A EXPANSÃO DO "CEMITÉRIO DE SATÉLITES" - LIXO ESPACIAL E SUSTENTABILIDADE ORBITAL: DESAFIOS CONTEMPORÂNEOS E PERSPECTIVAS FUTURAS

Queiroz, Clarice[1]; B. Prado[2]; B. Strapasson[3]; Carine P. S. de Souza[4]; G. Doche[5]; Jamily Soares Ribeiro[6]; L. G. P. Sá[5]

[1] Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, Brasil, clariceemille@gmail.com. [2] Colégio Master, Campo Grande - MS, Brasil, bruna.gp09@gmail.com. [3] Universidade Federal do Paraná, Curitiba - PR, Brasil, bruno.strapasson@ufpr.br. *[4]Centro de Ensino Médio Integrado do Gama, Brasília - DF, Brasil,* carinepsouza00@gmail.com. *[5]Centro Universitário UNICEPLAC, Gama - DF, Brasil,* grazigold804@gmail.com *e* gustavo.luis0503@gmail.com. *Universidade Federal do ABC, Santo André - SP, Brasil, jsr10@aluno.ifnmg.edu.br.*

Resumo: O crescimento acelerado do setor espacial nas últimas décadas, impulsionado pela redução dos custos de lançamento e pela expansão das megaconstelações de pequenos satélites, intensificou significativamente a problemática do lixo espacial. Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo analisar a evolução recente dos detritos orbitais, seus impactos sobre a segurança das operações espaciais e as principais estratégias de mitigação atualmente propostas. A metodologia utilizada baseia-se em uma revisão bibliográfica qualitativa, fundamentada em artigos científicos e relatórios técnicos nacionais e internacionais. Os resultados evidenciam um aumento expressivo da densidade de detritos em órbita terrestre, elevando o risco de colisões e comprometendo a sustentabilidade das atividades espaciais. Verificou-se, ainda, que,

embora existam avanços tecnológicos relacionados ao monitoramento e à remoção ativa de resíduos orbitais, persistem limitações operacionais, econômicas e regulatórias. Conclui-se que a mitigação do lixo espacial constitui um desafio multidimensional, exigindo cooperação internacional, fortalecimento da governança espacial e desenvolvimento contínuo de tecnologias sustentáveis.

Palavras-chave: lixo espacial; detritos orbitais; sustentabilidade espacial; governança orbital; colisões espaciais.

THE EXPANSION OF THE "SATELLITE CEMETERY"—SPACE DEBRIS AND ORBITAL SUSTAINABILITY: CONTEMPORARY CHALLENGES AND FUTURE PERSPECTIVES

Queiroz, Clarice[1]; B. Prado[2]; B. Strapasson[3]; Carine P. S. de Souza[4]; G. Doche[5]; Jamily Soares Ribeiro[6]; L. G. P. Sá[5]

[1] *Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, Brazil, clariceemille@gmail.com.*

[2] *Colégio Master, Campo Grande - MS, Brazil, bruna.gp09@gmail.com.*

[3] *Universidade Federal do Paraná, Curitiba - PR, Brazil,* bruno.strapasson@ufpr.br.

[4]*Centro de Ensino Médio Integrado do Gama, Brasília - DF, Brazil,* carinepsouza00@gmail.com.

[5]*Centro Universitário UNICEPLAC, Gama - DF, Brazil,* grazigold804@gmail.com *e* gustavo.luis0503@gmail.com.

[6]*Universidade Federal do ABC, Santo Andŕe - SP, Brazil, jsr10@aluno.ifnmg.edu.br.*

Summary: The accelerated growth of the space sector in recent decades, driven by reduced launch costs and the expansion of small satellite megaconstellations, has significantly intensified the problem of space debris. In this context, the present study aims to analyze the recent evolution of orbital debris, its impacts on the safety of space operations, and the main mitigation strategies currently proposed. The methodology is based on a qualitative bibliographic review supported by scientific articles and national

and international technical reports. The results reveal a significant increase in the density of debris in Earth orbit, raising the risk of collisions and compromising the sustainability of space activities. It was also verified that, although technological advances related to orbital debris monitoring and active removal exist, operational, economic, and regulatory limitations still persist. It is concluded that the mitigation of space debris constitutes a multidimensional challenge, requiring international cooperation, strengthening of space governance, and continuous development of sustainable technologies.

Key words: space debris; orbital debris; space sustainability; orbital governance; space collisions.

INTRODUÇÃO

A intensificação das atividades espaciais nas últimas décadas ampliou significativamente a presença de objetos artificiais em órbita terrestre. O avanço tecnológico, aliado à redução dos custos de lançamento e à crescente participação do setor privado, favoreceu a expansão das chamadas megaconstelações de satélites, especialmente em órbita terrestre baixa (Low Earth Orbit – LEO). Esse cenário contribuiu diretamente para o aumento da quantidade de detritos espaciais presentes ao redor do planeta (KESSLER; COUR-PALAIS, 1978).

O lixo espacial é composto por satélites desativados, estágios de foguetes, fragmentos oriundos de colisões e resíduos resultantes de missões espaciais anteriores. Mesmo partículas de pequenas dimensões representam riscos significativos, considerando as elevadas velocidades orbitais envolvidas. Segundo Krisko (2011), impactos entre detritos e satélites ativos podem ocasionar danos severos, comprometendo operações espaciais, serviços de comunicação e sistemas de monitoramento terrestre.

Além disso, instituições internacionais, como a NASA e a ESA, têm alertado para os riscos crescentes causados pelos resíduos orbitais. A NASA (2025) afirma que “a questão dos detritos orbitais é cada vez mais séria que pode impedir o acesso ao espaço e complicar assuntos que vão desde operações de satélites de comunicação à segurança de astronautas” (tradução nossa), enquanto a ESA (2025) destaca que “algumas regiões orbitais podem se tornar inutilizáveis em razão da alta densidade de detritos espaciais”. Nesse contexto, a problemática do lixo espacial ultrapassa a dimensão puramente tecnológica, envolvendo também questões econômicas, ambientais e geopolíticas.

Dados recentes da ESA indicam que atualmente existem mais de 36 mil objetos maiores que 10 centímetros monitorados em órbita terrestre, além de milhões de fragmentos menores que não podem ser rastreados continuamente, mas que ainda apresentam elevado potencial destrutivo. Esse crescimento demonstra a necessidade urgente de estratégias internacionais voltadas à sustentabilidade orbital.

Dessa forma, torna-se fundamental compreender os impactos do crescimento desordenado das atividades espaciais, bem como analisar as estratégias de mitigação atualmente desenvolvidas para garantir a utilização sustentável do ambiente orbital nas próximas décadas.

METODOLOGIA

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa de natureza qualitativa, desenvolvida por meio de revisão bibliográfica. Foram analisados artigos científicos, relatórios técnicos e documentos institucionais relacionados ao lixo espacial, à dinâmica orbital e às estratégias de mitigação de detritos espaciais.

A seleção das fontes priorizou publicações de relevância internacional, especialmente estudos vinculados a instituições aeroespaciais reconhecidas, como NASA, ESA e centros de pesquisa especializados em sustentabilidade orbital. Também foram considerados trabalhos voltados à compreensão da Síndrome de Kessler, da remoção ativa de detritos e das implicações regulatórias associadas ao crescimento das atividades espaciais.

Os materiais analisados foram comparados a partir de critérios relacionados à relevância científica, atualidade das informações e contribuição para a compreensão dos impactos ambientais, econômicos e tecnológicos associados aos detritos espaciais. A análise buscou identificar padrões de crescimento dos resíduos orbitais, os principais riscos associados às colisões espaciais e as perspectivas futuras relacionadas à preservação do ambiente orbital.

Além da revisão bibliográfica, foram utilizados dados públicos para a elaboração dos gráficos apresentados neste estudo. As informações referentes aos lançamentos espaciais e à atividade orbital foram obtidas por meio das plataformas Space Stats e Orbital Radar, enquanto dados relacionados aos detritos espaciais foram consultados junto ao Orbital Debris Program Office da NASA. Essas bases foram empregadas para complementar a análise qualitativa e ilustrar tendências recentes associadas ao crescimento das atividades espaciais e da população de detritos orbitais.

RESULTADOS

Os resultados obtidos evidenciam um crescimento contínuo da quantidade de detritos orbitais, sobretudo em órbita terrestre baixa. Esse aumento está diretamente relacionado à expansão das atividades espaciais comerciais, ao crescimento das megaconstelações de satélites e à ampliação da participação de empresas privadas no setor aeroespacial (LIOU, 2011).

Verificou-se, ainda, que a elevada densidade de detritos espaciais intensifica significativamente os riscos de colisões orbitais. Segundo Kessler e Cour-Palais (1978), impactos entre objetos espaciais podem gerar novos fragmentos, aumentando progressivamente a quantidade de detritos em órbita e elevando a probabilidade de novas colisões, o que pode tornar determinadas regiões orbitais perigosas ou até inviáveis para futuras operações espaciais por longos períodos.

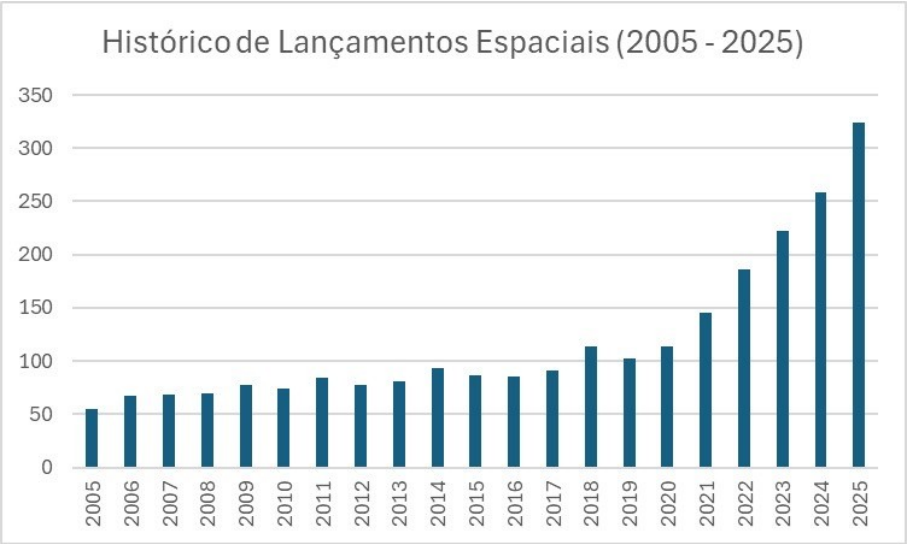
Também foi identificado o desenvolvimento crescente de tecnologias voltadas ao monitoramento e à remoção ativa de resíduos espaciais. Países asiáticos, especialmente China e Japão, têm investido em mecanismos autônomos de captura, rastreamento orbital e sistemas eletromagnéticos de remoção de detritos. Entretanto, grande parte dessas tecnologias ainda se encontra em fase experimental, limitando sua aplicação em larga escala.

DISCUSSÃO

Crescimento das atividades espaciais e sustentabilidade orbital

A análise dos estudos selecionados demonstra que o crescimento acelerado do setor espacial ocorre de maneira diretamente associada ao aumento da produção de resíduos orbitais. A miniaturização de satélites, aliada à redução dos custos de lançamento e ao avanço tecnológico, democratizou o acesso ao espaço, permitindo a ampliação das atividades de governos, universidades e empresas privadas. Como consequência, observa-se um crescimento contínuo da quantidade de objetos artificiais presentes em órbita terrestre, especialmente em órbita baixa.

Figura 1. *Histórico de lançamentos espaciais entre 2005 e 2025*



Fonte: Elaborado por L. G. P. Sá com dados de Orbital Radar (2026)

Conforme observado na Figura 1, o número de lançamentos espaciais apresentou crescimento significativo nas últimas duas décadas, especialmente a partir de 2021, refletindo a expansão das atividades comerciais e das megaconstelações de satélites.

Entretanto, esse avanço tecnológico ocorre de forma assimétrica em relação à capacidade de gestão e regulação do ambiente orbital. Embora o número de satélites e lançamentos espaciais tenha aumentado significativamente nas últimas décadas, muitos objetos desativados permanecem em órbita sem mecanismos obrigatórios e universalmente aplicados para sua remoção ou descarte seguro. Além disso, os acordos internacionais existentes ainda possuem limitações quanto à fiscalização e ao cumprimento efetivo das medidas de mitigação de resíduos espaciais. Dessa forma, o aumento contínuo da densidade de detritos intensifica os riscos de colisões e compromete a sustentabilidade das operações espaciais futuras.

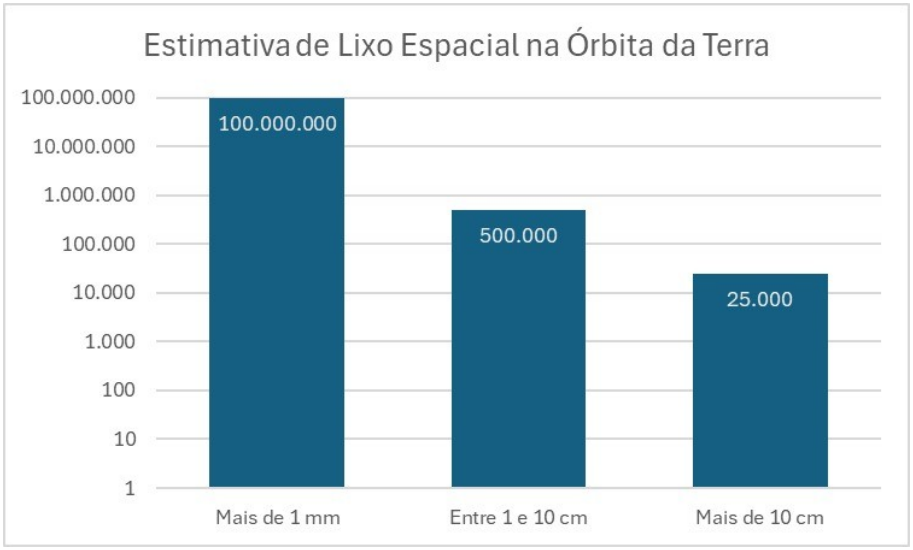
Nesse contexto, a problemática dos resíduos espaciais reproduz padrões históricos de exploração inadequada dos recursos naturais terrestres. Durante décadas, a humanidade explorou extensas áreas do planeta sem considerar plenamente os impactos ambientais futuros, contribuindo para processos de poluição, degradação ambiental e acúmulo de resíduos. De maneira semelhante, o ambiente orbital começa a apresentar sinais crescentes de saturação, transformando-se progressivamente em um espaço marcado pela presença de fragmentos metálicos, satélites desativados e resíduos oriundos de colisões anteriores.

Assim, torna-se evidente que a exploração espacial contemporânea exige não apenas inovação tecnológica, mas também planejamento sustentável e responsabilidade ambiental internacional.

Riscos associados aos detritos orbitais

Os resultados obtidos indicam que a crescente presença de fragmentos espaciais representa uma ameaça significativa à segurança orbital. Mesmo partículas de pequenas dimensões possuem elevado potencial destrutivo devido às altas velocidades presentes em órbita terrestre, podendo causar danos severos a satélites ativos, estações espaciais e futuras missões tripuladas.

Figura 2. *Estimativa da população de detritos espaciais por faixa de tamanho*



Fonte: Elaborado por L. G. P. Sá com dados da NASA Orbital Debris Program Office (2025)

A Figura 2 evidencia que a maior parte dos detritos espaciais é composta por fragmentos muito pequenos, frequentemente impossíveis de serem monitorados continuamente, mas ainda capazes de causar danos severos a satélites e espaçonaves.

Além disso, destaca-se o risco relacionado à chamada Síndrome de Kessler, fenômeno caracterizado pela ocorrência de colisões em cadeia entre objetos espaciais. Nesse cenário, uma colisão gera novos fragmentos, aumentando progressivamente a probabilidade de impactos subsequentes. Caso esse processo se intensifique, determinadas regiões orbitais poderão tornar-se praticamente inutilizáveis por longos períodos,

comprometendo não apenas missões científicas, mas também serviços essenciais dependentes de satélites, como telecomunicações, navegação GPS, monitoramento climático e sistemas de segurança internacional.

Os impactos econômicos também merecem destaque, considerando os elevados investimentos financeiros envolvidos no desenvolvimento, lançamento e manutenção de satélites comerciais e científicos. A perda de equipamentos espaciais devido a colisões representa prejuízos bilionários, além de comprometer projetos estratégicos de longo prazo.

Nesse sentido, evidencia-se que o problema dos detritos espaciais ultrapassa a dimensão puramente tecnológica, assumindo caráter econômico, político e social.

Tecnologias de mitigação e iniciativas internacionais

Diversas iniciativas tecnológicas têm sido desenvolvidas com o objetivo de minimizar os impactos dos detritos espaciais. Entre elas, destacam-se sistemas avançados de rastreamento orbital, mecanismos autônomos de captura, braços robóticos, redes eletrodinâmicas e tecnologias magnéticas voltadas à remoção ativa de resíduos espaciais (BONNAL; RUAULT; DESJEAN, 2013). Estudos também apontam que a remoção ativa de detritos representa uma das principais estratégias para a mitigação da crescente poluição orbital em órbita baixa da Terra (LIOU, 2011).

Observa-se que parte significativa desses avanços encontra-se concentrada em países asiáticos, especialmente Japão e China, que vêm ampliando investimentos em tecnologias voltadas à sustentabilidade orbital. Nesse cenário, destaca-se a atuação da Astroscale, empresa japonesa responsável pelo desenvolvimento de projetos de remoção ativa de detritos por meio de sistemas eletromagnéticos e tecnologias autônomas de captura orbital (ASTROSCALE, 2025).

Paralelamente, agências espaciais internacionais como a NASA e a ESA vêm ampliando estudos relacionados ao monitoramento de fragmentos espaciais e à criação de protocolos voltados ao descarte controlado de equipamentos ao final de suas missões (NASA, 2025; ESA, 2025). Além disso, levantamentos históricos sobre fragmentações de satélites demonstram que colisões e explosões em órbita representam uma das principais

fontes de geração de novos detritos espaciais (JOHNSON et al., 2001). Nesse contexto, modelos computacionais desenvolvidos pela NASA auxiliam na previsão de riscos de colisões e na análise da evolução do ambiente orbital ao longo do tempo (KRISKO, 2011).

Apesar desses avanços, observa-se que grande parte das tecnologias de remoção ativa ainda se encontra em fase experimental, apresentando limitações operacionais, financeiras e logísticas. Além disso, ainda existem desafios relacionados à ausência de regulamentações internacionais mais rígidas e à dificuldade de definição de responsabilidades sobre resíduos espaciais já existentes em órbita. Como discutido por Kessler e Cour-Palais (1978), o aumento contínuo da quantidade de fragmentos espaciais pode elevar progressivamente a probabilidade de colisões em cadeia, comprometendo a sustentabilidade das operações espaciais futuras.

Governança internacional e sustentabilidade espacial

A problemática dos detritos espaciais evidencia a necessidade de fortalecimento da governança internacional relacionada ao uso sustentável do espaço. Assim como ocorreu em debates ambientais globais ligados às mudanças climáticas, torna-se cada vez mais necessária a construção de mecanismos de cooperação internacional capazes de equilibrar desenvolvimento tecnológico e preservação ambiental orbital.

Nesse contexto, surgem discussões sobre modelos inspirados nos créditos de carbono, nos quais empresas responsáveis por grande volume de lançamentos espaciais contribuiriam financeiramente para fundos internacionais destinados ao monitoramento orbital e à remoção de resíduos espaciais. Tal proposta busca criar mecanismos de responsabilização compartilhada entre governos e empresas privadas, incentivando práticas mais sustentáveis no setor aeroespacial.

Além disso, evidencia-se que a ausência de políticas internacionais integradas pode intensificar desigualdades tecnológicas entre países, concentrando o desenvolvimento espacial em nações economicamente mais fortes. Países com maior capacidade de investimento, como China e Estados Unidos, tendem a liderar tanto a exploração espacial quanto o desenvolvimento das futuras tecnologias de mitigação orbital.

Dessa forma, a sustentabilidade espacial dependerá diretamente da capacidade coletiva de estabelecer acordos internacionais sólidos, capazes de garantir o uso responsável do ambiente orbital pelas próximas gerações.

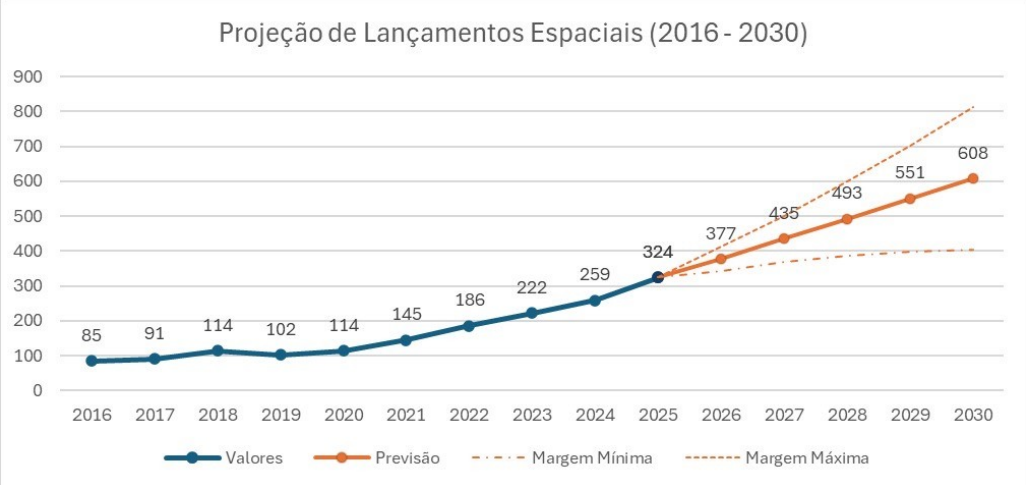
Limitações e perspectivas futuras

Este estudo apresenta limitações relacionadas à dependência de simulações computacionais e modelos preditivos, sujeitos a incertezas inerentes ao comportamento dinâmico do ambiente orbital. Além disso, existem dificuldades significativas no monitoramento de fragmentos de pequenas dimensões, que frequentemente escapam dos sistemas convencionais de rastreamento, embora apresentem elevado potencial destrutivo.

Também devem ser considerados fatores econômicos e políticos, como cortes orçamentários em programas científicos nacionais e internacionais, além da desigualdade de investimentos destinados ao desenvolvimento de tecnologias aeroespaciais. Paralelamente, a limitada valorização educacional e científica em determinados contextos sociais pode dificultar a formação de profissionais qualificados e a ampliação de pesquisas inovadoras na área espacial.

No que se refere às perspectivas futuras, observa-se que o problema dos detritos espaciais tende a adquirir proporções ainda mais complexas nas próximas décadas, especialmente em razão do crescimento acelerado das megaconstelações de satélites e da ampliação da participação privada no setor aeroespacial.

Figura 3. *Projeção do crescimento dos lançamentos espaciais até 2030*



Fonte: Elaborado por L. G. P. Sá com dados de Space Stats (2025) e projeções do autor.

A Figura 3 sugere que o número de lançamentos poderá continuar aumentando ao longo da próxima década. Mesmo considerando cenários conservadores, a tendência aponta para uma intensificação da ocupação orbital, reforçando a necessidade de políticas voltadas à sustentabilidade espacial e ao gerenciamento de detritos.

Nesse cenário, será fundamental ampliar os investimentos em tecnologias de remoção ativa de detritos, aprimorar sistemas de monitoramento orbital e fortalecer acordos internacionais voltados à sustentabilidade espacial. Além disso, projeta-se que futuras missões espaciais passem a incorporar protocolos mais rigorosos relacionados ao descarte controlado de equipamentos, à desorbitação programada e à reutilização de componentes espaciais.

Por fim, conclui-se que a continuidade segura das atividades espaciais dependerá diretamente da capacidade internacional de equilibrar inovação tecnológica, responsabilidade ambiental e regulamentação orbital eficiente.

CONCLUSÃO

O lixo espacial representa um dos principais desafios contemporâneos para a sustentabilidade das atividades espaciais. O crescimento acelerado do número de satélites e

da quantidade de detritos orbitais intensifica os riscos de colisões e compromete a segurança das operações espaciais futuras.

Embora avanços tecnológicos relacionados ao monitoramento e à remoção ativa de resíduos espaciais estejam em desenvolvimento, ainda existem limitações técnicas, econômicas e regulatórias que dificultam sua aplicação em larga escala.

Dessa forma, conclui-se que a mitigação do lixo espacial exige abordagens integradas, envolvendo inovação tecnológica, cooperação internacional e fortalecimento da governança orbital. Somente por meio de ações coordenadas será possível garantir a utilização sustentável do espaço e a continuidade segura das atividades aeroespaciais nas próximas gerações.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Wogel pela iniciativa de reunir a equipe de pesquisadores envolvida neste artigo e pelo incentivo à divulgação e ao desenvolvimento da ciência. Agradecemos também à A. C. Gomes pela contribuição como revisora de texto, auxiliando no aprimoramento da qualidade deste trabalho.

REFERÊNCIAS

[1] Anamind. *How much data is required for forecasting?*. 2025. [https://www.anamind.com/anamind-blog/how-much-data-is-required-for-forecasting/], acessada em maio de 2026.

[2] Astroscale. *Active debris removal and orbital sustainability technologies.* Tóquio, 2025. [https://astroscale.com], acessada em maio de 2026.

[3] Bonnal, C.; Ruault, J. M.; Desjean, M. C. *Acta Astronautica* **2013**, *85*, 51. [https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2012.11.009]

[4] Esa. Space Debris Office. Paris, 2025. [https://www.esa.int/Safety_Security/Space_Debris], acessada em maio de 2026.

[5] Johnson, N. L. et al. History of on-orbit satellite fragmentations. Houston: NASA, 2001. [https://doi.org/10.2514/6.2001-4669]

[6] Kessler, D. J.; Cour-Palais, B. G. *Journal of Geophysical Research* **1978**, *83*, 2637. [https://doi.org/10.1029/JA083iA06p02637]

[7] Krisko, P. H. *Acta Astronautica* **2011**, *69*, 493. [https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2011.04.017]

[8] Liou, J. C. *Advances in Space Research* **2011**, *47*, 1865. [https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.02.003]

[9] Nasa. Orbital Debris Program Office. Houston, 2025. [https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov], acessada em maio de 2026.

[10] Nasa. Orbital Debris Program Office: Frequently Asked Questions. Houston, 2025. [https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/faq/], acessada em maio de 2026.

[11] Orbital Radar. *Satellite launch log.* 2026. [https://orbitalradar.com/satellite-launch-log], acessada em maio de 2026.

[12] Space Stats. *Orbital launches by year.* 2025. [https://spacestatsonline.com/launches], acessada em maio de 2026.

[13] United Nations. *The Paris Agreement.* Bonn, 2015. [https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement], acessada em maio de 2026.