem a acompanhar de perto os ciclos de produção e consumo.

Ainda assim, a consideração das variáveis físicas pode enriquecer a compreensão do mercado. A trajetória de longo prazo dos preços se desenvolve sobre o pano de fundo das condições estruturais do mercado (Shafiee; Topal, 2010), e compreender como produção, reciclagem e demanda evoluíram ao longo do tempo pode auxiliar na interpretação da dinâmica de preços do metal.

B.2.3 Métodos quantitativos aplicados ao mercado de commodities

A regressão linear múltipla por Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) é um procedimento estatístico que busca estimar a relação entre variáveis ao minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre os valores observados e os previstos (Wooldridge, 2016). O coeficiente de determinação (R^2) expressa a proporção da variância da variável dependente explicada pelo conjunto de preditores, variando de 0 a 1 (Wooldridge, 2016). Segundo Cohen (1988), a magnitude do R^2 pode ser classificada como pequena ($R^2 < 0,13$), média ($0,13 \leq R^2 < 0,26$) ou grande ($R^2 \geq 0,26$). A significância global do modelo é avaliada pela estatística F , cujo p -valor associado indica se o conjunto de preditores contribui de forma estatisticamente significativa para a explicação da variável dependente. Adotou-se o nível de significância convencional de 5% ($\alpha = 0,05$) para todas as inferências realizadas neste estudo (Wooldridge, 2016). Quando aplicada a séries temporais, no entanto, essa técnica enfrenta limitações que precisam ser consideradas. Entre elas, destacam-se a multicolinearidade entre variáveis que compartilham tendências de crescimento (Kutner et al., 2005), a autocorrelação nos resíduos (verificável pelo teste de Durbin-Watson), o comportamento irregular dos erros do modelo (como variância inconstante ou falta de normalidade), e a possível não-estacionariedade das séries, cujo tratamento inadequado pode resultar em regressões espúrias (Granger; Newbold, 1974).

O Fator de Inflação da Variância (VIF) é o indicador utilizado para avaliar a multicolinearidade. O VIF varia de 1 (ausência de colinearidade) a valores arbitrariamente altos; adota-se convencionalmente o limiar de 10, acima do qual se configura multicolinearidade severa (Hair et al., 2019; Kutner et al., 2005). Nessa condição, os erros padrão dos coeficientes são inflados, tornando as estimativas individuais instáveis e de difícil interpretação causal. Convém notar, porém, que isso não elimina necessariamente a capacidade preditiva global do modelo; apenas compromete a atribuição de efeitos individuais a cada preditor (Hair et al., 2019; Kutner et al., 2005).

A normalidade dos resíduos foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk, cuja estatística W varia de 0 a 1. Valores de W próximos a 1 indicam aderência à distribuição normal; a decisão é tomada pelo p -valor associado, considerando-se os resíduos normalmente distribuídos quando $p > 0,05$ (Shapiro; Wilk, 1965).

A autocorrelação serial dos resíduos foi avaliada pelo teste de Durbin-Watson, cuja estatística DW varia de 0 a 4. Valores próximos a 2 indicam ausência de autocorrelação; valores abaixo de

1,5 sugerem autocorrelação positiva, e acima de 2,5, autocorrelação negativa (Durbin; Watson, 1992).

B.3 MATERIAL E MÉTODO

O estudo adota abordagem quantitativa com delineamento descritivo-correlacional. O tratamento e a análise dos dados foram integralmente realizados em Python (versão 3.x), com suporte das bibliotecas *pandas*, *matplotlib*, *seaborn*, *scipy* e *statsmodels*.

B.3.1 Fonte e coleta dos dados

As informações utilizadas foram extraídas do relatório *Gold Demand Trends: Q4 and Full Year 2025* (World Gold Council, 2026). Foram extraídas quatro variáveis anuais referentes ao período 2010-2025, totalizando $n = 16$ observações:

- **Produção:** produção total em minas (toneladas);
- **Reciclagem:** volume de ouro reciclado (toneladas);
- **Demanda:** demanda total de ouro (toneladas);
- **Cotação:** cotação média anual do ouro (USD/kg).

Após limpeza e padronização, os dados numéricos foram consolidados estruturalmente em matrizes e utilizados como base primária para todas as análises empíricas subsequentes do estudo.

B.3.2 Procedimentos de análise

A análise foi conduzida em quatro etapas sequenciais, cada uma correspondendo a um módulo independente de código:

1. **Estatísticas descritivas:** foram calculadas média, desvio padrão, valores extremos e quartis para todas as variáveis numéricas, complementados por *boxplots* com sobreposição dos pontos individuais de cada ano, cujos resultados são apresentados na Figura B.1;
2. **Balanco de mercado:** a oferta total foi obtida pela soma de produção e reciclagem, da qual se subtraiu a demanda para obter o balanço anual. Os resultados foram representados graficamente em eixo duplo, com a série de cotações sobreposta para facilitar a leitura conjunta (a ser analisada detalhadamente na Figura B.2);
3. **Análise de correlações:** a matriz de correlação de Pearson foi calculada entre as quatro variáveis principais e visualizada em *heatmap*. A magnitude das correlações foi classificada segundo os critérios de Dancey & Reidy (2011): fraca ($-0,40 < r < 0,40$), moderada

($0,40 \leq r < 0,70$ ou $-0,70 < r \leq -0,40$) e forte ($r \geq 0,70$ ou $r \leq -0,70$). Para cada par relevante, foram produzidos gráficos de dispersão com linha de regressão simples e intervalo de confiança de 95% (áreas sombreadas que ilustram a margem de incerteza da estimativa: faixas mais estreitas sugerem menor dispersão esperada em torno da tendência central ajustada), conforme Figura B.3 e Figura B.4;

4. **Regressão linear múltipla:** estimou-se um modelo MQO tendo a cotação do ouro como variável dependente e a produção, a reciclagem e a demanda como preditores. O diagnóstico incluiu teste de normalidade de Shapiro-Wilk, gráfico de resíduos *versus* valores ajustados com curva LOWESS, teste de Durbin-Watson para autocorrelação e cálculo do VIF para avaliação de multicolinearidade (detalhado visualmente na Figura B.5).

B.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados são apresentados em quatro subseções que seguem a sequência metodológica adotada no estudo.

B.4.1 Estatísticas descritivas

A Tabela B.1 apresenta a estruturação da série histórica consolidada do mercado aurífero global (2010 a 2025), matriz referencial que fundamentou todas as avaliações descritivas e inferenciais desta subseção.

Tabela B.1 – Série histórica de oferta, demanda e cotação do ouro (2010-2025).

Ano	Produção (t)	Reciclagem (t)	Demanda (t)	Cotação (USD/kg)
2010	2.754,5	1.671,2	4.316,8	39.465,1
2011	2.876,9	1.626,3	4.525,7	50.545,3
2012	2.957,2	1.636,8	4.548,6	53.654,3
2013	3.164,7	1.195,3	4.332,1	45.289,4
2014	3.271,5	1.129,6	4.506,0	40.696,9
2015	3.369,2	1.067,1	4.449,2	37.257,6
2016	3.516,2	1.232,1	4.786,0	40.178,9
2017	3.580,6	1.112,4	4.667,4	44.777,0
2018	3.663,1	1.131,7	4.783,2	40.754,2
2019	3.606,8	1.275,7	4.888,7	44.777,0
2020	3.484,4	1.293,1	4.740,9	57.008,5
2021	3.579,3	1.135,8	4.709,7	57.796,3
2022	3.645,6	1.136,1	4.775,1	57.873,5
2023	3.640,8	1.233,6	4.943,9	62.461,4
2024	3.650,4	1.365,3	4.961,9	76.840,4
2025	3.671,6	1.404,3	5.002,3	110.722,2

Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados do World Gold Council (2026).

Conforme ilustrado na Figura B.1, a produção em minas cresceu de forma consistente ao longo do período, com média de 3.402,1 t e amplitude de 917,1 t entre os valores extremos. O

dado mais relevante, porém, é que o máximo histórico de 3.671,6 t foi atingido justamente em 2025, indicativo de que a capacidade produtiva global ainda se encontrava em fase de expansão ao final do intervalo analisado. A reciclagem, por sua vez, destacou-se com o maior coeficiente de variação (uma medida de dispersão relativa que expressa o desvio padrão como porcentagem da média (Hair et al., 2019)) limitando-se às três variáveis físicas de volume (produção, reciclagem e demanda). Com um índice de 15,4%, a reciclagem refletiu forte sensibilidade ao nível de preços: em períodos de cotação mais baixa, como os anos de 2014 a 2016, o volume reciclado recuou visivelmente; nas fases de preço elevado, voltou a crescer.

A demanda total chamou atenção pela estabilidade: com desvio padrão de apenas 217,5 t e coeficiente de variação de 4,6%, foi a variável menos volátil do conjunto físico, sugerindo que a demanda global por ouro possui caráter estruturalmente inelástico, sustentada por fluxos diversificados que tendem a se compensar ao longo do tempo. Por fim, ao observar isoladamente o eixo financeiro, o contraste é imediato: o preço do ouro (cotação) apresentou o coeficiente de variação mais expressivo de todo o estudo, batendo 34,4%. Esse elevado índice, somado à expressiva variação de USD 37.257/kg para o pico de USD 110.722/kg na janela de quinze anos (impulsionada por um forte salto a partir de 2022), deixa claro que a volatilidade dos preços obedece a uma lógica de mercado muito mais ríspida do que os movimentos dos volumes físicos.

Para orientar a interpretação visual da Figura B.1, ressalta-se que o retângulo principal (*box*) concentra a porção central da amostra, representando a sua variância (sob a forma de intervalo interquartil). O segmento horizontal preto no interior do retângulo indica a **mediana**, enquanto os pontos sobrepostos ao diagrama ilustram os valores anuais individuais ao longo da série.

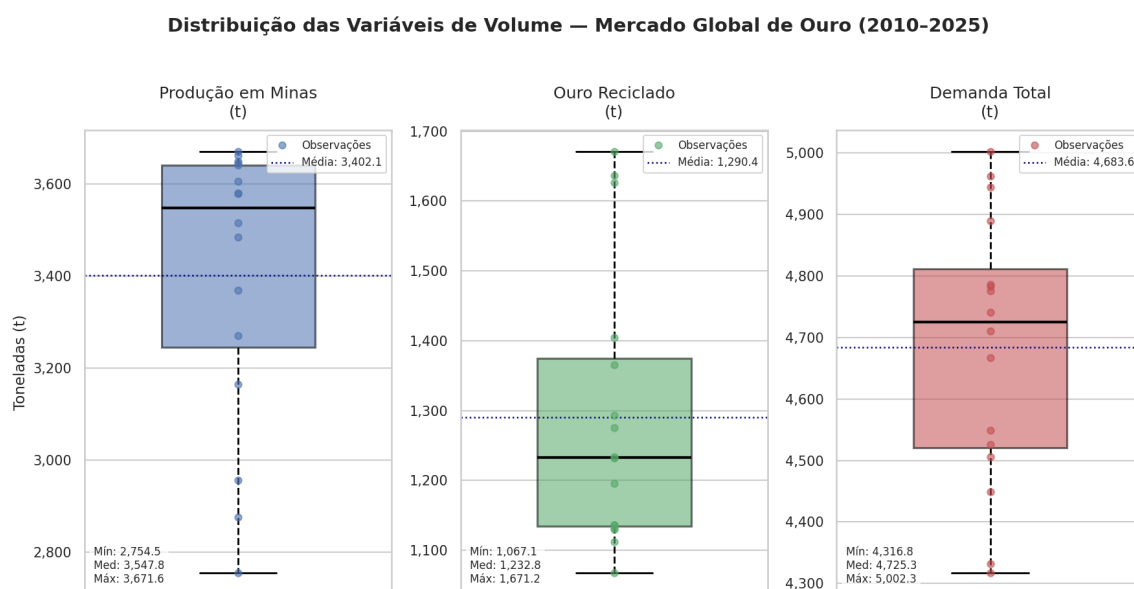


Figura B.1 – Distribuição das variáveis de volume do mercado global de ouro (2010-2025).

Fonte: Elaborada pelos autores com base em World Gold Council (2026).

B.4.2 Balanço de mercado (oferta total vs. demanda)

Ao longo dos 16 anos analisados, o mercado operou em superávit em 10 ocasiões e em déficit nas 6 restantes, com balanço médio de apenas +8,9 toneladas, número que, em escala global, é virtualmente zero. Esse resultado aponta para um mercado físico que se manteve próximo ao equilíbrio de forma persistente, o que não surpreende, dada a natureza do ouro: com um estoque acumulado ao longo de milênios disponível para absorver oscilações pontuais, déficits e superávits de curto prazo raramente se traduzem em pressão imediata sobre os preços.

Os episódios extremos, no entanto, merecem registro. O maior déficit ocorreu em 2014 (−104,9 t), ano em que a cotação também recuou de forma expressiva. Em 2023, um novo déficit relevante (−69,5 t) foi observado, impulsionado pelo crescimento excepcional da demanda. Os superávits de 2024 (+53,8 t) e 2025 (+73,6 t), no entanto, refletem o alcance de recordes históricos de produção, num contexto em que a oferta voltou a superar uma demanda que também seguia em crescimento.

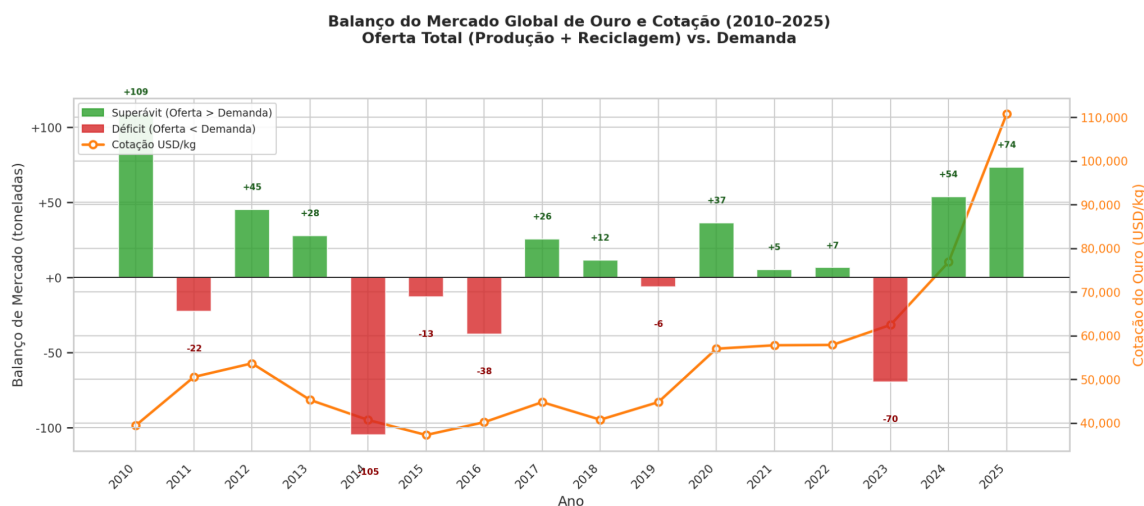


Figura B.2 – Balanço anual entre oferta total e demanda do mercado global de ouro, com cotação sobreposta (2010-2025).

Fonte: Elaborada pelos autores com base em World Gold Council (2026).

B.4.3 Análise de correlação

Conforme evidenciado na Figura B.3 e detalhado graficamente na Figura B.4, a correlação entre produção e demanda ($r = 0,82$) é a mais elevada do conjunto, mas exige interpretação cuidadosa. Ambas as variáveis cresceram ao longo do período por razões que não se explicam necessariamente de forma recíproca: a demanda expandiu-se em função da diversificação dos usos do ouro, enquanto a produção refletiu a maturação de projetos minerários de longo prazo. Parte dessa associação pode ser, portanto, espúria, decorrente de tendências temporais comuns, e não de uma relação causal direta entre produção e consumo.

A relação inversa entre produção e reciclagem ($r = -0,70$) é teoricamente mais relevante. Ela indica que, nos anos em que a extração primária foi mais baixa, a reciclagem tendeu a

compensar a lacuna, e vice-versa. Esse comportamento é consistente com o papel da reciclagem como mecanismo flexível de ajuste da oferta: quando a produção recua, o mercado encontra na reconversão de material já circulante uma fonte complementar de metal.

Por sua vez, a correlação entre demanda e cotação ($r = 0,63$), embora positiva, ficou abaixo do que a teoria econômica convencional poderia sugerir. O valor moderado reforça o argumento de Erb & Harvey (2013): a cotação do ouro responde a um conjunto mais amplo de variáveis (taxas de juros, câmbio, percepção de risco global) do que aquele capturado pelos dados físicos de demanda.

A correlação entre reciclagem e cotação ($r = 0,20$) também mereceu atenção por sua fraqueza. Seria esperada uma associação positiva mais expressiva, dado que preços mais altos deveriam incentivar o reprocessamento de material. Esse resultado pode refletir defasagens temporais na decisão de reciclar, ou a influência de fatores estruturais como disponibilidade de sucata e capacidade instalada de refino, que moderam a sensibilidade da reciclagem ao nível de preços.

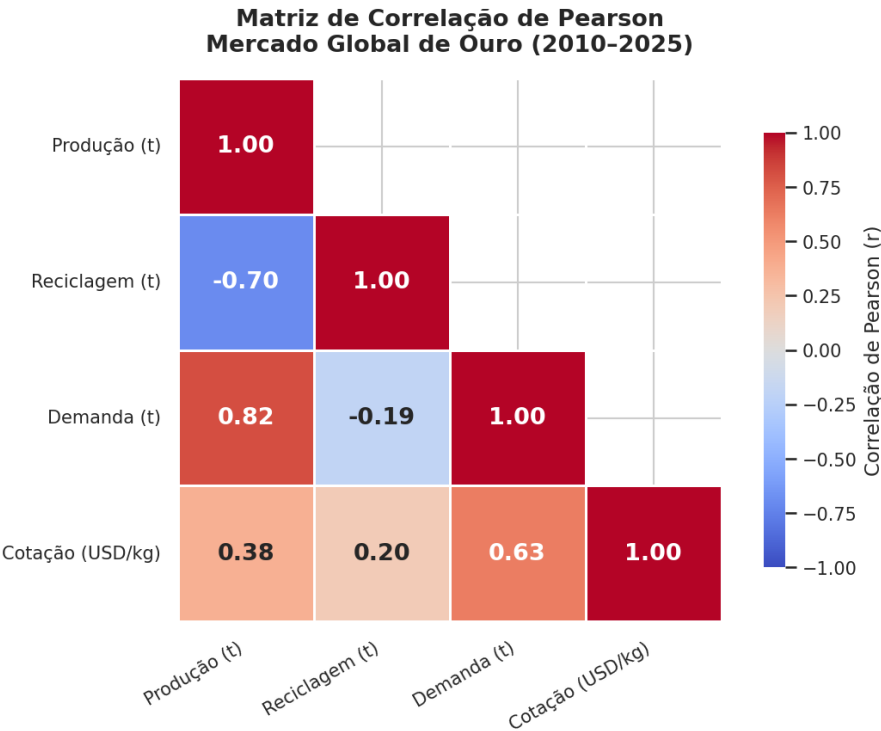


Figura B.3 – Matriz de correlação de Pearson entre as variáveis do mercado global de ouro (2010-2025).

Fonte: Elaborada pelos autores com base em World Gold Council (2026).

B.4.4 Regressão linear múltipla

O modelo de regressão linear múltipla estimado (com diagnóstico visual detalhado na Figura B.5) tem como variável dependente a Cotação do Ouro (USD/kg) e como preditores a Produção (t), a Reciclagem (t) e a Demanda (t).

Gráficos de Dispersão com Regressão Linear — Mercado Global de Ouro (2010-2025)

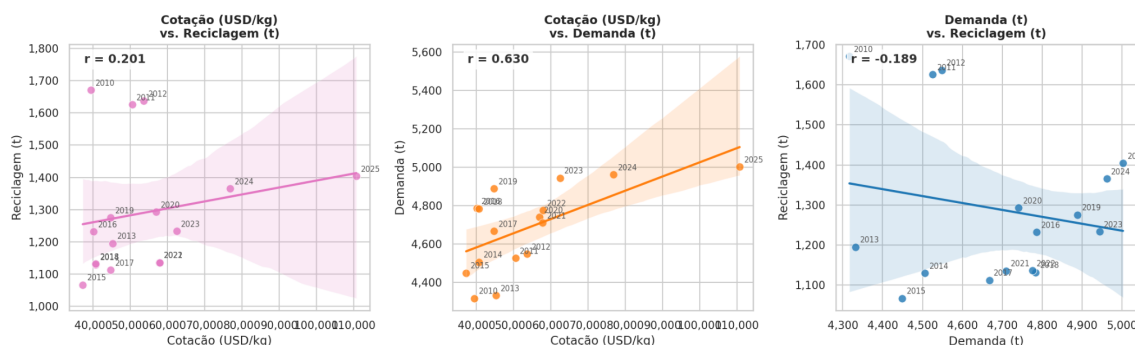


Figura B.4 – Gráficos de dispersão com linha de regressão simples para os pares de variáveis selecionados. As áreas sombreadas em torno das linhas representam o intervalo de confiança de 95%.

Fonte: Elaborada pelos autores com base em World Gold Council (2026).

O modelo apresentou $R^2 = 0,572$, classificado como efeito grande, segundo Cohen (1988), e R^2 ajustado = 0,46, com estatística $F = 5,35$ ($p = 0,014$), o que indica significância global ao nível de 5%. Em outras palavras, o conjunto das três variáveis de volume explica conjuntamente uma proporção significativa da variação da cotação. Entretanto, nenhum dos preditores individualmente atingiu o limiar convencional de significância estatística: Produção ($p = 0,190$), Reciclagem ($p = 0,098$) e Demanda ($p = 0,558$). Essa combinação, de modelo globalmente significativo mas com nenhum coeficiente individualmente significativo, é um padrão clássico de multicolinearidade severa.

Os três preditores apresentaram VIFs muito acima do limiar crítico de 10: Produção (VIF = 44,33), Demanda (VIF = 23,60) e Reciclagem (VIF = 15,08). O valor mais expressivo recai sobre a Produção, indicando que quase toda a variação dessa variável já é explicada pelas demais, o que torna seu coeficiente particularmente suscetível a instabilidades. Esse cenário não é surpreendente: quando três séries temporais crescem conjuntamente ao longo de 16 anos, algum grau de colinearidade é praticamente inevitável. Como anteriormente mencionado, tal fato não compromete a capacidade preditiva do modelo como um todo, mas exige que os coeficientes individuais não sejam interpretados como efeitos causais independentes.

O diagnóstico de resíduos revelou um quadro misto. Do lado favorável, o teste de Shapiro-Wilk ($W = 0,953$; $p = 0,537$) não encontrou evidências contra a normalidade dos resíduos, pressuposto que foi, portanto, atendido. Do lado desfavorável, o teste de Durbin-Watson retornou $DW = 0,950$, valor consideravelmente abaixo do intervalo de referência (1,5 a 2,5), sinalizando autocorrelação positiva nos resíduos. Essa violação é esperada em séries temporais curtas e com variáveis que compartilham trajetórias de crescimento similares; seu efeito principal é inflar artificialmente a precisão aparente dos erros padrão estimados, exigindo cautela na interpretação inferencial dos resultados.

Ainda que as limitações sejam reais, o modelo possui valor descritivo que não deve ser descartado. As variáveis físicas de oferta e demanda explicam conjuntamente cerca de 57% da

variação da cotação no período analisado. O restante, cerca de 43% da variância, permanece atribuível a fatores externos ao escopo do modelo, como as taxas de juros reais dos Estados Unidos, o comportamento institucional dos bancos centrais, a demanda especulativa via ETFs e eventos geopolíticos de impacto sobre a percepção de risco global.

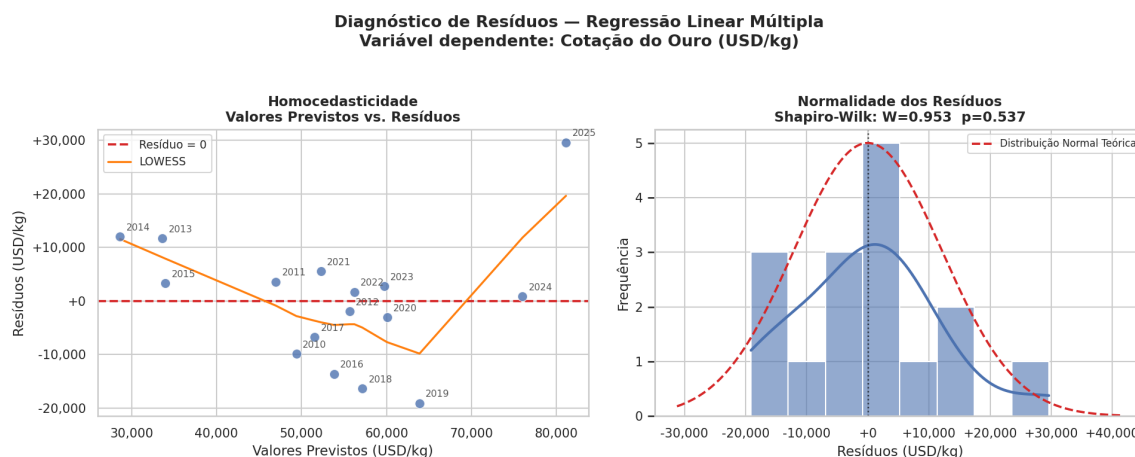


Figura B.5 – Diagnóstico de resíduos do modelo de regressão linear múltipla: resíduos *versus* valores ajustados e distribuição dos resíduos padronizados.

Fonte: Elaborada pelos autores com base em World Gold Council (2026).

B.5 CONCLUSÃO

Este estudo analisou quantitativamente a dinâmica do mercado global de ouro no período de 2010 a 2025, percorrendo quatro dimensões analíticas complementares: caracterização descritiva das variáveis, balanço anual entre oferta e demanda, análise de correlações lineares e estimação de modelo de regressão múltipla.

Os resultados permitem delinear algumas conclusões substantivas sobre o período estudado. Em termos físicos, o mercado demonstrou capacidade consistente de auto-ajuste: o balanço médio de +8,9 toneladas anuais indica um equilíbrio quase perfeito entre oferta e demanda, sustentado pela interação complementar entre produção primária e reciclagem. Ao mesmo tempo, a cotação do ouro quase triplicou no período, movimento que não encontra correspondência proporcional nos fundamentos físicos e que evidencia, uma vez mais, o peso determinante de variáveis financeiras e macroeconômicas na formação dos preços.

As correlações identificadas reforçam esse diagnóstico. A forte associação entre produção e demanda ($r = 0,82$) reflete trajetórias de crescimento paralelo que, ao menos em parte, decorrem de tendências temporais comuns. A correlação inversa entre produção e reciclagem ($r = -0,70$) é sugestiva de um mecanismo de substituição parcial na oferta. Já a correlação moderada entre demanda e cotação ($r = 0,63$) indica que o crescimento da demanda física, embora relevante, não é suficiente por si só para explicar a magnitude das variações de preço observadas.

O modelo de regressão múltipla, com R^2 de 0,572, confirmou que as variáveis físicas capturam algo mais que a metade da variação da cotação. A multicolinearidade severa em todos

os preditores (VIF máximo de 44,33) e a autocorrelação positiva nos resíduos ($DW = 0,95$) apontam de forma convergente para as limitações inerentes à análise de séries temporais curtas com variáveis que compartilham tendências de longo prazo. Esses resultados não invalidam o modelo, mas impõem cautela na interpretação dos coeficientes individuais.

O estudo tem limitações que merecem reconhecimento. A amostra de 16 observações anuais situa-se abaixo do mínimo de 50 observações recomendado pela literatura clássica de séries temporais (Box et al., 2016), o que restringe severamente o repertório metodológico disponível. Embora o mercado aurífero conte com registros de longo prazo, a opção metodológica por tal corte temporal justifica-se pela escolha de uma única fonte de dados harmonizada capaz de agrupar simultaneamente produção, demanda e reciclagem sob a mesma métrica institucional. Órgãos como o *U.S. Geological Survey* (USGS) dispõem de estatísticas seculares (U.S. Geological Survey, 2025), porém majoritariamente focadas na exploração primária e com disparidades numéricas próprias da metodologia do agrupamento estatístico. A integração de dados históricos alternativos com a base recente do *World Gold Council* (fundamental por consolidar as três frentes do balanço de mercado) exigiria combinar *datasets* metodologicamente incongruentes. O ônus temporal de utilizar 16 anos garantiu o bônus de avaliar as três variáveis matrizes com integridade de uma matriz de fonte única. Inegavelmente, amostras dessa magnitude comprometem o poder estatístico dos testes e a precisão na estimação de parâmetros, uma vez que a utilização de defasagens consome rapidamente os graus de liberdade (Enders, 2015). A ausência de testes de estacionariedade (ADF/KPSS) deixa em aberto a possibilidade de regressões espúrias. E a exclusão de variáveis macroeconômicas (como taxas de juros reais, índice do dólar e compras de bancos centrais) limita o alcance explicativo dos resultados.

Para pesquisas futuras, recomenda-se a adoção de dados trimestrais, o que ampliaria a amostra para aproximadamente 64 observações e tornaria viável a aplicação de métodos mais sofisticados de séries temporais. A incorporação de variáveis macroeconômicas ao modelo, combinada com técnicas de cointegração ou vetores autorregressivos (VAR), permitiria capturar as dinâmicas de longo prazo entre preços e fundamentos do mercado aurífero com maior rigor metodológico.

ANEXO A – POLÍTICAS EDITORIAIS DAS EDITORAS

Este anexo documenta as políticas de direitos autorais e compartilhamento das editoras às quais foram submetidos os artigos que fundamentam esta dissertação, em conformidade com as orientações da Biblioteca da UNESP.

BASE: SCIELO (SCIENTIFIC ELECTRONIC LIBRARY ONLINE)

Base: SciELO (Scientific Electronic Library Online)

URL da política: <https://www.scielo.br/about/>

Licença de publicação: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Resumo da política:

Os periódicos da plataforma SciELO publicam seus artigos sob licença CC-BY 4.0, que permite:

- **Compartilhar:** copiar e redistribuir o material em qualquer meio ou formato
- **Adaptar:** remixar, transformar e criar a partir do material para qualquer finalidade, inclusive comercial
- **Atribuição:** o licenciante não pode revogar essas liberdades desde que sejam seguidos os termos da licença

A única exigência é que seja dada a atribuição apropriada ao autor original. Não é necessária autorização formal para incluir o artigo em teses, dissertações ou repositórios institucionais. Esta política é válida para todos os periódicos hospedados na plataforma SciELO.

Verificado em: dezembro de 2025

EDITORA: ELSEVIER

Editora: Elsevier

URL da política: <https://www.elsevier.com/about/policies/sharing>

Modelo de publicação: Subscription ou Open Access (acordo CAPES-Elsevier)

Resumo da política de direitos autorais da Elsevier:

Conforme estabelecido na “Elsevier Sharing Policy”, os autores que publicam em periódicos da Elsevier retêm os seguintes direitos sobre seus artigos:

- **Direito de reutilizar em trabalhos próprios,** incluindo:

- **Inclusão em tese ou dissertação** (versão aceita ou publicada)
- Uso da versão aceita (accepted manuscript) em repositórios institucionais
- Reutilização de figuras, tabelas e excertos em trabalhos futuros
- Postagem da versão aceita em website pessoal ou institucional
- **Versão permitida para repositórios:** "Accepted manuscript"(versão aceita após peer review) ou versão publicada se Open Access
- **Requisitos:**
 - Incluir citação completa do artigo publicado
 - Incluir link para a versão publicada no ScienceDirect quando disponível
 - Mencionar acordo CAPES-Elsevier se aplicável (Open Access gratuito para UNESP)

Citação literal da política (tradução livre):

"Authors can include their articles in full or in part in a thesis or dissertation for non-commercial purposes. [...] Authors retain the right to use the accepted manuscript version of their article in their thesis or dissertation."

Acordo CAPES-Elsevier:

Como autor correspondente afiliado à UNESP, este artigo pode ser publicado em Open Access sem custos por meio do acordo entre CAPES e Elsevier, válido até 31/12/2028. Artigos Open Access podem ser depositados na versão publicada final.

Conclusão: A política da Elsevier autoriza explicitamente a inclusão da versão aceita de artigos nesta dissertação e seu depósito no repositório institucional da UNESP. Se publicado em Open Access por meio do acordo CAPES-Elsevier, a versão final publicada também pode ser incluída. Esta política é aplicável a todos os periódicos publicados pela Elsevier.

Verificado em: janeiro de 2026

EDITORA: SPRINGER NATURE

Editora: Springer Nature

URL da política: <https://www.springernature.com/gp/open-science/policies/journal-policies/licensing-and-copyright>

Modelo de publicação: Subscription ou Open Access

Resumo da política de direitos autorais da Springer Nature:

Conforme estabelecido na política de direitos autorais da Springer Nature, os autores que publicam em periódicos da editora retêm os seguintes direitos sobre seus artigos:

- **Direito de reutilizar em trabalhos próprios**, incluindo:

- **Inclusão em tese ou dissertação** (Version of Record, integral ou parcialmente)
- Reprodução e disponibilização da tese conforme exigido pela instituição acadêmica
- Reutilização de figuras, tabelas e excertos em trabalhos futuros
- Compartilhamento da versão aceita (accepted manuscript) em repositório institucional
- **Versão permitida para repositórios:** “Accepted manuscript” (versão aceita após peer review) ou Version of Record se Open Access
- **Requisitos:**
 - Incluir citação completa do artigo publicado conforme práticas acadêmicas padrão
 - Incluir declaração de reconhecimento: “Reproduced with permission from Springer Nature”
 - Incluir link para a versão publicada quando disponível

Citação literal da política (tradução livre):

“Authors have the right to reuse the Version of Record of their article, in whole or in part, in their own thesis or dissertation. Authors are permitted to reproduce and make their thesis available as required by their awarding academic institution.”

Conclusão: A política da Springer Nature autoriza explicitamente a inclusão da Version of Record de artigos nesta dissertação e seu depósito no repositório institucional da UNESP, sem necessidade de autorização prévia formal, desde que a publicação original seja devidamente citada. Esta política é aplicável a todos os periódicos publicados pela Springer Nature.

Verificado em: junho de 2026

EDITORA: SAGE PUBLICATIONS

Editora: SAGE Publications

URL da política: <https://www.sagepub.com/journals/permissions/sages-author-archiving-and-re-use-guidelines>

Modelo de publicação: Subscription ou Open Access (SAGE Choice / Gold Open Access)

Resumo da política de direitos autorais da SAGE Publications:

Conforme estabelecido nas “Author Archiving and Re-Use Guidelines” da SAGE, os autores que publicam em periódicos da editora retêm os seguintes direitos sobre seus artigos:

- **Direito de reutilizar em trabalhos próprios, incluindo:**
 - **Inclusão em dissertação ou tese** (Final Published PDF, Accepted Manuscript ou Original Submission)

- Inclusão mesmo quando a dissertação for depositada em repositório institucional ou base de dados eletrônica
 - Uso para fins de ensino próprio, desde que o acesso eletrônico permaneça restrito
 - Compartilhamento individual com colegas de pesquisa para fins não comerciais
 - Inclusão em livro de autoria ou edição própria
- **Versão permitida para dissertações:** Final Published PDF, Accepted Manuscript ou Original Submission (a critério do autor)
 - **Requisitos:**
 - Incluir citação completa no formato: Autor(es), Título da Contribuição, Título do Periódico (Volume e Número) pp. xx-xx. Copyright © [ano] (Detentor dos Direitos). DOI: [número DOI]
 - Acesso à Original Submission e Accepted Manuscript fornecido gratuitamente
 - Restrição de reutilização a fins não comerciais e sem derivações

Citação literal da política:

“You may use the Final Published PDF (or Original Submission or Accepted Manuscript, if preferred) [...] in your dissertation or thesis, including where the dissertation or thesis will be posted in any electronic Institutional Repository or database.”

Conclusão: A política da SAGE autoriza explicitamente a inclusão do Final Published PDF de artigos nesta dissertação e seu depósito no repositório institucional da UNESP, sem necessidade de autorização prévia formal. A SAGE é particularmente permissiva ao autorizar o uso da versão final publicada (e não apenas a versão aceita) para este fim. Esta política é aplicável a todos os periódicos publicados pela SAGE, com exceções pontuais listadas em sua página de política editorial.

Verificado em: junho de 2026

DADOS CURRICULARES

IDENTIFICAÇÃO	
	Anderson Adelson de Matos Data nasc. 24/03/1982
Nacionalidade	Brasileiro
Nome em citações bibliográficas	Matos, Anderson Adelson de Matos, A. A.
Currículo Lattes	http://lattes.cnpq.br/1695529923658468
ORCID	https://orcid.org/0009-0009-7824-6813
Outro identificador	
FORMAÇÃO ACADÊMICA	
2023/Atual	Mestrado em Engenharia UNESP - Faculdade de Engenharia - Campus de Guaratinguetá
2025/Atual	Especialização em Engenharia DevOps (360h) - Em andamento Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Mato Grosso (IFMT)
2025/Atual	Especialização em Gestão na Educação Profissional e Tecnológica (360h) - Em andamento Instituto Federal de São Paulo (IFSP)
2023/2024	Especialização em Gestão Escolar (360h) Centro Universitário Senac (SENAC/SP)
2010/2011	MBA - Gerência de Tecnologia da Informação (700h) Universidade de Taubaté (UNITAU)
2023/Atual	Bacharelado em Engenharia de Software - Em andamento Anhanguera
2006/2007	Curso Superior de Tecnologia em Webdesign - Tecnólogo Universidade de Taubaté (UNITAU)
2002/2003	Técnico em Informática ETEC João Gomes de Araújo
PRODUÇÃO BIBLIOGRÁFICA	
MATOS, A. A.; CUNHA, J. A. P. ; SANTOS, J. C. ; ROSA JUNIOR, O. ; RICHETTO, M. R. S. . Projeto Pedagógico do Curso de Tecnologia em Análise e Desenvolvimento de Sistemas (Faculdade de Tecnologia SENAI Felix Guisard - 3.01/SP). 2022. (Desenvolvimento de material didático ou instrucional - Projeto Pedagógico de Curso).	