



REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

SECRETARIA DE POLÍTICAS E PROGRAMAS ESTRATÉGICOS

PLANO NACIONAL DE ASTRONOMIA

Brasília — DF

2025

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

Presidente da República

Luiz Inácio Lula da Silva

Vice-Presidente da República

Geraldo Alckmin

Ministra da Ciência, Tecnologia e Inovação

Luciana Santos

COMISSÃO ESPECIAL DE ASTRONOMIA

Secretária de Projetos e Programas Estratégicos

Andréa Latgé (Presidente da Comissão)

Presidente do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

Ricardo Galvão (Vice-Presidente da Comissão)

Sociedade Astronômica Brasileira

Helio Jaques Rocha-Pinto (Relator da Comissão)

Reinaldo de Carvalho (Vice-Relator da Comissão)

Coordenadora-Geral de Bioeconomia e Ciências Exatas, Humanas e Sociais

Joana Nunes (Secretária da Comissão)

Subcomissão Grandes Questões em Astronomia

Adriana Valio (CRAAM)

André Ribeiro (UESC)

Eder Martioli (LNA)

Elisabete dal Pino (USP)

Fernando Roig (ON)

Karín Menéndez-Delmestre (UFRJ) — Coordenadora

Roberto Martins (ON)

Rogério Rosenfeld (UNESP)

Silvia Alencar (UFMG)

Subcomissão Infraestrutura Observacional e Instrumentação Astronômica

Beatriz Barbuy (USP)

Bruno Castilho (LNA) — Coordenador

Cláudia Rodrigues (INPE)

Henri Plana (UESC)

José-Dias Nascimento (UFRN)

Rafael Ribeiro (USP)

Simone Daflon (ON)

Ulisses Barres (CBPF)

Zulema Abraham (USP)

Subcomissão Big Data em Astronomia

Ana Leonor Chies Santiago Santos (UFRGS)

Angela Cristina Krabbe (USP)

Claudia Lucia Mendes de Oliveira (USP)

Clécio Roque De Bom (CBPF)

Felipe Braga Ribas (UTFPR)

Luiz Vitor de Souza Filho (USP)

Reinaldo Roberto Rosa (INPE) — Coordenador

Roberto Kalbusch Saito (UFSC)

Sandro Barboza Rembold (UFSM)

Subcomissão Astronomia & Sociedade

Alan Alves Brito (UFRGS) — Coordenador

Arianna Cortesi (UFRJ)

Daniel Brito (UFC)

Daniela Pavani (UFRGS)

Dinalva A. de Sales (FURG)

Patrícia Spinelli (MAST)

Rafael Santucci (UFG)

Roberto Costa (USP)

Silvia Lorenz (UFRJ)

Índice

Introdução.....	8
Cap. I. Grandes Questões da Astronomia.....	11
I.1. O Universo como um laboratório de descobertas.....	12
I.1.2. Ciência de dados, simulações e inteligência artificial.....	12
I.1.3. Astronomia multimensageira, sinergias e soberania científica.....	13
I.2. A natureza desconhecida do Universo.....	13
I.2.1. O modelo Λ CDM é o que melhor descreve o Universo?.....	15
I.2.2. Qual a natureza da energia escura?.....	17
I.2.3. Qual a natureza da matéria escura?.....	17
I.2.4. Qual é o melhor modelo para descrever a fase inflacionária?.....	18
I.2.5. Qual é o papel cosmológico dos neutrinos?.....	19
I.3. O Universo em condições extremas.....	20
I.3.1. Os grandes desafios e questões fundamentais.....	20
I.4. A origem e o destino das galáxias.....	25
I.4.1. Formação e evolução de galáxias.....	26
I.4.2. Grandes levantamentos, observatórios e instrumentos de próxima geração.....	28
I.5. A Via Láctea e o lugar da Terra no Universo.....	31
I.5.1. Explorando a formação e evolução de sistemas planetários e estelares.....	32
I.5.2. A formação e evolução de sistemas planetários.....	32
I.5.3. Detecção e caracterização de exoplanetas.....	33
I.5.4. Caracterização profunda de estrelas e subestruturas estelares.....	34
I.5.5. Evolução estelar e o ambiente da habitabilidade.....	34
I.5.6. A Via Láctea.....	35
I.5.7. História química e formação estelar no disco, halo e bojo galáctico.....	35
I.5.8. Populações estelares antigas, galáxias anãs e fluxos estelares.....	36
I.5.9. Interações com satélites galácticos e a morfologia do disco.....	37
I.5.10. A arqueologia galáctica por meio de levantamentos ópticos.....	37
I.6. A Vida no Cosmos: possibilidades e caminhos.....	38
I.6.1. Astrobiologia.....	40
I.6.2. Sistema Solar.....	41
I.6.3. Observações de sistemas planetários.....	42
I.6.4. Técnicas computacionais avançadas.....	43
Cap. II. Infraestrutura observacional e instrumentação astronômica.....	45
II.1. Infraestrutura e instrumentação para o desenvolvimento da ciência.....	47
II.2. Levantamento da situação atual.....	48
II.2.1. Projetos atuais.....	48
II.2.2. Análise dos projetos.....	50
II.2.3. Áreas da Astronomia atendidas.....	51
II.2.4. Colaborações.....	51
II.2.5. Amplitude e capilaridade nacional.....	52
II.2.6. Integração internacional robusta.....	52
II.2.7. Geração de capacidades estratégicas.....	52
II.2.8. Principais desafios citados.....	53
II.2.9. Tendências observadas.....	53
II.2.10. Perspectivas para a próxima década.....	53
II.3. Orçamento.....	54

II.3.1. Distribuição de recursos totais.....	56
II.3.2. Principais fontes de financiamento.....	56
II.3.3. Custos recorrentes e de manutenção.....	57
II.3.4. Desafios observados.....	57
II.3.5. Síntese estratégica.....	57
II.4. Participação da indústria nacional.....	58
II.4.1. Participação da indústria nos projetos descritos neste estudo.....	59
II.4.2. Participação da Indústria Internacional.....	60
II.5. Critérios de importância dos projetos.....	61
II.5.1. Critérios para classificação de projetos de instrumentação astronômica.....	61
II.6. Conclusões e recomendações.....	64
Cap. III. Big Data.....	67
III.1. Conceitos e tendências.....	68
III.1.1. Principais propriedades do Big Data em Astronomia.....	69
III.1.2. Tendências inerentes ao Big Bata em Astronomia.....	71
III.2. Panorama nacional do uso de Big Data.....	73
III.2.2. Perspectivas para a próxima década.....	82
III.3. Oportunidades e desafios em Astronomia de Big Data.....	82
III.3.1. Identificação das linhas de pesquisa promissoras.....	83
III.3.2. Questões orçamentárias e de fomento à P&D.....	84
III.4. Orçamentos já empenhados e relacionados a Big Data em Astronomia.....	85
III.5. Estimativas para investimentos em Big Data em Astronomia.....	87
III.6. Diagnósticos e recomendações.....	90
III.6.1. Diagnósticos específicos.....	91
III.6.2. Recomendações.....	92
III.6.3. Recomendações sobre integração.....	94
III.6.4. Big Data como pilar da Astronomia Brasileira na próxima década.....	95
Cap. IV. Astronomia e Sociedade.....	96
IV.1. O Ensino e a Educação em Astronomia.....	100
IV.1.1. Educação Básica.....	101
IV.1.2. Educação Superior.....	105
IV.1.3. Curricularização da Extensão Universitária — o potencial da Astronomia.....	113
IV.1.4. Ensino da Astronomia em perspectiva inclusiva — Pessoas com Deficiências (PcD).....	115
IV.2. Divulgação e Popularização da Astronomia.....	116
IV.2.1. Temas Centrais na Divulgação Científica em Astronomia.....	119
IV.2.2. Boas práticas na comunicação com a Imprensa e o público.....	124
IV.2.3. Olimpíada Brasileira de Astronomia e Astronáutica (OBA).....	127
IV.2.4. O Selo da SAB.....	128
IV.2.5. Astroturismo.....	128
IV.3. Centros de Divulgação/Popularização da Astronomia.....	129
IV.3.1. Planetários.....	129
IV.3.2. Museus e Centros de Divulgação/Popularização da Astronomia.....	135
IV.3.3. Observatórios Astronômicos.....	137
IV.4. Diversidade, Equidade e Inclusão na Astronomia.....	138
IV.4.1. Questões étnico-raciais.....	139
IV.4.2. Questões de gênero.....	142
IV.4.3. Classe social.....	143
IV.4.4. Pessoas com Deficiências.....	144
IV.4.5. Origem geográfica.....	144
IV.4.6. Assédios.....	145

IV.4.7. Questões de parentalidade na Astronomia.....	145
IV.5. Astronomia como vetor de inovação para a sociedade produtiva.....	146
IV.6. Acervos e Memória, Patrimônio Material e Imaterial da Astronomia.....	150
IV.6.1. A importância da memória na Astronomia.....	150
IV.6.2. Patrimônio material da Astronomia no Brasil.....	151
IV.6.3. Patrimônio Imaterial da Astronomia Brasileira.....	155
IV.6.4. Desafios para a preservação.....	156
IV.6.5. Caminhos para a valorização e preservação.....	157
IV.7. A Astronomia a serviço da sociedade.....	159
Cap. V. Conclusões e Recomendações.....	160
V.1. Recomendações transversais e oportunidades para a Astronomia brasileira.....	161
V.2. A situação do Brasil no European Southern Observatory.....	164
V.3. Sobre a adesão do Brasil a grandes colaborações internacionais.....	165
V.4. O papel das Fundações de Amparo à Pesquisa.....	166
V.4. Sobre o acompanhamento e execução deste plano.....	167
Apêndice A.....	169
Apêndice B.....	171
Apêndice C.....	173
Referências.....	175

Introdução

A Astronomia é uma das ciências mais antigas da humanidade e permanece na vanguarda da curiosidade científica, ampliando nossos conhecimentos sobre as leis fundamentais do Universo, a origem dos Cosmos, a formação de estrelas e planetas, e a possibilidade de vida além da Terra. No Brasil, essa disciplina consolidou-se como uma área bastante produtiva, tendo uma comunidade vibrante, reconhecida internacionalmente por contribuições em descobertas astronômicas e no desenvolvimento tecnológico.

Este Plano Nacional de Astronomia (PNA) é um marco na contínua jornada de planejamento estratégico da Astronomia brasileira. Ele dá sequência a um esforço pioneiro da comunidade, que há uma década elaborou o primeiro documento de seu tipo para o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI). Esta segunda edição não apenas atualiza e expande aquele escopo inicial, mas também reflete a maturidade e o crescimento do setor, incorporando os novos e complexos desafios científicos e tecnológicos desta década.

Sob a liderança da Secretaria de Políticas e Programas Estratégicos (SEPPE/MCTI), o processo de delineamento deste plano foi iniciado no começo de 2024, a partir de reuniões preparatórias entre a SEPPE e a SAB (Sociedade Astronômica Brasileira). Como desdobramento direto desse diálogo, o MCTI instituiu uma Comissão Especial de Astronomia (CEA) com a missão de conceber a estrutura e coordenar a elaboração do PNA. Esta comissão definiu seus quatro eixos temáticos estratégicos e estabeleceu a metodologia de trabalho que seria executada por subcomissões temáticas.

O trabalho de elaboração do plano foi estruturado em quatro eixos temáticos fundamentais, cada um desenvolvido por uma subcomissão temática dedicada:

- **As Grandes Questões Científicas da Astronomia:** esta subcomissão tem por objetivo identificar e priorizar os temas científicos que devem orientar o desenvolvimento da astronomia no Brasil na próxima década. Isso inclui a definição de questões fundamentais sobre a origem e evolução do Universo, a formação de estruturas cósmicas, a natureza da matéria e da energia escuras, a formação e evolução de estrelas e galáxias, e a busca por planetas e vida fora do Sistema Solar. O trabalho envolve mapear as áreas em que o país possui competência consolidada, bem como aquelas em que a atuação estratégica pode gerar maior impacto científico e tecnológico, orientando políticas de fomento, observação e formação de recursos humanos.

- **Infraestrutura observacional e Instrumentação Astronômica:** esta subcomissão tem como foco avaliar, planejar e propor estratégias para o desenvolvimento, manutenção e expansão da infraestrutura observacional brasileira, tanto em solo nacional quanto em parcerias internacionais. Inclui telescópios, radiotelescópios, instrumentos ópticos e infravermelhos, detectores e sistemas de controle. Também busca fortalecer a capacidade nacional de projetar e construir instrumentação astronômica de ponta, articulando universidades, centros de pesquisa e indústria. O objetivo é garantir que a comunidade astronômica brasileira disponha dos meios técnicos e tecnológicos necessários para responder às grandes questões científicas da próxima década.
- **Big Data em Astronomia:** esta subcomissão tem por objetivo estabelecer diretrizes para o uso, armazenamento e análise de grandes volumes de dados astronômicos gerados por levantamentos e observatórios nacionais e internacionais. Envolve o desenvolvimento de competências em ciência de dados, inteligência artificial e computação de alto desempenho aplicadas à astronomia. Também busca promover a criação de infraestruturas digitais interoperáveis, políticas de acesso aberto e formação de especialistas capazes de extrair conhecimento científico de bases massivas e complexas. O foco é integrar o Brasil de forma competitiva à era dos grandes levantamentos e da astronomia orientada por dados.
- **Astronomia e Sociedade:** esta subcomissão tem como missão articular a astronomia com a educação, a cultura científica e o desenvolvimento social. Seu escopo inclui o ensino e divulgação da astronomia em todos os níveis, a valorização de museus e observatórios públicos, a formação de professores e comunicadores, e o uso da astronomia como ferramenta de inclusão e inspiração para jovens. Também propõe ações que reforcem a presença da astronomia na agenda nacional de ciência e tecnologia, ampliando seu impacto social e seu papel na construção de uma sociedade mais crítica, participativa e informada.

Cada subcomissão foi composta por oito especialistas de notório saber e um coordenador, todos membros da SAB, atuando sob a supervisão da CEA. Estas subcomissões conduziram um amplo processo de consulta pública, colhendo contribuições de pesquisadores e alunos de Astronomia de todo o país. Este processo colaborativo, coordenado de forma centralizada, garantiu que o PNA reflita um diagnóstico realista e um conjunto de aspirações coerentes e alinhadas para o futuro da Astronomia nacional.

Apesar dos avanços pontuais, o investimento nacional em ciência e tecnologia permanece limitado. O Brasil destina cerca de 1% do PIB a CT&I — aproximadamente R\$ 89,5 bilhões por ano — valor significativamente inferior ao de países como Alemanha e Estados Unidos, que aplicam mais de 3% do PIB. O Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT) con-

tinua sendo a principal fonte de recursos, com R\$ 9,96 bilhões investidos em 2023 e previsão de R\$ 14,7 bilhões para 2025. Embora programas como Mais Inovação, Centelha e o Plano Brasileiro de Inteligência Artificial — que prevê R\$ 23 bilhões até 2028 — indiquem esforços de modernização, o cenário geral ainda revela baixo investimento e falta de coordenação estratégica entre as iniciativas. Essa fragmentação compromete a capacidade do país de planejar de forma integrada e sustentável o futuro da ciência, incluindo a Astronomia. O presente plano propõe uma visão holística do investimento atual, de modo a servir de base para que o aumento do investimento em Astronomia no Brasil ocorra de forma articulada, coerente e alinhada às prioridades nacionais de Ciência e Tecnologia.

Este documento consolida e apresenta os relatórios detalhados produzidos por cada uma das quatro subcomissões temáticas, aprovados pela Comissão Especial de Astronomia. Ele apresenta um diagnóstico do estado atual da Astronomia brasileira, seguido de recomendações concretas para o desenvolvimento da Astronomia na próxima década. O PNA não é um documento estático, mas um guia dinâmico que pretende servir como:

1. Bússola para agências de fomento e para o próprio MCTI na priorização de investimentos.
2. Referência para a comunidade científica no planejamento de suas linhas de pesquisa.
3. Instrumento de articulação para parcerias internacionais estratégicas.
4. Alicerce para inspirar uma nova geração de cientistas e cidadãos, mostrando o compromisso do Brasil em desvendar os mistérios do Universo.

Ao seguir o roteiro traçado neste plano, o Brasil reafirma seu compromisso com a produção de conhecimento de ponta e se posiciona para ocupar um lugar de ainda maior destaque no cenário astronômico global nas próximas décadas.

Capítulo I

Grandes Questões da Astronomia

I.1. O Universo como um laboratório de descobertas

Vivemos uma revolução na maneira como exploramos o Cosmos. O Universo tornou-se, mais do que nunca, um laboratório de descobertas: um espaço onde fenômenos físicos são acessados por múltiplas janelas observacionais e onde a articulação entre tecnologia, inovação metodológica e colaboração internacional redefine as fronteiras da pesquisa. A Astronomia contemporânea passou a operar de forma profundamente interdisciplinar, orientada por dados em grande escala, instrumentação astronômica de grande capacidade e modelagem teórica baseada em simulações numéricas.

A próxima década será marcada pela entrada em operação de uma nova geração de telescópios e experimentos que redefinirão os limites da observação astronômica. Telescópios como o ELT (Extremely Large Telescope) do ESO (European Southern Observatory), o GMT (Giant Magellan Telescope) e o CTAO (Cherenkov Telescope Array Observatory) inaugurarão regimes de sensibilidade e resolução sem precedentes no óptico e em raios gamas. Novos equipamentos em solo latino-americano — como o Vera Rubin Observatory, LLAMA (Large Latin American Millimetric Array), o BINGO (Baryon Acoustic Oscillations in Neutral Gas Observations) Telescope, o ASTRI Mini-Array e o futuro SWGO (Southern Wide field Gamma-ray Observatory) — oferecem ao Brasil oportunidades concretas de protagonismo em instrumentação científica e desenvolvimento tecnológico.

Ao mesmo tempo, a Astronomia espacial — por meio de telescópios da NASA como JWST e o Roman Space Telescope, assim como missões da Agência Espacial Europeia (ESA) como PLATO, Euclid e ARIEL (Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey) — estende nossas capacidades de estudo desde as finas atmosferas de planetas extrasolares até a detecção e estudo de galáxias distantes antes inacessíveis. Inserir o Brasil nesses consórcios e expandir sua presença em missões futuras é condição estratégica para garantir acesso aos dados e para formar recursos humanos em setores-chave da Astrofísica e da engenharia aeroespacial.

I.1.2. Ciência de dados, simulações e inteligência artificial

A Astronomia é hoje uma ciência orientada por dados. Grandes levantamentos com participação brasileira — como o LSST (Legacy Survey of Space and Time, no Vera Rubin Observatory), o J-PAS (Javalambre Physics of the Accelerating Universe Astrophysical Survey), o J-PLUS (Javalambre-Photometric Local Universe Survey), o S-PLUS (Southern Photometric Local Universe Survey) e o SDSS-V — geram petabytes de dados que exigem metodologias computacionais avançadas para serem processados, analisados e interpretados. O uso de inteligência artificial e aprendizado de máquina vem se tornando essencial para identificar padrões, acelerar a modelagem teórica e aprimo-

rar a análise observacional. Redes neurais convolucionais, modelos generativos e algoritmos de classificação automatizada já atuam em múltiplas frentes: da busca por transientes à reconstrução de parâmetros estelares e galácticos.

No entanto, o papel das simulações numéricas permanece central. Modelos magnetohidrodinâmicos, simulações cosmológicas de alta resolução e códigos de evolução estelar são cruciais para conectar teoria e observação. É fundamental, portanto, o investimento em infraestrutura nacional de alto desempenho computacional para simulações e análise de dados, assim como a integração nacional aos desenvolvimentos internacionais.

I.1.3. Astronomia multimessageira, sinergias e soberania científica

O avanço da Astronomia multimessageira — integrando observações de ondas gravitacionais, neutrinos, raios cósmicos, ondas electromagnéticas e partículas exóticas — exige a articulação de múltiplos instrumentos, tempos de resposta rápidos e plataformas computacionais integradas. Essa abordagem é chave para enfrentar os grandes desafios científicos contemporâneos: da origem das ondas gravitacionais primordiais à busca por partículas de matéria escura em galáxias anãs, da detecção de erupções de núcleos ativos à caracterização de quilonovas.

Essa complexidade demanda planejamento científico e político. A formação de redes de colaboração nacional entre observatórios, o estímulo à participação em consórcios internacionais e a criação de políticas públicas que reconheçam o valor estratégico da Astronomia são elementos estruturantes para garantir soberania científica em um campo altamente competitivo.

A começar por esta introdução — que propõe a investigação metodológica como fundação —, estruturamos os eixos temáticos que seguem com base nas transformações científicas em curso no mundo, mas também com um olhar atento às potencialidades do Brasil. Ao abordar a natureza oculta do Cosmos, o Universo em condições extremas, a formação das galáxias, o lugar de nossa Via Láctea e nossa Terra, e a busca por vida, o texto se articula em torno de um compromisso coletivo: imaginar e construir o futuro da Astronomia como ciência estratégica, integradora e orientada pela descoberta.

I.2. A natureza desconhecida do Universo

A cosmologia teve um grande avanço nos últimos 60 anos. O desenvolvimento de instrumentos cada vez mais precisos e eficientes aliado ao aperfeiçoamento de previsões de modelos físicos permitiram testar esses modelos a partir de vários tipos diferentes de observações do Universo. Esses avanços começaram com a descoberta da radiação cosmológica de fundo (RCF), Nobel de Física em

1978, e passaram pela primeira medida de flutuações primordiais na densidade do Universo em 1992 que são a origem da rica estrutura que observamos hoje com a existência de galáxias, estrelas e planetas (Nobel de Física em 2006) e pela descoberta inesperada da expansão acelerada do Universo em 1998 (Nobel de Física em 2011). O aperfeiçoamento das previsões teóricas de observáveis cosmológicos foi reconhecida com o Nobel de Física dado a James Peebles em 2019. O estudo de curvas de rotação de galáxias na década de 1970 levaram à uma maior evidência da necessidade de matéria escura.

No início desse século as diferentes observações convergiram para um modelo cosmológico padrão, denominado Λ CDM, onde a matéria composta por átomos corresponde atualmente a apenas cerca de 5% do total do Universo. Os 95% restantes estão divididos em matéria escura (cerca de 25%) e energia escura (cerca de 70%). Este modelo também presume que o Universo passou por uma fase de expansão ultra-rápida em seu início, denominado fase inflacionária ou inflação, que explica o fato de o Universo ser espacialmente plano e muito homogêneo no seu passado, com flutuações na densidade inferiores a uma parte em 100.000 na época onde a radiação cósmica de fundo foi produzida, quando o Universo tinha cerca de 400.000 anos. A fase inflacionária foi a responsável pela origem dessas flutuações, sementes das estruturas que observamos hoje.

O modelo Λ CDM é baseado na teoria da relatividade geral e no modelo padrão da física de partículas elementares. Além disso, a energia escura, responsável pela expansão acelerada do Universo, é descrita por uma constante cosmológica (denotada pela letra Λ), introduzida já em 1917 por Einstein. A matéria escura, por sua vez, é descrita por uma nova partícula elementar sem carga elétrica e estável ou com meia vida maior que a idade do Universo. As grandes questões que norteiam as pesquisas atuais podem ser resumidas em:

1. O modelo Λ CDM é o que melhor descreve o Universo?
2. Qual é a natureza da energia escura?
3. Qual é a natureza da matéria escura?
4. Qual é o melhor modelo para descrever a fase inflacionária?
5. Qual é o papel cosmológico dos neutrinos — em especial a soma de suas massas e a possível detecção do fundo cósmico de neutrinos?

Essas questões podem ser estudadas comparando previsões sólidas de modelos físicos com medidas precisas de diferentes dados observacionais. Os diferentes dados observacionais são obtidos principalmente de:

- instrumentos que medem a temperatura, polarização e lenteamento da radiação cósmica de fundo;

- grandes levantamentos astronômicos de objetos no Universo, como aglomerados de galáxias, galáxias (incluindo suas formas que podem ser distorcidas por lenteamento gravitacional) e supernovas;
- medidas precisas de supernovas próximas;
- abundância no Universo de elementos químicos leves produzidos após o Big Bang;
- raios gama de altas energias;
- raios cósmicos de altas energias;
- neutrinos cósmicos;
- linhas de 21 cm do hidrogênio neutro para oscilações acústicas bariônicas e reionização;
- ondas de rádio provenientes da transição de 21 cm do hidrogênio;
- ondas gravitacionais;
- experimentos subterrâneos de busca por matéria escura;
- produção e detecção de matéria escura em aceleradores de partículas.

Vamos agora abordar brevemente os avanços em responder às 5 questões listadas acima.

I.2.1. O modelo Λ CDM é o que melhor descreve o Universo?

Apesar do modelo Λ CDM ter sido capaz de descrever todos os diferentes dados observacionais até o momento, atualmente há dois resultados que mostram uma tensão estatisticamente significativa no modelo.

O primeiro é resultado de medidas precisas da taxa de expansão do Universo, determinada pela constante de Hubble. Medidas a partir de supernovas locais quando comparadas com medidas indiretas provenientes de ajustes precisos do espectro de potência angular da radiação cósmica de fundo, que pressupõem o modelo Λ CDM, diferem com uma significância estatística de cerca de 5 desvios padrões. Essas diferenças constituem a chamada “tensão de Hubble”. Caso essa tensão não seja o resultado de incertezas sistemáticas ainda desconhecidas, ela apontaria para uma falha do modelo Λ CDM. A tensão de Hubble pode ser melhor quantificada em futuros experimentos que medem de maneira independente a taxa de expansão do Universo, como por exemplo a medida de eventos de ondas gravitacionais com contrapartida eletromagnética. Há grupos brasileiros trabalhando nos experimentos LIGO/Virgo/Kagra e no Einstein Telescope, que podem contribuir no futuro para confirmar ou não a tensão de Hubble. Também há grupos teóricos no Brasil que estudaram possíveis

mudanças no modelo Λ CDM, como por exemplo a inclusão de uma nova componente denominada “*early dark energy*”, que pode diminuir a tensão de Hubble.

O segundo resultado decorre de uma análise cosmológica baseada na distribuição de galáxias, que revela o pico nas correlações de dois pontos conhecido como oscilações acústicas bariônicas (BAO, na sigla em inglês). Esse estudo combina medições de galáxias, supernovas do tipo Ia e RCF. Em janeiro de 2024, a colaboração Dark Energy Survey (DES) publicou uma análise de cerca de 1500 novas supernovas do tipo Ia, observadas ao longo de cinco anos. Quando combinados com dados do próprio DES sobre a distribuição e as formas das galáxias, incluindo as BAO, os resultados favoreceram um modelo com energia escura dinâmica, com significância estatística de aproximadamente dois desvios padrão em relação ao modelo com constante cosmológica. Essa evidência aumentou para cerca de três a quatro desvios padrão quando os dados de BAO do Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI), divulgados em abril de 2024 e março de 2025, foram incluídos na análise conjunta com as supernovas.

A tensão entre o modelo Λ CDM e um modelo com energia escura variável ou dinâmica deverá ser melhor compreendida com a análise final dos seis anos de dados do DES, com os resultados consolidados do DESI e com os levantamentos de próxima geração, como o Legacy Survey of Space and Time (LSST), o Euclid, o Roman Space Telescope, o J-PAS, entre outros. Há participação ativa de grupos brasileiros tanto no DES quanto no LSST, resultado em grande parte dos esforços do Laboratório Interinstitucional de e-Astronomia (LIneA). O projeto BINGO, que medirá o BAO em baixos redshifts na faixa de rádio, também conta com forte envolvimento nacional, assim como o J-PAS, no qual o Brasil desempenha papel destacado.

Existem muitos modelos além de Λ CDM, com a introdução de novos componentes no Universo, como em modelos de “*early dark energy*” ou mesmo introduzindo modificações na teoria da relatividade geral. Para testar esses modelos, é necessário desenvolver previsões teóricas robustas para serem comparadas com medidas observacionais. Alguns desafios para previsões teóricas robustas são: efeitos não-lineares da gravitação, efeitos de bárions na densidade de galáxias, incertezas na determinação de redshifts fotométricos (para levantamentos fotométricos como o DES e o LSST), incertezas na modelagem do chamado viés de galáxias (relação entre contraste de densidade de matéria escura com o contraste de densidade em galáxias), entre outros. Simulações numéricas são cada vez mais importantes para realizar previsões teóricas. Outro desafio importante para realizar estes testes é a necessidade de computação de alto desempenho: a exploração do espaço de alta dimensionalidade de parâmetros cosmológicos com a inclusão dos chamados parâmetros de “*nuisance*” requer o uso de técnicas estatísticas avançadas, como por exemplo o Markov Chain Monte Carlo, que demanda um alto custo computacional. Centros computacionais de processamento de dados, abertos

à comunidade astronômica nacional e descritos no Capítulo III, terão papel estruturante essencial nesse processo.

1.2.2. Qual a natureza da energia escura?

A energia escura é a componente responsável pela expansão acelerada do Universo. No modelo Λ CDM, ela é representada por uma constante cosmológica. Essa componente tornou-se relevante apenas em épocas recentes da história cósmica, influenciando diretamente a formação das grandes estruturas do Universo. O estudo da distribuição de galáxias e das supernovas do tipo Ia fornece, portanto, informações cruciais sobre sua natureza. Como discutido anteriormente, o modelo baseado em uma constante cosmológica tem sido menos favorecido frente a parametrizações que consideram uma energia escura dinâmica. Com as novas análises de grandes levantamentos de galáxias e supernovas, como o Legacy Survey of Space and Time (LSST), será possível alcançar maior precisão estatística para avaliar se o modelo da constante cosmológica pode ser definitivamente descartado — o que representaria uma transformação profunda em nossa compreensão do Universo. O LSST combinará medições de funções de correlação de dois pontos envolvendo posição e lenteamento fraco de galáxias, oscilações acústicas bariônicas, supernovas, e contagem de aglomerados de galáxias em função da massa, com o objetivo de identificar o modelo cosmológico que melhor descreve o Universo.

O desafio teórico consiste em desenvolver modelos microscópicos para a energia escura, baseados em teoria de campos, como os chamados modelos de quintessência — e não apenas em simples parametrizações da equação de estado. Esses modelos são implementados em códigos cosmológicos de Boltzmann, que resolvem numericamente as equações que descrevem a evolução das perturbações de densidade e radiação no Universo primordial, permitindo prever os observáveis cosmológicos. Entre esses códigos, destacam-se o CAMB (Code for Anisotropies in the Microwave Background) e o CLASS (Cosmic Linear Anisotropy Solving System), amplamente utilizados em cosmologia moderna. A construção de previsões realistas exige incorporar efeitos não lineares, modelos de “bias” de galáxias — que descrevem como a distribuição observada de galáxias se relaciona à distribuição subjacente de matéria escura —, feedback bariônico e outros processos essenciais para uma descrição consistente da evolução cósmica.

1.2.3. Qual a natureza da matéria escura?

A matéria escura corresponde a cerca de 25% da densidade de energia do Universo. A evidência para sua existência até o momento vem apenas de observações astronômicas. Não sabemos qual é a natureza da matéria escura. Sabemos apenas que deve ser não-relativística (fria) para atuar na formação de estruturas no Universo, deve ser estável (para estar presente no Universo) e eletricamente

neutra (para não interagir com a luz). Existe um grande número de candidatos, com massas variando de partículas superleves (como os áxions) até a possibilidade da contribuição de buracos negros.

A natureza da matéria escura pode ser investigada por quatro abordagens principais: (i) sua produção em aceleradores de partículas, como o LHC; (ii) a detecção direta de partículas da matéria escura provenientes do halo galáctico, em detectores subterrâneos terrestres, como o DarkSide; (iii) a detecção indireta, por meio dos produtos de aniquilação da matéria escura em regiões de alta densidade, como o centro da Galáxia; e (iv) a observação de efeitos astronômicos que revelem sua presença gravitacional em diferentes escalas.

A detecção indireta da matéria escura baseia-se na busca por sinais de aniquilação ou decaimento dessas partículas, tais como raios gama de alta energia e neutrinos provenientes de regiões com grande concentração de matéria escura. Essa abordagem será discutida em mais detalhe na próxima seção. Um aspecto essencial desse esforço é a identificação de galáxias anãs nas vizinhanças da Via Láctea, as quais são fortemente dominadas por matéria escura e, portanto, potenciais fontes desses produtos de aniquilação. O levantamento DES, por exemplo, quase dobrou o número conhecido dessas galáxias, e as observações de raios gama pelo satélite Fermi estabeleceram limites restritivos para a massa das partículas candidatas à matéria escura. Espera-se que o Legacy Survey of Space and Time descubra muitos novos sistemas anãs, ampliando significativamente as amostras disponíveis para esse tipo de análise.

Um sinal característico de matéria escura leve é a supressão do espectro de potência causada pelo “free streaming” das partículas. O estudo da distribuição de galáxias permite impor limites inferiores para a massa da matéria escura, atualmente da ordem de alguns keV. Outros modelos alternativos, como a “fuzzy dark matter” e a “interacting dark matter”, preveem essa supressão apenas em escalas muito pequenas, nas quais efeitos de feedback bariônico e não linearidades gravitacionais limitam a precisão das previsões teóricas, dificultando a obtenção de resultados robustos (ver Drlica-Wagner et al. 2022 para uma revisão detalhada).

Novas estratégias também vêm sendo exploradas para detectar sinais indiretos de matéria escura no halo galáctico. Entre elas, destacam-se estudos conduzidos pela colaboração DESC do LSST, que investigam lacunas em correntes estelares causadas pela passagem de mini-halos de matéria escura, e análises do impacto da matéria escura na dinâmica de aglomerados estelares, que podem fornecer restrições complementares sobre sua natureza.

I.2.4. Qual é o melhor modelo para descrever a fase inflacionária?

É muito provável que o Universo tenha passado por uma fase de rápida expansão em seus primórdios, denominada fase inflacionária. Essa fase explica porque o Universo é espacialmente plano e porque a radiação cósmica de fundo é uniforme em todas as escalas. Mais ainda, ela prevê as

pequenas flutuações de uma parte em 100000 observadas na radiação cósmica de fundo e que são as sementes das galáxias. Atualmente, a melhor maneira de obter informações sobre a fase inflacionária é a partir do estudo da polarização da RCF. Os limites sobre a razão entre as amplitudes tensoriais e as escalares obtidos pelo satélite Planck em 2018 a partir de limites na observação do chamado modo B (modo rotacional) de polarização da RCF já excluiu diversos modelos inflacionários. Espera-se que novos instrumentos, como o Simons Observatory no Chile, possam explorar com mais precisão a busca pelo modo B, que confirmaria a teoria inflacionária.

1.2.5. Qual é o papel cosmológico dos neutrinos?

Neutrinos são partículas sem carga elétrica que não interagem com a luz e, portanto, são parte da matéria escura no Universo. Assim como fótons, neutrinos foram produzidos no início do Universo e estavam em equilíbrio térmico com o fluido cósmico através das interações fracas. Eles se desacoplaram do fluido cósmico quando o Universo tinha cerca de apenas 1 segundo. A densidade em número de neutrinos cósmicos (que aparecem em três famílias associadas aos elétrons, múons e taus) hoje é comparável ao número de fótons da RCF: cerca de 340 por centímetro cúbico, formando um gás de férmions com temperatura de 1,95 K. A detecção em laboratórios terrestres desse fundo de neutrinos cosmológicos é desafiadora pois eles possuem energia muito pequena. Seus efeitos são detectados apenas em medidas cosmológicas.

Não sabemos o valor da massa de neutrinos. A partir de dados de oscilação de neutrinos sabemos que a soma de suas massas deve ser maior que 0,6 eV (de fato, esse valor aumenta para 0,10 eV se a hierarquia de massas é “invertida”). Neutrinos afetam o crescimento de perturbações no Universo e as previsões de, por exemplo, o espectro de potência das perturbações dependem de suas massas. Os limites cosmológicos em suas massas, obtidos a partir de observáveis como o espectro angular da RCF, dependem do modelo cosmológico. Por exemplo, Planck (combinado com dados de BAO) encontra um limite superior de 0,12 eV para a soma da massa de neutrinos no modelo Λ CMD espacialmente plano. Caso a soma da massa de neutrinos seja 0,1 eV, sua contribuição atualmente para a densidade de energia do Universo é de apenas 1% — muito menor que a contribuição da matéria escura. O limite mais restrito atualmente vem da combinação de dados recentes do DESI com outros dados é de 0,072 eV, novamente no contexto de Λ CDM plano. Possivelmente levantamentos como o LSST podem contribuir para obter medidas com maior precisão na soma da massa de neutrinos.

Neutrinos de altas energias não têm origem cosmológica, sendo produzido por fontes astronômicas em condições extremas, como AGNs, e são discutidos na seção seguinte.

Diversos temas complementares se adicionam aos subtemas fundamentais da natureza escura do Universo. Alguns destes são:

- Observações cosmológicas em 21 cm: BINGO (BAO em $z \sim 0,3$), HIRAX e SKA mapearão HI do reionização a baixo redshift.
- Feedback bariônico: ventos galácticos e AGNs impactam lentes fracas e devem ser modelados em simulações hidrodinâmicas.

I.3. O Universo em condições extremas

Explorar o Universo em condições extremas significa investigar cenários em que a matéria, a energia e o próprio espaço-tempo desafiam nossos modelos mais sofisticados de física. Em torno de buracos negros supermassivos, discos de acreção giram a velocidades relativísticas, gerando jatos de partículas aceleradas a velocidades relativísticas; o interior de estrelas de nêutrons abriga densidades tão elevadas que podemos testar diretamente a equação de estado da matéria nuclear; e, no instante que sucede o Big Bang, flutuações quânticas se traduzem em ondas gravitacionais que carregam memórias da infância do Cosmos. Para desvendar esses mistérios, confiamos hoje em uma combinação inédita de telescópios e detectores multimensageiros, simulações de altíssimo desempenho e inteligência artificial capazes de vasculhar petabytes de dados em busca de sinais tênues e fugazes. Essa sinergia é o alicerce para transformar o Cosmos num verdadeiro laboratório de descobertas.

I.3.1. Os grandes desafios e questões fundamentais

A exploração do Universo em condições extremas se debruça sobre uma série de questões fundamentais que impulsionam a pesquisa Astrofísica global. Destacamos os temas abaixo.

Ondas Gravitacionais: a detecção de ondas gravitacionais revolucionou nossa capacidade de observar eventos cósmicos violentos. As observações conjuntas dos interferômetros LIGO, Virgo e KAGRA já revelaram fusões de estrelas de nêutrons e buracos negros. Quando acompanhadas por contrapartidas eletromagnéticas — como quilonovas (explosões resultantes da fusão de estrelas de nêutrons) e surtos breves de raios gama (GRBs) —, essas detecções permitem medir diretamente propriedades fundamentais, como o raio e a massa dessas estrelas densas, além de testar a Relatividade Geral em regiões de curvatura extrema. Projetos futuros, como o Einstein Telescope e o LISA (Laser Interferometer Space Antenna), prometem estender esse alcance, sondando ondas geradas no Universo primordial e abrindo a possibilidade de detectar, pela primeira vez, sinais da própria inflação quântica no tecido do espaço-tempo. Isso traria informações cruciais sobre os primeiros instantes do Universo.

Aceleradores Cósmicos, Pevatrons, e Astrofísica Multimessageira: o Cosmos abriga verdadeiros aceleradores de partículas naturais cujas energias ultrapassam em milhões de vezes as alcançáveis em laboratórios terrestres: buracos negros, pulsares, estrelas de nêutrons, surtos de raios gama (GRBs) e explosões de supernovas injetam partículas ultrarrelativísticas em jatos, fluxos de acreção, e ondas de choque que produzem raios gama e raios cósmicos de altíssima energia. A observação desses fótons de alta energia é essencial para revelar a natureza da aceleração de raios cósmicos a energias extremas e para identificar fenômenos transientes — como flares de AGNS-blazares e surtos de raios gama (GRBs) —, bem como para localizar os “Pevatrons” galácticos, os maiores aceleradores de partículas da Via Láctea a energias superiores a 10^{15} eV. Observatórios terrestres de próxima geração — CTAO, seu Precursor ASTRI Mini-Array, e SWGO, além dos em operação como HAWC e LHAASO — proporcionarão sensibilidade e resolução angular sem precedentes, permitindo mapear com detalhe a emissão dessas fontes e fenômenos até centenas de TeV. Além disso, a Astrofísica multimessageira, que integra observações de ondas gravitacionais, raios gama, neutrinos e raios cósmicos, é também fundamental para desvendar a origem Astrofísica dos raios cósmicos de ultra-alta energia (acima de PeV, ou peta-elétron-volts). Esses raios cósmicos, com energias extraordinárias, são ainda um mistério. Essa abordagem holística não apenas revela a natureza dos mecanismos de aceleração em fontes compactas e transientes, mas também permite a correlação de diferentes “mensageiros” emanados de um mesmo evento, fornecendo uma compreensão integrada dos processos físicos que impulsionam as partículas a limites extremos de energia.

Física Fundamental Além do Modelo Padrão e a Natureza da Matéria Escura: as condições extremas do Universo funcionam como um laboratório natural para testar os limites da física conhecida e buscar pistas de fenômenos além do Modelo Padrão. Em ambientes onde densidades, campos magnéticos e energias atingem valores incomparáveis, podemos investigar desde a existência de buracos negros primordiais — hipotéticos remanescentes do Universo primordial — até candidatos a matéria escura, como partículas tipo áxion, que se converteriam em fótons sob a ação de campos magnéticos intensos. Observações multimessageiras, que combinam raios gama, raios cósmicos, neutrinos e ondas gravitacionais, são chaves para caracterizar esses fenômenos transientes extremos. Detectores de neutrinos de altíssima energia, como IceCube-Gen2 no Polo Sul, KM3NeT no Mediterrâneo, DUNE (Deep Underground Neutrino Experiment) e Hyper-Kamiokande, buscam partículas que escapam de núcleos galácticos ativos e remanescentes de supernovas, revelando mecanismos de aceleração capazes de atingir energias inacessíveis a aceleradores terrestres. Simultaneamente, observatórios de raios cósmicos — Pierre Auger e Telescope Array — mapeiam a composição e as anisotropias das partículas ultra-energéticas que inundam nosso planeta, e ao mesmo tempo, observatórios de raios gama, como o HESS e os futuros CTAO e ASTRI Mini-Array medem a contrapartida eletromagnética dessas mesmas fontes. O cruzamento desses dados multimessageiros amplia enor-

memente nosso poder de sondagem. Por exemplo, ao buscar padrões de conversão de partículas tipo áxion em fótons de alta energia nos espectros de raios gama, podemos restringir propriedades dessas partículas e testar modelos de matéria escura. Da mesma forma, um outro candidato à matéria escura fria, os WIMPs (*Weakly Interacting Massive Particles*) — ao aniquilarem-se podem gerar raios gama observáveis em linhas espectrais ou excessos de emissão difusa no halo galáctico. Ainda, o estudo de atrasos de chegada de fótons gama de diferentes energias produzidos em fontes muito distantes permite colocar limites cada vez mais rigorosos à violação da invariância de Lorentz (da constância da velocidade da luz), um possível sinal de estrutura quântica do espaço-tempo. Em conjunto, esses esforços estão pavimentando o caminho para descobertas revolucionárias: novas interações fundamentais até evidências diretas de partículas de matéria escura, como áxions e WIMPs, e até mesmo sinais do próprio Big Bang, codificados em raios gama, neutrinos e partículas cósmicas que atravessam o Cosmos. A convergência de detectores de última geração e abordagens multimessageiras nos aproxima de compreender a física que governa o Universo em suas condições mais extremas — e, quem sabe, de ultrapassar o horizonte do que hoje consideramos possível.

Origem dos buracos negros supermassivos: como se formam buracos negros com massas de 10^6 – $10^{10} M_{\odot}$ em épocas tão jovens ($z > 6$)? Modelos via colapso direto de nuvens de gás, crescimento por acreção super-Eddington e fusões sucessivas competem para explicar esse enigma. Ondas gravitacionais de fusões de buracos negros de massas intermediárias (10^2 – $10^4 M_{\odot}$) detectadas por LIGO, Virgo e KAGRA, se confirmadas, podem fornecer pistas diretas sobre essa população primordial.

Horizontes de eventos reais vs. singularidades nuas: dentro da Relatividade Geral, buracos negros apresentam horizontes de evento que selam singularidades invisíveis. Contudo, a possibilidade de “singularidades nuas” — regiões onde a curvatura diverge sem horizonte envolvente — continua em aberto. O Event Horizon Telescope (EHT), ao produzir imagens da sombra de M87* e de Sgr A*, colocou em evidência a geometria do horizonte. Futuras campanhas com maior resolução e sensibilidade no mm/sub-mm poderão detectar desvios sutis esperados em cenários que violem o teorema da censura cósmica, ou evidências de matéria exótica próxima ao horizonte.

Emissão Difusa, Efeitos de Propagação e Campos Magnéticos Cósmicos: o estudo da emissão difusa de raios gama (radiação gama que não pode ser atribuída a uma fonte pontual específica) e os efeitos de sua propagação através do espaço são cruciais para medir a *Extragalactic Background Light* (EBL), que é o brilho acumulado de todas as fontes extragalácticas que emitem luz no infravermelho, visível e ultravioleta desde distâncias cosmológicas. Além disso, permite a caracterização de campos magnéticos galácticos e extragalácticos que influenciam a propagação de partículas carregadas. Essas investigações também fornecem *insights* valiosos sobre a física dos raios cósmicos e do

meio interestelar e intergaláctico, além de incluir temas fundamentais relacionados à propagação cosmológica dos raios gama, como a atenuação por interação com a EBL.

I.3.2. Observatórios e experimentos de ponta

A interseção de dados de raios gama, ondas gravitacionais, neutrinos e raios cósmicos forma o cerne da Astronomia multimessageira. A era da Astronomia multimessageira exige a colaboração de diversas instalações observacionais, cada uma sensível a diferentes mensageiros cósmicos.

Observatórios de Raios Gama: projetos como o CTAO, que será a maior e mais sensível rede de telescópios Cherenkov do mundo, atuando nas faixas de 50 GeV a 300 TeV; o seu Precursor, o ASTRI Mini-Array, um arranjo menor de telescópios Cherenkov de pequeno tamanho atuando na faixa 1-300TeV; o SWGO — observatório de tanques Cherenkov de campo amplo, no hemisfério sul — e sua contrapartida já em operação no hemisfério norte: o LHAASO (Large High Altitude Air Shower Observatory) na China, ambos atuando em multi-TeV, trabalharão em conjunto para mapear o céu com sensibilidade e alcance sem precedentes. Esses observatórios desempenham um papel vital na detecção de raios gama até energias ultra-altas produzidas pelas fontes aceleradoras cósmicas. Essas instalações visam identificar fenômenos transientes, como explosões (flares) de raios gama, e também emissões persistentes de AGNs (núcleos galácticos ativos), supernovas, quilonovas e pulsares, bem como sondar a radiação difusa que cruza o Universo e seus efeitos na EBL. Além disso, terão papel fundamental na detecção de interações entre partículas de matéria escura (WINPs) em regiões como o halo da Galáxia, e na medida indireta dos campos magnéticos galácticos e intergalácticos interagentes com as partículas carregadas resultantes do cascadeamento dos raios gama de fontes distantes.

Observatórios de Ondas Gravitacionais: Detectores como LIGO, Virgo e KAGRA já revolucionaram nossa compreensão de fusões de buracos negros e estrelas de nêutrons. Projetos futuros, como o Einstein Telescope na Europa (com sensibilidade em frequências superiores, podendo capturar sinais de fundo estocástico gravitacional), e o LISA (Laser Interferometer Space Antenna), missão espacial (com sensibilidade em frequências baixas 10^{-4} a 10^{-1} Hz), permitirão estender esse alcance, sondando ondas geradas no Universo primordial de menos de 1 segundo de idade e abrindo a possibilidade de detectar sinais da própria inflação quântica no tecido do espaço-tempo, explorando possíveis extensões da Relatividade Geral em escala quântica.

Observatórios de Neutrinos: Detectores de neutrinos de nova geração — IceCube-Gen2, KM3NeT, DUNE e Hyper-Kamiokande — buscam partículas tênues que podem revelar processos de aceleração em supernovas e núcleos galácticos ativos (AGNs). À medida que parcerias como a AMON (Astrophysical Multimessenger Observatory Network) amadurecerem, tornaremos possível

emitir alertas em tempo real, mobilizando toda a comunidade astronômica quando um evento extraordinário acontece, seja um flash de neutrinos, um pico de raios gama ou uma onda gravitacional.

Telescópios de Raio-X, Ópticos, e de Rádio de Próxima Geração: Satélites de raios X atuais e futuros são cruciais para sondar os emissores de alta energia imediatamente após um alerta multimensageiro. Instrumentos como o Chandra X-ray Observatory, o XMM-Newton e o NuSTAR mapeiam regiões de acreção em buracos negros e de choque em remanescentes de supernovas, enquanto o futuro Athena (Advanced Telescope for High-ENergy Astrophysics) aumentará em muito a sensibilidade e a resolução espectral, permitindo estudar a física do plasma relativístico e a termodinâmica de discos de acreção. Em coordenação com alertas de ondas gravitacionais, raios gama e neutrinos, observações de raios X revelam o início dos processos de ejeção de jatos e caracterizam a evolução temporal de flares. Projetos como o ELT (Extremely Large Telescope) e o GMT (Giant Magellan Telescope), ambos na fase de construção no Chile, serão os maiores telescópios ópticos do mundo, graças aos seus espelhos primários de 39 m e 24,5 m, respectivamente. Levantamentos de grande escala como LSST (Legacy Survey of Space and Time), operado pelo Observatório Vera C. Rubin, J-PAS (Javalambre Physics of the Accelerating Universe Astrophysical Survey) e S-PLUS (Southern Photometric Local Universe Survey) são essenciais para identificar as contrapartidas eletromagnéticas de eventos multimensageiros e para o mapeamento detalhado de galáxias e estruturas em grande escala. Além destes, o Space-based multi-band astronomical Variable Objects Monitor (SVOM) e o futuro THESEUS serão fundamentais para varrer rapidamente grandes áreas do céu em várias bandas, capturando eventos transientes logo após um alerta de LIGO, Virgo ou KAGRA, ou do CTAO ou ASTRI Mini-Array. Ainda assim, a latência na emissão de alertas e a necessidade de coordenação global permanecem gargalos que a rede AMON procura mitigar, distribuindo alertas quase em tempo real e permitindo observações de seguimento coordenadas. No âmbito das baixas frequências de rádio e milimétricas, observatórios como os futuros LLAMA, localizado na Argentina, e BINGO, no Brasil, contribuirão para o estudo de gás neutro e campos magnéticos, bem como para pesquisa em cosmologia. O MeerKAT, na África do Sul, e o futuro Square Kilometre Array (SKA), com antenas distribuídas por diversos países, oferecerão sensibilidade e resolução sem precedentes para detectar emissões de rádio fracas, mapear estruturas em grande escala e capturar sinais transientes de pulsares e jatos relativísticos. Além disso, a colaboração com o Event Horizon Telescope (EHT) abre a perspectiva de estender a técnica de VLBI (Very Long Baseline Interferometry) ao LLAMA, proporcionando linhas de base ainda maiores para “detectar” regiões próximas ao horizonte de eventos de buracos negros. Essa combinação poderá ajudar a revelar detalhes cruciais sobre a existência — ou não — de horizontes de eventos ideais, testando na prática se certas singularidades permanecem “nuas” ou ficam ocultas atrás de um horizonte de eventos.

I.3.3. Perspectivas futuras

Explorar o Universo em condições extremas é um dos desafios mais instigantes da Astrofísica moderna. Os grandes desafios do Universo em condições extremas residem na sua própria complexidade. Unindo o poder de observação dos telescópios, a sensibilidade dos detectores e a velocidade da análise computacional, poderemos avançar em questões fundamentais: como “O que mais podemos aprender com raios gama, ondas gravitacionais e neutrinos acerca das fontes compactas e seus eventos extremos?”; Existe de fato um “pico” de densidade de matéria escura em torno de buracos negros? “Como associar diferentes mensageiros a um mesmo evento?”; e “É possível sondar o Universo primordial: como era ele nos instantes iniciais que hoje nos escapam, e de que forma a gravidade quântica pode se revelar?”

O futuro da exploração do Universo em condições extremas é intrinsecamente ligado à nossa capacidade de inovar em tecnologia, computação e colaboração. Ao ultrapassar essas fronteiras, desvendaremos os segredos mais profundos do Cosmos, revelando a física por trás dos fenômenos mais energéticos e misteriosos do Universo. Em suma, o Universo em condições extremas nos convida a ultrapassar fronteiras tecnológicas e conceituais. A convergência entre instrumentação de ponta, supercomputação e inteligência artificial não é apenas uma tendência: é o caminho para transformar o Cosmos num verdadeiro laboratório de descobertas, onde as perguntas mais ousadas ganham resposta e onde cada fóton, cada neutrino e cada ondulação no espaço-tempo carrega um pedaço do quebra-cabeça cósmico.

I.4. A origem e o destino das galáxias

Entender a origem e evolução das galáxias é uma das grandes questões abertas da Astrofísica moderna. Como estruturas fundamentais do Universo visível, as galáxias abrigam estrelas, gás, poeira, buracos negros supermassivos e matéria escura. São nelas que ocorrem os principais processos de formação estelar e enriquecimento químico, além de desempenharem papel central na construção das estruturas cósmicas em grande escala. Investigar como se formam, crescem e se transformam ao longo do tempo é essencial para construir um quadro coeso da história do Cosmos.

Nas últimas décadas, avanços em observações multibanda, modelagens teóricas sofisticadas e simulações numéricas em grande escala transformaram nosso entendimento das galáxias. Telescópios como o JWST já permitem observar galáxias formadas nos primeiros 500 milhões de anos, revelando o colapso do gás em halos de matéria escura e os primeiros ciclos de formação estelar. No entanto, muitas perguntas fundamentais permanecem em aberto: como se dá o colapso inicial do gás em halos de matéria escura? Quais mecanismos regulam a formação estelar e o crescimento de bura-

cos negros centrais? Que papel desempenham os ambientes em grande escala, como aglomerados e filamentos cósmicos, na história evolutiva das galáxias?

O estudo detalhado de galáxias no Universo próximo, em contrapartida ao estudo do Universo distante, oferece a oportunidade de avaliar o resultado “final” dos processos astrofísicos que transformam esses sistemas ao longo do tempo cósmico desde sua formação inicial. Observações detalhadas da emissão das estrelas, da poeira e do gás, assim como do movimento do gás e das estrelas permitem reconstruir a história de formação estelar e a evolução dinâmica de galáxias individuais com precisão sem precedentes. Amostras cada vez maiores com dados espectroscópicos de campo integral (e.g., MANGA, SAMI), e em particular com mapas altamente resolvidos que traçam a emissão de populações estelares e a dinâmica interna em escalas subgalácticas no Universo próximo (e.g., MUSE no óptico e ALMA no milimétrico) vêm alimentando de forma notável modelos de formação e evolução de galáxias. Esses estudos locais fornecem a referência necessária para interpretar populações observadas em tempos cósmicos mais primitivos e calibrar modelos de formação e evolução galáctica.

O estudo das galáxias conecta áreas centrais da Astrofísica — como o estudo do meio interestelar, evolução estelar, estrutura em grande escala e cosmologia, entre outras. Porém ela também dialoga com outras disciplinas, como química (evolução da metalicidade ao longo do tempo cósmico), física fundamental (testes de matéria e energia escuras), assim como ciência de dados aplicada (manipulação de enormes volumes de dados) e inteligência artificial (e.g., machine learning e deep learning). Assim, sua relevância ultrapassa fronteiras disciplinares: fomenta desenvolvimento tecnológico, formação de capital humano especializado e inovação em métodos analíticos que beneficiam setores além da Astronomia. Investir nessa área é também uma forma de fortalecer uma base científica interdisciplinar, fomentando a inovação e desenvolvendo competências em ciência de dados, modelagem computacional e instrumentação — elementos cada vez mais centrais em economias baseadas em tecnologia, inovação e conhecimento.

I.4.1. Formação e evolução de galáxias

A formação de galáxias é um processo complexo que começa com pequenas flutuações de densidade no Universo primordial, amplificadas pela gravidade. Essas flutuações evoluem para estruturas cada vez maiores, originando os halos de matéria escura dentro dos quais o gás colapsa e se resfria, iniciando a formação estelar. Desde então, galáxias evoluem por meio de processos internos (e.g, atividade de formação estelar, crescimento de buracos negros supermassivos, SMBHs) e processos externos (e.g, fusões e interações com outras galáxias, acreção de gás proveniente do meio intergaláctico). Nos processos internos, a formação de estrelas e o ciclo de evolução estelar aumenta o conteúdo de massa estelar, contribui para a formação de estruturas estelares e enriquece químicamente o gás.

mente o meio interestelar por meio de ventos estelares e explosões de supernovas. O crescimento de buracos negros supermassivos (SMBHs) também impacta a evolução das galáxias à medida que os SMBHs se alimentam de gás, podendo produzir jatos e gerando processos de retroalimentação que aquecem e/ou expulsam o gás nas proximidades (combustível necessário para formação estelar), alterando a capacidade de formar novas estrelas. Já os processos externos — como fusões e interações com outras galáxias (massivas ou satélites), assim como acreção de gás do meio intergaláctico — rearranjam a massa estelar, momento angular e distribuição de gás do sistema, levando a modificações em massa total, morfologia e enriquecimento metálico.

A evolução das galáxias não segue um processo idêntico para todas as galáxias: a evolução galáctica depende da massa do sistema, de seu ambiente (se se encontra em regiões densamente povoadas por outras galáxias ou em áreas mais isoladas) e da época na história cósmica. Galáxias massivas tendem a formar estrelas de modo rápido e eficiente, cessando a formação estelar cedo na história cósmica. As menos massivas mantêm atividade por mais tempo e são mais suscetíveis a influências ambientais. Observações mostram que ventos estelares e jatos de SMBHs podem expulsar ou aquecer o gás, regulando — ou mesmo interrompendo — novos ciclos de formação estelar, e compreender essa retroalimentação é um dos maiores desafios em simulações hidrodinâmicas. A relação entre a formação estelar e o crescimento de buracos negros centrais ainda é mal compreendida: embora se observe uma correlação entre a massa do buraco negro e a do bojo, os mecanismos causais dessa coevolução permanecem um mistério aberto.

Outro desafio importante é entender como surgem e evoluem os diversos componentes galácticos — disco, bojo, braços espirais e halo estelar. Evidências observacionais indicam que fusões entre galáxias, interações gravitacionais e instabilidades internas moldam essas estruturas de forma dinâmica. Fusões de galáxias e instabilidades internas resultam em movimentação global do gás, alterando a distribuição de metais e gerando acúmulos de gás que desencadeiam surtos de formação estelar. Esses surtos ocorrem tanto na escala global (impactando o sistema como um todo) quanto na escala local, e.g., quando barras direcionam gás ao centro e produzem surtos de formação estelar nucleares. O estudo das dinâmicas internas e de gradientes de metalicidade mapeados por espectroscopia integral de campo (e.g., MUSE, MANGA e SAMI, entre outros) oferece uma cronologia dinâmica e química valiosa, conectando observação e teoria.

O ambiente também exerce papel fundamental, modulando a formação estelar. Em aglomerados densos, mecanismos como a pressão de arraste (onde o gás quente retido pelo potencial gravitacional global do aglomerado retira o gás frio da galáxia conforme esta se insere no aglomerado) aceleram o fim da formação estelar. Isso resulta em uma sobreincidência de galáxias passivas e vermelhas (por conta de uma emissão dominada por estrelas velhas que emitem preferencialmente nas bandas mais vermelhas) nas regiões mais densas de aglomerados de galáxias, enquanto galáxias com

maior atividade de formação estelar (e portanto, com estrelas jovens e massivas que emitem fortemente nas bandas mais azuis) nas beiradas destas grandes estruturas: a dita “relação morfologia–densidade” onde galáxias elípticas são frequentemente encontradas nas regiões centrais de aglomerados e galáxias espirais, nas partes mais periféricas. Já em filamentos da rede cósmica, o suprimento contínuo de gás frio pode sustentar a atividade por mais tempo. Mapear sistematicamente essa dependência ambiental é crucial para compreender a diversidade em propriedades (e.g., morfologia, taxas de formação estelar, massa estelar e atividade de crescimento de SMBHs) das galáxias.

I.4.2. Grandes levantamentos, observatórios e instrumentos de próxima geração

A chave para decifrar a evolução das galáxias está em reunir amostras estatisticamente robustas, cobrindo amplos intervalos de tempo cósmico. Para isso, a Astronomia internacional entrou na era dos grandes levantamentos observacionais, que combinam imageamento profundo e espectroscopia em grandes áreas do céu em sinergia com telescópios espaciais e terrestres.

Atualmente, destacam-se os seguintes projetos:

- James Webb Space Telescope (JWST) — em operação desde 2022, o JWST tem revolucionado a Astronomia extragaláctica ao observar as primeiras galáxias formadas no Universo, revelar como o gás colapsa em halos de matéria escura e mapear, com detalhe inédito, o crescimento estelar e dos buracos negros até $z \sim 10$. Suas imagens e espectros infravermelhos também mostram a estrutura interna de galáxias mais próximas, permitindo ligar, num mesmo observatório, a formação inicial à evolução madura dos sistemas. Um exemplo dessa capacidade é o Cosmos-Web, levantamento profundo que usará o JWST para catalogar mais de um milhão de galáxias, criando a referência de alta resolução que calibrará Euclid, Roman e LSST na próxima década.
- Euclid — lançado em 2023, iniciou observações científicas em 2024. Seu *Wide Survey* cobrirá cerca de 15000 graus quadrados com resolução espacial próxima à do telescópio espacial Hubble, em bandas ópticas e no infravermelho próximo, além de espectroscopia de baixa resolução nesse mesmo intervalo de comprimentos de onda. Medindo as formas de mais de 1,5 bilhão de galáxias até $z \sim 2$ e obtendo redshifts para dezenas de milhões, Euclid cartografará a distribuição de matéria escura e a evolução da estrutura cósmica, estabelecendo a linha de base estatística para estudos de energia escura, crescimento de estruturas e formação de galáxias.
- Nancy Grace Roman Space Telescope — com lançamento previsto para o fim da década, o Roman realizará levantamentos mais profundos em área menor (cerca de 2000 graus quadrados), usando um campo de visão 100 vezes maior que o Hubble e sensibilidade superior no

infravermelho próximo. Seu *High Latitude Survey* complementarará o Euclid ao atingir galáxias mais tênues, refinando medições de lenteamento fraco e estendendo o censo de galáxias até $z \sim 3$.

- Vera C. Rubin Observatory / LSST — com *first light* em 2025, mapeará ~ 18000 graus quadrados do céu austral durante dez anos, revisitando cada campo centenas de vezes em seis bandas ópticas. Entregará fotometria e morfologias para > 20 bilhões de galáxias até $z \sim 1$, medições de lenteamento fraco para cosmologia, estatísticas sem precedentes sobre interações, fusões e variabilidade em núcleos ativos, além de séries temporais que revelarão supernovas e a evolução estrutural das galáxias em diferentes ambientes. A profundidade e a cadência farão do LSST um pilar para conectar a evolução estrutural das galáxias ao ambiente e a fases transitórias de formação estelar e atividade nuclear.
- SPHEREx — lançado em 2025, realizará o primeiro levantamento espectrofotométrico de todo o céu no infravermelho próximo. Seus mapas trarão um catálogo de aproximadamente 1 bilhão de fontes com espectros de baixa resolução, permitindo estudar a história de formação estelar, a distribuição de poeira e a evolução química das galáxias em uma ampla faixa de distâncias cósmicas. Esses dados servirão de ponte entre levantamentos ópticos de grande área e observações profundas de alta resolução, oferecendo contexto estatístico essencial para investigar a formação e o destino das galáxias.
- Levantamentos de espectroscopia integral de campo (MaNGA, SAMI, MUSE) — O MaNGA (SDSS-IV) obtém espectros espacialmente resolvidos para cerca de 10000 galáxias de redshifts baixos a intermediários, fornecendo um panorama estatístico sem precedentes dos gradientes de metalicidade, idades estelares e campos de velocidade internos. O australiano SAMI aplica metodologia similar para cerca de 3000 galáxias, complementando o MaNGA ao explorar ambientes mais extremos (aglomerados densos, grupos) e oferecendo outro conjunto controlado para análise populacional. Já o MUSE, instalado no VLT, alia o poder coletor de um telescópio de 8 m à alta resolução espacial e espectral, permitindo dissecar populações estelares, regiões H II e cinemática fina em galáxias próximas e distantes. A sinergia entre amostragem estatística volumosa (MaNGA + SAMI) e detalhamento físico de alta resolução (MUSE) constrói um retrato completo da evolução das galáxias, unindo escala populacional e processos internos em nível de poucos parsecs.
- VLT / VISTA e grandes levantamentos espectroscópicos óptico-NIR (MOONS, 4MOST, DESI, ERIS) — MOONS, o novo espectrógrafo multiobjeto óptico-NIR do VLT, e 4MOST, instalado no VISTA, gerarão redshifts, metalicidades e mapas cinemáticos para milhões de galáxias ao longo de uma vasta faixa de distâncias; o DESI, já em operação no telescópio Mayall,

cartografa a distribuição tridimensional de galáxias e quasares com precisão inédita, refinando limitações sobre energia e matéria escuras; e o ERIS, imager / espectrógrafo NIR de alta resolução do VLT, complementará esses levantamentos com observações focadas na dinâmica interna e nos episódios de formação estelar em galáxias próximas e distantes.

- Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) — em operação desde 2013, o ALMA revolucionou os estudos de galáxias ao mapear, com resolução menor que 1 arcosssegundo, o gás molecular e a poeira que alimentam a formação estelar e os buracos negros supermassivos, desde galáxias anãs locais até sistemas intensamente formadores de estrelas a $z > 6$. As atualizações do programa ALMA2030 (faixas de frequência mais largas, receptores de maior sensibilidade e correlador aprimorado) dobrarão a largura de banda e aumentarão significativamente a eficiência, possibilitando levantamentos rápidos de grandes amostras e imagens ainda mais detalhadas de discos, barras e fluxos de gás em galáxias próximas e distantes. Essas melhorias manterão o ALMA como laboratório essencial para entender como a matéria-prima fria se converte em estrelas e estrutura galáctica ao longo da história do Universo.
- ngVLA (Next Generation Very Large Array) — com operações previstas para 2031, combinará centenas de antenas em uma rede que cobrirá frequências de 1,2 a 116 GHz, preenchendo a lacuna entre o desempenho do ALMA em comprimentos de onda menores e o futuro SKA em comprimentos de onda maiores. Oferecerá um salto significativo em sensibilidade e resolução em relação aos radiotelescópios atuais, permitindo mapear o gás molecular frio em galáxias próximas e distantes com resolução de poucos parsecs e, assim, ligar diretamente os reservatórios de gás às taxas de formação estelar, ao crescimento de buracos negros supermassivos e à evolução química dos sistemas ao longo do tempo cósmico, entre outras pesquisas.
- Square Kilometre Array (SKA) — apoiado pelos *pathfinders* já em operação MeerKAT (África do Sul) e ASKAP (Austrália), o SKA formará o maior radiotelescópio do mundo. Seu legado para a ciência de galáxias será o censo definitivo do gás neutro (H I), do Universo local até $z \sim 2$, revelando como o fluxo de gás alimenta as galáxias, como interações o removem em aglomerados e como a disponibilidade de H I regula o ritmo de formação estelar, entre outros.

Pesquisadores brasileiros colaboram ativamente nos levantamentos fotométricos S-PLUS, J-PLUS e J-PAS, que mapeiam grandes áreas do céu com conjuntos de filtros ópticos de múltiplas bandas — 12 no S-PLUS e J-PLUS, e mais de 50 no J-PAS — possibilitando estimativas fotométricas de redshift, distribuição de metais e idades estelares para milhões de galáxias. Esses projetos

complementam levantamentos espectroscópicos e de imagem profunda ao fornecer catálogos homogêneos de populações estelares e parâmetros físicos, criando um elo essencial entre dados de alta resolução e grandes amostras estatísticas. No âmbito teórico e computacional, grupos brasileiros também integram consórcios de simulações cosmológicas de ponta, como IllustrisTNG, EAGLE e Magneticum, reforçando a capacidade nacional de confrontar observações e modelos de evolução galáctica.

O momento atual apresenta uma chance estratégica para a Astrofísica brasileira se posicionar como protagonista internacional em estudos de galáxias. O país já dispõe de grupos consolidados em áreas como análise de grandes volumes de dados, modelagem de espectros de galáxias, ambientes de aglomerados, evolução morfológica, e conexões com matéria escura e energia escura.

A próxima década será decisiva para responder quando e como as primeiras galáxias se formaram, de que modo o ambiente regula a formação estelar e qual é o papel dos buracos negros supermassivos na evolução desses sistemas.

O Brasil já atua de forma decisiva em várias frentes dessa agenda, sustentado por grupos consolidados em análise de grandes volumes de dados, simulações cosmológicas e instrumentação óptica, infravermelha e de rádio. Ao aprofundar essa participação — assumindo responsabilidades na exploração científica dos grandes levantamentos — o país converte seu potencial em liderança efetiva, produz resultados originais e coloca a comunidade brasileira no primeiro plano das pesquisas sobre a origem e o destino das galáxias.

1.5. A Via Láctea e o lugar da Terra no Universo

Responder simultaneamente às perguntas “Qual é o lugar da Terra no Universo?” e “Como a Via Láctea constrói esse cenário?” exige muito mais do que posicionar nosso planeta em coordenadas cósmicas: requer entender a trajetória da própria Galáxia — desde sua montagem inicial, o enriquecimento químico de seus discos, halo e bojo, até os ambientes dinâmicos que propiciaram a formação do Sol. Ao investigar a história da Via Láctea, elucidamos os processos que governam a formação de estrelas, discos protoplanetários e exoplanetas, conectando a diversidade de mundos habitáveis que encontramos (ou ainda encontraremos) ao pano de fundo galáctico que os nutre. Assim, o estudo conjunto da estrutura e evolução da Via Láctea, da caracterização detalhada das estrelas que a compõem e da multiplicidade de sistemas planetários que abriga é fundamental para decifrar o contexto cósmico que permitiu a existência da Terra — e para avaliar quão comuns podem ser cenários semelhantes em nossa Galáxia.

I.5.1. Explorando a formação e evolução de sistemas planetários e estelares

A formação e evolução de sistemas planetários, a caracterização de exoplanetas e o estudo profundo da evolução estelar são as chaves para decifrar o contexto cósmico que permitiu a existência da vida terrestre. O avanço de técnicas de detecção e caracterização de exoplanetas, aliado a observações multiespectrais de estrelas e discos protoplanetários, que já vêm revolucionando a ciência nos últimos anos, promete transformar ainda mais a nossa visão sobre a diversidade de mundos e sobre os caminhos possíveis para o descobrimento de planetas habitáveis nas próximas décadas. Este tema constitui, de maneira ampla, o estudo dos alicerces astrofísicos que definem o nosso lugar no Cosmos.

I.5.2. A formação e evolução de sistemas planetários

Nebulosas compostas por gás e poeira, em colapso gravitacional, dão origem às estrelas e, ao seu redor, aos discos protoplanetários — os berços dos planetas. Compreender a composição, a estrutura e a evolução desses discos é fundamental para conectar as condições iniciais da formação estelar à arquitetura final dos sistemas planetários. Avanços recentes revelaram uma diversidade surpreendente nos caminhos evolutivos desses sistemas, desafiando os modelos clássicos baseados exclusivamente no Sistema Solar.

Observações de alta resolução em múltiplos comprimentos de onda (óptico, infravermelho, submilimétrico) são essenciais para mapear discos de formação planetária, para realizar modelagens físico-químicas detalhadas que integrem hidrodinâmica, crescimento de grãos e migração planetária. Monitoramento temporal é importante para entender fenômenos dinâmicos como ventos, acreção e instabilidades. Esses estudos esclarecem os mecanismos que governam a evolução de discos protoplanetários e a formação de planetas rochosos e gigantes, bem como os fatores que levam à formação de zonas habitáveis.

Instrumentos como o ALMA têm revolucionado o estudo de discos protoplanetários ao revelar anéis, lacunas e assimetrias com resolução sub-UA (menor que 1 unidade astronômica), sugerindo interações precoces com planetas em formação. Em sinergia, o JWST está abrindo novas janelas para a caracterização espectral de regiões internas e quimicamente ricas desses discos, especialmente em infravermelho médio.

A próxima geração de telescópios terrestres, como o Extremely Large Telescope (ELT) do ESO e o Giant Magellan Telescope (GMT), oferecerá resolução angular e sensibilidade sem precedentes, permitindo estudar a formação planetária em escalas espaciais que se aproximam da unidade astronômica para sistemas próximos. Essas capacidades serão essenciais para investigar a ligação entre subestruturas nos discos e a formação de planetas rochosos e gigantes.

I.5.3. Detecção e caracterização de exoplanetas

Desde a descoberta dos primeiros exoplanetas, ficou evidente que a diversidade de sistemas planetários supera amplamente nossas expectativas iniciais. Para compreender como a Terra se insere nesse espectro, é essencial expandir nossa capacidade tanto de detecção quanto, sobretudo, de caracterização desses sistemas, onde incluem-se:

- Melhorar a precisão dos métodos de trânsito, velocidade radial e astrometria, visando detectar planetas menores e mais distantes de suas estrelas;
- Avançar nas técnicas de espectroscopia de transmissão e emissão para sondar atmosferas planetárias em busca de bioassinaturas e condições compatíveis com a vida;
- Estabelecer estatísticas robustas sobre a ocorrência de exoplanetas, por meio de várias técnicas isoladas e combinadas, incluindo o método de microlentes gravitacionais, ampliando a cobertura no espaço de parâmetros planetários — inclusive planetas similares à Terra em zonas habitáveis;
- Desenvolver missões espaciais dotadas de coronógrafos e interferômetros capazes de imagear diretamente exoplanetas ao redor de estrelas próximas;
- Investir em grandes levantamentos com instrumentos dedicados, promovendo a caracterização homogênea de amplas populações estelares e planetárias;
- Priorizar o estudo detalhado dos sistemas que compõem a vizinhança solar, onde a proximidade possibilita observações mais profundas e abrangentes.

Nesse cenário, missões dedicadas à caracterização atmosférica de exoplanetas, como a Ariel (ESA), que analisará em grande escala as atmosferas de centenas de exoplanetas, e a proposta HWO (Habitable Worlds Observatory), da NASA — voltada para imageamento direto e espectroscopia de mundos potencialmente habitáveis — serão peças-chaves para investigar a diversidade de composições atmosféricas e buscar assinaturas da habitabilidade. Já na superfície da Terra, o espectrógrafo de alta resolução ANDES (ArmazoNEs high Dispersion Echelle Spectrograph), do Extremely Large Telescope, com participação brasileira, complementará essas missões ao medir velocidades radiais e espectros planetários com precisão ímpar, ampliando o leque de ferramentas disponíveis para a caracterização detalhada de exoplanetas.

A combinação de grandes levantamentos (como TESS, PLATO e o Roman Space Telescope) com instrumentos de alta precisão, operando em telescópios de pequeno e médio porte — como o Observatório do Pico dos Dias (OPD), o Southern Astrophysical Research Telescope (SOAR) e o Canada France Hawaii Telescope (CFHT) — será fundamental. Instrumentos especializados, como o SPARC4 (no OPD), o STELES (no SOAR) e o SPIRou (no CFHT), aliados a modos de operação

voltados para surveys dedicados, otimizam o uso desses observatórios e ampliam sua relevância na caracterização detalhada de exoplanetas.

Além disso, o uso de telescópios de maior abertura como o Observatório Gemini e o envolvimento em telescópios de nova geração, como o GMT e o ELT, é de importância estratégica. Esses instrumentos alcançarão limites de magnitude e resolução angular sem precedentes, permitindo o estudo direto de estrelas em formação e de sistemas planetários ainda imersos em seus discos protoplanetários, além do acesso a uma população extremamente diversa de sistemas planetários em todos os estágios de evolução. Tais capacidades tornarão viável a exploração de amostras mais completas e a descoberta de uma diversidade planetária ainda inimaginável.

I.5.4. Caracterização profunda de estrelas e subestruturas estelares

A compreensão precisa das estrelas que hospedam planetas é fundamental para interpretar corretamente os sistemas planetários. Parâmetros como massa, idade, composição química e atividade magnética afetam tanto a formação, capacidade de caracterização, quanto à habitabilidade dos planetas. Neste contexto, ressaltam-se as seguintes linhas estratégicas:

- Medir propriedades fundamentais de estrelas com precisão sem precedentes, integrando espectroscopia, fotometria, astrometria em séries temporais para estudo de ciclos de atividade, asterossismologia e variabilidade estelar;
- Estudar binaridade estelar e interações em sistemas múltiplos, que afetam diretamente a formação planetária;
- Investigar a metalicidade estelar e abundâncias específicas como preditores da composição planetária e como marcadores do histórico de formação do sistema planetário;
- Usar populações estelares como traçadores do histórico dinâmico e químico da Galáxia, com foco em sua relação com a formação planetária.

A caracterização detalhada das estrelas permitirá conectar populações planetárias a ambientes galácticos e históricos evolutivos distintos.

I.5.5. Evolução estelar e o ambiente da habitabilidade

Estrelas evoluem, e com elas mudam as condições de habitabilidade de seus planetas. Compreender essa evolução é essencial para estimar as janelas de tempo nas quais a vida pode surgir e persistir. Neste contexto, destacam-se as seguintes linhas estratégicas:

- Modelos evolutivos estelares calibrados por observações em múltiplas fases da vida estelar;

- Estudo do impacto de ventos estelares, ejeções de massa e radiação de alta energia na atmosfera de exoplanetas;
- Exploração de zonas habitáveis em torno de diferentes tipos estelares, inclusive anãs M e estrelas subgigantes.

Esses dados permitirão construir uma cronologia precisa da habitabilidade nos sistemas estelares, incluindo o nosso próprio.

I.5.6. A Via Láctea

Compreender a Via Láctea — nossa Galáxia natal — é fundamental para responder a algumas das questões mais profundas da Astrofísica: Como as galáxias se formam e evoluem? Qual é a história do enriquecimento químico do Cosmos? E, em última instância, qual é o lugar da Terra e da humanidade no Universo? Ao reconstruir a história da Via Láctea e de suas vizinhas, podemos traçar o caminho cósmico que levou à formação do Sistema Solar e da vida como a conhecemos.

Nas próximas décadas, avanços em levantamentos ópticos, espectroscopia e astrometria nos permitirão fazer um mapeamento sem precedentes da estrutura, composição e história dinâmica da nossa Galáxia. Portanto, é importante manter uma agenda científica focada em revelar a arqueologia galáctica por meio de investigações sobre a formação estelar, o enriquecimento químico e a interação com galáxias satélites.

I.5.7. História química e formação estelar no disco, halo e bojo galáctico

A distribuição de elementos químicos nas estrelas do disco fino, disco espesso, halo e bojo oferece uma cronologia detalhada do processo de formação estelar ao longo do tempo. Investigações espectroscópicas permitirão:

- Mapear gradientes químicos radiais e verticais;
- Determinar idades estelares com alta precisão;
- Estabelecer as taxas de enriquecimento químico em diferentes ambientes galácticos;
- Compreender as relações entre metalicidade, massa estelar e cinemática.

Esses dados serão cruciais para modelar a evolução galáctica e para diferenciar entre cenários de formação interna versus acreção externa.

A caracterização química detalhada das populações estelares depende diretamente do acesso a instrumentação espectroscópica de alta resolução e ampla cobertura espectral. Investimentos em instrumentos como o GHOST (Gemini High-resolution Optical SpecTrograph), recentemente insta-

lado no Gemini Sul, e o STELES, em fase de comissionamento no SOAR, são fundamentais para posicionar a comunidade nacional na fronteira da arqueoquímica galáctica. Esses espectrógrafos permitem determinar com alta precisão abundâncias de dezenas de elementos, incluindo traçadores de processos de nucleossíntese e parâmetros atmosféricos estelares essenciais.

Complementarmente, a polarimetria de grande campo tem ganhado relevância no mapeamento da estrutura do meio interestelar. Instrumentos como o SouthPol, previsto para ser instalado no novo telescópio robótico de 1 m do OPD, permitirão sondagens sistemáticas da polarização interestelar em grande escala. Esses dados são essenciais para:

- Traçar a geometria e intensidade do campo magnético galáctico, com implicações diretas na dinâmica da formação estelar;
- Mapear a distribuição de grãos de poeira e suas interações com o gás interestelar;
- Entender como o acoplamento entre campo magnético, gás e poeira afeta a estrutura e evolução do disco e do halo.

Para enfrentar o desafio de mapear grandes populações estelares de forma eficiente, também é prioritário o desenvolvimento e acesso a espectrógrafos multiobjetos com múltiplas fendas ou fibras ópticas instalados em grandes telescópios. Instrumentos promissores nesse contexto incluem o PFS (no Telescópio Subaru), o MOONS (no VLT) e o MSE (no CFHT), além de projetos emergentes no hemisfério sul voltados a levantamentos galácticos e extragalácticos. Tais espectrógrafos permitirão observar simultaneamente centenas de estrelas, viabilizando levantamentos de grande campo com precisão química e cinemática adequadas à arqueologia galáctica moderna.

A sinergia entre espectroscopia de alta resolução, polarimetria e levantamentos fotométricos e astrométricos de grande escala constituirá a base para uma reconstrução detalhada da história da Via Láctea e dos processos que moldaram o ambiente galáctico onde surgiu o Sistema Solar.

1.5.8. Populações estelares antigas, galáxias anãs e fluxos estelares

As populações estelares antigas são testemunhas diretas das primeiras fases da formação da Via Láctea. Galáxias anãs e fluxos estelares remanescentes de interações passadas são registros fósseis do processo de acreção hierárquica previsto pela cosmologia Λ CDM.

Combinando dados de astrometria (como os do Gaia), espectroscopia de alta resolução e fotometria profunda, poderemos:

- Identificar estruturas estelares subjacentes;
- Associar populações a progenitores extragalácticos;
- Determinar a contribuição das galáxias anãs na montagem do halo estelar;

- Medir as assinaturas químicas e dinâmicas de eventos de fusão antigos.

1.5.9. Interações com satélites galácticos e a morfologia do disco

As galáxias satélites em órbita da Via Láctea, como a Grande Nuvem de Magalhães e a Galáxia Anã de Sagitário, provocam perturbações no disco galáctico, gerando ondulações, barras e espessamentos verticais. Estudar essas interações nos permitirá:

- Avaliar os impactos dinâmicos de interações recentes e antigas;
- Inferir a massa do halo escuro da Via Láctea;
- Compreender como a acreção contínua molda a morfologia galáctica;
- Explorar como essas perturbações influenciam a formação estelar.

Modelagens dinâmicas e simulações cosmológicas calibradas por observações serão ferramentas-chave para este esforço.

1.5.10. A arqueologia galáctica por meio de levantamentos ópticos

Levantamentos ópticos como Gaia, LSST (Vera C. Rubin Observatory), SDSS-V e futuros telescópios de grande campo permitirão a reconstrução detalhada da história da Via Láctea por meio da chamada arqueologia galáctica. Neste contexto, destacam-se as seguintes linhas estratégicas:

- Mapear bilhões de estrelas com posições, velocidades e composições químicas;
- Identificar estruturas subjacentes como correntes estelares, agregados dissolvidos e remanescentes de fusões;
- Derivar idades e trajetórias orbitais para grandes amostras de estrelas;
- Unificar dados observacionais com modelos físicos em tempo real.

Esses levantamentos servem como base para a próxima geração de pesquisas em Astrofísica galáctica.

A Terra não é apenas um pálido ponto azul no Cosmos — ela é o resultado de uma complexa e longa cadeia de processos astrofísicos e químicos que conectam a formação da Via Láctea à evolução de estrelas, planetas e, eventualmente, à emergência da vida. Com os avanços previstos para a próxima década, estaremos em posição de investigar, com precisão sem precedentes, tanto a estrutura e história química da nossa Galáxia quanto a diversidade e as condições de habitabilidade de sistemas planetários em sua vastidão.

A busca por mundos semelhantes ao nosso, aliada ao mapeamento arqueológico da Via Láctea, ampliará nosso entendimento sobre como as galáxias se formam, como estrelas e planetas evoluem e sob quais circunstâncias a vida pode surgir. O presente levantamento propõe um caminho estratégico e integrado para enfrentar questões fundamentais tais como: somos uma raridade cósmica ou o resultado natural da evolução do Universo?

Compreender o lugar da Terra no Universo requer uma abordagem abrangente que una o estudo profundo da nossa Galáxia — a Via Láctea — com a investigação detalhada da formação de estrelas, sistemas planetários e mundos habitáveis. As implicações observacionais, teóricas e de formação de pessoal delineadas acima convergem com as recomendações transversais apresentadas no final deste documento.

I.6. A Vida no Cosmos: possibilidades e caminhos

A busca por vida fora da Terra representa uma das mais profundas e abrangentes questões científicas da atualidade. Essa investigação não apenas estimula a curiosidade humana, mas também mobiliza diversas disciplinas — da Astrofísica e química interestelar à biologia, geofísica, ciência planetária e inteligência artificial. O objetivo central dessa empreitada é compreender como a vida pode surgir e evoluir em diferentes ambientes cósmicos, quais condições são necessárias para sua sustentação e qual seria o papel da vida em uma perspectiva cósmica.

A descoberta dos primeiros exoplanetas na década de 1990 marcou o início de uma nova era na Astrofísica, transformando profundamente nossa compreensão sobre a formação e evolução de sistemas planetários. Em reconhecimento a esse avanço, o Prêmio Nobel de Física de 2019 foi concedido a Michel Mayor e Didier Queloz, pela detecção do primeiro planeta orbitando uma estrela do tipo solar, 51 Pegasi b, em 1995. Desde então, o número de exoplanetas confirmados ultrapassou 6000, revelando uma diversidade surpreendente de tamanhos, composições e órbitas. Essa enorme variedade de planetas e arquiteturas orbitais extrapolou qualquer previsão anterior, desafiando os modelos clássicos baseados no Sistema Solar. Por exemplo, os planetas mais abundantes em nossa Galáxia são superterras e mininetunos, planetas inexistentes em nosso Sistema Solar.

A seguir, apresentamos um conjunto articulado de questões que podem nortear o desenvolvimento de pesquisas interdisciplinares voltadas à caracterização da habitabilidade no Universo e à busca ativa por bioassinaturas. Um ponto de partida fundamental reside na compreensão dos caminhos químicos que conduzem à formação, evolução e estabilidade de moléculas complexas em ambientes astrofísicos. A astroquímica tem mostrado que nuvens moleculares interestelares, discos protoplanetários e atmosferas planetárias abrigam compostos orgânicos complexos, alguns dos quais são

considerados precursores da vida. Mapear a diversidade e abundância dessas moléculas, utilizando espectroscopia de alta resolução, pode revelar os ingredientes disponíveis para a química prebiótica em diferentes fases da evolução cósmica.

A composição molecular dos ambientes astrofísicos é decisiva para a formação planetária. A presença de água, metano, dióxido de carbono e compostos nitrogenados, por exemplo, influencia diretamente as condições físico-químicas dos discos protoplanetários, afetando a formação de planetas rochosos e gasosos, bem como a possibilidade de retenção de atmosferas. Entender esses processos é essencial para avaliar a propensão de sistemas planetários à habitabilidade.

A formação e evolução dos sistemas planetários, por sua vez, é uma área em plena transformação. Dados de missões espaciais e observações por telescópios terrestres revelaram que a diversidade de sistemas planetários vai muito além do que se imaginava há poucas décadas. Questões fundamentais ainda permanecem em aberto: como se distribuem os planetas potencialmente habitáveis em torno de estrelas de diferentes tipos? Como as interações dinâmicas, migrações planetárias e perturbações gravitacionais moldam a estabilidade e as condições de seus ambientes?

As estrelas, com suas propriedades físicas e campos magnéticos, exercem papel crucial na habitabilidade planetária. A erosão atmosférica de exoplanetas é um processo fundamental para entender sua evolução e potencial habitabilidade, especialmente em sistemas orbitando estrelas ativas. Entre os mecanismos mais relevantes estão a fotoevaporação, causada pela absorção de fótons de alta energia (UV e raios X) que aquecem e expandem as camadas superiores da atmosfera até que elas escapem do campo gravitacional do planeta. Além disso, ventos estelares — fluxos contínuos de partículas carregadas — podem interagir com a atmosfera, removendo material por processos de arrasto e choque. Episódios de atividade estelar intensa, como explosões (flares) acompanhadas por emissões ultravioleta extremas (EUV) e ejeções de massa coronal (CMEs), podem intensificar significativamente essas perdas atmosféricas, especialmente em planetas próximos à estrela hospedeira. Esses processos são particularmente importantes para planetas em torno de estrelas anãs M, onde a proximidade com a estrela os torna mais vulneráveis a essas formas de erosão, com consequências diretas para sua composição atmosférica e possível habitabilidade. A caracterização do clima espacial, especialmente em sistemas com planetas na zona habitável, torna-se, assim, uma prioridade.

Nesse cenário, os exoplanetas — especialmente os potencialmente habitáveis — ocupam posição de destaque. Estimativas atuais indicam que deve haver bilhões de planetas na Galáxia, dos quais uma fração significativa pode apresentar condições propícias à vida. A caracterização de suas atmosferas é um próximo passo. Novas gerações de telescópios espaciais e terrestres, como o JWST e os observatórios ELT e GMT, permitirão a detecção e análise de atmosferas planetárias, inclusive com a possibilidade de identificar biomarcadores em mundos semelhantes à Terra.

A espectroscopia de transmissão é uma técnica poderosa para estudar a composição atmosférica de exoplanetas durante o trânsito, quando o planeta passa em frente à sua estrela hospedeira. Nesse momento, parte da luz estelar atravessa a atmosfera do planeta e é parcialmente absorvida por diferentes espécies químicas, deixando assinaturas espectrais características nos comprimentos de onda correspondentes. Ao comparar o espectro da estrela com e sem o planeta em trânsito, é possível inferir a presença de moléculas como H_2O , CO , CH_4 e Na , entre outras. Para extrair essas informações, utiliza-se o método de reconstrução atmosférica, que consiste no ajuste de modelos físicos às observações espectrais, geralmente por meio de técnicas estatísticas como amostragem de Monte Carlo via Cadeias de Markov (MCMC) ou *nested sampling*. Esses modelos consideram parâmetros como composição química, perfil de temperatura, presença de nuvens ou neblinas e estrutura de pressão, permitindo inferências quantitativas sobre a atmosfera observada. A combinação da espectroscopia de transmissão com técnicas de reconstrução atmosférica tem sido essencial para caracterizar atmosferas de planetas gigantes e, mais recentemente, de superterras e mininetunos, oferecendo pistas sobre sua origem, evolução e potencial habitabilidade.

A espectroscopia de alta precisão, aliada a métodos avançados de aprendizado de máquina, está ampliando a sensibilidade dos instrumentos na detecção de sinais sutis. Técnicas de aprendizado de máquina são particularmente promissoras para identificar padrões complexos e não lineares em grandes volumes de dados, o que pode viabilizar a detecção de moléculas em desequilíbrio químico — como oxigênio coexistindo com metano e vapor d'água — fortes indícios de processos biológicos ativos.

I.6.1. Astrobiologia

Nesse contexto, surge também a pergunta fundamental: a vida na Terra é um fenômeno exclusivamente local ou fruto de um processo de panspermia, em que compostos orgânicos, ou até mesmo formas microbianas, teriam sido transportadas por meteoritos ou cometas? Essa hipótese se conecta a investigações sobre a existência de vida em corpos do Sistema Solar, como Marte, Europa, Encélado e Titã. Esses mundos, com oceanos subterrâneos, atividade geotérmica ou ambientes ricos em compostos orgânicos, são alvos prioritários em missões de exploração astrobiológica.

A possibilidade de bioquímicas alternativas — isto é, formas de vida baseadas em solventes distintos da água ou estruturas moleculares não baseadas no carbono — amplia ainda mais o escopo das investigações. Explorar essa diversidade exige não apenas novas teorias, mas também instrumentação adaptada a detectar formas de vida radicalmente diferentes da terrestre.

A astrobiologia surge assim como eixo estruturador de um vasto programa de pesquisa. Ela engloba desde a detecção de bioassinaturas (sinais diretos ou indiretos da presença de vida) até o estudo de processos químicos prebióticos em ambientes planetários e interestelares. A investigação das

condições que permitiram o surgimento da vida na Terra — especialmente em ambientes extremos, como fontes hidrotermais, lagos hipersalinos ou regiões com radiação intensa — fornece modelos importantes para a identificação de habitats potenciais em outros mundos.

Por fim, propõe-se também a promoção de estudos focados em ambientes extremos terrestres, como análogos naturais a habitats extraterrestres, especialmente nos campos da microbiologia, geoquímica e física de sistemas extremos. Esses estudos contribuem diretamente para a identificação de limites da vida e para o desenvolvimento de modelos aplicáveis à astrobiologia planetária.

I.6.2. Sistema Solar

A composição molecular de ambientes astrofísicos exerce influência direta sobre a formação planetária e a possível habitabilidade. A detecção de moléculas orgânicas complexas em discos protoplanetários, por meio de instrumentos como o ALMA, já revelou que compostos precursores da vida estão presentes desde as fases iniciais da formação estelar. Entender como esses compostos se preservam, se transformam ou se acumulam em corpos sólidos é central para avaliar os caminhos da vida no Cosmos.

Nessa perspectiva, o estudo dos meteoritos e dos processos de acreção planetária é essencial. Em particular, os meteoritos preservam registros primordiais dos materiais que compunham o Sistema Solar em seus primeiros milhões de anos. Investigações isotópicas e mineralógicas desses objetos podem fornecer pistas sobre a origem da água, compostos orgânicos e elementos voláteis fundamentais para a vida. A integração entre meteorítica, astroquímica e geociências planetárias deve ser incentivada como estratégia para desvendar a origem da vida e a evolução planetária.

Ainda no contexto do Sistema Solar, é necessário enfatizar também a importância dos pequenos corpos — asteroides, cometas e objetos transnetunianos — como testemunhos da formação e evolução do sistema planetário. Missões como OSIRIS-REx e Hayabusa 2 ilustram o potencial científico do retorno de amostras desses corpos. Os estudos do cinturão de Kuiper e da região transnetuniana, por sua vez, fornecem acesso a uma população de objetos praticamente inalterados desde a origem do Sistema Solar, alguns dos quais podem conter materiais voláteis e orgânicos relevantes para a astrobiologia.

Mais recentemente, a passagem de objetos interestelares como 1I/‘Oumuamua (2017) e 2I/Borisov (2019) introduziu uma nova dimensão ao estudo da matéria extraterrestre. A caracterização física e composicional desses corpos, que se acredita terem se originado em outros sistemas planetários, pode oferecer oportunidades únicas para investigar a diversidade de materiais em diferentes regiões da galáxia. O desenvolvimento de programas de vigilância e interceptação de tais objetos deve ser incentivado.

Outro campo de destaque é a astrogeologia, especialmente no que diz respeito a processos de impacto e à geologia de superfícies planetárias. As colisões cósmicas moldaram a história do Sistema Solar, influenciaram a composição atmosférica de planetas e luas, e possivelmente atuaram como gatilho para o surgimento da vida ao fornecer energia e matéria orgânica. A análise geológica de crateras, depósitos de impacto e morfologias de superfície em planetas e satélites é fundamental para reconstruir cenários de habitabilidade passada.

Além das questões astrobiológicas, a segurança da vida em nosso próprio planeta também merece atenção. Monitorar objetos potencialmente perigosos, como asteroides e cometas próximos à Terra, exige vigilância constante e desenvolvimento de estratégias de mitigação. O crescente problema do lixo espacial — resíduos de satélites, foguetes e detritos orbitais — também demanda soluções tecnológicas e acordos internacionais.

Por fim, a previsão do clima espacial, especialmente em resposta à atividade solar, é fundamental para proteger infraestruturas críticas, como redes de comunicação, satélites e sistemas de navegação. O avanço na modelagem do Sol e na compreensão de sua variabilidade ajudará a reduzir os impactos de tempestades solares em nosso planeta.

1.6.3. Observações de sistemas planetários

No plano observacional, a espectroscopia de alta resolução e o uso de técnicas espectropolarimétricas têm papel central na caracterização de atmosferas planetárias, tanto dentro quanto fora do Sistema Solar. Avanços nos espectrógrafos como o ANDES (ArmazoNEs high Dispersion Echelle Spectrograph), previsto para ser instalado no ELT e que conta no seu desenvolvimento com a participação do Brasil, o telescópio PLANETS (Polarized Light from Atmospheres of Nearby ExtraTerrestrial Systems), que também conta com participação do Brasil na sua construção, e plataformas espaciais como o JWST permitirão detectar traços moleculares como oxigênio, metano, dióxido de carbono e vapor d'água em exoplanetas potencialmente habitáveis.

Esses instrumentos devem ser acompanhados por técnicas de ponta em processamento de dados e inteligência artificial, que permitam extrair assinaturas sutis em meio ao ruído. Algoritmos de machine learning e redes neurais profundas vêm sendo empregados para reconhecer padrões em curvas de luz, espectros atmosféricos e sinais de rádio, aumentando a sensibilidade na detecção de sinais astrobiológicos.

Nesse contexto, é fundamental propor investimentos contínuos em estudos de atmosferas exoplanetárias, com ênfase em espectroscopia de transmissão, emissão e reflexão, e na análise de desequilíbrios químicos atmosféricos como possíveis indicadores de processos biológicos ativos. Modelos físicos de bioassinaturas em diferentes cenários planetários — mundos oceânicos, desertos, análogos à Terra primitiva — devem ser incorporados às bases de dados e estratégias de observação.

A participação do Brasil nesse cenário global de descobertas deve ser fortalecida, priorizando as parcerias já existentes e fomentando, por exemplo, a inserção do país em missões espaciais internacionais, além de novas colaborações com redes de pesquisa e a participação em grandes levantamentos astronômicos. Internacionalmente, a colaboração científica neste domínio é intensa e essencial. Destacam-se programas como os observatórios internacionais JWST, ALMA, VLT e TMT, o satélite TESS e PLATO (Planetary Transits and Oscillations of Stars), este último com participação do Brasil, e os futuros ELT e GMT, dos quais o Brasil poderia vir a ser parceiro.

No âmbito nacional, deve-se fortalecer iniciativas de estudo e monitoramento de asteroides próximos da Terra, como o projeto IMPACTON (Iniciativa de Mapeamento e Pesquisa de Asteroides nas Cercanias da Terra do Observatório Nacional), e redes de monitoramento de meteoros e bólidos, como o EXOSS Citizen Science Project e o Brazilian Meteor Observation Network (BRAMON), incentivando a sua expansão e a recuperação e estudo de meteoritos. Esses dados são valiosos para a compreensão da entrada de matéria extraterrestre na atmosfera terrestre, suas composições químicas e potenciais implicações astrobiológicas.

O estudo dos objetos transnetunianos e centauros também deve ser incentivado, fortalecendo os estudos sobre suas eventuais atmosferas, através de iniciativas como a Transneptunian Occultation Network (TON) e o projeto da Rede de Ocultações Sul-Americana (ROSA), nos quais o Brasil tem uma presença ativa.

I.6.4. Técnicas computacionais avançadas

O uso de High-Performance Computing (HPC) tem se tornado cada vez mais essencial na Astrofísica moderna, especialmente nas áreas de detecção e caracterização de exoplanetas. O grande volume e complexidade dos dados obtidos por missões espaciais como Kepler, TESS e, mais recentemente, o JWST, exigem capacidades computacionais avançadas para o pré-processamento eficiente de curvas de luz, remoção de ruído e identificação de trânsitos planetários com alta precisão. Assim como o tratamento das curvas de luz de missões futuras, como o PLATO com participação de pesquisadores brasileiros, necessitará de computação de alta performance para tratamento de grandes volumes de dados.

Além disso, nos modelos de reconstrução atmosférica, o HPC permite a execução de algoritmos estatísticos intensivos — como MCMC e *nested sampling* — que requerem milhares a milhões de simulações para explorar o espaço de parâmetros e estimar incertezas de forma robusta. Isso é particularmente crítico quando se busca inferir propriedades atmosféricas sutis a partir de espectros observacionais ruidosos ou com baixa resolução. O acesso à infraestrutura de HPC também facilita a aplicação de técnicas de aprendizado de máquina para classificação automática de curvas de luz e

detecção de assinaturas planetárias, contribuindo para acelerar a descoberta de novos exoplanetas e aprofundar nossa compreensão de suas atmosferas e condições físicas.

A discussão sobre a vida no Cosmos deve refletir a complexidade e abrangência do tema, englobando desde os primeiros passos da formação do Sistema Solar até a busca por inteligência extraterrestre. O investimento em infraestrutura de observação, instrumentação científica, cooperação internacional e formação interdisciplinar é essencial para que o Brasil possa se inserir de forma competitiva e relevante nesse esforço global, contribuindo não apenas com observações e análises, mas também com ideias originais e abordagens inovadoras. A vida no Universo é uma fronteira científica, filosófica e cultural — e é tempo de colocá-la no centro de nossas prioridades de pesquisa.

Diante desse panorama, a agenda científica sobre a vida no Cosmos converge para três grandes frentes interligadas de ação:

- *Caracterizar atmosferas de exoplanetas e buscar bioassinaturas* — Utilizar espectroscopia de transmissão, emissão e reflexão, aliada a modelos de reconstrução atmosférica, para detectar moléculas e sinais de desequilíbrio químico em planetas potencialmente habitáveis, visando identificar possíveis bioassinaturas.
- *Investigar corpos do Sistema Solar como pistas para a origem e persistência da vida* — Estudar Marte, Europa, Encélado, Titã e outros corpos com potencial astrobiológico, bem como meteoritos, cometas e objetos transnetunianos, para compreender a distribuição de compostos orgânicos, água e atividade geológica que possam sustentar ou preservar vida.
- *Compreender o impacto da atividade estelar e do clima espacial na habitabilidade* — Investigar como flares, ejeções de massa coronal e ventos estelares afetam atmosferas planetárias, com foco em processos de erosão atmosférica e estabilidade de ambientes em zonas habitáveis, especialmente em torno de estrelas anãs M.

A comunidade brasileira se posiciona para contribuir de forma decisiva às grandes questões sobre a vida no Universo, em total sinergia com os demais eixos deste documento — o Universo escuro, a física de extremos, formação de galáxias, arqueologia estelar e ciências planetárias. As oportunidades que se abrem, sejam elas em missões espaciais, grandes levantamentos ou infraestrutura computacional, reforçam a necessidade de ações transversais e coordenadas, apresentadas a seguir, como recomendações gerais.

Capítulo II

Infraestrutura observacional e instrumentação astronômica

A Astronomia Brasileira tem apresentado um crescimento contínuo em escala e qualidade desde a década de 1960. Esse avanço decorre de esforços coordenados de diversos grupos de pesquisa, que culminaram em conquistas importantes, tais como:

1. acesso a telescópios internacionais por meio de mérito científico individual;
2. implantação administrativa e tecnológica do Observatório do Pico dos Dias (OPD) e a criação do Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA), que atualmente opera telescópios de pequeno e médio porte no OPD; e gerencia a participação brasileira em consórcios internacionais;
3. participação em consórcios estratégicos, como Telescópio SOAR (4 m) e Observatório Gemini (dois telescópios de 8 m).
4. participação em consórcios/missões espaciais, como CoRoT (da agência espacial francesa – CNES) e PLATO (da ESA), ambos com acesso livre aos dados.

O panorama global da Astronomia contemporânea é predominantemente observacional, complementado por modelagem teórica e simulações numéricas em grande escala. Nesse contexto, o foco nacional deslocou-se progressivamente da criação dos observatórios para o desenvolvimento de instrumentação científica avançada, tanto para plataformas próprias (pequeno e médio porte, como o SOAR) quanto para instalações internacionais de grande porte (≥ 8 m), nas quais o país participa. No campo das missões espaciais, fizemos parte do consórcio internacional do satélite CoRoT(2003–2014), liderado pela agência espacial francesa (CNES) e participamos atualmente do desenvolvimento do satélite PLATO (PLANetary Transits and Oscillations of stars 2010–2034), colaboração internacional organizado pela ESA.

Com o intuito de mapear essas atividades, a subcomissão de infraestrutura observacional e instrumentação astronômica realizou uma pesquisa de projetos em desenvolvimento no país junto à comunidade de pesquisadores. As respostas submetidas apresentam grande diversidade, o que motivou sua classificação segundo os seguintes eixos:

- *escopo do projeto*: nacional ou internacional;
- *porte da instalação*: pequeno, médio ou grande;
- *estágio de desenvolvimento*: em operação, em fase de projeto e construção, ou previsto para médio e longo prazos;
- *faixa espectral*: domínios óptico, infravermelho próximo e ultravioleta (geralmente agrupados), radioAstronomia e altas energias — áreas em que atuam subgrupos com relativa independência.

Os projetos em desenvolvimento por nossa comunidade evidenciam uma comunidade nacional ampla, distribuída em mais de dez estados, com forte articulação entre universidades, institutos públicos e *hubs* tecnológicos como LNA, INPE, ON e CBPF. Os projetos demonstram crescente inserção internacional — com colaboração de instituições líderes como NASA, ESA, ESO, Fermilab, Max Planck, agências espaciais europeias, CNRS, Harvard e GMT — e mostram que o Brasil passou de participante a co-líder em várias frentes de instrumentação, com crescente capacidade de transferência de tecnologia e formação de recursos humanos. No campo das pesquisas espaciais em particular, houve intensas atividades em software e hardware de alta confiabilidade (por engenheiros da Escola Politécnica da USP e do Instituto Mauá de Tecnologia-IMT- SP). Entre os principais desafios, destacam-se a coordenação e continuidade de projetos complexos envolvendo múltiplas instituições, a dependência de financiamentos não governamentais e a necessidade de retenção de quadros técnicos altamente qualificados.

A consolidação do Brasil como polo de instrumentação astronômica requer políticas públicas que deem estabilidade, integração e protagonismo às instituições nacionais. Sugere-se a criação de um Sistema Nacional de Instrumentação Astronômica, com financiamento plurianual estável (via FNDCT/FINEP), garantindo continuidade dos projetos e compartilhamento estruturado de laboratórios estratégicos (seja nas UPs do MCTI seja nas universidades).

Também é fundamental instituir carreira técnica para engenheiros e instrumentistas, fomentar mecanismos de compra pública de inovação e apoio à criação de *spin-offs*, além de fortalecer a presença do país em consórcios internacionais como instrumento de diplomacia científica e de *soft-power*.

II.1. Infraestrutura e instrumentação para o desenvolvimento da ciência

O avanço da Astronomia está intimamente ligado à capacidade de observar o universo por meio de instrumentos cada vez mais precisos, sensíveis e especializados. Os equipamentos que voam em satélites têm exigências suplementares extremas, na medida em que estão expostas às radiações cósmicas e não podem ser reparados. Por isso, a infraestrutura observacional e o desenvolvimento de instrumentação astronômica constituem pilares essenciais não apenas para a produção de conhecimento científico de ponta, mas também para o fortalecimento estratégico da ciência, da tecnologia e da inovação no Brasil.

O acesso a dados observacionais inéditos — obtidos por telescópios, espectrógrafos, câmeras

avancadas, interferômetros, satélites e detectores inovadores — permite que pesquisadores brasileiros atuem na fronteira do conhecimento em áreas como cosmologia, física estelar, ondas gravitacionais, ciências planetárias, astropartículas e exoplanetas. A alta precisão das medidas a partir do espaço (livres da interferência atmosférica), a resolução temporal e a duração das observações espaciais revolucionaram a área, evitando a grave limitação que a cadência dia/noite impunha. Além disso, em várias áreas da astronomia é mandatório se fazer observações espaciais para as quais a atmosfera não é transparente (regiões do espectro ultravioleta distante, raios x, raios gama, e partes do infravermelho). Contudo, o impacto do desenvolvimento instrumental vai muito além da geração de novos dados científicos: trata-se de um vetor de inovação tecnológica. Engenharia de precisão, de software, óptica, detectores avançados, microeletrônica, criogenia, ciência de dados e inteligência artificial são áreas mobilizadas nos projetos de instrumentação, exigindo soluções customizadas e promovendo o domínio de tecnologias críticas no país.

Esse processo tem efeitos diretos na formação de recursos humanos altamente qualificados — engenheiros, técnicos e pesquisadores — e na capacitação de laboratórios nacionais, que passam a atuar como centros de excelência com capacidade de inovação e exportação de conhecimento. Além disso, o envolvimento da indústria nacional na fabricação de componentes, sistemas ópticos, eletrônicos e mecânicos cria oportunidades de transferência de tecnologia e estimula o surgimento de spin-offs e startups de base tecnológica, com impacto em setores tão diversos quanto saúde, agro, defesa e energia. Assim, a instrumentação astronômica serve como alavanca para o desenvolvimento econômico e a soberania tecnológica do país.

A contínua expansão e modernização da infraestrutura observacional — como telescópios no solo nacional, participação em grandes observatórios internacionais, missões espaciais e laboratórios de instrumentação — são essenciais para manter o protagonismo científico brasileiro no cenário global. Investir em instrumentação astronômica significa investir em inovação, educação, formação de pessoal, diplomacia científica e no fortalecimento da indústria nacional — consolidando a Astronomia como uma força motriz no desenvolvimento científico e tecnológico do Brasil.

II.2. Levantamento da situação atual

II.2.1. Projetos atuais

O levantamento da situação atual é baseado em formulários respondidos pela comunidade, e abrange projetos classificados por escopo (nacional/internacional), porte (pequeno, médio, grande), estágio de desenvolvimento e faixa espectral.

A) Nacional, pequeno porte, já em funcionamento, necessitando atualizações:

- Reforma do Radiotelescópio de Itapetinga
- Reforma da rede de telescópios ópticos do BRICS
- Manutenção e atualização do Projeto IMPACTON
- Finalização do radiointerferômetro de Cachoeira Paulista
- Modernização de instrumentos do Laboratório Nacional de Astrofísica
- Compra e instalação do novo detector CCD Skipper no espectrógrafo SIFS

B) Nacional, médio porte:

- Finalização do radiotelescópio BINGO

C) Nacional, infraestrutura tecnológica:

- Reforma e modernização da infraestrutura do Laboratório Nacional de Astrofísica
- Construção do Laboratório de óptica do IAG-USP
- Desenvolvimento de obturadores mecânicos (*shutters*) customizados
- Construção de sensores estelares para navegação no espaço e de nanossatélites

D) Internacional, com participação em instrumentação substantiva envolvendo engenheiros:

- Construção do espectrógrafo MOSAIC para o telescópio ELT
- Construção do espectrógrafo CUBES para o telescópio VLT
- Construção do radiotelescópio LLAMA
- Construção de equipamentos para o telescópio GMT (GMACS, Câmara ComCam, Câmara de Testes de Óptica Adaptativa)
- Construção da câmera JPCAM para o levantamento J-PAS

E) Internacional, com participação em instrumentação, software e verbas moderadas:

- Construção do sistema de óptica adaptativa SAMPLUS para o telescópio SOAR
- Construção do CCD Skipper
- Operação e manutenção do levantamento SPLUS
- Construção do telescópio PLANETS, destinado ao estudo de estrelas e busca por exoplanetas.
- Construção dos sistemas ADCS para os satélites CHEOPS, PicSat e CASSTOR

- Participação no consórcio internacional do satélite PLATO

F) Internacional, grande aporte financeiro necessário:

- Participação brasileira no Cherenkov Telescope Array
- Participação brasileira no Observatório de raios gama (SWGO)
- Participação brasileira no Giant Magellan Telescope
- Instalação de telescópio robótico de 1.5 m no Chile
- Construção do espectrógrafo ANDES para o ELT
- Participação nas missões EnVision (ESA) e VERITAS (NASA) para Vênus

G) Infraestrutura computacional, base de dados:

- Infraestrutura computacional de grande porte CD-JPAS (financiado com recursos FINEP no projeto ON-Multi)
- Construção do Laboratório Multiusuários LAMAG (aprovado no edital FINEP infra 2025)

H) Grande porte incluindo espacial - acima de 500 milhões:

- Participação brasileira na construção do telescópio espacial PLATO
- Participação brasileira na construção do Galileo Soar Space Telescope
- Participação brasileira na construção do South American Gravitational Wave Observatory (SAGO)

II.2.2. Análise dos projetos

Os projetos atualmente em desenvolvimento se distribuem entre projetos de infraestrutura observacional (telescópios, satélites, instalações, etc.), de instrumentação científica (espectrógrafos, fotômetros, etc.) e de infraestrutura de desenvolvimento (laboratórios, bancadas, etc.). Isso mostra um equilíbrio entre o desenvolvimento direto de instrumentos e a construção de estruturas físicas para suportá-los, refletindo maturidade na cadeia tecnológica da Astronomia nacional.

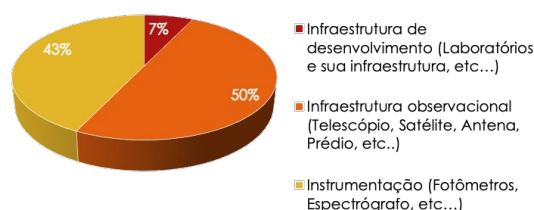


Figura 1 - Categorias de Projetos.

II.2.3. Áreas da Astronomia atendidas

A maior parte dos projetos em andamento concentra-se no domínio óptico e infravermelho próximo, consolidando-o como a principal área de atuação da comunidade astronômica brasileira. Em seguida aparecem iniciativas em radiofrequência e ultravioleta, enquanto a área de astropartículas soma 3 projetos. Áreas emergentes de fronteira também estão representadas, como raios gama, ondas gravitacionais e infravermelho médio/distante, além de raios X. Esse panorama confirma a predominância histórica da instrumentação óptica/infravermelha, mas revela também uma diversificação crescente, com inserção em campos estratégicos de ponta, como a detecção de ondas gravitacionais, a física de astropartículas e a astronomia espacial.

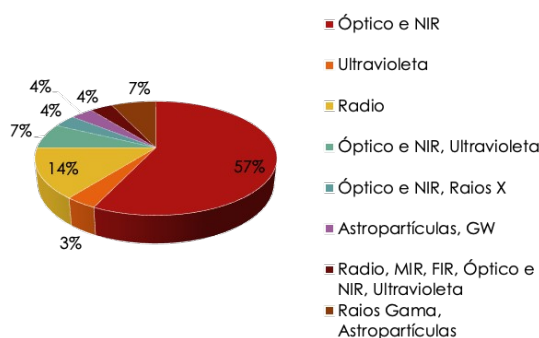


Figura 2 - Diferentes Áreas da Astronomia.

II.2.4. Colaborações

Praticamente todos os projetos envolvem algum tipo de colaboração, sendo que os que tem colaboração internacional geralmente também tem colaboração nacional, demonstrando integração da comunidade brasileira tanto internamente quanto com grandes colaborações globais.



Figura 3 - Colaborações.

Ao todo, cerca de 1060 pesquisadores brasileiros (entre doutores, técnicos e estudantes) estão envolvidos nessas colaborações, com uma média de 32,5 pesquisadores por projeto.

Os números indicam uma cadeia robusta de capacitação, com projetos de médio e grande porte envolvendo muitas instituições e profissionais, o que também favorece a formação de recursos humanos.

II.2.5. Amplitude e capilaridade nacional

A análise das respostas revela uma comunidade astronômica nacional ampla e capilarizada, que reúne as principais instituições brasileiras com tradição em Astronomia e instrumentação (IAG/USP, IF/USP, CBPF, LNA, INPE, ON, UFRGS, UFSC, UFRN, etc.). Essa diversidade se revela também na dispersão geográfica que cobre ao menos 10 estados, indicando que a instrumentação astronômica não está mais restrita ao eixo Rio de Janeiro–São Paulo–Minas Gerais. Projetos de grande porte chegam a mobilizar redes com até 20 instituições nacionais, mostrando alta capacidade de articulação.

II.2.6. Integração internacional robusta

No plano internacional, observa-se o estabelecimento de parcerias frequentes com instituições líderes mundiais, como Fermilab, NASA/GSFC, Max-Planck, ESO, CNRS, NOIRLab, GMTO, NRAO, Queen’s Belfast, ANU, Harvard, Universidade de Chicago, ESA, OBSPM, etc. Essas cooperações ocorrem em três formatos predominantes:

- Participação brasileira em grandes consórcios internacionais, como GMT, LSST, SWGO, CTA, GSST e PLATO.
- Projetos liderados por brasileiros com colaboração internacional de nicho, envolvendo transferência de *know-how*, estágios ou *hardware* específico.
- Projetos liderados ou co-liderados por instituição brasileira, como J-PAS, J-PLUS, S-PLUS, em que o país assume papel de igual para igual com parceiros internacionais.

II.2.7. Geração de capacidades estratégicas

Outro ponto estratégico é a formação de recursos humanos, incluindo treinamento de pessoal em engenharia, intercâmbios, e forte transferência de conhecimento para o ambiente nacional. Nesse contexto, o ON e IAG se destacam como centros de excelência na formação de recursos humanos altamente qualificados na área de Astronomia. Vários projetos estão associados com a criação de *spin-offs* industriais, transferência de tecnologia e uso dual em setores como ciência de dados, óptica, sensores, IoT, saúde e agro. Paralelamente, o LNA e o CBPF emergem como *hubs* tecnológicos, combinando laboratórios multiusuários com presença internacional.

II.2.8. Principais desafios citados

Apesar desse dinamismo, permanecem desafios estruturais significativos: a coordenação de múltiplas instituições com culturas e estruturas distintas (acadêmicas, governamentais e industriais); a sustentabilidade do financiamento nacional diante de custos elevados e da dependência de recursos externos; a necessidade de padronização de processos e infraestrutura entre os parceiros; e o risco de perda de talentos em projetos de longa duração, agravado pela instabilidade de pessoal e de bolsas de pesquisa.

II.2.9. Tendências observadas

Por fim, destacam-se algumas tendências relevantes. Há uma crescente aposta em big data e ciência computacional, com destaque para redes como BRICS Data, J-PAS e LSST. A instrumentação solar e a polarimetria vêm se consolidando como vocações nacionais, especialmente nos trabalhos do INPE e do LNA. Além disso, a participação brasileira em colaborações internacionais tornou-se mais estratégica, passando de um papel secundário para a liderança de projetos específicos.

Em síntese, a comunidade brasileira mostra-se altamente articulada, com forte inserção internacional e cada vez mais capaz de assumir liderança global. As redes formadas promovem não apenas ciência de fronteira, mas treinamento avançado, inovação tecnológica e impacto industrial. Todavia, desafios de coordenação interinstitucional, financiamento contínuo e manutenção de recursos humanos especializados ainda configuram gargalos críticos para garantir perenidade e protagonismo do país no cenário global.

II.2.10. Perspectivas para a próxima década

Na próxima década a Astronomia brasileira estará dispondo de novos instrumentos, em particular:

- Espectrógrafo STELES de alta resolução espectral no telescópio SOAR (a partir de 2026)
- Espectrógrafos ANDES e MOSAIC no Extremely Large Telescope (ELT a partir de 2029, e espectrógrafos a partir de 2032)
- Espectrógrafos GCLEF e GMACS no Giant Magellan Telescope (datas ainda incertas)
- Cherenkov Telescope Array (data incerta)
- Acesso a dados das missões espaciais PLATO, EnVision e VERITAS

II.3. Orçamento

Com base nos dados da tabela abaixo, que consolida as informações dos pesquisadores responsáveis sobre os orçamentos, verifica-se a expressiva inserção de projetos brasileiros em infraestrutura e instrumentação. O volume de financiamento envolvido é notável, com valores totais que frequentemente atingem centenas de milhões de reais. Contudo, os dados também revelam um desafio crucial: para a maioria dos projetos, o valor já aprovado é inferior ao necessário para a sua conclusão, destacando uma lacuna financeira que precisa ser sanada para garantir a materialização dessas importantes empreitadas científicas.

Nome do projeto	Valor total do projeto (R\$)	Valor aprovado até o momento (R\$)	Valor necessário para a conclusão do projeto (R\$)	Financiamento Nacional (R\$)
ASTRI-Mini Array & CTA-SSTs	975.000.000,00	673.500.000,00	301.500.000,00	16.437.000,00
Southern Wide-Field Gamma-ray Observatory (SWG0)	400.000.000,00	300.000.000,00	370.000.000,00	300.000.000,00
Renovação e Operação do Rádio Observatório Pierre Kaufmann	600.000,00	100.000,00	500.000,00	
MOSAIC	6.000.000,00	1.500.000,00	4.500.000,00	6.000.000,00
IMPACTON	1.000.000,00	1.000.000,00	0,00	
Brazilian Decimetric Array (BDA)	20.000.000,00	11.000.000,00	9.000.000,00	11.000.000,00
South American Gravitational wave Observatory - SAGO	100.000.000,00	0,00	100.000.000,00	100.000.000,00
Telescópio BINGO	55.000.000,00	30.000.000,00	25.000.000,00	55.000.000,00
LLAMA	142.500.000,00	125.000.000,00	17.500.000,00	80.000.000,00
Ampliação e modernização do Observatório do Pico dos Dias	42.000.000,00	26.377.427,00	15.000.000,00	26.377.427,00
SIFS/Skipper	600.000,00	0,00	600.000,00	0,00
MOSAIC for the Extremely Large Telescope	10.000.000,00	1.500.000,00	7.500.000,00	10.000.000,00
Telescópio Gigante Magellan.	295.000.000,00	295.000.000,00	275.000.000,00	295.000.000,00
Cassegrain U-Band Efficient Spectrograph	25.000.000,00	22.000.000,00	30.000.000,00	400.000,00
Galileo Solar Space Telescope (GSST/SOLAR50)	500.000.000,00	50.000.000,00	500.000.000,00	
Atualização de Instrumentação astronômica avançada.	27.623.412,08	13.576.133,89	14.047.278,19	13.576.133,89
Participação brasileira no desenvolvimento do GMACS	11.120.000,00	61.400.000,00	49.800.000,00	19.800.000,00
Participação brasileira na Etapa Preliminar da ComCam	840.000,00	840.000,00	0,00	190.000,00
Participação brasileira no desenvolvimento do AOTC	983.000,00	675.000,00	308.000,00	405.000,00
Desenvolvimento de Shutters Mecânicos Customizados	1.622.000,00	668.000,00	100.200,00	1.622.000,00
SAMplus (SOAR Adaptive Module Upgrade)	5.000.000,00	5.000.000,00	0,00	5.000.000,00
BLASST - Brazilian Lab of Astronomical Survey Studies	27.092.000,00	576.000,00	26.516.000,00	27.092.000,00
Participação brasileira no desenvolvimento do MANIFEST	5.642.000,00	732.000,00	4.910.000,00	144.000,00
T80-Sul - S-PLUS	33.000.000,00	30.000.000,00	30.000.000,00	30.000.000,00
CCDs skipper para a astronomia	26.000.000,00	2.000.000,00	24.000.000,00	2.000.000,00

Nome do projeto	Valor total do projeto (R\$)	Valor aprovado até o momento (R\$)	Valor necessário para a conclusão do projeto (R\$)	Financiamento Nacional (R\$)
T150	23.100.000,00	4.000.000,00	19.900.000,00	5.500.000,00
LNA no Parque Científico e Tecnológico de Itajubá	39.027.902,26	27.629.072,86	9.928.008,93	39.027.902,96
ECHARPE	2.000.000,00	1.900.000,00	10.000,00	1.900.000,00
BRICS Intelligent Telescope and Data Network	20.000.000,00	300.000,00	20.000.000,00	300.000,00
NIRPS	60.000.000,00	60.000.000,00	0,00	6.000.000,00
ANDES	60.000.000,00	60.000.000,00	0,00	6.000.000,00
Planets	3.500.000,00	0	3.500.000,00	1.120.000,00
JPAS	27.000.000,00	21.000.000	6.000.000,00	7.000.000,00
PLATO	3.000.000.000,00	7.000.000,00	1.000.000,00	7.000.000,00
VERITAS e EnVision	3.000.000.000,00	0	7.000.000,00	7.000.000,00
TOTAL	8.946.250.314,34	1.834.273.633,75	1.873.119.487,12	1.080.891.463,85

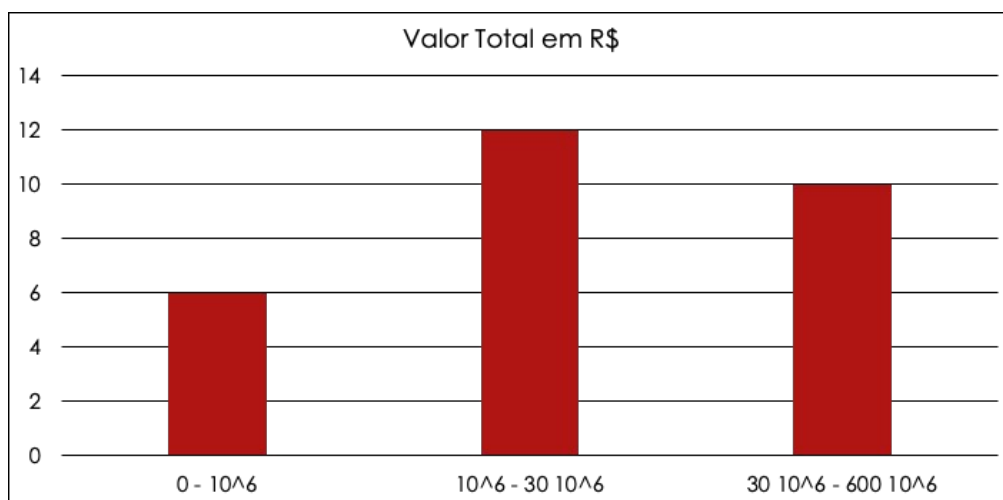


Figura 4 - Valor Total dos Projetos dividido em três intervalos.

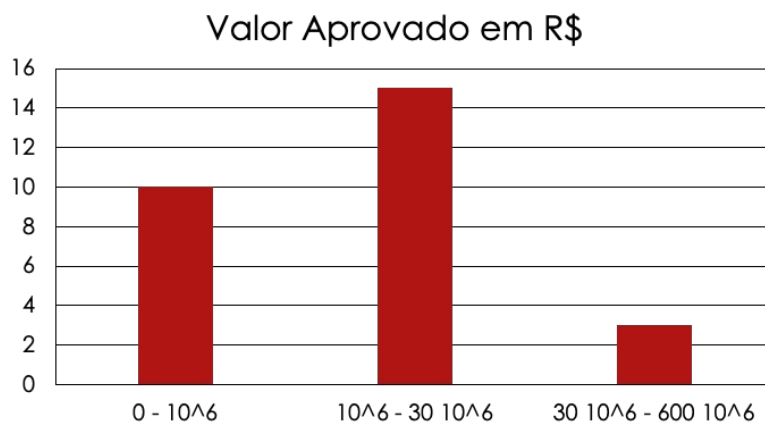


Figura 5 - Valor Aprovado dos Projetos dividido em três intervalos.

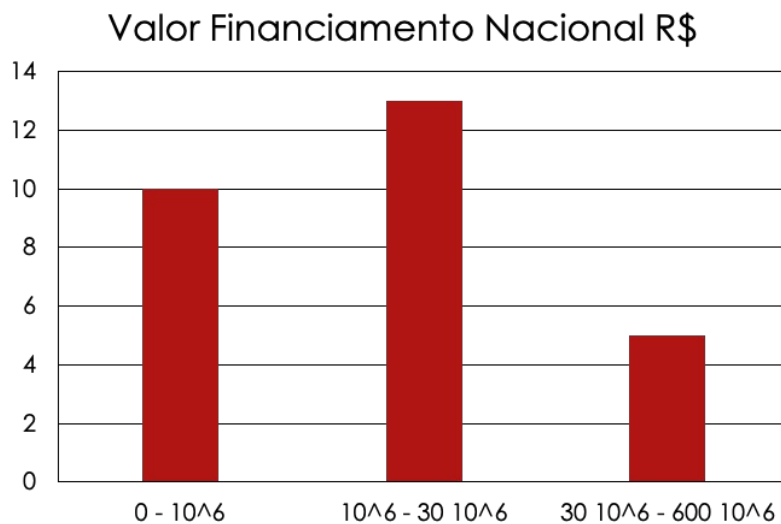


Figura 6 - Valor do Financiamento Nacional dividido em três intervalos.

Os projetos variam enormemente em ordem de grandeza:

- Pequenos (até ~R\$ 1 milhão) → atualizações de infraestrutura, aquisição de materiais e serviços pontuais.
- Médios (R\$ 10–100 milhões) → construção de instrumentos específicos, laboratórios e sistemas de apoio. (ANDES), participação nas missões espaciais da ESA
- Grandes (acima de R\$ 500 milhões) → participação em consórcios internacionais (GMT, CTAO, SWGO, Rubin/LSST).

Essa amplitude mostra que o ecossistema combina desde projetos incrementais locais até megaprojetos internacionais.

II.3.1. Distribuição de recursos totais

- Total declarado: cerca de R\$ 3.7 bilhões (descontados a participação de outros países)
- Captado até agora: cerca de R\$ 1,83 bilhão (cerca de 50%).
- Faltante estimado: cerca de R\$ 1,87 bilhão.

Ou seja, metade dos recursos ainda precisa ser viabilizada para a execução plena dos projetos, mostrando grande dependência de novos aportes.

II.3.2. Principais fontes de financiamento

- Agências nacionais: FAPESP, FINEP, MCTI/FNDCT, CNPq.

- Consórcios internacionais: contribuições em dólares ou euros (EUA, Europa, Argentina, Chile).
- Recursos já empenhados concentram-se na parte crítica da infraestrutura (ex.: fibras ópticas para o LSST, prédios laboratoriais do LNA).

II.3.3. Custos recorrentes e de manutenção

Vários projetos, como os telescópios SOAR ou SWGO, destacam a necessidade de uma planificação que assegure a manutenção futura no período de 2027 a 2037, sobretudo porque, em alguns casos, os custos operacionais de longo prazo são comparáveis aos dispêndios iniciais de implantação, exigindo, portanto, uma visão estratégica e sustentável para além do curto prazo.

II.3.4. Desafios observados

Vários desafios logísticos e financeiros impactam a execução de projetos astronômicos no país. A significativa variação cambial, por exemplo, encarece de forma imprevisível a aquisição de insumos e equipamentos importados, elevando os custos totais de maneira inesperada. Esse cenário é agravado pelo comum subdimensionamento inicial dos orçamentos, que frequentemente precisam ser revistos e ampliados para valores muito superiores aos originalmente planejados.

Além dos obstáculos internos, a dependência de contrapartida internacional representa um risco considerável, pois eventuais atrasos no repasse de recursos por parte de outros países parceiros podem simplesmente travar o andamento de um projeto. Por fim, a fragmentação do financiamento nacional, com aportes provenientes de diferentes agências que nem sempre atuam de forma articulada, adiciona uma camada adicional de complexidade e incerteza ao gerenciamento dos recursos.

II.3.5. Síntese estratégica

O Brasil já assumiu compromissos expressivos em megaprojetos internacionais de grande escala, como o GMT, o CTAO, o SWGO e o LSST. No entanto, é fundamental que o país garanta a continuidade dos aportes federais para que o acesso a essas infraestruturas de ponta não fique restrito a pesquisadores de apenas alguns estados, assegurando uma distribuição nacional dos benefícios científicos.

Paralelamente, é crucial não negligenciar os projetos de porte médio e pequeno. Embora menos visíveis, essas iniciativas são fundamentais para a formação contínua de pessoal especializado e

para o estímulo à indústria nacional de tecnologia, exigindo políticas públicas que ofereçam linhas de financiamento ágeis e estáveis.

Por fim, a elevada proporção de recursos ainda não captados, que corresponde a aproximadamente 63% do total necessário, revela uma fragilidade financeira significativa. Essa lacuna orçamentária representa um risco considerável, podendo comprometer seriamente os prazos estabelecidos em colaborações internacionais e, conseqüentemente, a credibilidade do país como parceiro estratégico no cenário científico global.

II.4. Participação da indústria nacional

A participação da indústria brasileira em projetos de infraestrutura e instrumentação astronômica é um ponto-chave, tanto para viabilizar os instrumentos quanto para gerar impactos econômicos e tecnológicos.

Infelizmente a participação da indústria nacional nos projetos, embora esteja melhorando, ainda é incipiente concentrando-se em poucos fornecedores e em demandas pontuais, muitas vezes restritas a serviços mecânicos ou de integração. Esta deficiência se dá por vários fatores, mas a maior parte dos componentes críticos continua sendo adquirida no exterior principalmente pela falta de expertise local em áreas como óptica de precisão, detectores e criogenia, e também pela baixa previsibilidade de demanda e baixo volume e grande especificidade das necessidades, que não estimula a criação de um mercado estável.

Essa limitação, entretanto, pode ser vista como oportunidade estratégica: com políticas públicas específicas e mecanismos de aproximação entre universidades, observatórios e empresas, a instrumentação astronômica pode se tornar um vetor de inovação tecnológica e de geração de competências exportáveis, contribuindo para o fortalecimento da indústria nacional em setores de alta tecnologia.

A indústria brasileira deve ser envolvida progressivamente, começando com partes mecânicas de alta precisão, eletrônica e software embarcado — áreas em que já há alguma capacidade instalada. Políticas públicas podem estimular parcerias de co desenvolvimento (empresa + instituto de pesquisa) com foco em projetos de médio porte, que serviriam de "escola" tecnológica. A experiência internacional mostra que a instrumentação científica pode funcionar como motor de industrialização de nicho, criando competências exportáveis.

A experiência da EMBRAPI neste sentido é muito promissora, mas dada a escala dos projetos e empresas envolvidas os critérios eletivos para a participação nos projetos é bastante restritivo.

Seria importante que uma iniciativa desta forma fosse pensada para empresas e institutos de pequeno e médio porte mas com alto potencial tecnológico.

A Astronomia nacional representa uma oportunidade estratégica para a indústria, que pode atuar no fornecimento de componentes e serviços de alto valor agregado. Isso inclui desde estruturas mecânicas de precisão, óptica fina e eletrônica embarcada até o desenvolvimento de software especializado para automação e análise de dados. Essa demanda por insumos de alta tecnologia cria um mercado qualificado que eleva o padrão técnico e a capacidade produtiva do setor industrial no país.

Além do fornecimento, há um campo fértil para o desenvolvimento tecnológico conjunto por meio de parcerias em Pesquisa & Desenvolvimento entre empresas, universidades e observatórios. Essa colaboração resulta em um profundo aprendizado tecnológico que pode ser transferido e reaplicado em outros setores estratégicos, como satélites, defesa, telecomunicações e medicina diagnóstica, gerando propriedade intelectual valiosa no processo.

Por fim, o impacto socioeconômico se estende para além dos laboratórios. Grandes projetos de instrumentação frequentemente catalisam a criação de startups de alta tecnologia e fortalecem toda a cadeia produtiva. A participação empresarial não só gera empregos qualificados e descentraliza a economia, como também gera spin-offs importantes: empresas que inicialmente fornecem detectores ou sistemas de imageamento para observatórios podem, posteriormente, adaptar essa tecnologia para mercados civis, como sensores médicos, câmeras de alta precisão ou equipamentos de segurança.

II.4.1. Participação da indústria nos projetos descritos neste estudo

Amplitude: há projetos com envolvimento de apenas 1–2 empresas (ex.: EfE Tecnologia, Metalcard, Omega 7) até casos com mais de 25 empresas brasileiras associadas (como no GMT Fapesp).

Áreas de atuação: mecânica de precisão, óptica, eletrônica, software, criogenia, engenharia de sistemas e até construção civil.

Exemplos relevantes:

- Metalcard (São José dos Campos), forte em componentes mecânicos e optomecânicos.
- Omega 7 (São José dos Campos), em desenvolvimento de software.
- Oliveira Instrumentos Ópticos (OIO), spin-off do LNA em fibras ópticas.
- Instituto Prof. João Steiner, que embora não seja uma empresa, já funciona como elo com a indústria e parceiros internacionais.

Patentes e *spin-offs*: aparecem iniciativas relevantes, como patentes do LNA e startups derivadas (OIO, empresa de software do S-PLUS). O Brasil já tem sementes de participação industrial relevante, mas precisa de políticas públicas consistentes e de médio prazo para transformar casos pontuais em um ecossistema sólido de inovação.

II.4.2. Participação da Indústria Internacional

A participação da indústria internacional nos projetos de Astronomia é significativa, frequentemente superando a nacional tanto em volume quanto no fornecimento de componentes para áreas críticas. Empresas e instituições consolidadas globais, como as francesas First-Light e ALPAO, a americana National Instruments, a alemã Amus e a LSST Discovery Alliance, são provedoras essenciais de tecnologias de ponta, incluindo óptica de precisão, sistemas criogênicos, atuadores piezoelétricos e detectores especializados.

Essa dependência do exterior torna-se particularmente marcante nos projetos de grande porte, como o Telescópio Gigante Magellan (GMT), o T150 e o Large Synoptic Survey Telescope (LSST). Para estes megaprojetos, o acesso a essas tecnologias-chave e de alta complexidade, muitas vezes indisponíveis no mercado local, é crucial, destacando um desafio estratégico para a autonomia tecnológica do setor no país.

II.4.3. Tendências e desafios

O cenário da participação da indústria nacional na Astronomia mostra um crescimento gradual, com empresas evoluindo de fornecedoras de serviços básicos para desenvolvedoras de componentes mais sofisticados. No entanto, essa capacitação ainda é incipiente em áreas críticas e de alto valor agregado, como a fabricação de detectores, óptica de alta precisão e sistemas de criogenia, setores nos quais o Brasil ainda recorre quase que exclusivamente a fornecedores internacionais.

Apesar dessa dependência, observa-se um progresso institucional relevante com o surgimento de *spin-offs* acadêmicas, como a OIO, e institutos especializados, como o Steiner, que representam o embrião de um ecossistema de inovação. Contudo, este ecossistema enfrenta o risco de fragmentação, pois muitas empresas participam de forma pontual em projetos específicos, sem garantir continuidade, o que dificulta a consolidação de uma expertise sustentável e a curva de aprendizado contínuo.

De modo geral, a indústria brasileira já atua de forma mais significativa do que no passado, embora de modo desigual e ainda dependente de iniciativas isoladas ou do impulso de grandes proje-

tos âncora, como o Telescópio Gigante Magellan (GMT). Existe um potencial estratégico claro em fortalecer fornecedores locais especializados em óptica, mecânica de precisão e software embarcado. Fomentar essa base é crucial para estimular a criação de um cluster nacional de instrumentação astronômica, capacitando-o não apenas a atender a demanda interna, mas também a competir e colaborar de forma mais ativa e constante em futuros projetos internacionais de grande escala.

II.5. Critérios de importância dos projetos

Os resultados da pesquisa que realizamos entre os pesquisadores mostraram uma grande diversidade em termos de orçamentos dos projetos, projetos de infraestrutura ou de pura instrumentação, projetos com integração em consórcios internacionais ou puramente nacionais. Essa grande diversidade, em si, revela a boa saúde da comunidade astronômica nacional e levanta uma problemática, nada nova em si: contemplar um máximo de projetos com um orçamento limitado ou contemplar um número limitado de projetos mas usando um orçamento consequente. Essa pergunta depende de maneira evidente do orçamento disponível, mas também e de maneira essencial do estado final desejado pela comunidade e a União.

Uma sistematização é essencial tanto para avaliar prioridades quanto para defender apoio institucional e financiamento. Neste sentido tentamos apresentar uma série de critérios que podem ajudar nessa tarefa.

II.5.1. Critérios para classificação de projetos de instrumentação astronômica

A) Dimensão Científica

Os critérios para avaliação de projetos de instrumentação astronômica devem refletir, com peso preponderante, a finalidade essencial destes empreendimentos: a produção de ciência de excelência. Para isso, é fundamental que a dimensão científica tenha um peso alto, na faixa de 30 a 40% do total da avaliação de mérito.

Dentro desta dimensão, devem ser considerados fatores cruciais. Em primeiro lugar, o avanço científico potencial, que avalia em que grau o novo instrumento será capaz de gerar dados inéditos ou complementares, abrindo novas frentes de investigação. Este critério está intrinsecamente ligado ao alinhamento com as grandes questões da área (Capítulo I deste plano), verificando se o projeto aborda temas centrais e prioritários da Astrofísica e Cosmologia atuais.

Além do impacto puramente científico, é vital medir o potencial de integração internacional do projeto, ou seja, sua capacidade de inserir pesquisadores brasileiros em colaborações e consórcios globais de ponta. Por fim, para maximizar o retorno do investimento nacional, o projeto deve abranger a maior parte da comunidade possível no país, garantindo que os dados e as oportunidades por ele gerados sejam aproveitados por um número amplo de grupos de pesquisa, evitando a concentração em nichos restritos.

B) Formação e Capacitação

O critério de formação e capacitação deve receber um peso médio (15–20% do total) na avaliação de mérito dos projetos, uma vez que é fundamental para garantir a sustentabilidade de longo prazo da Astronomia e da ciência nacional. Este eixo avalia a contribuição do projeto para o desenvolvimento de capital intelectual e técnico, indo além dos resultados científicos imediatos.

Dentro desta categoria, dois aspectos são primordiais. O primeiro é o treinamento de recursos humanos, que deve quantificar e qualificar a participação de estudantes de graduação e pós-graduação, bem como de bolsistas de pós-doutorado, assegurando que o projeto funcione como uma escola prática para a próxima geração de cientistas. O segundo aspecto é a capacitação técnica, que mede a formação de profissionais especializados — como engenheiros, técnicos de laboratório e desenvolvedores de software — no processo de construção e operação da instrumentação. Esta capacitação técnica gera um legado de expertise que pode ser aplicado em outros setores de alta tecnologia, multiplicando o impacto do investimento.

C) Desenvolvimento de Tecnologia e Inovação

O eixo desenvolvimento tecnológico e inovação deve receber um peso médio-alto (20–25% do total) na avaliação, por sua função estratégica em conectar a ciência de fronteira à inovação e ao desenvolvimento nacional. Este critério avalia a capacidade do projeto de gerar não apenas conhecimento, mas também tecnologia e aplicações tangíveis.

Dentro desta dimensão, destaca-se o desenvolvimento de novas tecnologias em áreas como óptica avançada, detectores, eletrônica de precisão e software especializado. Esse desenvolvimento deve ser acompanhado de um claro potencial de transferência tecnológica, analisando como as soluções técnicas criadas podem ser adaptadas e aplicadas em outros setores estratégicos, como saúde, energia, defesa e tecnologia da informação. Por fim, é crucial mensurar a capacidade do projeto de gerar propriedade intelectual e patentes, criando as condições para o surgimento de *spin-offs* e startups de base tecnológica que traduzam o conhecimento científico em benefício econômico e social para o país.

D) Dimensão Socioeconômica

O eixo da dimensão socioeconômica deve receber um peso médio (10–15% do total) na avaliação, por seu papel em assegurar que os investimentos em Astronomia gerem benefícios tangíveis para a sociedade e a economia nacionais. Este critério busca mensurar o retorno do projeto para além do ambiente acadêmico.

Para isso, são considerados três fatores principais. O primeiro é o impacto na indústria nacional, avaliando o nível e a sofisticação do envolvimento de empresas locais nas etapas de fabricação, testes e fornecimento de componentes. O segundo é o potencial de geração de startups ou produtos derivados (*spin-offs*) que comercializem tecnologias originadas do projeto. Por fim, a integração com políticas de desenvolvimento regional é crucial, premiando iniciativas que instalem laboratórios ou infraestruturas em estados diferentes, promovendo a descentralização da capacitação tecnológica e a criação de polos de inovação em diversas regiões do país.

E) Dimensão Estratégica e de Soberania Científica

O eixo da dimensão estratégica e de soberania científica deve ter um peso variável (10–15% do total), sendo um fator decisivo para o planejamento de longo prazo do país. Este critério avalia como um projeto fortalece a posição nacional no cenário global e assegura capacidades tecnológicas essenciais.

São considerados três pilares fundamentais. O primeiro é a autonomia tecnológica, que mede a capacidade do projeto de reduzir a dependência externa em áreas críticas, como óptica fina, detectores e sistemas criogênicos. O segundo é o posicionamento internacional do Brasil, analisando seu potencial para aumentar o protagonismo e a influência do país em colaborações e fóruns científicos globais. Por fim, a sustentabilidade da infraestrutura nacional é crucial, priorizando instrumentos que modernizem e fortaleçam a operação de observatórios e laboratórios locais, garantindo que a comunidade astronômica brasileira tenha acesso contínuo a ferramentas de pesquisa competitivas.

F) Dimensão de Divulgação e Extensão Científica

O eixo divulgação e extensão científica deve receber um peso sugerido de 5 a 10% do total na avaliação, podendo ser maior em chamadas que especificamente valorizem a dimensão social do investimento. Este critério busca garantir que o conhecimento gerado transcenda os limites da academia e cumpra seu papel social de inspirar e educar a sociedade.

Dentro desta dimensão, são avaliados vários aspectos inter-relacionados. O alcance social do projeto, medido pelo seu potencial de impactar positivamente milhares de estudantes e o público em geral, promovendo o interesse pelas carreiras em STEM (ciência, tecnologia, engenharia e matemática). Paralelamente, o projeto deve valorizar a ciência nacional, atuando como uma vitrine que mostra

o protagonismo e a competência brasileira em empreendimentos científicos internacionais de grande porte.

A efetividade dessa divulgação está diretamente ligada à produção de material de divulgação acessível e de qualidade, como vídeos, exposições, documentários e websites interativos. Finalmente, é crucial a integração com escolas e museus de ciência por meio de programas estruturados de visitas, desenvolvimento de kits educacionais e sessões de observação pública, que transformam a ciência em uma experiência tangível e inspiradora para as novas gerações.

II.6. Conclusões e recomendações

O desenvolvimento de infraestrutura observacional e instrumentação astronômica posiciona o Brasil como ator relevante no cenário internacional, permitindo que cientistas nacionais atuem na fronteira do conhecimento e contribuam para descobertas em áreas estratégicas da Astrofísica moderna. A participação qualificada do país em grandes consórcios globais, aliada à capacidade crescente de concepção, fabricação e operação de instrumentos científicos de alta complexidade, fortalece a soberania nacional em ciência e tecnologia. Esses esforços resultam não apenas em novos dados científicos, mas também na consolidação de uma massa crítica de pesquisadores, engenheiros e técnicos altamente qualificados.

Além dos impactos acadêmicos, a instrumentação astronômica atua como vetor de inovação e de dinamização da economia nacional, promovendo transferência de tecnologias de alto valor, participação da indústria em cadeias produtivas especializadas e o surgimento de spin-offs e startups de base tecnológica. Nesse sentido, investir nesse setor significa fomentar um ecossistema virtuoso de ciência, tecnologia e inovação, essencial para o desenvolvimento sustentável e para o protagonismo do Brasil no século XXI.

II.6.1. Recomendações

A) Consolidar infraestrutura nacional como ativo crítico

Os projetos mostram que o Brasil já possui *ilhas de excelência tecnológica* (ex.: LNA, CBPF, INPE, IAG/USP, EP/USP, IMT), porém ainda fragmentadas. Uma política pública eficaz deve:

- Criar um Sistema Nacional de Instrumentação Astronômica, com certificação, governança, metas e compartilhamento estruturado de laboratórios.

- Transformar essas instituições em Infraestruturas Estratégicas de Estado — com previsão de recursos plurianuais garantidos para instrumentação (evitando descontinuidade).

B) Estabelecer programas de fomento contínuo e previsível

Os projetos são de maturação longa (5–15 anos). Incentivos que dependam de editais anuais e pontuais *inviabilizam continuidade*. Sugere-se:

- Linhas específicas na FINEP e FNDCT para desenvolvimento tecnológico de médio e longo prazo em Astronomia, com tranches programadas.
- Revisão dos mecanismos de compras públicas para permitir contratação ágil de tecnologia sensível e customizada, em cooperação com empresas nacionais.

C) Planejar carreira e retenção de recursos humanos especializados

Existe risco concreto de *fuga de cérebros*, especialmente de engenheiros com formação em instrumentação. Para enfrentá-lo:

- Criar bolsas de engenharia de instrumentação vinculadas a projetos estratégicos.
- Incorporar cargos permanentes (não apenas acadêmicos) de engenheiro/instrumentista nos quadros de ICTs como LNA, INPE, CBPF.

D) Valorizar a liderança brasileira em consórcios internacionais

O Brasil assumiu protagonismo técnico em vários consórcios globais (ex.: CTA, SWGO, GMT, LSST, J-PAS). A estratégia pública deve:

- Priorizar apoio institucional e diplomático a esses consórcios como parte da política externa de ciência.
- Criar um programa oficial de “soft power científico”, fortalecendo o papel dos pesquisadores que ocupam posições de liderança internacional.

E) Estimular *spin-offs* tecnológicos e cadeia produtiva nacional

Para ampliar a participação da indústria nacional em projetos de instrumentação astronômica, é essencial adotar mecanismos que estimulem a aproximação entre empresas, universidades e observatórios. Programas de compras públicas de inovação e editais de co-desenvolvimento podem criar um ambiente de aprendizado tecnológico, permitindo que fornecedores locais assumam progressiva-

mente funções de maior complexidade — desde a produção de estruturas e sistemas eletrônicos até a fabricação de componentes ópticos e criogênicos. Além disso, a criação de linhas de crédito específicas, incentivos fiscais e apoio a clusters regionais de inovação ligados aos principais polos de Astronomia do país podem fortalecer a capacidade industrial em setores estratégicos. Dessa forma, a instrumentação astronômica deixaria de ser apenas uma atividade científica e de engenharia de fronteira para se consolidar como um motor de inovação e competitividade para a economia brasileira.

Projetos geram aplicações em áreas como saúde, defesa, IA e agro, mas falta escala e política industrial para dar continuidade. Assim é importante:

- Dedicar fundos específicos de capital semente para startups originadas em instrumentação astronômica e software com suporte do BNDES/FINEP.
- Estimular a compra pública de inovação (PPI) para tecnologias desenvolvidas no ecossistema astronômico.
- Diminuir os entraves burocráticos para a criação de *spin offs* nas ICTs e posteriormente viabilizar legalmente a contratação dessas nos projetos.

Capítulo III

Big Data

Este capítulo tem como proposta central oferecer uma análise abrangente sobre os desafios e oportunidades relacionados ao uso intensivo de dados na Astronomia brasileira, tendo em vista o papel crescente do Big Data como eixo estruturante da pesquisa científica contemporânea. Assim a Astronomia brasileira, historicamente comprometida com projetos de relevância internacional, encontra-se diante de um novo ciclo marcado por demandas computacionais complexas, exigências de formação interdisciplinar e necessidade de infraestrutura de ponta. Nesse cenário, é fundamental fortalecer políticas públicas que reconheçam o valor estratégico da Astronomia como vetor de inovação, formação científica e inserção global do conhecimento produzido no país.

Trata-se de um contexto onde a integração entre Astronomia de ponta, Big Data, ciência de dados e inteligência artificial (IA) é hoje uma realidade irreversível. Projetos astronômicos modernos produzem volumes colossais de dados, cujo armazenamento, acesso e análise requerem o uso intensivo de infraestruturas de armazenamento, algoritmos avançados, aprendizado de máquina e plataformas computacionais de alta performance. A ciência de dados aplicada à Astronomia permite a identificação automática de fenômenos cósmicos, classificação de objetos, detecção de padrões e antecipação de eventos, transformando radicalmente os métodos de investigação científica. Nesse novo paradigma, a IA e seus agentes correspondentes deixam de ser apenas uma ferramenta auxiliar e passam a ocupar um lugar central na produção do conhecimento astronômico contemporâneo.

Essa transformação, cujo grande protagonista é o Big Data, abrange desde o planejamento de observações até a análise automatizada de dados em grande escala, especialmente oriundos de levantamentos realizados por telescópios voltados para diferentes janelas do espectro eletromagnético. É estratégico que o Brasil preserve e amplie sua participação nas colaborações internacionais em que já possui algum protagonismo, ao mesmo tempo em que consolida novas parcerias relevantes para a comunidade astronômica brasileira. Além disso, é essencial investir no aprimoramento e utilização de equipamentos nacionais de pequeno e médio porte, alinhados às prioridades da comunidade astronômica, para ampliar a capacidade científica e tecnológica instalada no país. Tais investimentos, quando alinhados às prioridades científicas da comunidade astronômica brasileira, podem gerar avanços significativos em ciência de dados e engenharia aplicada, consolidando uma base nacional robusta para o enfrentamento dos desafios científicos e tecnológicos da Astronomia do século XXI.

III.1. Conceitos e tendências

Os grandes projetos de observação astronômica atuais, tomando como exemplos dois grandes levantamentos, como o *Vera C. Rubin Observatory-LSST* e o *Square Kilometre Array (SKA)*, foram projetados para gerar petabytes de dados por ano. Essa produção massiva de dados exige novas abordagens em armazenamento, processamento e análise de dados. Num contexto ainda mais amplo, o

termo Big Data em Astronomia refere-se às principais propriedades de uma quantidade massiva de dados gerados por telescópios e simulações, exigindo tecnologias avançadas para armazenar, processar e extrair informação científica (National Academy 2020; Australian Nacional Academy 2025; Mahabal et al. 2024). O *Big Data* (Rosa 2019, 2021; Alvo 2022), frequentemente descrito pelos "6 Vs" (volume, velocidade, variedade, valor, veracidade e virtuosismo), impõe desafios únicos para os usuários e sistemas de TI tradicionais, exigindo novas abordagens para gerenciá-los e tratá-los com o objetivo de produzir informação e conhecimento de forma eficaz. Este novo paradigma exige uma sólida capacitação nos três pilares fundamentais da TI: *Hardware*, *Software* e Recursos Humanos ("Peopleware"). Devido às suas principais propriedades, ilustradas na Figura 7, a gestão eficiente do Big Data também requer uma abordagem estruturada baseada no *Ciclo de Vida dos Dados* que abrange desde a aquisição até a sua preservação total ou parcial de acordo com protocolos de uso e manutenção do armazenamento.

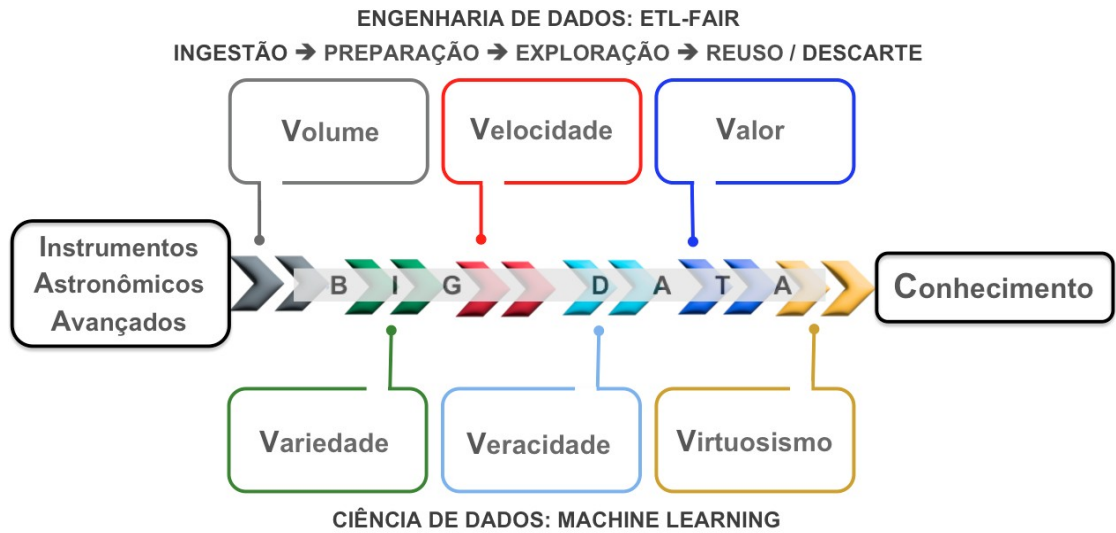


Figura 7 — Diagrama para a Astronomia na era do Big Data representando o fluxo conceitual da geração de conhecimento disruptivo a partir de instrumentos astronômicos avançados.

III.1.1. Principais propriedades do Big Data em Astronomia

Volume: Telescópios modernos podem gerar dezenas de petabytes de dados por ano, que podem ser armazenados em conjunto com tecnologias como *Data Cubes interativos* (ex. LSST Firefly), e *data lakes* que permitem consulta eficiente e cruzada de grandes volumes compostos por *arrays* multidimensionais.

Velocidade: Os fluxos de dados podem alcançar altas velocidades, exigindo recursos de processamento em tempo real. Em Astronomia, altas taxas de produção de dados (ex. 1 Terabyte por noite) devem ser tratadas com agilidade, pois muitas vezes demandam processamento rápido para identificar fenômenos transientes, supernovas, asteroides, ou ainda aqueles relacionados ao MMA (*multimessenger astronomy*).

Variedade: Em geral, Big Data abrange vários tipos de dados, incluindo formatos estruturados, não estruturados e semiestruturados. Em Astronomia, um mesmo instrumento pode gerar diferentes tipos e formatos de dados como imagens de alta resolução de campos profundos em altos redshifts, curvas de luz, espectros, e hipercubos dinâmicos derivados de simulações de alto desempenho.

Valor: Quando envolve extração ágil de informação relevante com qualidade a partir da mineração de dados (data mining) em Big Data.

Veracidade: A qualidade e a confiabilidade dos dados e metadados são cruciais para uma análise precisa, exigindo preparação, padronização e limpeza cuidadosas dos dados. Em Astronomia, por exemplo, o IVOA (International Virtual Observatory Alliance) padroniza serviços e APIs para interoperabilidade com qualidade no padrão FAIR (*Findable, Accessible, Interoperable and Reusable*).

Virtuosismo: Refere-se à excelência em infraestrutura tecnológica e humana. *Hardware*: data centers robustos, servidores HPC (*High Performance Computing*) e soluções de armazenamento em grande escala; *Software*: ferramentas otimizadas, pipelines paralelos e compatibilidade com infraestruturas modernas; *Peopleware*: equipes técnicas e científicas altamente capacitadas para operar, analisar e inovar com Big Data.

O fluxo conceitual, mostrado na Figura 7, conecta instrumentos astronômicos avançados (incluindo telescópios terrestres e espaciais, redes e *arrays* do século XXI) à geração de conhecimento científico disruptivo por meio da ciência e engenharia de dados. Nesse processo, os 6Vs do Big Data atuam como eixos fundamentais para caracterizar e enfrentar os desafios tecnológicos e científicos. Assim, o virtuosismo acrescentado ao conjunto tradicional de 5Vs reconhece a importância do domínio técnico especializado em *hardware*, *software* e *peopleware*, essenciais para o sucesso da ciência e engenharia de dados em Astronomia. Esses elementos estruturais do Big Data sustentam a capacidade de operar grandes sistemas de aquisição, transferência e processamento de dados em ambientes de alta complexidade, característica que evidencia a importância da capacitação de recursos para atuar no domínio do Big Data. Nesse domínio, o processamento dos dados astronômicos é estruturado em etapas alinhadas ao ciclo ETL (*Extract, Transform, Load*), abrangendo ingestão, preparação, exploração e, finalmente, reuso ou descarte controlado. Essas etapas estão integradas aos princípios FAIR, que asseguram a reutilização eficiente e segura dos dados pela comunidade científica, preservando seu valor científico ao longo do tempo. Em conjunto, ao longo desse fluxo, métodos avançados de ciência de dados e aprendizado de máquina (*machine learning*) desempenham papel central, permitindo identificar padrões complexos, classificar fenômenos e extrair informações de relevância científica a partir de grandes volumes de dados heterogêneos. O resultado é a conversão de dados brutos em conhecimento qualificado, capaz de impulsionar avanços disruptivos na compreensão do Universo.

Com base no conceito de Big Data em Astronomia, surgiram subáreas especializadas como a *astroinformática*, *astroestatística*, engenharia de dados astronômicos e ciência de dados baseada em IA e agentes, que fornecem as bases computacionais e analíticas para extrair conhecimento de bases heterogêneas e complexas de dados da Astronomia.

Um dos destaques recentes é o uso de *brokers* (sistemas que recebem fluxos completos de alertas, como os do LSST: cerca de 60 segundos após cada imagem, filtram, classificam, anotam e enviam aos usuários finais apenas os eventos relevantes), essenciais para filtrar e distribuir alertas de eventos astrofísicos em tempo real, exigindo infraestruturas robustas e agentes inteligentes adaptativos. Conceitos inovadores, como este, não apenas redefinem o papel do cientista na era digital, como também impõem novos desafios às instituições científicas em termos de formação, arquitetura de sistemas, interoperabilidade e acesso a plataformas internacionais de computação distribuída.

III.1.2. Tendências inerentes ao Big Bata em Astronomia

Essas transformações estão associadas a diversas tendências tecnológicas emergentes motivadas pelo Big Data em Astronomia, entre as quais se destacam, além dos *brokers*:

- Pipelines científicos automatizados, que integram aquisição, calibração e análise de dados, reduzindo o tempo entre observação e descoberta;
- VACs (*Value-Added Catalogs*), catálogos enriquecidos que complementam os dados brutos de grandes levantamentos com parâmetros físicos e refinados extraídos por equipes especializadas e agentes;
- Telescópios robóticos, operados remotamente e capazes de reagir a eventos em tempo real com base em agentes inteligentes;
- Computação distribuída e nuvem científica, que possibilitam o processamento colaborativo de grandes volumes de dados de forma descentralizada;
- Simulações numéricas massivas integradas a dados reais, que permitem validar modelos astrofísicos e cosmológicos com observações em tempo real;
- Análise multibanda e multimodal, com integração de dados oriundos de diferentes faixas do espectro (óptico, rádio, raios X etc.);
- Ciência aberta e reproduzível, com uso crescente de ambientes FAIR, notebooks interativos e partilha de dados e códigos.

Essas tendências não apenas redefinem o papel do cientista na era digital, como também impõem novos desafios às instituições científicas em termos de formação, arquitetura de sistemas, interoperabilidade e acesso a plataformas internacionais de computação distribuída.

A próxima década será marcada por um crescimento exponencial do volume de dados em Astronomia, impulsionado por uma nova geração de instrumentos científicos de alta resolução, capacidade e desempenho (Rosa 2019). Telescópios terrestres como o GMT (*Giant Magellan Telescope*), ELT (*Extremely Large Telescope*), TMT (*Thirty Meter Telescope*), além de projetos de levantamento de dados massivos como o LSST (*Legacy Survey of Space and Time*) e o SKA (*Square Kilometre Array*), estão projetados para gerar dezenas a centenas de terabytes na escala diária. Não menos importantes na geração de dados, embora em menor quantidade, são também as missões espaciais como o *James Webb Space Telescope* (JWST) e o Euclid em termos de volume bruto de dados. Por exemplo, o TMT poderá atingir até 90 TB por noite de observação, enquanto o JWST transmite atualmente cerca de 0,24 TB por dia. Ainda que os telescópios espaciais contribuam com dados de altíssima qualidade e resolução, são os observatórios terrestres, com levantamentos contínuos e de grande escala, que estão se consolidando como os principais motores do Big Data na Astronomia do século XXI.

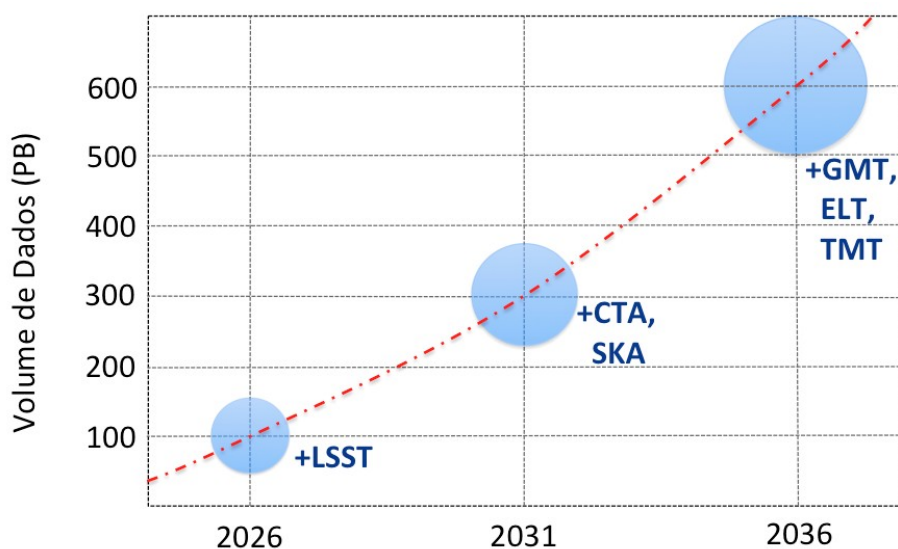


Figura 8 — Projeção do avanço da Astronomia do Big Data para o período de 2026 a 2036.

O crescimento da Astronomia do Big Data, mostrado na Figura 8, será impulsionado pelos grandes projetos astronômicos que estão entrando em operação, parcial ou plenamente, em 2026. Em 2036, o volume acumulado de dados científicos astronômicos ultrapassará a marca de 0.6 exabyte¹ (Rosa 2021). Essa magnitude consolida a Astronomia como uma das áreas científicas mais dependentes de infraestrutura de dados em grande escala, exigindo políticas nacionais robustas de armazenamento, processamento e acesso distribuído para ambos os casos: onde a participação brasileira já está consolidada ou venha a se consolidar.

¹ 1 EB = 1000 petabytes.

III.2. Panorama nacional do uso de Big Data

Considerando os critérios técnicos associados ao conceito de Big Data, adota-se aqui uma definição operacional para *Astronomia de Big Data* como sendo aquela cuja geração de dados brutos pode atingir a ordem de 1 PB por ano² (Alvo 2022). Esse limiar permite distinguir de forma objetiva os projetos que impõem demandas específicas de infraestrutura computacional para Big Data, gerenciamento automatizado de dados, e suporte especializado em ciência de dados (Ver Apêndice B). Além do volume, é importante ressaltar que os demais Vs também estão presentes nesse contexto, uma vez que esses dados são altamente variados (imagens, espectros, catálogos derivados), produzidos com grande rapidez (ex. alertas em tempo real), e requerem curadoria, integração, valor científico e excelência em TI para extração de conhecimento.

INFRAESTRUTURA OBSERVACIONAL	FAIXA ESPECTRAL	PB / ANO (OPERAÇÃO PLENA - Dados Brutos e Produtos)	PROJETOS & INICIATIVAS (Ano de Início)	INSTITUIÇÕES BRASILEIRAS ENVOLVIDAS (2025)
BDA	RÁDIO	Não foram encontradas estimativas	PBDA-II (2024)	03
BINGO	RÁDIO	Não foram encontradas estimativas	Abdus (2023) Uirapuru (2018)	05
CTAO	GAMA	2.0 - 3.0	LST-BRA (2018) / MST-BRA (2022) / SST-BRA (2023)	13
DESI / M-KPNO	ÓPTICO	0.8 - 1.0	AI-SCoPE (2025) / LIneA Sci. Plat. (2020)	04
GMT / LCO	ÓPTICO / IR	4.0 - 5.0	GMT-Brasil (2020)	21
LSST / Obs. Vera Rubin	ÓPTICO	5.0 - 6.0	AI-SCoPE (2025) BLASST (2025) IDAC-BRASIL (2022) LIneA Sci. Plat. (2020)	26
T250+JPCam / OAJ	ÓPTICO	0.4 - 0.6	J-PAS (2023)	13
T80 / OAJ	ÓPTICO	0.01 - 0.03	J-PLUS (2015)	13
T80S / CTIO	ÓPTICO	0.03 - 0.05	AI-SCoPE (2025) S-PLUS (2017)	24

Tabela 2 — Síntese das infraestruturas observacionais nas quais haverá participação de instituições brasileiras em projetos e iniciativas que envolvem grande volume e complexidade de dados.

A Tabela 2 apresenta uma síntese das principais infraestruturas observacionais nas quais a comunidade brasileira mantém participação ativa no contexto do paradigma da Astronomia de Big Data (ver Apêndice B). A tabela sintetiza, por infraestrutura observacional, a janela espectral, a produ-

2 A medida PB por ano (Petabytes/ano) equivale à produção de cerca de 100 milhões de fotos 4K de 10 MB, as quais, quando armazenadas em discos de 5 TB, demandam, em dez anos, 2.000 unidades, formando uma torre de 40 metros de altura.

ção estimada (PB/ano, brutos + derivados), as iniciativas com ano de início e o número de instituições brasileiras engajadas em cada projeto. O código de cor usado nas linhas da tabela representa: laranja ($\geq 0,5$ PB/ano), amarelo ($< 0,5$ PB/ano), cinza/TBD (ainda sem estimativa). A contagem de instituições corresponde a engajamentos declarados e pode incluir sobreposição entre projetos.

As infraestruturas observacionais são apresentadas em ordem alfabética, acompanhados da faixa aproximada de produção anual de dados, o que facilita uma leitura comparativa das demandas de infraestrutura e evidencia oportunidades de P&D associadas a cada projeto ou iniciativa. Essa organização permite identificar, de forma objetiva, quais iniciativas requerem maior capacidade computacional, maior integração com redes internacionais e maior investimento em recursos humanos especializados.

Big Data refere-se a conjuntos de dados extensos — caracterizados por grande volume, variedade, velocidade, veracidade e valor — que exigem arquiteturas e tecnologias escaláveis para armazenamento, gestão, processamento e análise eficientes (NIST 2018). No contexto astronômico, os levantamentos J-PLUS, J-PAS e S-PLUS podem acumular $\sim 0,7$ PB em um ano de operação; embora a taxa diária de aquisição não alcance sistematicamente 10 TB/dia (referência comum à infraestruturas observacionais de grande porte como o LSST e SKA), o volume total e a complexidade dos produtos já impõem desafios típicos de ciência de dados em grande escala, justificando sua inclusão no domínio de Big Data em Astronomia. A relevância não se limita ao volume: há desafios substanciais na extração de valor (análise e inferência), na velocidade (plataformas de distribuição que atendem, em média, a centenas de milhares de requisições diárias), na variedade (integração de múltiplas fontes e formatos) e na veracidade (mitigação de ruídos e controle de qualidade). A Tabela 2 lista projetos que exibem várias dessas características.

Conforme detalhado no Apêndice B, a estimativa de produção em Astronomia — sobretudo em grandes levantamentos, não se restringe aos dados brutos: a estratégia observacional envolve exposições repetidas (profundidade e calibração), metadados, quadros de calibração e mosaicos (*coadds*); os produtos derivados (catálogos, *coadds* finais, fotometria) podem alcançar volumes comparáveis ou superiores; e fatores operacionais — compressão, overheads de pipeline, versionamento, replicações e backups — ampliam substancialmente o armazenamento requerido. Diante desse ciclo de vida completo e de seus impactos em armazenamento, rede, processamento e governança, é necessário adotar um limiar mínimo para enquadramento em Astronomia de Big Data, definido por critérios objetivos (multiplicadores de derivados e backups, cadência e repetição de exposições, requisitos de reprocessamento e distribuição) especificados no Apêndice B.

Portanto, para estimar Big Data de forma realista, por exemplo, em J-PLUS e S-PLUS, consideramos todo o ciclo de vida: exposições repetidas (profundidade/calibração), metadados e QA (*Quality Insurance*), frames de calibração, mosaicos/*coadds*, produtos derivados (catálogos, fotome-

tria), artefatos intermediários de pipeline, documentação/portais e réplicas/backups. Na prática, isso introduz um multiplicador global de ~5–10 sobre o volume bruto anual resultando nos valores apresentados na Tabela 2. Mesmo com esses aportes, ambos permanecem abaixo do limiar de 0,5 PB/ano. No entanto, a necessidade de velocidade e processamento em tempo real, diversidade de formatos e um ecossistema tecnológico avançado das respectivas plataformas servem de modelo para como ciência e Big Data se encontram na prática, principalmente no caso do S-PLUS, que é totalmente desenvolvido no Brasil.

É importante destacar que os projetos e iniciativas considerados na Tabela 2 são aqueles que ainda estarão ativos ao longo da próxima década e direcionados à criação de consórcios, centros de dados e plataformas computacionais, com participação brasileira, e destinados ao processamento e análise de grandes volumes de dados astronômicos.

III.2.1. Descrição de projetos e iniciativas

Em suma, a Astronomia de Big Data no Brasil apresenta atualmente um conjunto de projetos e iniciativas de destaque, em sua maioria concentrados na região Sudeste — mas que engloba participação de outras regiões, com destaque para o Sul — que refletem o seu avanço e o seu potencial de crescimento. A seguir, com base no levantamento realizado pela subcomissão, apresenta-se um detalhamento entre os projetos e iniciativas que se destacam no cenário da Astronomia de Big Data.

A. Projetos e iniciativas que envolvem centros de dados e plataformas para Big Data

- (A1) AI-SCoPE³ (Artificial Intelligence for Smart Cosmic Exploration) — Desenvolvido no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), o AI-SCoPE é uma plataforma inovadora que funciona como interface para um *data lake*, desenvolvido no Laboratório de Inteligência Artificial do CBPF (LAB-IA/CBPF) para a comunidade. O sistema foi projetado para lidar com o futuro recebimento de múltiplos petabytes de dados provenientes de vários levantamentos tais como DESI (Dark Energy Spectroscopic Instrument), LSST, L4 (La Silla Schmidt Southern Survey), ZTF (Zwicky Transient Facility) e 4MOST, com ênfase em catálogos públicos incorporando inteligência artificial para busca e cruzamento de catálogos, recuperação de imagens e requisições de processamento em tempo real. A meta é maximizar a eficiência dos usuários no acesso e uso dos dados. A plataforma também concentra desenvolvimento de Agentes de Inteligência Artificial que vão recomendar e alertar sobre possíveis observações para redes de telescópios, executar modelagem automatizada de eventos astrofísicos, em particular transientes rápidos e MMA.

3 <http://aiscope.cbpf.br>

- (A2) BLASST⁴ (Brazilian Laboratory for Astronomical STudies), uma iniciativa que envolve uma equipe multidisciplinar de profissionais com grande experiência em diversas áreas da Astronomia, não se restringindo somente ao software e hardware. O BLASST funcionará de forma similar mas complementar ao AI-SCoPE no sentido de distribuição de dados, mas o diferencial será a criação de catálogos de valor agregado para uso geral da comunidade, assim como desenvolvimento de novos métodos, que usam o estado da arte atual em software, LLMs (*large language models*; Alvo 2022) e agentes, para multiplicar o impacto dos novos telescópios e grandes projetos. O BLASST conterá catálogos de diferentes levantamentos e em especial do LSST e possibilitará também a subtração de imagens do LSST em tempo real e fotometria forçada, além de complementar e expandir as capacidades que o AI-SCoPE já tem, com possibilidade de integração de inteligência artificial à análise dos dados do LSST e de outros levantamentos.
- (A3) IDAC-BRA-LSST (*Independent Data Access Center — Brasil — LSST*), também chamado *Brazil Lite IDAC*⁵, é um centro independente de acesso a dados do LSST, coordenado pelo LIneA — Laboratório Interinstitucional de e-Astronomia, em parceria com o Observatório Vera C. Rubin. Integrado a uma rede internacional de centros IDAC distribuídos em todos os continentes, o IDAC-BRA-LSST constitui uma contribuição *in-kind* do Brasil ao projeto, oferecendo uma infraestrutura dedicada ao armazenamento, gerenciamento e disponibilização de dados científicos do LSST. No modelo Lite IDAC, o centro brasileiro é responsável por hospedar e distribuir os VACs derivados das imagens combinadas (*co-added*), além de produtos auxiliares como mapas de profundidade, *footprints* e catálogos de redshifts fotométricos, assegurando sua integração às plataformas globais de acesso do Rubin Observatory. Sua infraestrutura conta com servidores PostgreSQL de alto desempenho, sistemas de armazenamento de grande porte distribuídos e também conectados à rede com capacidade escalável até a ordem de 10 petabytes, clusters de processamento de mais de 500 núcleos de CPU (HPE Apollo 2000) e suporte a ambientes modernos de análise, como Kubernetes e Jupyter Notebooks, complementados pelo acesso a recursos de computação de alto desempenho do supercomputador Santos Dumont instalado no LNCC, interligados por rede de 100 Gbps para garantir a transferência eficiente de dados. O acesso a esses recursos é mediado pelo LIneA Science Platform, uma infraestrutura que disponibiliza ambientes interativos e ferramentas especializadas, como JupyterHub, serviços de consulta via TAP (*Table Access Protocol*), visualizadores de céu (*Sky Viewer*) e de objetos (*Target Viewer*), além de portais específicos pa-

4 <https://people.if.usp.br/abramo/pt-br/node/49>

5 <https://www.linea.org.br/idac>

ra exploração de dados (ex.: SDSS Sky Server, LSST Photo-z Server, Portal de Ocultação Solar).

- (A4) S-PLUS⁶ (Southern Photometric Local Universe Survey) — é um projeto internacional de Big Data em Astronomia iniciado em 2015, liderado por brasileiros, que atualmente atende o maior número de usuários (229 — de 52 instituições inscritos no wiki — e centenas de não inscritos) e é aberto a toda a comunidade. Seu objetivo é mapear 9 300 graus quadrados do céu do hemisfério sul em 12 filtros fotométricos, produzindo imagens e catálogos de milhões de objetos. O projeto conta com um telescópio robótico dedicado de 86 cm, contando com 3 servidores e 5 estações de processamento de alta capacidade que compõem um *data lake* e que fornece diferentes tipos de dados como catálogos, imagens, documentações, serviços de processamento em tempo real e APIs. O *splus.cloud* é usado por mais de 800 usuários em todo o mundo. Com 40 artigos publicados, 30 teses e dissertações defendidas, 5 data releases internacionais de imagens e catálogos que cobrem cerca de metade do céu do sul, o S-PLUS é uma preparação para a próxima etapa de dados que virão do LSST bem como um *pathfinder* para sistemas que serão associados como telescópios maiores, de tamanho 1.5-2m, como o T150. O S-PLUS é um projeto que exemplifica de forma clara o conceito de Big Data aplicado à Astronomia. Além dos volumes de dados brutos totais mostrados na Tabela 1, o caráter de Big Data do S-PLUS se revela em diferentes dimensões. Na velocidade, a plataforma de distribuição *splus.cloud* lida com uma média de centenas de milhares de requisições por dia e já registrou picos de até 4,5 milhões de acessos em apenas 24 horas, chegando a mais de 50 TB em um único dia. Além disso, parte das requisições envolve dados gerados em tempo real, como a criação de imagens coloridas a partir das observações em múltiplos filtros, exigindo processamento dinâmico e entrega imediata. Na variedade, o projeto precisa gerenciar não apenas imagens brutas e calibradas, mas também catálogos fotométricos, metadados e produtos derivados, cada qual com requisitos diferentes de armazenamento e acesso.

B. Projetos e iniciativas que envolvem outras infraestruturas

- (B1) BINGO⁷ e BDA⁸ (Brazilian Decimetric Array) são projetos na faixa de rádio, cujos volumes e cadências de dados ainda não foram dimensionados, mas que poderão representar uma contribuição significativa para a radioAstronomia de Big Data no Brasil, especialmente no mapeamento de grandes áreas do céu, na caracterização de estruturas em escalas cósmicas e nos estudos de transientes.

6 <https://www.splus.iag.usp.br/>

7 <https://www.gov.br/inpe/pt-br/assuntos/ultimas-noticias/radiotelescopio-bingo>

8 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0273117799005918>

- (B2) CTA⁹ (Cherenkov Telescope Array) e demais observatórios dedicados à Astrofísica de altas energias deverão gerar fluxos substanciais de dados de raios gama e radiação Cherenkov, com exigências específicas de análise em tempo real. Projetos do CTA, como LST, MST e SST contam com a participação brasileira *in-kind*.
- (B3) J-PAS¹⁰ e J-PLUS¹¹ são projetos de levantamentos ópticos conduzidos a partir de dois telescópios, o Telescópio Javalambre Survey Telescope (T250), de 2,5 metros de diâmetro, e outro de 80 cm, localizados no Observatório Astrofísico de Javalambre (OAJ), Espanha. Esses levantamentos produzem catálogos fotométricos amplos e de alta qualidade, essenciais para complementar observações de grandes levantamentos internacionais. O volume de dados gerado é estimado em 10–15 terabytes por ano, valor que, embora abaixo da escala de dezenas de petabytes de outros grandes projetos, representa um recurso estratégico para calibração cruzada e enriquecimento de catálogos no contexto do Big Data em Astronomia.
- (B4) Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA) — O LNA, órgão do MCTI, mantém uma série de programas e instrumentos voltados à observação astronômica e ao monitoramento sistemático de fenômenos celestes, abrangendo desde astrometria e fotometria de precisão até espectroscopia e radioAstronomia. Entre os ativos de maior destaque estão o Southern Astrophysical Research Telescope (SOAR), localizado no Chile, e o Observatório Gemini, com telescópios de 8,1 m situados no Havaí (Gemini North) e no Chile (Gemini South). O Brasil, por meio do LNA, participa ativamente da operação e do uso científico desses telescópios, garantindo acesso a tempo de observação e integração com grandes levantamentos internacionais. Embora nem todos os programas associados a esses instrumentos operem na escala típica de Big Data, eles desempenham papel essencial na manutenção de séries temporais históricas, no desenvolvimento de instrumentação científica, na formação de recursos humanos e na criação de sinergias com projetos de maior escala de dados. Parte dessas atividades também possui potencial de integração com iniciativas multibanda e multimessageiras, com o BRICS Astronomy, reforçando a contribuição brasileira no ecossistema global de pesquisa astronômica.
- (B5) GMT-Brasil¹² — A iniciativa GMT-Brasil [15] representa a participação científica do Brasil no Giant Magellan Telescope, coordenada pelo IAG/USP e financiada pela FAPESP, com foco no desenvolvimento de instrumentação e na colaboração internacional em Astronomia de ponta.

9 <https://www.cta-observatory.org>

10 <https://www.j-pas.org/>

11 <https://www.j-plus.es/>

12 <https://www.gmt.iag.usp.br/en/gmt-brazil>

C. Projetos e iniciativas que envolvem Grandes Grupos e Consórcios

- (C1) BPG-LSST — Grupo de Participação Brasileiro (BPG) com acesso a dados restritos do LSST (*data right holders*). Atualmente conta com cerca de 120 membros, sendo 24 Pesquisadores Principais (PI) tendo em seu grupo até 4 pesquisadores juniores (JAs), pós-docs, estudantes de pós-graduação ou graduação. Os pesquisadores associados têm sua atuação coordenada pelo LIneA em uma estrutura organizacional definida pelo LSST. Composto por pesquisadores de 22 instituições diferentes em 10 estados brasileiros, distribuídos em 8 colaborações científicas independentes: Galáxias; Estrelas, Via Láctea e Volume Local; Sistema Solar; Energia Escura; Núcleos Galácticos Ativos; Transientes e Estrelas Variáveis; Lentes Fortes; e Informática & Estatística. O BPG-LSST atuará através do IDAC-Brasil-LSST (Centro de Commissionamento Brasileiro do LSST), que é a infraestrutura brasileira de apoio à análise de dados do projeto, contando com o apoio de parceiros do LIneA como RNP, ON e LNCC.
- (C2) *BRICS Astronomy Working Group* (BAWG) — No contexto multilateral, o Brasil é membro do BAWG que coordena ações conjuntas em pesquisa, desenvolvimento tecnológico e formação de recursos humanos entre os países do bloco. Apoia iniciativas brasileiras no Square Kilometre Array (SKA) por meio de colaborações técnicas e industriais, como o programa SKA Connect, que integra indústria, universidades e centros de pesquisa para desenvolver soluções compatíveis com as demandas do observatório. No contexto multilateral, participa do BRICS Intelligent Telescope and Data Network (BITDN), que busca conectar telescópios e centros de dados por meio de uma rede inteligente para levantamentos coordenados e detecção de transientes, e a participação na iniciativa Open Universe¹³ chancelada pela UNOOSA¹⁴ (*UN Office of Outer Space Affairs*), voltada para capacitação e ampliação ao acesso aberto e a usabilidade de dados científicos. Essas ações incluem ainda programas de capacitação, *hackathons* e treinamentos em análise de dados astronômicos, facilitando a inserção brasileira em redes internacionais de ciência e tecnologia envolvendo futuramente Big Data.
- (C3) CLAST (*Consortium for Large Astronomical Survey Tasks*) — Esse é um consórcio de mais de 40 membros, de 14 instituições brasileiras e instituições estrangeiras, reunindo astrônomos, físicos, estatísticos, engenheiros e cientistas da computação. Esse consórcio é responsável por planejar, financiar e coordenar o BLASST (*Brazilian Laboratory for Astronomical Survey Studies*). O consórcio tem por princípios organizacionais a definição de estratégias comuns, otimização da participação em grandes levantamentos e instrumentos e a maximização do impacto das pesquisas individuais, principalmente por meio da disseminação entre a

¹³ <https://openuniverse.cbpf.br/>

¹⁴ <https://www.unoosa.org/>

comunidade astronômica brasileira de técnicas avançadas de Inteligência Artificial (IA), incluindo a construção de plataformas de IA, ferramentas de Aprendizado de Máquina, incluindo agentes de IA e LLMs, para acelerar as pesquisas científicas análises de alto nível.

- (C4) SPANET¹⁵ (*São Paulo Astronomy Network*) — é uma aliança entre universidades, instituições e profissionais para impulsionar a Astronomia e o desenvolvimento da Instrumentação Astronômica e Ciência de Dados no estado de SP. A rede busca alcançar isso através da coordenação de ações que aumentem a visibilidade da produção brasileira no cenário nacional e internacional, promovam a educação científica na sociedade e impulsionem o desenvolvimento tecnológico e econômico. A SPANet contribui ativamente para grandes projetos internacionais com foco na investigação do Universo em todo o espectro eletromagnético e considerando iniciativas com tecnologias emergentes, abrangendo assim projetos de Big Data em Astronomia. Alguns exemplos de projetos relacionados à SPANET: BINGO, GMT, CTAO, J-PAS, J-PLUS e S-PLUS.
- (C5) T80-Sul — Consórcio composto de 229 membros de 24 instituições brasileiras e outras 28 internacionais que utilizam o telescópio robótico brasileiro no Cerro Tololo Interamerican Observatory. Iniciado em 2016, conta com 6 data releases abertos a toda a comunidade brasileira (sendo que 5 deles abertos ao mundo, ver splus.cloud). Organiza anualmente inúmeros eventos científicos e em especial escolas de IA.

D. Projetos e iniciativas que envolvem uso integrado de base de dados

- (D1) Uso de levantamentos e bases de dados públicos internacionais consolidadas — Muitos membros da comunidade astronômica brasileira utilizam extensivamente dados provenientes de grandes levantamentos públicos, como Zwicky Transient Facility (ZTF), Dark Energy Survey (DES), Sloan Digital Sky Survey (SDSS), Euclid e Prime Focus Spectrograph (PFS). Além disso, há intenso uso de dados de telescópios espaciais e de levantamentos de rádio voltados para cosmologia, incluindo projetos baseados em medições da Radiação Cósmica de Fundo (RCF). Esses recursos, amplamente acessíveis, possibilitam que pesquisadores brasileiros desenvolvam investigações de ponta, muitas vezes em sinergia com dados obtidos em colaborações internacionais nas quais o Brasil já participa ativamente.
- (D2) Integrações Multibanda e Multimessageira — Essas linhas de pesquisa, e outras que aqui não foram mencionadas, fortalecem-se com a abordagem combinada da Astrofísica multibanda e multimessageira, que integra observações em múltiplos comprimentos de onda (óptico, infravermelho, rádio, raios gama) com mensageiros não eletromagnéticos, como ondas gravitacionais e partículas de alta energia. No Brasil, destacam-se grupos de pesquisa en-

15 <https://www.spanet.iag.usp.br/home>

volvidos em colaborações internacionais como o LIGO Scientific Collaboration e iniciativas correlatas voltadas para a detecção e análise de sinais de ondas gravitacionais, essenciais para a compreensão de eventos astrofísicos extremos. Essa integração potencializa respostas rápidas a alertas transientes, enriquecimento de VACs, priorização de segmentos robóticos e correlações estatísticas em grande escala, conectando iniciativas ópticas (J-PLUS/J-PAS/S-PLUS), de altas energias (CTA) e de rádio (BINGO, BDA, SKA), além do uso estratégico de bases de dados públicas internacionais.

- (D3) International Virtual Observatory Alliance¹⁶ (IVOA) — Essa iniciativa continua sendo uma referência global para a padronização e interoperabilidade de dados astronômicos, viabilizando a integração de grandes volumes de informações coletadas por telescópios e missões distintas. Por meio de protocolos como TAP (*Table Access Protocol*), VOTable, SIA (*Simple Image Access*) e ConeSearch, o IVOA estabeleceu a infraestrutura que permite a cientistas consultar e cruzar catálogos, imagens e espectros em escala massiva, sem barreiras institucionais ou geográficas. Embora o termo *Virtual Observatory* tenha perdido força, sendo progressivamente substituído por abordagens mais amplas de astroinformática e pelos princípios de dados FAIR, sua base tecnológica permanece ativa e essencial. Projetos de grande porte como o LSST, GMT, SKA e Gaia continuam a adotar esses padrões, reforçando sua relevância. No caso da Astronomia brasileira, a participação em colaborações internacionais torna fundamental a adesão às normas do IVOA, garantindo não apenas acesso pleno a dados globais, mas também a possibilidade de desenvolver ferramentas e serviços interoperáveis capazes de colocar o país em posição de destaque na Astronomia de Big Data.

O conjunto de projetos e iniciativas descritos acima demonstra não apenas a capacidade técnica instalada no país, mas também a necessidade de fortalecer redes de colaboração e ampliar o investimento em infraestrutura e recursos humanos, de forma a assegurar que a comunidade astronômica brasileira possa atuar com protagonismo na era do Big Data.

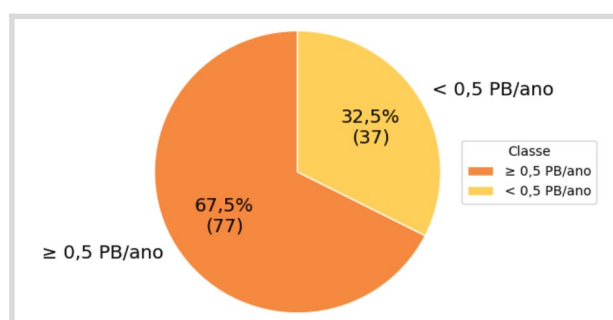


Figura 9 — Engajamento institucional em projetos e iniciativas envolvendo Astronomia de Big Data de acordo com os valores da Tabela 1.

16 <https://www.ivoa.net/>

O gráfico da Figura 9 apresenta a distribuição aproximada de instituições brasileiras, públicas e privadas, que atuam em Astronomia por meio de projetos e iniciativas listados na Tabela 2, nos quais foram identificadas 114 instituições envolvidas com projetos e iniciativas cujos volumes de dados gerados são conhecidos. Os valores refletem a proporção de envolvimento institucional em cada caso, considerando tanto atividades de pesquisa e desenvolvimento quanto suporte técnico e operacional. Este resultado indica que, em 2025, cerca de 67,5% das instituições brasileiras possuem pesquisadores e grupos atuando em Astronomia de Big Data onde o volume de dados ultrapassa 0.5 PB/ano, evidenciando uma base significativa de engajamento e demanda por competência nacional nessa área estratégica.

III.2.2. Perspectivas para a próxima década

A Astronomia brasileira expandiu-se significativamente nas últimas décadas e apresenta hoje uma comunidade diversa, com crescente inserção internacional e capacidade técnica reconhecida em diferentes áreas. A expectativa para os próximos dez anos é de consolidação e avanço em áreas estratégicas, alavancadas por novos levantamentos de dados e pela participação ativa em grandes colaborações globais. Este cenário será fortemente impulsionado pela adoção de abordagens integradas de astroinformática, ciência de dados e inteligência artificial, associadas a novas plataformas de observação em solo e no espaço, geradoras de volumes sem precedentes de informação científica atingindo a ordem de 1 exabyte de dados gerados até 2040.

III.3. Oportunidades e desafios em Astronomia de Big Data

Entre as oportunidades estratégicas para a próxima década de Big Data em Astronomia, destacam-se as chamadas e acordos de colaboração institucional que possibilitem a participação efetiva de astrônomos brasileiros em P&D associadas aos grandes telescópios do século XXI, garantindo acesso antecipado aos dados ainda na fase de comissionamento e fomentando a elaboração de iniciativas e projetos que explorem plenamente o potencial do Big Data. Essas colaborações devem também abrir espaço para que o Brasil desenvolva e lidere a concepção de instrumentos complementares e soluções avançadas de tecnologia da informação voltadas à ciência e engenharia de dados astronômicos.

Com base nas tendências internacionais e no diagnóstico nacional apresentados nas seções anteriores, identificam-se ainda como oportunidades:

- (i) desenvolvimento e operação de *pipelines* científicos automatizados, integrando aquisição, calibração e análise de dados;

- (ii) criação e manutenção de *brokers* e VACs voltados a grandes levantamentos, com interoperabilidade internacional;
- (iii) implantação de *data centers* de alto desempenho e plataformas de computação distribuída alinhadas aos princípios FAIR (*Findable, Accessible, Interoperable, Reusable*);
- (iv) aplicação avançada de inteligência artificial e aprendizado de máquina para classificação de objetos, detecção de padrões e previsão de eventos astronômicos;
- (v) integração de dados multibanda e multimodais, abrangendo rádio, óptico, infravermelho e raios X;
- (vi) execução de simulações numéricas massivas integradas a dados observacionais;
- (vii) fortalecimento de práticas de ciência aberta, com reprodutibilidade e compartilhamento de código e dados.

Entre os desafios, destacam-se a necessidade de expandir e modernizar a infraestrutura nacional de computação de alto desempenho, formar e reter quadros técnicos especializados em engenharia e ciência de dados astronômicos, e estabelecer estratégias coordenadas para integração entre centros de pesquisa e acesso a dados internacionais.

III.3.1. Identificação das linhas de pesquisa promissoras

Dentre as principais linhas de pesquisa em Astrofísica com relevância para o paradigma de Big Data na próxima década, destacam-se:

- Cosmologia e Estrutura em grande escala — Investigação de tensões cosmológicas fundamentais, como a Constante de Hubble (H_0) e a Amplitude de Flutuações de Matéria (S_8); estudos sobre matéria escura e energia escura, utilizando levantamentos como LSST, DES, Euclid e RCF-S4; análise de alinhamentos intrínsecos e lentes gravitacionais fracas, combinando observações e modelagem estatística avançada.
- Formação e Evolução de Galáxias — Classificação morfológica de galáxias com redes neurais profundas e agentes autônomos para detecção de anomalias; estudos da evolução química e do conteúdo de poeira com dados multibanda (S-PLUS, J-PLUS, J-PAS); investigação de galáxias em aglomerados e estruturas cósmicas de grande escala; análise de objetos raros e núcleos ativos variáveis (AGNs).
- Astrofísica Estelar e de Exoplanetas — Estudos de estrelas Be, variáveis cataclísmicas, sistemas binários e objetos compactos; caracterização de atmosferas de exoplanetas gigantes com

dados de missões como Roman e JWST; arqueologia estelar e dinâmica galáctica com dados do Gaia, THEIA, S-PLUS e levantamentos correlatos.

- Transientes e Fenômenos Anômalos — Aplicação de *machine learning* e uso de *brokers* e *plataforma de recomendação de follow-up* (ex.: FINK, AI-SCope) para detecção e classificação automática em tempo quase real; Identificação de supernovas raras, quilonovas, transientes rápidos, eventos cataclísmicos e microlentes usando surveys como LSST e ZTF.
- Sistema Solar e Pequenos Corpos — Predição e análise de ocultações estelares, com potencial de bilhões de eventos anuais a partir do LSST; estudos sobre propriedades de corpos menores (objetos binários, famílias, cores, curvas de luz) e objetos interplanetários.
- Integrações Multibanda e Multimessageira — Combinação de observações em diferentes faixas do espectro (óptico, infravermelho, rádio, raios gama) com detecção de ondas gravitacionais e partículas de alta energia; participação brasileira em colaborações como LIGO e detectores correlatos.
- Infraestrutura e Formação em Astroinformática (*linha transversal a todas as anteriores*) — Desenvolvimento de infraestrutura para armazenamento e processamento de grandes volumes de dados (Big Data); criação de *pipelines* automatizados, plataformas interoperáveis e bancos de dados abertos; formação de profissionais especializados em ciência de dados aplicada à Astronomia, com competências em HPC, IA e engenharia de software científico.

III.3.2. Questões orçamentárias e de fomento à P&D

Os investimentos em Big Data em Astronomia devem ser estruturados com critérios que assegurem infraestrutura robusta, capacitação contínua em engenharia de dados e astroinformática e retenção de recursos humanos especializados. A curto e médio prazo, é essencial investir no desenvolvimento de portfólios de serviços disponibilizados em plataformas abertas para a comunidade astronômica, incluindo curadoria e atualizações de catálogos legados e novos. A manutenção e criação de centros de e-Astronomia requer reforço contínuo em tecnologia de bancos de dados, armazenamento e processamento, com integração de soluções em nuvem. É estratégico fortalecer a infraestrutura de rede por meio da RNP (Rede Nacional de Ensino e Pesquisa) e demais redes, prevendo conexões escaláveis a partir de 100 Gbps, implantação de roteadores de última geração com DMZ (*Demilitarized Zone*), switches e transceivers modernos. Com base em benchmarks internacionais, o investimento mínimo anual estimado para infraestrutura de data centers (“*AI-ready*”) gira em torno de US\$ 5–10 milhões, enquanto aprimoramento de rede demanda de US\$ 1–5 milhões por ano, totalizando uma estimativa mínima média de US\$ 10 milhões por ano.

Rede / Provedor	Capacidade Típica (Gbps)	Estimativa de Custo Anual (USD)	Aplicabilidade na Astronomia de Big Data
RNP	10–100 (> 400)	0 (custos cobertos por verbas públicas)	Principal backbone nacional para tráfego de dados científicos
Rednsp	100–400	0 (custos cobertos por verbas públicas)	Principal backbone para tráfego de dados científicos entre o Estado de São paulo e Europa e EUA.
AmLight	100–400	0 (custos cobertos por convênios e ag. internacionais)	Transferência de dados de telescópios no Chile e África do Sul
RedCLARA	10–100	Até ~50 mil (taxa de consórcio e manutenção mínima)	Cooperação latino-americana e acesso à Europa
GÉANT / Internet2	100–400	0 (custos cobertos por consórcios internacionais)	Interligação com supercomputadores e centros de dados globais
Backbones Privados (Claro, Vivo, TIM, Algar)	10–400	500 mil – 3 milhões	Rotas alternativas ou projetos com grande volume interno
Cloud Providers (AWS, Google Cloud, Azure)	10–100	200 mil – 2 milhões	Armazenamento, processamento e distribuição de dados

Tabela 3 — RNP e Redes Alternativas para Comunicação de Grande Volume de Dados.

É fundamental assegurar, no Brasil, uma infraestrutura de rede de alta capacidade e alta disponibilidade, interligada às redes acadêmicas internacionais — condição estratégica para a participação nacional em grandes observatórios. No caso específico dos telescópios instalados no Chile, a continuidade de uma malha nacional de dados com conectividade internacional robusta pode gerar vantagens decisivas para a comunidade científica brasileira. Para atingir esse objetivo, é necessário investir de forma sustentada na RNP e nas redes estaduais e institucionais, bem como manter e ampliar os contratos de interconexão com as redes globais. A Tabela 3 apresenta um comparativo entre a RNP e redes equivalentes que podem funcionar como canais adicionais para aumentar a resiliência e reduzir gargalos no fluxo do Big Data em Astronomia.

III.4. Orçamentos já empenhados e relacionados a Big Data em Astronomia

Aqui são apresentados, sempre que disponíveis, os valores já empenhados em projetos e iniciativas estratégicas mencionados neste relatório. A ênfase recai sobre plataformas, centros de dados e instrumentos que compõem a espinha dorsal da atuação brasileira no paradigma de Big Data em Astronomia.

As três principais iniciativas nacionais voltadas ao LSST (AI-SCoPE, BLASST e IDAC-Brazil) representam investimentos expressivos e complementares no ecossistema de dados astronômicos:

i) AI-SCoPE (Artificial Intelligence for Smart Cosmic Exploration): A referida plataforma para análise massiva de dados em múltiplos surveys, recebeu investimentos através de projetos FINEP para o Laboratório de Inteligência Artificial na Física do CBPF de aproximadamente R\$ 24 milhões. Esse investimento envolve infraestrutura e pessoal especializado para dar suporte às demandas de hardware e software do Laboratório.

ii) BLASST (Brazilian Lab of Astronomical Survey Studies): Iniciativa multidisciplinar voltada à criação de catálogos de valor agregado (*VACs*), subtração de imagens em tempo real e fotometria forçada, além do desenvolvimento de novos métodos baseados em *Large Language Models* (LLMs) e agentes inteligentes. Complementa as funções do AI-SCoPEe busca multiplicar o impacto dos grandes levantamentos. A criação deste laboratório só foi possível graças ao financiamento de mais de US\$ 25 milhões já aplicados pela FAPESP nos últimos 10 anos em fibras ópticas para comunicação da comunidade científica e especialmente para o LSST. Em adição, em 2025 a FAPESP investiu R\$ 576 mil, concedidos diretamente aos pesquisadores do Estado de São Paulo com data-rights no LSST. Atualmente o BLASST conta com 40 pesquisadores de 11 instituições (CBPF, IAG-USP, IF-USP, IFT-UNESP, IME-USP, ON, UESC, UFRJ, UFRGS, UFS e UFSC).

iii) IDAC-BRA (Independent Data Access Center — Brasil): Centro de dados e análise voltado ao armazenamento e processamento dos dados do LSST, integrado a uma rede internacional de *IDACs*. O acordo LIneA/SLAC-DOE, avaliado em US\$4,4 milhões (~R\$ 24 milhões), foi assinado em 2024. Já foram investidos ~R\$10 milhões em equipamentos, e há R\$ 6 milhões aprovados pela FINEP para a próxima fase. Participam como *data right holders* pesquisadores de mais de 25 instituições brasileiras, incluindo UEL, UFU, UnB, UNESP, UFRGS, UTFPR, USP, UFSM, INPE, UFF, UFRJ, CBPF, LNA, ON e outras. Após o período de comissionamento, de dois anos, tanto os dados como help-desk especializado estarão disponíveis para a comunidade astronômica brasileira.

Outros projetos relevantes, que não são diretamente relacionados com o LSST, incluem:

iv) S-PLUS: Projeto internacional liderado por brasileiros, baseado no telescópio robótico T80 e em um *data lake* distribuído (IAG, IMT e CBPF) com 500 TB de dados. Possui 229 usuários ativos em 52 instituições brasileiras e internacionais e mais de 800 usuários globais que utilizam o banco de dados (splus.cloud). O investimento inicial no telescópio foi de US\$ 4 milhões, e cerca de R\$ 500 mil foram aplicados na curadoria e distribuição de dados.

v) T150: Projeto futuro, no infravermelho próximo, aberto a toda a comunidade brasileira. Proposta de US\$1,5 milhão em negociação, condicionada a contrapartidas de outras fontes.

vi) J-PAS e J-PLUS: Levantamentos ópticos no hemisfério norte, com telescópios de 2,5 m e 0,8 m, respectivamente, sob liderança brasileira parcial. Banco de dados gerido pelo Centro de Estudos de Física del Cosmos de Aragón (Espanha). Já receberam mais de US\$ 5 milhões de agências brasileiras.

vii) GMT (Giant Magellan Telescope): Participação brasileira atualmente concentrada em serviços de software para equipes instrumentais, dado que o telescópio se encontra na fase de *preliminary design*. O investimento total do Brasil no GMT é de US\$ 50 milhões, mas a fração destinada a dados ainda não foi definida.

viii) CTAO (Cherenkov Telescope Array Observatory): Mais de 50 pesquisadores brasileiros já atuam na análise dos primeiros dados. Investimento nacional da ordem de R\$ 20 milhões, incluindo máquinas para processamento local e ações para conectividade internacional (Chile–Europa). Há expectativa de implantação de uma central de análise no Brasil.

Há outros projetos internacionais de grande interesse, dos quais apontamos como mais relevantes: o Einstein Telescope, CSST, Euclid, Nancy Grace Roman, SWGO, FINK, ZTF e o BRICS Astronomy. Até o momento, a participação brasileira nas iniciativas de Big Data provenientes destes projetos ou é incipiente ou ainda não possui valores consolidados informados.

III.5. Estimativas para investimentos em Big Data em Astronomia

O enfrentamento dos desafios do Big Data na Astronomia brasileira nos próximos dez anos exigirá um plano de investimentos consistente, coordenado e capaz de fortalecer uma comunidade científica integrada e distribuída geograficamente. A Astronomia, além de seu impacto cultural e educacional, desempenha papel estratégico no desenvolvimento de tecnologias de ponta e na formação de recursos humanos altamente qualificados. Sua natureza interdisciplinar e o uso intensivo de ciência de dados fazem com que a área esteja entre as ciências exatas que mais impulsionam inovações no século XXI.

Nesse contexto, a consolidação da atuação brasileira em grandes colaborações internacionais, como LSST, SKA, Gaia, GMT, além de outras, depende de investimentos contínuos tanto em Infraestrutura Técnica quanto em Recursos Humanos (RH) especializados.

Recursos Humanos: É essencial investir na formação, capacitação, contratação e manutenção de profissionais especializados em engenharia e ciência de dados, Astronomia computacional com uso de HPC e engenharia de software baseada em MLOps (Machine Learning Operations). Também se destaca a necessidade de fomentar linhas interdisciplinares emergentes, como *astroinformática* e *astroestatística* baseadas em IA, para sustentar o ciclo completo de tratamento e análise de grandes volumes de dados astronômicos.

Infraestrutura Técnica: O fortalecimento e a implementação de centros de dados universitários e institucionais são prioridades, incluindo soluções para armazenamento, processamento e conectividade de alta velocidade. Isso deve ser acompanhado por ações efetivas para integração com redes e iniciativas internacionais, garantindo interoperabilidade e acesso competitivo aos dados globais.

Com base em projeções atuais, recomenda-se que o orçamento para a próxima década contemple:

- i) aumento progressivo de bolsas e contratações (taxa anual estimada de 2,5%);
- ii) aquisição e atualização de hardware compatível com demandas de Big Data (crescimento médio de 15% ao ano); e
- iii) manutenção e evolução contínua de software científico especializado (crescimento médio de 8% ao ano).

Esses investimentos devem também abordar três eixos estratégicos transversais:

Inclusão e Descentralização: desenvolver políticas para envolver grupos de todas as regiões do país, estimulando redes colaborativas regionais e promovendo o acesso equitativo a recursos e dados, considerando governança horizontal regional representativa.

Conectividade e Sustentabilidade: garantir conexões de alta velocidade entre centros de pesquisa e assegurar a sustentabilidade técnica e financeira das bases de dados e infraestruturas de longo prazo.

Compartilhamento de Softwares e Ferramentas: Desenvolvimento e manutenção de *pipelines* científicas, sistemas interoperáveis e ambientes de dados abertos seguindo os princípios FAIR.

Nesse sentido, as Redes Colaborativas Nacionais desempenham papel central, envolvendo instituições estratégicas como o LNCC e o supercomputador Santos Dumont, que oferecem suporte crítico em HPC, e sociedades científicas como SAB, SBF, SBC e SBMAC, capazes de articular políticas públicas integradas para ciência, tecnologia e inovação aplicadas ao Big Data em Astronomia.

Considerando esses fatores, estima-se que o cenário nacional demande investimentos da ordem de R\$ 500 milhões a R\$ 1 bilhão nos próximos 10 anos, distribuídos entre infraestrutura de HPC, contratação e formação de pessoal, desenvolvimento e manutenção de software.

O fortalecimento da atuação brasileira em Big Data na Astronomia para a próxima década exigirá, portanto, investimentos estruturados em recursos humanos, infraestrutura tecnológica e conectividade, de modo a viabilizar uma comunidade científica integrada, distribuída geograficamente e preparada para enfrentar os desafios impostos por grandes levantamentos e colaborações internacionais.

A estimativa preliminar para um cenário nacional distribuído entre 3 a 5 centros de dados regionais ou temáticos é de R\$ 220 a 500 milhões para um período de 5 a 10 anos, distribuídos em quatro eixos:

- Hardware (HPC, Armazenamento, Infraestrutura): R\$ 100 a 150 milhões;
- Software (desenvolvimento MLOps, licenças, manutenção): R\$ 20 a 50 milhões;
- Recursos Humanos (equipes técnicas, programas especiais, bolsas): R\$ 50 a 100 milhões;
- Conectividade (enlaces, equipamentos de rede): R\$ 50 a 100 milhões

Embora este plano de investimentos seja concebido para um horizonte de 10 anos, considera-se estratégico apresentar projeções estendidas para 20 anos, de forma a nortear discussões e subsidiar o planejamento de longo prazo para o próximo Plano Nacional de Astronomia (PNA). Essas projeções contemplam três fases principais, distribuídas ao longo de duas décadas, envolvendo hardware, software, recursos humanos e conectividade, considerando também a manutenção e a inserção brasileira em novas colaborações ao longo da próxima década.

Nesse cenário, no curto prazo (1 a 5 anos), o foco é a instalação inicial de sistemas de computação de alto desempenho (HPC) e armazenamento de grande capacidade, com investimentos de R\$ 60 a 80 milhões por centro. Desse montante, R\$ 15 a 20 milhões para o desenvolvimento de ferramentas; R\$ 25 a R\$ 30 milhões para sistemas de software considerando a formação inicial de equipes e a concessão de bolsa; e R\$ 15 a 20 milhões para contratação de enlaces de alta velocidade e infraestrutura básica de rede.

No médio prazo (6 a 10 anos), prevê-se a expansão e atualização tecnológica do hardware (R\$ 20 a R\$ 30 milhões por centro), a consolidação de sistemas de software e adoção de novas tecnologias (R\$ 20 a R\$ 30 milhões), o fortalecimento das equipes técnicas e científicas (R\$ 30 a R\$ 40 milhões) e o aumento da capacidade e resiliência da conectividade (R\$ 20 a R\$ 30 milhões).

No longo prazo (11 a 20 anos), a meta é garantir a renovação e modernização da infraestrutura com nova geração de equipamentos (R\$ 30 a R\$ 40 milhões), reengenharia e integração de software (R\$ 25 a R\$ 30 milhões), consolidação de carreiras técnicas e científicas (R\$ 40 a R\$ 50 milhões) e manutenção e integração internacional da conectividade (R\$ 20 a R\$ 30 milhões).

A abordagem, para estimativa de recursos, por fases garante: (i) início coordenado com foco em infraestrutura e capacitação, (ii) adaptação tecnológica e expansão escalável no médio prazo, e (iii) sustentação científica e técnica, de longo prazo, com autonomia e protagonismo internacional.

Considerando a instalação de três a cinco centros de dados distribuídos regionalmente, o investimento nacional estimado totaliza de R\$ 0,7 a R\$1,4 bilhões ao longo de 20 anos, assegurando autonomia científica e tecnológica para consolidar a participação brasileira nas colaborações internacionais estratégicas em Astronomia e Astrofísica.

Estimativa Nacional (3 a 5 centros)

Curto prazo (1–5 anos): R\$ 150–250 milhões;

Médio prazo (6–10 anos): R\$ 200–400 milhões;

Longo prazo (11–20 anos): R\$ 350–750 milhões;

Total nacional (1-20 anos): R\$ 0,7 a 1,4 bilhões¹⁷

¹⁷ Os valores estimados são aproximações e dependem de refinamento e detalhamento referenciado dentro do paradigma TCO (ver Apêndice C).

Portanto, o fortalecimento da atuação brasileira em Big Data na Astronomia para a próxima década exigirá investimentos estruturados da ordem de 1 bilhão de reais, em recursos humanos, infraestrutura tecnológica e conectividade, de modo a viabilizar uma comunidade científica integrada, distribuída geograficamente e preparada para enfrentar os desafios impostos por grandes levantamentos e colaborações internacionais.

As projeções apresentadas neste relatório foram obtidas exclusivamente a partir (i) do formulário respondido pela comunidade astronômica (≈ 100 contribuições qualificadas) e (ii) de valores correntes de mercado para infraestrutura de Big Data aplicável a volumes $\geq 0,5$ PB/ano (armazenamento, rede e computação). Embora este estudo não tenha adotado formalmente o modelo de Custo Total de Propriedade (TCO, CAPEX+OPEX) — tal como proposto por Wynstra & Hurkens (2005) —, recomendamos sua aplicação nos próximos ciclos orçamentários. Para projetos com $\geq 0,5$ PB/ano, o TCO captura custos de armazenamento em camadas, rede $\geq 10\text{--}40$ Gb/s, HPC/reprocessos, plataforma de dados (pipeline, catálogo, portal), pessoal e energia/manutenção, além de réplicas/backups e contingências. Propõe-se estimar volumes com multiplicadores do ciclo de vida ($\approx 5\text{--}10$ vezes) e de replicação ($\approx 2\text{--}3$ vezes), prever renovações em 4–5 anos e apresentar cenários Base/Alto/Conservador para 2026–2036.

Valores de referência sobre recursos orçamentários, obtidos em documentos públicos de investimento em C&T e Astronomia, usados para comparação com as estimativas aqui apresentadas, são discutidos no Apêndice C.

III.6. Diagnósticos e recomendações

O trabalho realizado pela Subcomissão de Big Data evidencia que o Brasil dispõe de uma comunidade astronômica tecnicamente qualificada, com inserção internacional crescente e participação relevante em projetos estratégicos de grande porte. Contudo, o avanço efetivo da Astronomia de Big Data no país depende de ações coordenadas que articulem infraestrutura, recursos humanos e integração institucional.

A partir do levantamento feito com mais de uma centena de profissionais que atuam no Brasil em P&D em Astronomia constatou-se que:

i) Uma parcela significativa já está envolvida em projetos relevantes de Big Data, incluindo *brokers*, VACs, observação automatizada e análise multibanda.

ii) Existem iniciativas promissoras de data centers e plataformas computacionais, como o AI-Scope, o BLASST, o IDAC-Brasil e o *LineA Science Plataforma*, que já operam ou estão em fase de implantação, mas em diferentes estágios de maturação.

iii) Persistem gargalos críticos, como a carência de infraestrutura de HPC, a escassez de profissionais especializados em engenharia e ciência de dados astronômicos e a falta de estratégias nacionais coordenadas para formação e manutenção de profissionais a longo prazo (> 5 anos), integração e acesso a dados internacionais.

III.6.1. Diagnósticos específicos

No contexto da Astronomia de Big Data, dois elementos estruturantes são essenciais para a descoberta científica: os Data Centers (DCs) e as Plataformas de Análise Avançada com Inteligência Artificial (IA), incluindo soluções baseadas em *Machine Learning* e *Agentes Inteligentes*.

a) Data Centers (DCs)

- *Hardware*: Muitos DCs nacionais ainda operam com infraestrutura limitada, enfrentando desafios de escalabilidade, capacidade de armazenamento (petabytes), redundância de dados e gargalos de I/O. A ingestão e consulta simultânea de dados em volumes massivos requer arquitetura paralela e balanceamento de carga.
- *Software*: Sistemas de gestão e análise de dados frequentemente não estão adaptados a workflows astronômicos complexos ou à integração com pipelines automatizados, dificultando o uso em tempo real.
- *Peopleware*: Há carência de grupos formados por profissionais com formação interdisciplinar que combina conhecimentos em Astrofísica, engenharia de dados, computação de alto desempenho (HPC) e gestão de infraestrutura. Essa lacuna compromete a eficiência, manutenção e evolução tecnológica dos DCs.
- DACs (Data Access Control): Adequar DCs ao paradigma de DACs, que são sistemas de última geração para gerir e autorizar o acesso aos dados gerados pela infraestrutura observacional, garantindo que apenas utilizadores autorizados tenham acesso e controle ao Big Data gerado. Garantindo assim uma interação segura, organizada e controlada com os dados e a informação correspondente.

b) Plataformas de Análise com IA (por exemplo: VACs e *Brokers*)

- *Hardware*: A análise automatizada de eventos astronômicos em tempo real requer infraestrutura robusta com GPUs/TPUs de alto desempenho, baixa latência e alto throughput, principalmente para inferência em milhões de alertas diários.

- *Software*: Os modelos de IA precisam ser constantemente atualizados, interpretáveis e auditáveis, adaptando-se a novos tipos de dados e mantendo a confiabilidade sob diferentes condições. É essencial garantir interoperabilidade entre múltiplas fontes e plataformas.
- *Peopware*: Há carência de profissionais com formação interdisciplinar que combina conhecimentos em Astrofísica, engenharia de dados, computação de alto desempenho (HPC) e gestão de infraestrutura. Essa lacuna pode comprometer a eficiência, manutenção e evolução tecnológica dos DACs.

c) Papel das Agências de Fomento:

No eixo Projetos, Iniciativas e Recursos Humanos, ressalta-se o papel central das agências de fomento brasileiras, CAPES, CNPq, FINEP e Fundações Estaduais de Amparo à Pesquisa (FAPs), na sustentação de programas e ações voltados ao Big Data em Astronomia. A coordenação e integração entre essas agências é estratégica para otimizar investimentos, evitar redundâncias e maximizar impactos.

As modalidades de apoio atualmente disponíveis (auxílios individuais, bolsas, projetos temáticos, redes de pesquisa e programas institucionais) podem e devem ser ajustadas para contemplar explicitamente as demandas em infraestrutura computacional, engenharia de dados e capacitação técnica necessárias à ciência de dados astronômicos em grande escala.

Constata-se também demandas por chamadas e editais voltados a projetos bilaterais e multilaterais envolvendo o Brasil e parceiros internacionais, favorecendo o intercâmbio de tecnologias, dados e competências. Essa abordagem é essencial para consolidar a presença brasileira em colaborações globais de grande porte, permitindo não apenas o acesso a dados estratégicos, mas também a liderança em componentes de hardware, software e soluções inovadoras de TI aplicadas à Astronomia.

III.6.2. Recomendações

Frente a esse diagnóstico, destacam-se as seguintes recomendações estratégicas:

Eixo 1 — Fortalecimento de Infraestrutura

- Implantar centros de armazenamento e bancos de dados e infraestrutura para processamento massivo de dados nacionais interoperáveis com redes globais;
- Investir em plataformas abertas com suporte a análise massiva, *brokers* e *VACs* integrados;

- Investir em infraestrutura modular e escalável (com suporte a storage distribuído e sistemas paralelos), uso de containers e microserviços para maior flexibilidade e manutenção, e formação contínua de equipes técnicas e científicas interdisciplinares.

Eixo 2 — Prospeção e Capacitação de Recursos Humanos

- Criar programas permanentes de formação interdisciplinar em IA aplicada à Astrofísica, HPC e astroinformática;
- Organização de encontros temáticos e workshops nacionais e internacionais sobre Astronomia de Big Data, incentivando a troca de experiências, o mapeamento de tendências e a articulação de parcerias;
- Estimular a mobilidade de pesquisadores entre centros, criando e fortalecendo redes colaborativas. Em especial, com políticas de incentivo que estimulem sinergia, interoperabilidade e compartilhamento de recursos entre grupos e centros de P&D em Astronomia e Computação;
- Prospeção e formação de talentos em múltiplos níveis, promovendo capacitação não apenas de jovens pesquisadores, mas também de cientistas seniores e quadros técnicos, assegurando atualização contínua frente às mudanças tecnológicas.

Eixo 3 — Políticas de Fomento

- Lançar editais específicos para Astronomia de Big Data, contemplando infraestrutura, software e formação;
- Valorizar propostas colaborativas e abrangentes, respeitando as diferentes vocações e expertises dos grupos e casos científicos;
- Incentivar colaborações bilaterais e multilaterais, garantindo participação ativa e acesso aos dados em fases iniciais de operação;
- Promover políticas que permitam trazer e manter no Brasil cientistas de dados e engenheiros de software do sul global (e.g. Índia);
- A estrutura de financiamento deve incluir fundos plurianuais, consórcios interinstitucionais, cooperação internacional e mecanismos de avaliação e transparência ao longo do ciclo;
- Promoção de INCTs dedicados à Astronomia de Big Data, garantindo financiamento de longo prazo e foco em inovação tecnológica, ciência de dados e integração internacional;
- Para garantir a sustentabilidade das iniciativas em Big Data astronômico no Brasil ao longo da próxima década, é fundamental adotar uma abordagem de planejamento financeiro estruturado e escalonado. As agências de fomento devem articular fundos plurianuais integrados,

com editais específicos para infraestrutura computacional, desenvolvimento de software científico, plataformas de IA e formação técnica continuada;

- A criação de consórcios nacionais multi-institucionais pode facilitar o compartilhamento de recursos e ampliar o impacto coletivo. Além disso, a busca ativa por financiamento internacional colaborativo (via parcerias com observatórios como LSST, SKA, ESO, CTA e agências como a NSF ou ESOF) pode diversificar as fontes de apoio. Finalmente, a implementação de mecanismos de monitoramento e avaliação periódica, com indicadores técnicos e científicos bem definidos, permitirá ajustes estratégicos ao longo do ciclo decenal.

Eixo 4 — Integração Nacional e Governança

- Criação de uma Rede Nacional de Astronomia e Astrofísica, sob coordenação do MCTI, com a missão de: (i) Organizar white papers, relatórios técnicos e workshops para definir prioridades de P&D; (ii) Integrar e alinhar políticas de fomento entre CNPq, FINEP, FAPs e programas internacionais; (iii) Garantir a representação e o protagonismo brasileiro nas principais colaborações científicas internacionais da próxima década;
- Promover governança distribuída, garantindo representatividade regional e autonomia orçamentária.

III.6.3. Recomendações sobre integração

Embora a comunidade astronômica brasileira seja vibrante e diversificada, com múltiplas iniciativas relacionadas a Big Data, ainda se observam oportunidades para aprofundar a colaboração e otimizar esforços em projetos de P&D. Existem no país grupos e iniciativas com grande potencial de sinergia, mas nem sempre plenamente articulados entre si, o que reforça a necessidade de fortalecer a articulação entre os diferentes atores e ampliar a cooperação regional. Ações que promovam parcerias mais amplas e colaborativas podem potencializar recursos já existentes, ampliar o impacto dos resultados e consolidar uma comunidade científica mais inclusiva, coesa e cooperativa.

Para enfrentar esse desafio, é necessário promover políticas e ações que incentivem a criação de redes de colaboração bem articuladas, e o fortalecimento e consolidação de centros de excelência em big data e *astroinformática*. Além disso, recomenda-se que futuros editais de fomento valorizem explicitamente propostas cooperativas, com participação multi-institucional e estratégias claras de uma boa articulação entre os diferentes núcleos de pesquisa e as redes de colaboração.

Essa mudança de paradigma poderá ampliar a eficiência no uso dos recursos públicos, favorecer a formação de capital humano altamente qualificado em escala nacional e maximizar o impacto da ciência astronômica brasileira no cenário global.

A efetiva implementação dessas recomendações permitirá ao Brasil não apenas manter, mas ampliar sua relevância científica global, garantindo capacidade técnica, autonomia estratégica e liderança em áreas-chave da Astronomia de Big Data.

III.6.4. Big Data como pilar da Astronomia Brasileira na próxima década

O advento do Big Data consolidou-se como um dos marcos transformadores da ciência contemporânea, e na Astronomia esse impacto é ainda mais evidente. A crescente produção de dados em petabytes por ano, associada aos grandes telescópios e levantamentos globais, coloca a comunidade científica diante de desafios e oportunidades sem precedentes.

O Brasil, com sua tradição de excelência em Astronomia, Astrofísica e cosmologia, encontra-se diante de uma encruzilhada histórica: ou consolida suas capacidades em ciência e engenharia de dados, integrando-se plenamente às redes globais de produção e análise de informação científica, ou corre o risco de ver seu protagonismo reduzir-se diante da rápida evolução tecnológica mundial.

Os diagnósticos e recomendações aqui apresentados deixam claro que o Big Data não é apenas um recurso de apoio, mas um pilar central para o avanço da Astronomia Brasileira na próxima década. A integração de infraestrutura de alto desempenho, plataformas interoperáveis, recursos humanos qualificados e políticas de fomento coordenadas será determinante para que o país amplie sua relevância e se posicione como um parceiro estratégico nas principais colaborações científicas internacionais.

Nesse cenário, a consolidação de uma Rede Nacional de Astronomia e Astrofísica de Big Data, articulada com centros de supercomputação, universidades, institutos de pesquisa e redes de alta velocidade, não apenas fortalecerá a produção científica e ampliará o impacto da Astronomia na educação, na cultura e no desenvolvimento tecnológico, como também poderá impulsionar a geração de spin-offs (empresas derivadas), pois investimentos em TI de Big Data fomentam a produção de plataformas reutilizáveis, padrões abertos e competências de engenharia de dados que se traduzem em startups, transferência de tecnologia, novos serviços e empregos qualificados, com efeitos multiplicadores em setores como saúde, agricultura, clima e cidades inteligentes.

Ao final, investir de forma contínua e estratégica no Big Data em Astronomia significa investir no conhecimento e no futuro do país, garantindo que o Brasil participe não apenas como observador, mas como protagonista na exploração e compreensão do Universo.

Capítulo IV

Astronomia e Sociedade

A Astronomia é uma ciência básica fascinante, pois ela é capaz de conectar as pessoas de distintas formas, dada a conexão que todo ser humano, independentemente de sua origem cultural ou condição social, tem com o céu. Há milênios, a Astronomia, em sua dimensão de *relação céu-terra*, tem despertado a nossa curiosidade e nos incitado a formular questões fundamentais: quem somos? De onde viemos? Por que estamos aqui? Estamos sozinhos no Universo? Como tudo aconteceu?

Na atualidade, essas perguntas têm nos ajudado não apenas a construir robustas plataformas e estratégias de ensino, pesquisa, extensão e divulgação em Astronomia, mas também têm nos provocado a repensar processos e relações acadêmicas e científico-tecnológicas que têm impactado a vida de pessoas há séculos, em relações culturais complexas, marcadas o tempo inteiro por desigualdades sociais históricas. Compreendemos que é preciso fazer a Astronomia brasileira (comunidade) crescer cada vez mais; fortalecer o seu potencial científico, tecnológico e cultural no país (e no mundo) sem, no entanto, perder de vista o seu compromisso social com a desarticulação de sistemas estruturantes de opressão (o racismo, a aporofobia, o machismo, a misoginia, a homotransfobia, o capacitismo, entre outros) que nos atravessam diariamente. Precisamos construir uma profunda relação entre a *Astronomia* e a *Sociedade*,¹⁸ compreendendo que a primeira não está apartada da segunda, em suas múltiplas dimensões, e desnaturalizando assimetrias que impedem construções de projetos libertadores de *Sociedade brasileira* por meio da *Astronomia*.

Apresentamos alguns dos principais desafios (diagnósticos) e oportunidades (recomendações) que, no seio do nosso *fazer ciência em comunidade*, são cruciais para nos ajudar a desarticular estruturas opressoras que nos atravessam de distintas formas no Brasil no que tange a relação *Astronomia e Sociedade*. É nossa responsabilidade, enquanto cientistas, docentes, discentes, promotores (as) culturais, divulgadores(as), gestores(as), agentes de políticas públicas e sociedades mobilizadas, ocupando distintas posições de poder, construir uma sólida relação *Astronomia e Sociedade* que nos afete pela construção de um país muito mais democrático.

Por fins de organização, este capítulo está dividido em 6 (seis) eixos principais. São eles:

Eixo 1 — Ensino e Educação em Astronomia

A presença da Astronomia nos currículos de escolas, das IES e Unidades de Pesquisa no país é encarada como uma potente estratégia para a reformulação do Ensino e da Educação da Astronomia e das ciências no país, da Educação Infantil à Pós-Graduação, compreendendo o papel que a Astronomia, em particular, tem desempenhado para a construção de outras formas de despertar o pensamento crítico pela ciência, alcançando amplas camadas da população que têm sido alijadas do acesso

18 Sociedade no contexto mais amplo da palavra, não apenas em seu sentido hegemônico e institucionalizado, mas levando em conta a pluralidade de formas e modos de se viver no Brasil, no campo e na cidade; em contextos culturais que têm sido historicamente negligenciados e vulnerabilizados (comunidades quilombolas, indígenas, periféricas, tradicionais, entre outros).

à educação e à divulgação em ciências. O Ensino e a Educação em Astronomia, de qualidade, são cruciais para o fortalecimento das agendas e plataformas de pesquisas e desenvolvimento científico e tecnológico no país rumo à inovação libertadora.

Eixo 2 — Divulgação e Popularização da Astronomia

Reconhece-se o papel que a Astronomia desempenha para a popularização e divulgação da ciência no país, que permite a construção de distintas linguagens com povos, culturas e lugares do Brasil profundo. Apesar disso, sabe-se que a divulgação da Astronomia frequentemente alcança apenas uma comunidade específica, deixando de fora pessoas que vivem em territórios marginalizados, que muitas vezes sentem que os espaços de conhecimento acadêmico/escolar/museal não foram feitos para elas ou que não são capazes de compreendê-los — além das limitações logísticas e econômicas que dificultam o acesso a eventos de divulgação, sejam presenciais ou online. Esta divulgação deve amadurecer e ultrapassar a concepção heróica, promovendo processos em que os sujeitos participantes possam compreender, para além dos conteúdos, aspectos da natureza da ciência e suas relações com a sociedade e o meio ambiente, além de promover processos de avaliação destas ações (Bucchi & Trench, 2014). Além disso, a divulgação pode apresentar a universidade e o ensino superior não apenas como uma possibilidade, mas como um direito de todo cidadão.

Eixo 3 — Centros de Divulgação/Popularização da Astronomia

A Astronomia, como ciência milenar de forte apelo cultural e educacional, exerce um papel fundamental na promoção da cultura científica, no espanto estético e na formação de pessoas capazes de compreender e intervir no mundo de maneira crítica e informada. Centros de Divulgação/Popularização da Astronomia são considerados lugares estratégicos, instrumentos valiosos para a promoção da justiça social e cognitiva no país. Entende-se, por outro lado, que a divulgação da Astronomia não serve apenas para comunicar conceitos astronômicos ao público, mas também para construir uma ponte entre a sociedade e a ciência/acadêmica de forma geral, promovendo o desenvolvimento do pensamento crítico — algo fundamental na era em que estamos entrando, dominada por redes sociais, desinformação de diversas ordens (tais como *fake news*, teorias de conspiração, pseudociências) e inteligência artificial. Há um ecossistema de tipos de centros ligados à divulgação e popularização da Astronomia, sua história e memória, tais como museus, observatórios, planetários e sítios arqueológicos (Pompea & Russo, 2020).

Eixo 4 — Diversidade, Equidade e Inclusão na Astronomia

Ainda que a Astronomia seja considerada uma ciência básica que cativa de forma avassalado-

ra pessoas de diferentes contextos sociais e culturais, sabemos também que os ambientes de estudos, trabalhos e de relação da Astronomia com a sociedade são marcados por abismos de desigualdade no âmbito de categorias como a *diversidade*, a *equidade* e a *inclusão*. Essas questões são particularmente importantes quando o país, em pleno século 21, está mergulhado em processos de questionamentos (com avanços e retrocessos) sobre desigualdades étnico-raciais (pessoas negras, indígenas, quilombolas, ribeirinhos, moradores de favelas, povos e comunidades de tradição de matriz africana, entre outros), de classe (pobres), gênero (mulheres cis, pessoas trans e travesti), sexualidades, orientação sexual (homossexuais), origem geográfica (assimetrias regionais), territorialidade, capacitismo (pessoas com deficiências), assédios (sexual, moral, entre outros), parentalidade (maternidades na Astronomia), entre outros marcadores sociais da diferença.

Eixo 5 — Astronomia como Vetor de Inovação para a Sociedade Produtiva

Reconhece-se, nesse eixo, que a Astronomia brasileira possui grande potencial inovador, capaz de impactar o setor produtivo e o mercado criativo para além da pesquisa acadêmica. *Spin-offs* (divisões de empresas ou organizações que se tornam negócios independentes com acumulativo potencial de ativos, servidores e acúmulo de capital intelectual e tecnológico oriundos da empresa matriz) e *startups* (empresa recém-formada, com potencial tecnológico e capacidade de atuar em ambientes de alta incerteza) originadas de pesquisas astronômicas transformam conhecimento em negócios inovadores, gerando impacto econômico e social. Parcerias com a indústria possibilitam maior transferência de tecnologia, novas colaborações e empregos qualificados. Fortalecer a ponte entre academia, empresas e criativos é essencial para inserir mais astrônomos(as) no ecossistema de inovação do Brasil, valorizando o conhecimento nacional.

Eixo 6 — Acervos e Memória, Patrimônio Material e Imaterial da Astronomia

A Astronomia no Brasil tem raízes profundas, que atravessam séculos, estendem-se por todo o território nacional e envolvem diversas culturas. Há, no Brasil, um precioso acervo histórico, linguístico, documental, instrumental e patrimonial que precisa ser preservado e acessado. É preciso, além disso, expandir a concepção de acervo e memória da Astronomia no Brasil de forma a levar em conta as distintas histórias sobre os céus como potencial de conhecimento material e imaterial sobre narrativas ancestrais (Alves-Brito, 2024). Há, no Brasil, antes e após o processo de invasão europeia, um rico patrimônio material e imaterial sobre as relações céu-terra que precisa ser reconhecido, valorizado e preservado.

Cada um dos eixos foi escolhido levando em conta os desafios e as oportunidades que estão colocados para nós, no presente século, e que reverberam as nossas vivências institucionais e culturais, todas elas enviesadas por nossas próprias experiências. Ao final de cada seção temática deste

documento, listamos os diagnósticos e as recomendações direcionadas ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI); ao Ministério da Educação (MEC); à Sociedade Astronômica Brasileira (SAB); às Instituições de Ensino Superior (IES); às Unidades de Pesquisa; aos Centros de Divulgação e Popularização da Astronomia; bem como demais setores da sociedade e pessoas interessadas em criar, executar e acompanhar políticas públicas e ações efetivas que promovam o fortalecimento da educação e da divulgação científica em Astronomia no Brasil, tendo como princípio fundamental a promoção da justiça social para o fortalecimento da democracia no país.

IV.1. O Ensino e a Educação em Astronomia

Do ponto de vista do ensino e da educação, não resta dúvida sobre o potencial da Astronomia para atrair a atenção das pessoas das mais distintas idades e contextos sociais e culturais e, além disso, despertar curiosidades e paixões para as carreiras científicas e para estabelecer relações céu-terra capazes de fomentar outras interpretações do Cosmos. Isso fica evidente por meio dos distintos dados que serão mobilizados ao longo deste documento.

A Astronomia é uma ciência interdisciplinar, conectada com outros campos das ciências da natureza (física, matemática, química, biologia), das ciências humanas (educação, sociologia, história, geografia, antropologia, filosofia), das tecnologias (espaço, eletrônica, informática, óptica) e das estéticas (artes e linguagens) e, nesse sentido, trata-se de um campo de conhecimento estratégico para o ensino e para a educação, não somente na vertente *teórico-prática* (em escolas e Instituições de Ensino Superior), mas também como *pesquisa* (ver dados nacionais e internacionais, como o Planejamento Estratégico da União Astronômica Internacional para a Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas¹⁹). Essas duas vertentes são estruturantes para nos ajudar a refletir sobre os desafios e as oportunidades do Ensino e da Educação em Astronomia para transformar a sociedade brasileira, socialmente desigual.

Segundo, por exemplo, o relatório da *Clarivate Analytics*²⁰ para a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), entre os anos de 2011 e 2016 foram publicados, no Brasil, 4.767 artigos na área de Astronomia e Astrofísica, o que representa aproximadamente 2% do total de pesquisas do país nesse período (cerca de 250.000). Não somente a quantidade de artigos é expressiva, mas também a qualidade das pesquisas, conforme medido pelo número de citações que as publicações brasileiras somam ano a ano.

No entanto, o diagnóstico estruturante aponta para a latente dificuldade na comunidade científica brasileira em não fomentar, e tampouco reconhecer, o que é feito no país em termos de *pesqui-*

19 Disponível em: https://www.iau-aiu.net/IMG/pdf/iau_strategy_2030.pdf. Acesso em: 14/06/2025.

20 Disponível em: <https://www.gov.br/capes/pt-br/centrais-de-conteudo/17012018-capes-incitesreport-final-pdf/view>. Acesso em 31/05/2025.

sa no campo do Ensino e da Educação em Astronomia. Tanto a perspectiva *prática* (o *fazer* na educação básica e no ensino superior) quanto a de *pesquisa* necessitam ainda de atenção focada para que o campo da Educação receba, do ponto de vista institucional, político e estrutural, a mesma atenção que é dada às outras áreas da Astronomia no país. Esse dado objetivo tem explicações variadas, desde a pobre valorização dispensada ao ensino e à educação no país, até a falta de planejamento estratégico das instituições que historicamente pensaram o campo da Astronomia no Brasil. No entanto, a hipótese básica desse documento é a de que o Ensino e a Educação em Astronomia, em viés *prático* e de *pesquisa*, são estratégicos para que possamos lidar com os desafios impostos à sociedade brasileira no presente século.

Além disso, de acordo com a Constituição Federal de 1988, a educação é um direito fundamental, um dever e uma responsabilidade do Estado, contando com a colaboração da família e da sociedade. Há consenso na literatura científica sobre o fato de que a educação é fundamental para enfrentar as desigualdades sociais do país, aprofundando o conceito de democracia, que está intrinsecamente atrelado à ideia de justiça e igualdade. A educação, como um direito basilar, garante o desenvolvimento integral das pessoas em suas relações profundas com o mundo, em seus exercícios críticos e autônomos de cidadania e em suas qualificações profissionais.

O Ensino e a Educação em Ciências, e o Ensino e a Educação em Astronomia em particular, tornam-se assim necessários para o enfrentamento das grandes questões do país vigentes no presente século, compreendendo o papel central das ciências, e de suas tecnologias associadas, na desarticulação de desigualdades sociais históricas pela promoção da justiça social, cognitiva, de raça e de gênero, nas intersecções com outros marcadores sociais da diferença.

IV.1.1. Educação Básica

A implementação da Astronomia no contexto educacional brasileiro deve observar as seguintes normativas:

- A Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (LDB), Lei nº 9.394/1996 (Brasil, 1996), que estabelece as diretrizes e bases da educação no país, como também regulamenta o sistema educacional nacional (na educação básica e no ensino superior), tanto no sistema público quanto na rede privada, nas três esferas de poder: federal, estadual e municipal.
- Base Nacional Comum Curricular (BNCC).
- Diretrizes Curriculares Nacionais (DCNs) para a Educação Básica e para os cursos de Licenciatura.
- Plano Nacional de Educação (PNE).

- Política Nacional de Formação de Professores (Portaria MEC nº 2.117/2019).
- Diretrizes Curriculares Nacionais para Educação das Relações Étnico-Raciais (Brasil, 2004); para a Educação Escolar Indígena (2012a); para a Educação Escolar Quilombola (2012b); para a Educação Ambiental, entre outras;

A LDB define a Base Nacional Comum Curricular (BNCC: Brasil, 2018) como um documento basilar para a estruturação dos currículos dos sistemas e redes de ensino do país, desenvolvendo e aprofundando as propostas pedagógicas de todas as escolas públicas e privadas das três etapas da educação básica do Brasil: a Educação Infantil, o Ensino Fundamental e o Ensino Médio. Ainda que a BNCC seja um documento controverso, e que precisa ser visto com criticidade (Massoni, Alves-Brito & Cunha, 2021), é ela que tem pautado a formação inicial e continuada de professores no país (Slovinski, 2022).

A Educação Infantil desenvolve aspectos socioemocionais, motores e cognitivos de crianças. O Ensino Fundamental, em um período de 9 anos, em seus Anos Iniciais (1º ao 5º ano) e Anos Finais (6º ao 9º ano), trabalha os letramentos, cálculos e outras habilidades e conhecimentos sobre o mundo natural e social. A BNCC do Ensino Fundamental — Anos Iniciais valoriza as situações lúdicas de aprendizagem, articulada às experiências vivenciadas na Educação Infantil. A BNCC do Ensino Fundamental — Anos Finais, por outro lado, expõe os estudantes a desafios de maior complexidade. Já o Ensino Médio, com duração de 3 anos, visa a formação para o ingresso no ensino superior, o mercado de trabalho ou a participação em cursos técnicos.

Do ponto de vista do ensino e da educação em Astronomia, a BNCC estabelece conhecimentos, competências e habilidades que se espera que todos os estudantes desenvolvam ao longo da escolaridade básica. De acordo com a BNCC, os conteúdos de Astronomia estão enquadrados pela área das Ciências da Natureza, que engloba as disciplinas de Ciências (no Ensino Fundamental) e Ciências da Natureza e suas Tecnologias (no Ensino Médio). Consequentemente, pode-se afirmar que, na Educação Básica, a Astronomia é uma ciência *transversal*, a qual fomenta a discussão e as relações com outros campos do conhecimento (ciências humanas e sociais, ciências da natureza, linguagens, matemática e tecnologias). A Astronomia, como uma ciência básica, ocupa papel fundante na BNCC.

Estudos recentes, como o de Slovinski (2022), bem como as análises dos trabalhos apresentados nos encontros focados no Ensino e na Educação de Astronomia e áreas afins no país revelam que a Astronomia ainda ocupa espaço reduzido e fragmentado nos currículos escolares e nos programas de formação docente. Faltam materiais didáticos contextualizados, formação específica dos professores e políticas de fomento à sua inclusão efetiva (Langhi; Nardi, 2012; Slovinski, 2022).

De maneira sintética, a Astronomia é abordada da seguinte forma na BNCC:

- Ensino Fundamental — Anos Iniciais (1º ao 5º ano): Escalas de tempo; movimento aparente do Sol no céu; o Sol como fonte de luz; características da Terra; observação do céu; usos do solo; pontos cardeais; calendários; fenômenos cíclicos e cultura; constelações e mapas celestes; movimento de rotação da Terra; periodicidade das fases da Lua; instrumentos ópticos.
- Ensino Fundamental — Anos Finais (6º ao 9º ano): Forma, estrutura e movimentos da Terra; sistema Sol, Terra e Lua; composição, estrutura e localização do Sistema Solar no Universo; Astronomia e cultura; vida humana fora da Terra; ordem de grandeza astronômica; evolução estelar.
- Ensino Médio: No eixo *Vida, Terra e Cosmos*, resultado da articulação das unidades temáticas *Vida e Evolução* e *Terra e Universo* desenvolvidas no Ensino Fundamental, propõe-se que os estudantes analisem a complexidade dos processos relativos à origem e evolução da Vida (em particular dos seres humanos), do planeta, das estrelas e do Cosmos, bem como a dinâmica das suas interações, e a diversidade dos seres vivos e sua relação com o ambiente.

Em relação à educação infantil, para este segmento os Referenciais Curriculares Nacionais para a Educação Infantil (RCNEI) estimulam a observação de fenômenos empíricos como o dia e a noite, a presença de astros luminosos e iluminados no céu, entre outros temas experienciados por crianças pequenas em seus cotidianos. Ou seja, ao longo do processo formativo são definidas habilidades específicas para cada etapa, incentivando ainda o uso de diferentes recursos e abordagens para o ensino da Astronomia, como aplicativos digitais, mapas celestes e observações no céu.

Diagnóstico 1: Ainda que conteúdos de Astronomia apareçam visceralmente na BNCC, do Ensino Fundamental ao Ensino Médio, o grande desafio é, por meio do ensino e da educação em Astronomia, orientados por princípios éticos, políticos e estéticos traçados pelas Diretrizes Curriculares Nacionais da Educação Básica, construir na educação básica uma formação humana integral, para a construção de uma sociedade justa, democrática e inclusiva.

Diagnóstico 2: Ainda que o Ensino Fundamental seja o terreno mais fértil para a abordagem de temas relacionados à Astronomia na educação básica, este também é o nível de ensino com a maior carência de docentes com uma formação adequada ao tratamento de temas astronômicos.

Diagnóstico 3: O Ensino Médio representa na atualidade uma descontinuidade do processo de letramento científico iniciado no Ensino Fundamental, pois o ciclo prevê a abordagem de apenas três habilidades relacionadas à Astronomia.

Recomendação 1: Transformar as condições físicas e estruturais das escolas públicas do pa-

ís, sobretudo as escolas diferenciadas (quilombolas, indígenas, do campo, entre outras), oferecendo o acesso irrestrito de escolas às condições técnicas e pedagógicas para o seu funcionamento adequado.

Recomendação 2: Ampliar, de forma sistemática, o ensino e a educação da Astronomia na Educação Infantil, levando em conta as necessidades específicas e os campos de experiências desse público.

Recomendação 3: Em articulação com as Instituições de Ensino Superior (IES), MEC e MCTI, garantir a formação inicial e continuada de professores (de ciências) com qualidade, com foco no ensino de disciplinas de Astronomia por meio de alterações curriculares nos cursos de licenciatura e de pedagogia, além da promoção de cursos presenciais e/ou a distância de formação continuada, em nível de extensão e/ou divulgação, evitando a criação ou consolidação de desigualdades sociorraciais, de gênero, regionais ou por outro marcador social.

Recomendação 4: Alterar as estruturas das escolas para garantir, às pessoas discentes, o acesso a livros de Astronomia, Internet, tecnologias digitais, mídias sociais, telescópios e visitas continuadas a museus, planetários e observatórios.

Recomendação 5: Distribuir planetários digitais nas escolas e/ou construir planetários físicos nas regiões do país com mais alta vulnerabilidade social.

Recomendação 6: Garantir, em processo formativos iniciais e continuados de professores, a inclusão de pessoas excluídas historicamente das ciências e criar um Programa Nacional de Apoio ao Ensino de Astronomia na Educação Básica.

Recomendação 7: Assegurar, por meio das IES, que as teorias e as práticas que envolvem o ensino e a educação da Astronomia ampliem as perspectivas epistemológicas para além dos discursos positivistas, hegemônicos e excludentes da construção de conhecimento sobre o Universo.

Recomendação 8: Incentivar, nacionalmente, a produção de livros e outros materiais físicos e digitais que explorem a Astronomia de forma inclusiva e diversa, levando em conta tecnologias assistivas.

Recomendação 9: Fomentar a criação de editais específicos para a promoção do ensino e da educação da Astronomia no país de forma inclusiva e equânime.

Recomendação 10: Criar e fortalecer programas robustos de ensino e educação em Astronomia em projetos escolares diferenciados, como a educação escolar quilombola; a educação escolar indígena; a educação escolar do campo; a educação escolar especial; educação esco-

lar inclusiva; educação profissional e educação de jovens e adultos (EJA), sem perder de vista, em nenhuma delas, a Educação para as Relações Étnico-Raciais no contexto da Astronomia.

Recomendação 11: Garantir, em todas as escolas brasileiras, o ensino de qualidade de Astronomia, ampliando e fortalecendo os programas de pós-graduação (*lato e stricto sensu*) existentes, fomentando o crescimento continuado dos respectivos corpos docentes por meio da abertura frequente de novas vagas para professores.

Recomendação 12: Ampliar e fortalecer o Programa Institucional de Bolsas de Iniciação à Docência (PBID) no país, como foco no ensino e na educação de Astronomia e em articulação com outros campos do conhecimento.

Recomendação 13: Incentivar editais que estimulem a colaboração entre Universidade e Escolas (ensino fundamental e médio), especialmente em regiões periféricas e/ou favelas. Nestes projetos podem ser co-criados novos materiais em colaboração entre professores universitários e das escolas e as crianças.

IV.1.2. Educação Superior

A Educação Superior, por sua vez, compreende tanto as atividades de formação inicial quanto as de formação continuada de professores, bem como a formação de cientistas bachareis/bacharelas. A LDB também estabelece princípios e diretrizes para o ensino superior, incluindo a autonomia universitária, a gestão democrática e a pesquisa.

As graduações são etapas preparatórias em que estudantes recebem formação sólida. Essas formações são ainda incipientes, no país, no que tange a especificidade da Astronomia. Além disso, quando se trata da formação em Física, há ainda carência de, nesses cursos, serem ofertadas disciplinas sólidas com foco em Astronomia e/ou experiências formativas no campo.

Os cursos de atualização, extensão e aperfeiçoamento normalmente derivam de projetos isolados, fruto do trabalho de pesquisadores interessados em fomentar o Ensino e a Educação em Astronomia. As pós-graduações *lato e stricto sensu* são vinculadas às IES e Unidades de Pesquisa e, por isso, mais bem estruturadas e oferecidas com certa regularidade. No entanto, percebe-se que os cursos *lato sensu* em Ensino e Educação em Astronomia, apesar de cumprirem papel social relevante, são incipientes e pouco abrangentes, pois formaram poucos profissionais desde que surgiram; os cursos *stricto sensu*, representados pelos Mestrados Profissionais em Astronomia (MPEA), são oferecidos regularmente, suas matrizes curriculares abrangem temas astronômicos e de ensino. Apesar do bom desempenho dos MPEA, o número de pessoas formadas está aquém do necessário para resolver parte do problema da formação inicial.

Os cursos de pós-graduação em Astronomia/Astrofísica *stricto sensu* são também incipientes, dada as dimensões e o potencial do país.

IV.1.2.1. Graduação

No caso específico da Astronomia, não há cursos de Licenciatura no país. Em termos de bacharelado, há atualmente apenas quatro (4) cursos específicos de graduação em Astronomia e/ou Astrofísica, destacando-se o curso de Bacharelado em Astronomia da UFRJ, o primeiro e mais antigo do país, criado em 1958; o curso de Bacharelado em Astronomia da USP, criado em 2009; o curso de Bacharelado em Física, com ênfase em Astrofísica, da UFRGS, criado em 2010, como parte do processo de expansão das universidades brasileiras; e o curso de Bacharelado em Astrofísica (Física com habilitação em Astronomia) da UFS. Alguns cursos de Bacharelado e Licenciatura em Física do Brasil apresentam, em seus currículos, disciplinas pontuais de Astronomia.

Grande parte das pessoas que trabalham no campo da Astronomia e Astrofísica no Brasil têm, em geral, formação básica em nível de graduação em Física (bacharelado ou licenciatura) e, posteriormente, complementam a formação com estudos de pós-graduação (mestrado e doutorado) na área de Física e/ou Astronomia.

Confrontamo-nos também com uma distorção paradoxal entre as habilidades necessárias à atuação profissional e aquelas aprendidas pelos estudantes que vem a ser candidatos naturais aos programas de pós-graduação: o meio acadêmico requer astrônomos(as) cada vez mais multidisciplinares, capazes de abordar diferentes frentes de atuação em Astronomia, e com habilidades computacionais e algorítmicas de alto nível, mas os cursos de graduação em física, que contribuem com a maioria dos estudantes que ingressam nas pós-graduações em Astronomia, não são ajustados de modo a formar futuros astrônomos(as) multidisciplinares, uma vez que eles se pautam pelas diretrizes curriculares do bacharelado em física, o qual possui suas próprias demandas em termos de habilidades e competências. Paralelamente, o engajamento dos programas de pós-graduação em Astronomia no apoio e/ou na colaboração com os cursos de graduação em Astronomia/Astrofísica é imprescindível para a atualização curricular desses últimos, de modo a preparar o mais eficientemente possível os futuros estudantes de pós-graduação (PNA, 2010).

Além disso, as formações básicas em Física e/ou Astronomia têm sido realizadas completamente alijadas dos grandes problemas nacionais, que envolvem a transformação social do país. Esse é um grande desafio na formação, quase sempre demasiadamente tecnicista, sem abarcar experiên-

cias epistemológicas, filosóficas, metafísicas e estéticas plurais. Vale ainda lembrar que grande parte das profissionais que lecionam ciências no Ensino Fundamental não são formadas em licenciatura em Física. São, majoritariamente, formadas em Matemática e Biologia, o que amplia o abismo das desigualdades quando se trata do domínio de conteúdos relacionados à Astronomia. No estudo recente, conduzido por Slovinski (2022), demonstra-se com base em informações coletadas em bancos de dados nacionais (2019), em sinergia com outros estudos da literatura, que a situação dos pontos da formação de professores de Física no Brasil, particularmente no que diz respeito ao acesso de licenciandos(as) a disciplinas ligadas à Astronomia durante sua formação, é crítica. De acordo com o estudo:

- *25% dos professores foram formados em cursos na modalidade EaD, oferecidos principalmente por IES privadas, onde a oferta é moldada por interesses econômicos e, por isso, se concentram no Centro-Sul brasileiro, a região mais rica do País;*
- *Todas as unidades da federação oferecem ao menos uma licenciatura em Física;*
- *Em média, cada IES entregou menos de 10 professores de Física em 2019, com o melhor cenário sendo observado no sistema EaD das IES privadas, e o pior, no EaD das IES Estaduais;*
- *Sob o ponto de vista das regiões, o maior índice de professores formados por curso se deu no Sudeste (acima da média nacional em todas as categorias de IES), e o pior cenário coube ao Sul. Em termos populacionais, o Nordeste entregou o maior número de licenciados por milhão de habitantes;*
- *Em termos de professores formados, as UF são extremamente relevantes na região Norte; os IF e as IES Estaduais, no Nordeste; e as IES privadas, no Sudeste.*

Quanto ao acesso dos licenciandos a disciplinas de Astronomia nesses mesmos cursos, a investigação concluiu que:

- *25,7% das licenciaturas oferecem disciplinas na forma obrigatória, 36,2% na modalidade opcional, e 38,1% não as oferecem;*
- *As disciplinas obrigatórias são mais frequentemente encontradas nos IF e na região Sul; as optativas, nas UF e na região Nordeste; e a não oferta é mais sentida nas IES privadas e na região Norte;*
- *As UF se destacam ainda pela baixa oferta de disciplinas obrigatórias, o que gera preocupação por sua relevância no número de professores formados;*

- *Os IF se localizam principalmente fora dos grandes centros populacionais, e se destacam na oferta de disciplinas obrigatórias nas regiões Sudeste e Sul, além de disciplinas optativas no Nordeste, gerando um impacto positivo em termos de acesso;*
- *As IES Estaduais distribuem-se de forma irregular e se caracterizam pela não oferta, principalmente pela contribuição da região Nordeste, ainda que no Sudeste e no Sul a oferta supere a não oferta;*
- *As IES privadas são responsáveis por um quarto dos licenciados em 2019, mas projetamos que quase 60% deles não tiveram acesso a disciplinas de Astronomia;*
- *Projetamos que, em 2019, 24,1% dos professores formados no Brasil tiveram acesso a disciplinas de Astronomia de natureza obrigatória, 35,6% de natureza optativa, e 40,3% não tiveram acesso a disciplinas de Astronomia.*
- *Com base em dados de 2020, as licenciaturas que mais permitem o acesso de seus alunos às disciplinas de Astronomia são as que possuem o menor número de professores formados — Física e Ciências Naturais — o que, infelizmente, pouco contribui para modificar o cenário do Ensino de Astronomia no Brasil.*
- *As licenciaturas em Biologia e Química exibiram um panorama semelhante sob o ponto de vista da sua vinculação com o Ensino de Astronomia. Ambas formaram uma quantidade considerável de professores em 2020, mas somente uma ínfima parcela deles puderam ter acesso a disciplinas de Astronomia durante sua formação inicial.*

Diagnóstico: Levando-se em conta (i) o impacto, a robustez e as demandas de pesquisa relacionadas à Astronomia no Brasil e (ii) também a existência de centenas de cursos de Bacharelado em Física e outras centenas de cursos de Licenciatura em Física no Brasil, conclui-se que o número de cursos de Bacharelado em Astronomia é irrisório e, os de Licenciatura, inexistentes. Além disso, o oferecimento de disciplinas de Astronomia, nesses cursos, na federação, é limitado, perpassando ainda por severas disparidades regionais.

Recomendação 1: Tornar a carreira docente atrativa para jovens, criando plano de carreira e salários competitivos.

Recomendação 2: Ampliar a abertura de concursos públicos para a contratação de astrônomos/as nas variadas Unidades de Pesquisa e de IES no país, atentando-se às disparidades regionais existentes.

Recomendação 3: Projetar e executar estudo detalhado sobre o impacto da criação de cursos

de Licenciatura em Astronomia no Brasil, levando em conta o papel visceral da Astronomia na BNCC, fugindo de ideias simplistas sobre a prática profissional docente (aplicação de procedimentos, regras e meios técnicos para atingir fins) e de uma concepção positivista do conhecimento científico, que sustenta o modelo racionalista técnico.

Recomendação 4: Fortalecer, nos cursos de Bacharelado e Licenciatura em Física, Química, Biologia, Geografia, Matemática, e áreas afins, a presença de disciplinas e projetos de ensino, pesquisa e divulgação em Astronomia, fugindo de ideias simplistas sobre a prática profissional docente e de concepções do modelo racionalista técnico.

Recomendação 5: Fomentar a diversificação da formação de profissionais em Física/Astronomia para atuação em Divulgação das Ciências, em planetários, museus, observatórios, IES e Unidades de Pesquisa.

Recomendação 6: Garantir, em todos os programas de graduação em Astronomia e Astrofísica do país, políticas de ações afirmativas, de forma a garantir o ingresso e a permanência de estudantes sujeitos das políticas.

Recomendação 7: Estimular as instituições de ensino em Astronomia a flexibilizar seus currículos no sentido de permitir uma formação multidisciplinar, levando em conta os constantes avanços tecnológicos e de pesquisa e as agendas de inclusão, justiça e diversidade.

Recomendação 8: Ampliar e flexibilizar os currículos da graduação, em que disciplinas sobre questões sociais da ciência sejam incluídas (sociologia, filosofia, história, divulgação e extensão), fortalecendo a relação entre Astronomia e sociedade e garantindo uma formação mais integral de profissionais nas áreas de divulgação e extensão.

IV.1.2.2. Pós-Graduação (Acadêmica)

Não há como expandir o número de cursos, docentes e departamentos de Astronomia pelo Brasil afora sem a formação na pós-graduação, em alto nível, em todas as áreas possíveis e levando em conta as questões de justiça social, racial, cognitiva e de gênero.

O número de cursos de pós-graduação acadêmica em Astronomia e Astrofísica é (ainda) extremamente limitado no Brasil, levando em conta o potencial do país e o seu número de IES. Há cursos de pós-graduação em Astronomia e/ou Astrofísica principalmente na Bahia (UESC), no Espírito Santo (UFES), em Minas Gerais (UFMG), em São Paulo (USP, UNESP, UNICID, Mackenzie, UNIVAP, INPE), no Rio de Janeiro (CBPF, ON, UFRJ, INPE), no Rio Grande do Sul (UFRGS, UFSM, FURG), em Sergipe (UFS), no Paraná (UTFPR, UEL), em Santa Catarina (UFSC), entre outros.

Cursos de pós-graduação voltados ao Ensino/Educação de Astronomia ainda têm pouca oferta no Brasil e, em geral, estão vinculados, como áreas de conhecimento, em programas de Pós-Graduação em Ensino de Física (como no caso da UFRGS, USP, entre outras instituições), Ciências e/ou em Departamentos de Educação. Neste Universo, especializações do tipo *lato sensu* são as mais comuns (para dados atualizados, sugerimos a leitura de Slovinski, 2022).

Diagnóstico 1: O número de programas de pós-graduação em Astronomia e Astrofísica no Brasil, sobretudo em nível *stricto sensu*, é ainda incipiente e altamente concentrado no sul-sudeste. A área de pesquisa em Ensino/Educação em Astronomia é fracamente aportada no campo macro das pesquisas em Astronomia no país.

Diagnóstico 2: A pesquisa em Educação em Astronomia é ainda majoritariamente publicada em português, concentrando-se basicamente em três dos principais periódicos nacionais (Revista Brasileira de Ensino de Física; Caderno Brasileiro de Ensino de Física; Revista Latino Americana de Educação em Astronomia), produzidos no sul-sudeste. As teses e dissertações acadêmicas, por sua vez, também se expandiram significativamente ao longo das últimas duas décadas, e esse crescimento catapultou, de certa forma, a quantidade de artigos científicos, com a publicação dos resultados de tais pesquisas.

Diagnóstico 3: A participação da Astronomia brasileira em consórcios internacionais (com financiamentos federais) e em projetos em rede de grande porte, como os INCTs/CNPq, têm diminuído ao longo dos anos, o que desacelera os programas de pós-graduação em Astronomia e Astrofísica e desestimula a produção e criação acadêmicas e científica.

Diagnóstico 4: Segundo dados de 2022, dez das 51 IES que vinculam pesquisadores e pesquisadoras da Educação em Astronomia responderam por 60% dos trabalhos publicados, sendo que as cinco IES mais destacadas se localizam no estado de São Paulo. A UFRGS, apesar de possuir departamentos de Astronomia e Ensino de Física reconhecidos nacionalmente por sua importância, não consta nem entre as dez IES mais destacadas na produção de teses e dissertações acadêmicas voltadas à Educação em Astronomia.

Recomendação 1: Ampliar a oferta de cursos de pós-graduação em Astronomia e Astrofísica no Brasil, de forma a solucionar os problemas de disparidade regional/institucional, bem como fortalecer os programas que já existem com a oferta sistemática de bolsas.

Recomendação 2: Garantir, em todos os programas de pós-graduação em Astronomia e Astrofísica do país, políticas de ações afirmativas, de forma a garantir o ingresso e a permanên-

cia de estudantes sujeitos das políticas.

Recomendação 3: Assegurar a mobilidade nacional e internacional de discentes vinculados/às aos programas de pós-graduação em Astronomia e Astrofísica.

Recomendação 4: Criar projetos novos de Especialização em Astronomia e fortalecer as propostas existentes no país.

Recomendação 5: Fomentar a criação de programas de pós-graduação e/ou áreas de pesquisa em Ensino e Educação em Astronomia no país.

Recomendação 6: Estimular a circulação de pessoas e suas produções científicas no campo da Educação em Astronomia no âmbito internacional.

Recomendação 7: Estimular a abertura de editais específicos para fomentar a colaborações internacionais no campo da Educação em Astronomia, sobretudo fortalecendo as relações Sul-Sul.

Recomendação 8: Criar, no âmbito da SAB, grupos de estudos especializados para executar, acompanhar e avaliar o Plano Nacional de Astronomia em vista a solucionar os problemas estratégicos da comunidade no âmbito do ensino, da educação, da divulgação e da pesquisa em Astronomia.

Recomendação 9: Fortalecer os periódicos nacionais, promovendo a sua internacionalização.

Recomendação 10: Prover uma verba específica para permitir que bacharelados(as) em Astronomia ou de áreas afins realizem estágios em laboratórios das Unidades de Pesquisa do MCTI (LNA, INPE, ON, MAST, CBPF etc.), como parte de sua formação na área experimental, instrumental e computacional, visando complementar a disponibilidade em infraestrutura de laboratórios já oferecida pelas instituições responsáveis pelos cursos.

IV.1.2.3. Pós-Graduação (Profissional)

Os primeiros cursos de Mestrados Profissionais (MPs) voltados para professores da Educação Básica surgem no Brasil em 2002, vinculados ao comitê de área de Ensino na Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à época denominado comitê de Ensino de Ciências e Matemática. Enquanto os Mestrados Acadêmicos (MAs) estão mais direcionados à formação de pesquisadores, os MPs visam à qualificação de *professores-pesquisadores* que atuam em diferentes componentes curriculares nos espaços escolares (ainda que possam também atuar em IES), ou seja, enquanto os MAs estão focados na pesquisa básica, os MP diferem-se na medida em

que sua finalidade principal é elaborar, desenvolver e aplicar um *produto educacional* voltado à sala de aula, e que possa ser utilizado e replicado por outros professores.

Há, no Brasil, os Mestrados Profissionais Nacionais em distintas áreas (Física, Matemática, História, entre outras), sendo que a política foi inaugurada em 2002 com a criação do Mestrado Profissional em Ensino de Física na UFRGS. No Brasil, atualmente são encontrados apenas dois cursos de pós-graduação *stricto sensu*, na forma de Mestrado Profissional em Astronomia (MPEA): o da UEFS e o da USP, ambos oferecidos regularmente desde 2013, ou seja, não estão ligados ao Programa Nacional de Mestrado Profissional em Ensino de Física (MNPEF) da Sociedade Brasileira de Física. Os MPEA têm contribuído de forma visceral para o desenvolvimento do país.

No entanto, é importante ressaltar que os MPs Nacionais, apesar de sua importância para a política de formação continuada de professores, têm sofrido várias críticas na literatura especializada (Slovinski, 2022).

Além disso, os produtos oriundos dos MPs em nada têm buscado dialogar, por exemplo, com as políticas de formação continuada que visam à inserção das Diretrizes Curriculares Nacionais para a Educação das Relações Étnico-Raciais na educação básica entre outras políticas viscerais para compreender os grandes problemas do país, como as questões socioambientais.

Há, no entanto, autores que apresentam uma visão antagônica a esta, discutindo, por exemplo, que boa parte dos problemas associados aos MP não são exclusivos deles, mas sim comuns às próprias políticas impostas à Educação no Brasil, argumentando ainda que a maioria esmagadora de egressos de um Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências permaneceu na Educação Básica após a conclusão do mestrado. No momento, não há no Brasil cursos de Doutorado Profissionais em Astronomia.

Diagnóstico 1: Em termos de Ensino de Astronomia, os MPEA são o mais alto patamar existente no sistema de educação do Brasil. No entanto, há ainda questões viscerais na formação e produção dos(as) docentes dos cursos de MPEA que precisam ser ajustadas.

Diagnóstico 2: Nem mesmo iniciativas como os MPEA parecem ser suficientes para mudar o panorama atual do Ensino de Astronomia, pois a formação continuada no Brasil é deficiente e paliativa, uma vez que não resolve o problema da formação docente.

Diagnóstico 3: Com raras exceções, a partir de trabalhos localizados, os MPs do país, e os de Astronomia não são uma exceção, são ainda majoritariamente arquitetados a partir do Modelo de Déficit, sem dialogar com as políticas de inclusão, equidade e diversidade para a formação continuada docente.

Recomendação 1: Criar, fortalecer e ampliar a produção em rede dos MPEA.

Recomendação 2: Assegurar que a produção e a criação acadêmica e científica de docentes e supervisores(as) dos trabalhos finais dos(as) discentes dos cursos de MPEA sejam compatíveis com o campo do Ensino e Educação em Astronomia, para além de perspectivas conteudistas e epistemologias hegemônicas.

Recomendação 3: Criar repositórios nacionais em que os produtos e criações oriundos dos MPEA e dos programas e projetos das IES (PIBID, extensão, etc) sejam facilmente acessados por docentes de todo país.

Recomendação 4: Implantar cursos de Doutorado Profissionais em Astronomia.

Recomendação 5: Criar, com foco em Astronomia em diálogo com outros campos de conhecimento, Cursos de **Atualização** (com carga mínima de 40 horas); Cursos e Programas de **Extensão** (com carga horária variável, conforme seus projetos); Cursos de **Aperfeiçoamento** (com carga mínima de 180 horas) e Cursos de pós-graduação *lato sensu* de **Especialização** (com carga horária mínima de 360 horas).

IV.1.3. Curricularização da Extensão Universitária — o potencial da Astronomia

A Extensão Universitária, entendida como função indissociável do ensino e da pesquisa, ocupa papel central na consolidação de uma universidade pública socialmente referenciada. A curricularização da extensão, conforme estabelecido pela Resolução CNE/CES nº 7/2018, exige das instituições de ensino superior uma reconfiguração de suas práticas formativas, integrando as dimensões acadêmica e social dos saberes.

A Extensão visa permitir que a Universidade e a sociedade comuniquem-se e compartilhem saberes, conhecimentos e valores. Como financiadores da Universidade pública, gratuita e democrática, é direito de cada cidadão ter acesso ao conhecimento produzido nas universidades e é dever de cada profissional que nelas laboram, promover a difusão deste conhecimento ao público, seja através de atividades artísticas, científicas, cursos, eventos, palestras ou quaisquer outras que sejam inclusivas à sociedade.

Nesse contexto, a Astronomia se destaca como campo privilegiado de atuação extensionista, dada sua natureza interdisciplinar, seu apelo cultural e sua capacidade de articulação com distintos públicos e realidades sociais.

A inserção da extensão nos currículos dos cursos de graduação deve considerar os seguintes dispositivos legais:

- Resolução CNE/CES nº 7/2018: Institui as Diretrizes para a Extensão na Educação Superior.

- Plano Nacional de Educação (Lei nº 13.005/2014).
- Diretrizes Curriculares Nacionais para os cursos de graduação.
- Documento de Referência para a Curricularização da Extensão (FORPROEX, 2018).
- Referenciais institucionais das IFES (PDI, PPCs, regulamentos internos).

IV.1.3.1. Potencial da Astronomia como Ação Extensionista

A Astronomia possui um enorme potencial para a extensão universitária, pois permite:

- Transversalidade de saberes entre as ciências, artes, tecnologias e humanidades.
- Diálogo entre saberes científicos e populares.
- Ações em contextos formais e não formais de educação.
- Democratização do acesso à ciência, contribuindo para a formação cidadã.

IV.1.3.2. Astronomia e os Distintos Públicos

A extensão em Astronomia permite alcançar públicos historicamente marginalizados dos espaços de formação científica:

- *Infâncias*: projetos lúdicos e sensoriais em creches e escolas de educação infantil.
- *Juventudes e adultos*: oficinas, cursos livres e observatórios em contextos escolares e comunitários.
- *Terceira idade*: projetos intergeracionais que valorizam memórias e saberes astronômicos culturais.
- *Periferias urbanas, aldeias, quilombos, presídios*: vivências que promovem ciência cidadã e empoderamento social.
- *Pessoas com deficiência*: física, visual, auditiva, intelectual, neurodivergência, etc.

IV.1.3.3. Curricularização da Extensão em Cursos com Foco em Astronomia

A curricularização requer:

- Inclusão de componentes curriculares com carga horária extensiva vinculada a ações com a comunidade.

- Projetos de extensão permanentes com temáticas astronômicas.
- Vinculação entre práticas de extensão e componentes como Estágio Supervisionado, TCC e Atividades Complementares.

Diagnóstico 1: Baixa articulação entre os grupos de pesquisa e as comunidades escolares/populares.

Diagnóstico 2: Ausência de formação docente para a extensão e para o trabalho com públicos diversos.

Diagnóstico 3: Dificuldades institucionais na regulamentação e reconhecimento das ações extensionistas.

Recomendação: à SAB: criar uma Comissão de Extensão em Astronomia, fomentando formação, difusão de boas práticas e parcerias com movimentos sociais e grupos minoritários (coloquei mas nao sei se cabe aqui); **ao MEC (SESU/SEB):** incluir a extensão em Astronomia nos editais de fomento à educação básica, formação docente e divulgação científica; **ao MCTI:** apoiar a integração entre os projetos de divulgação da ciência e as IES, com ênfase em projetos que atuem com populações vulnerabilizadas; incentivar projetos de divulgação científica cultural, articulados a redes de museus e espaços de ciência e cultura; **às Agências de fomento (FAPs, CNPq):** criar bolsas de extensão para alunos de graduação e alunos de ensino básico, tal como fazem para iniciação científica e IC Júnior.

IV.1.4. Ensino da Astronomia em perspectiva inclusiva — Pessoas com Deficiências (PcD)

IV.1.4.1. Astronomia para PcD Visual (PcDV)

O Ensino de Astronomia para PcDV apresenta desafios específicos.

Diagnóstico: Grande parte do conteúdo produzido em Astronomia é visual e baseado em imagens. Algumas das principais dificuldades encontradas no ensino de Astronomia para pessoas cegas são a ausência de representações visuais, a dificuldade de visualização de conceitos abstratos, a falta de material tátil desenvolvido por especialistas e a falta de descrições adequadas.

Segundo Figueira (2019) em geral, nas escolas, o ensino de Astronomia é trabalhado de forma expositiva, tendo o livro como principal ferramenta metodológica. Dessa forma, o ensino de Astronomia para alunos com deficiência visual parece algo de difícil alcance no modo tradicional de

ensino.

Recomendação: A utilização de materiais táteis é uma alternativa para tornar o aprendizado da Astronomia mais acessível e envolvente para pessoas com deficiência visual. É possível criar modelos táteis de planetas, estrelas, galáxias e outros corpos celestes, além de mapas e diagramas para ajudar na compreensão dos movimentos e relações entre os objetos do Universo. Materiais didáticos acessíveis, como maquetes, recursos grafotáteis (cadernos) e em áudio são fundamentais para auxiliar na compreensão de conceitos em Astronomia por PCD visual.

Dickman e Ferreira (2008), constataram que o processo de ensino-aprendizagem em ciência para alunos cegos têm significativa melhora com a experimentação e utilização de materiais táteis-visuais. No entanto, muitas vezes não há materiais acessíveis disponíveis para esse fim, pois há carência no desenvolvimento de atividades na temática inclusão que contribuam para a formação inicial dos professores.

IV.1.4.2. Astronomia para PcD Auditiva (PcDA)

Na questão da educação de PcDA,

Diagnóstico: Há ausência de vocabulário apropriado para descrever fenômenos astronômicos. As palavras com tradução para libras restringem-se a palavras bastante básicas, insuficientes para ensinar Astronomia. Por exemplo, no site do Instituto Nacional de Ensino de Surdos (INES) há um dicionário de libras (<https://www.ines.gov.br/dicionario-de-libras/>), no entanto nem o nome dos planetas do sistema solar consta lá. Há uma grande demanda para formalizar as palavras usadas em Astronomia.

Recomendação: O uso de materiais didáticos adaptados é crucial no processo de ensino e aprendizagem de alunos com deficiência. É importante incentivar que alunos dos cursos de licenciatura desenvolvam materiais direcionados a esse público. Adicionalmente, institutos especializados como o Instituto Benjamin Constant ou o Instituto Nacional de Educação de Surdos, ambos no Rio de Janeiro e ambos públicos, oferecem periodicamente cursos presenciais e remotos, direcionados ao desenvolvimento de material inclusivo.

IV.2. Divulgação e Popularização da Astronomia

No mundo contemporâneo, a Astronomia permanece como uma das mais potentes ciências básicas para fomentar o interesse científico. Neste contexto, a divulgação científica em Astronomia deve ser compreendida como uma prática estratégica, capaz de mobilizar conhecimento, fortalecer o pensamento crítico e ampliar a participação social na ciência.

Os mais recentes resultados de pesquisas realizadas pelo Ministério da Ciência e Tecnologia do Brasil no âmbito da percepção de ciência indicam que grande parte da população brasileira (> 95%) nunca visitou espaços científico-culturais por estes não existirem em suas cidades. Paradoxalmente, grande parte da população brasileira se diz interessada por ciência, ainda que tenham dificuldade de nomear cientistas brasileiros.

O Brasil instituiu, recentemente, o Programa Nacional de Popularização da Ciência — Pop Ciência²¹, com o objetivo principal *de desenvolver a cultura científica e estimular a prática da ciência, tecnologia e inovação para promover a inclusão social e reduzir as desigualdades sociais*. São seus princípios basilares: (i) a reflexão crítico-criativa que parte da realidade concreta para a transformação do mundo; (ii) a democratização do conhecimento científico; (iii) a inclusão social, a acessibilidade e a justiça social; (iv) a valorização da cidadania e do diálogo como meio de engajamento do público na ciência; (v) a valorização da cultura científica e o fortalecimento da educação formal e não formal; (vi) a promoção da informação e do combate à desinformação e ao negacionismo científico; (vii) a promoção do desenvolvimento sustentável e do enfrentamento das mudanças climáticas; (viii) o respeito à diversidade e à igualdade de gênero; (ix) o combate ao racismo e a todas as formas de discriminação; (x) a valorização dos saberes tradicionais e suas tecnologias; e (xi) o enfrentamento das desigualdades regionais.

Entende-se, assim, que a Popularização da Astronomia, expressão aqui utilizada para dar conta de uma multiplicidade de experiências de popularização vivenciada na comunidade astronômica brasileira (divulgação científica, difusão, disseminação, comunicação pública da ciência, jornalismo científico, entre outros), é o ato de difundir e divulgar a Astronomia para toda sociedade, levando em conta os desafios sociais, ambientais, econômicos e tecnológicos, sem perder de vista as questões de inclusão, equidade e diversidade, não somente na Astronomia, mas também dos públicos que são alcançados em cada uma das atividades de popularização realizadas no país. Toda e qualquer política de popularização da Astronomia deve estar baseada nos princípios basilares da POP Ciência.

No Brasil, a divulgação de Astronomia tem sido realizada por uma diversidade de atores. Um estudo recente sobre as ações durante o período de distanciamento social mostrou que estudantes de graduação e pós-graduação das áreas das exatas, junto a astrônomos e astrônomas amadores(as), lideraram as iniciativas no início da pandemia de covid-19 (Penteado et al., 2021). Já os(as) astrônomos(as) profissionais e os(as) divulgadores(as) institucionais — como jornalistas científicos e educa-

21 Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/decreto-n-11.754-de-25-de-outubro-de-2023-518991101>. Acesso: 02/06/2025.

dores(as) em museus e planetários — tiveram participação menos expressiva. Esse cenário evidencia que grande parte das ações de divulgação é conduzida por pessoas sem formação específica em comunicação pública da ciência, o que limita a capacidade de lidar com a diversidade de públicos e contextos socioculturais.

Diagnóstico 1: Distintos estudos da literatura especializada têm destacado o papel da Astronomia como uma das ciências básicas mais instigantes, que atrai públicos variados, despertando a curiosidade pela ciência e as conexões cósmicas profundas existentes em distintos contextos sociais e culturais.

Diagnóstico 2: Formações (iniciais, continuadas ou cursos livres) dedicadas para os agentes que realizam a divulgação e popularização da Astronomia no país são incipientes.

Recomendação 1: MCTI: intensificar recursos para a Semana Nacional de C&T, Olimpíadas Científicas de Astronomia, Feiras Científicas e Museus e Centros de C&T com foco na Astronomia, compreendendo o papel interdisciplinar e impactante que a Astronomia exerce nos currículos escolares, nos espaços culturais científicos e na vida das pessoas, que estão conectadas com o céu (e suas relações) ao longo de suas vidas. Entende-se que Astronomia fomenta a ciência, a tecnologia e a inovação como estratégias fundamentais de desenvolvimento, criando e fortalecendo outras linguagens nas ciências, explorando os seus aspectos interculturais, interdisciplinares e transdisciplinares.

Recomendação 2: Ampliar políticas públicas para a educação e a popularização da Astronomia, levando em conta as perspectivas de inclusão, equidade e diversidade, que identifiquem, apoiem e reconheçam as ações existentes no país.

Recomendação 3: Criar políticas que promovam ações integradas com países africanos, latinos e do Sul Global, fomentando programas de cooperação internacional que visem o compartilhamento de práticas de popularização da Astronomia, bem como a formação de educadores(as) e promotores(as) da cultura científica.

Recomendação 4: Estabelecer políticas de financiamento regular e sistemático para a popularização da Astronomia por meio da criação e fortalecimento de programas estratégicos para o desenvolvimento da área.

Recomendação 5: Criar, nas IES e/ou unidades de pesquisa em ciências físicas, de cursos de formação em divulgação científica em Astronomia por meio de cursos de aprimoramento, aperfeiçoamento, graduação, extensão, especialização, pós-graduação, formação inicial e continuada de professores com foco na divulgação em Astronomia; formação de promotores

culturais para atividades em museus, centros de ciências, planetários e observatórios.

Recomendação 6: Criar programas específicos de bolsas para atuação de recém-formados para atuação na divulgação da Astronomia no país.

Recomendação 7: Descentralizar, do Sul-Sudeste, os espaços culturais de divulgação em Astronomia, pela criação de planetários, observatórios e centros de ciência de médio e grande porte em cada um dos estados da federação.

Recomendação 8: Criar repositórios para a organização das iniciativas que são realizadas no país em divulgação em Astronomia.

Recomendação 9: A profissionalização da divulgação em Astronomia deve ser estimulada, tanto para que se estabeleçam processos e ações de qualidades no contato com a sociedade, quanto para o favorecimento da diversificação de atuação dos profissionais do campo.

IV.2.1. Temas Centrais na Divulgação Científica em Astronomia

IV.2.1.1. Comunicação Científica

Diagnóstico: As descobertas astronômicas geram grande interesse midiático. Pode ser a identificação de um novo exoplaneta com condições habitáveis, a captura da imagem de um buraco negro ou qualquer outro evento que atraia as atenções da mídia. Tais avanços, embora tecnicamente complexos, carregam forte apelo simbólico e cultural. É interessante notar que mesmo eventos astronômicos periódicos como eclipses, chuvas de meteoros ou mesmo os solstícios e equinócios despertam interesse da imprensa e do público em geral. A divulgação científica nesse campo tem a missão — muitas vezes difícil — de traduzir esses resultados para uma linguagem compreensível, mas sem perder de vista sua relevância científica e suas implicações mais amplas. O objetivo nunca deveria ser apenas informar, mas cultivar a curiosidade, contextualizar os achados e demonstrar como a ciência se constrói. O que se constata é que faltam contextualização e profundidade na maior parte das coberturas jornalísticas sobre o tema.

Recomendação 1: Estabelecer canais diretos entre pesquisadores e jornalistas especializados.

Recomendação 2: Produzir materiais de apoio (infográficos, minitextos explicativos, glossários) que acompanhem comunicados de descobertas.

Recomendação 3: Formar cientistas para atuar como fontes confiáveis e acessíveis à imprensa.

sa.

Recomendação 4: Reforçar a contextualização histórica, cultural e epistemológica das descobertas.

Recomendação 5: Estimular a formação de jornalistas especializados em jornalismo científico.

IV.2.1.2. Sessões Públicas de Observação do Céu

Diagnóstico: Poucas experiências são tão marcantes quanto observar diretamente um céu estrelado, especialmente em tempos de crescente desconexão das pessoas com o ambiente natural. A experiência pessoal de ter acesso a um telescópio e olhar com o próprio olho objetos celestes tais como a Lua, os anéis de Saturno ou as luas de Júpiter, é inesquecível e completamente distinta daquela de ver de forma passiva fotos destes mesmos objetos numa tela de computador ou telefone celular. Sessões públicas com telescópios podem ser periódicas, para marcar eventos astronômicos como eclipses ou chuvas de meteoros, podem ser parte das atividades em planetários ou centros de ciência, ou mesmo celebrações como o Dia da Astronomia. Tais sessões oferecem ocasiões privilegiadas para despertar o interesse do público e criar vínculos afetivos com a ciência. Apesar do forte impacto emocional e educativo, essas ações ainda são esporádicas e, muitas vezes, dependem do esforço voluntário de astrônomos ou grupos amadores.

Recomendação 1: Institucionalizar e calendarizar sessões públicas, integrando-as a eventos astronômicos previsíveis.

Recomendação 2: Criar parcerias das instituições especializadas com prefeituras e secretarias de cultura, bem como parcerias com grupos amadores para ampliar o alcance dessas atividades.

Recomendação 3: Fomentar ações em áreas de vulnerabilidade social e regiões de menor acesso a espaços científicos.

IV.2.1.3. Enfrentamento à desinformação

O fenômeno da desinformação representa uma ameaça concreta à democracia e à vida, especialmente por disseminar conteúdos negacionistas e anticiência, e por outras, extremistas, com grande velocidade e capilaridade nas redes sociais e aplicativos de mensagens. Muitas vezes, estes processos estão atrelados a projetos intencionais e de cunhos ideológicos e políticos, que se valem das mídias digitais para ampliar seu alcance. No campo da Astronomia, a desinformação assume formas

variadas — desde equívocos por desconhecimento, passando por conteúdos pseudocientíficos, teorias da conspiração e sensacionalismos. Frequentemente a desinformação nesta área se apoia no uso distorcido de imagens astronômicas que, por conta do desconhecimento geral sobre esses fenômenos, ganham interpretações exageradas.

De acordo com um estudo recente de Marti, Almeida e Spinelli (2024), as notícias falsas em Astronomia compartilham características típicas desse tipo de conteúdo nas mídias digitais: (i) são atrativas, mas com estética confusa; (ii) utilizam títulos sensacionalistas que apelam ao emocional, funcionando como iscas de cliques; (iii) recorrem a elementos gráficos como caixa alta ou fontes ampliadas para criar um senso de urgência; e (iv) invocam a autoridade de "especialistas" ou usam uma linguagem com aparência científica para conferir legitimidade à informação. Essas características, presentes nas narrativas tendenciosas sobre Astronomia, oscilam entre as diversas formas de desinformação, podendo ser disseminadas tanto por mídias digitais quanto por veículos tradicionais de comunicação.

Diagnóstico 1: Teorias conspiratórias e conteúdos pseudocientíficos se disseminam com facilidade, muitas vezes travestidos de informação legítima. A popularidade da Astronomia infelizmente convive com a disseminação de conteúdos pseudocientíficos, de teorias conspiratórias ou de antigas superstições apresentadas como ciência. Neste cenário, o papel da divulgação científica deve ser tanto reativo quanto propositivo: é necessário corrigir equívocos com firmeza, mas também construir narrativas mais sólidas, baseadas em evidências e abertas ao diálogo, pois a ausência de respostas claras contribui para a desconfiança pública na ciência. A construção da confiança pública na ciência passa, necessariamente, por essa mediação crítica, porém sempre respeitosa.

Recomendação 1: Produzir conteúdos educativos em linguagem acessível que refutem mitos com base em evidências.

Recomendação 2: Monitorar redes sociais e plataformas digitais para responder rapidamente a boatos com alto alcance.

Recomendação 3: Promover campanhas regulares de alfabetização científica, especialmente em períodos de maior circulação de desinformação.

Recomendação 4: Estimular a empatia e o respeito nos debates, evitando posturas agressivas ou excludentes.

Recomendação 5: Incentivar cursos de formação de educadores na temática da alfabetização

mediática e desinformação em Astronomia.

IV.2.1.4. Dimensões históricas e culturais

Diagnóstico: Há uma tendência a privilegiar uma visão eurocêntrica e tecnocientífica da Astronomia, negligenciando os saberes tradicionais e as expressões culturais ligadas ao céu. Os povos indígenas, comunidades quilombolas, populações rurais e tradicionais carregam cosmovisões próprias e sofisticadas relações com o céu, muitas delas associadas a ciclos naturais como as estações climáticas ou as fases da Lua. Reconhecer e valorizar esses saberes é fundamental para uma divulgação inclusiva e contextualizada. Além disso, interseções com a arte, a música, o cinema e a literatura ampliam o alcance e a potência comunicativa da ciência astronômica.

Recomendação 1: Integrar conteúdos sobre cosmovisões indígenas, afro-brasileiras e de populações tradicionais nas ações de divulgação.

Recomendação 2: Estimular projetos interdisciplinares que cruzem ciência, arte, história e cultura.

Recomendação 3: Estabelecer parcerias com lideranças comunitárias para co-criação de conteúdos.

Recomendação 4: Valorizar e preservar a memória astronômica local e regional.

IV.2.1.5. Política Espacial e Desenvolvimento Tecnológico

Diagnóstico: A relevância estratégica da Astronomia e da pesquisa espacial para o desenvolvimento tecnológico ainda é pouco compreendida pela sociedade e subestimada por gestores públicos. Não se pode perder de vista que, muito além do estudo do Cosmos, a Astronomia impulsiona inovações tecnológicas com impacto direto na vida cotidiana. Sensores, algoritmos, computadores de alto desempenho, sistemas ópticos e técnicas de imageamento originalmente desenvolvidos para fins astronômicos, encontram aplicações em áreas como medicina, agricultura e segurança. Ao comunicar e salientar esses vínculos, a divulgação científica contribui para evidenciar a relevância estratégica da pesquisa espacial e reforçar o debate sobre a necessidade de investimentos públicos em ciência e tecnologia.

Recomendação 1: Destacar os impactos positivos da Astronomia em áreas aplicadas (medicina, segurança, agricultura, etc.).

Recomendação 2: Inserir a Astronomia no debate público sobre inovação e soberania tecno-

lógica.

Recomendação 3: Produzir materiais que expliquem, de forma clara, os retornos sociais dos investimentos em pesquisa espacial.

Recomendação 4: Apoiar ações de lobby científico e defesa das iniciativas científicas junto a legisladores.

IV.2.1.6. Conscientização Ambiental e Poluição Luminosa

Diagnóstico: A intensificação da urbanização e o uso excessivo de iluminação artificial têm provocado uma crescente degradação da visibilidade do céu noturno. Esse fenômeno, conhecido como poluição luminosa, afeta negativamente não apenas a prática da Astronomia, mas também os ciclos naturais de diversos ecossistemas e os ritmos biológicos humanos. No Brasil, esse problema ainda é subestimado tanto pelo poder público quanto pela sociedade civil. Além disso, o desconhecimento sobre os impactos ambientais da poluição luminosa e sobre as possibilidades de mitigação limita ações educativas e de preservação do patrimônio celeste. Ainda neste particular, as temáticas da subárea da Astrobiologia permitem reflexões sobre as condições biológicas necessárias para a existência da vida na Terra e no Cosmos, e portanto, permitem uma nova narrativa para abordagem das mudanças climáticas que ocorrem em nosso planeta.

Recomendação 1: Promover campanhas de conscientização pública sobre os efeitos da poluição luminosa e das mudanças climáticas, integrando a Astronomia a pautas ambientais e de sustentabilidade urbana.

Recomendação 2: Incentivar a adoção de práticas e legislações voltadas à redução do excesso de iluminação artificial, como o uso de luminárias direcionadas e iluminação de menor intensidade.

Recomendação 3: Estimular a criação e a divulgação de projetos de astroturismo como estratégia de educação ambiental, valorização cultural e desenvolvimento econômico sustentável.

Recomendação 4: Fomentar iniciativas interdisciplinares que unam astrônomos, geógrafos, biólogos, fotógrafos e comunidades locais, especialmente em áreas de unidades de conservação com potencial para a observação do céu.

Recomendação 5: Ampliar estudos e políticas públicas voltadas à proteção do céu noturno como patrimônio natural e cultural, considerando experiências bem-sucedidas em parques e

áreas protegidas brasileiras.

IV.2.2. Boas práticas na comunicação com a Imprensa e o público

IV.2.2.1. Linguagem acessível e estilo envolvente

Diagnóstico: Com frequência, a principal barreira entre o conhecimento científico e o público não especializado é a linguagem. Cabe ao cientista como divulgador e/ou ao jornalista especializado evitar jargões, empregar analogias, utilizar metáforas eficazes e recorrer a exemplos cotidianos. Todas estas são estratégias que tornam a comunicação mais fluida. É essencial sempre adaptar o discurso aos diferentes públicos, porém sem abrir mão do rigor conceitual. A boa divulgação científica deve não apenas informar, mas também encantar e mobilizar.

Recomendação 1: Incentivar o uso de metáforas, analogias e narrativas que encantem sem sacrificar o rigor.

Recomendação 2: Produzir materiais adaptados a diferentes perfis de público.

Recomendação 3: Estimular a experimentação estética e criativa nas ações de divulgação.

IV.2.2.2. Formação dos cientistas como comunicadores

Diagnóstico: Nem todos(as) os(as) cientistas se sentem confortáveis em situações de comunicação pública, o que é compreensível. No entanto, habilidades de comunicação são cada vez mais necessárias e podem ser aprendidas. A maioria dos cientistas não recebe formação em comunicação pública e se sente despreparada para interagir com a imprensa ou com grandes audiências.

Recomendação 1: Implementar cursos regulares de media training e divulgação científica nas instituições de pesquisa.

Recomendação 2: Criar grupos de pesquisadores-embaixadores da ciência com preparo específico para falar em público.

Recomendação 3: Incentivar a participação de cientistas em eventos abertos e atividades de extensão.

Recomendação 4: Favorecer a criação de assessorias de imprensa especializadas em Astronomia.

IV.2.2.3. Uso estratégico de recursos visuais e multimídia

Diagnóstico: A Astronomia possui enorme apelo visual, mas esse potencial é subexplorado em muitas iniciativas. Imagens de alta resolução, vídeos, simulações e infográficos têm gran-

de poder de impacto e engajamento. A produção de conteúdo audiovisual, especialmente para plataformas digitais, amplia o alcance da divulgação e estimula o interesse em diferentes faixas etárias. O desafio é aliar beleza estética a precisão científica no uso destes recursos.

Recomendação 1: Investir na produção de vídeos curtos, simulações e infográficos adaptados às plataformas digitais.

Recomendação 2: Criar bancos de imagens de uso livre com materiais de qualidade.

Recomendação 3: Formar equipes multidisciplinares para integrar ciência, design e narrativa visual.

IV.2.2.4. Trabalho em equipe com profissionais da comunicação

Diagnóstico: A ausência de colaboração entre cientistas e comunicadores compromete a efetividade das ações de divulgação, tanto em seu alcance como na precisão das informações transmitidas. A qualidade da divulgação aumenta significativamente quando há colaboração entre cientistas e profissionais da comunicação como jornalistas, designers, roteiristas, programadores, educadores e influenciadores. Essa articulação interdisciplinar possibilita a produção de conteúdos mais atrativos, com linguagem refinada e estratégias comunicativas eficazes. Iniciativas como produzir releases, artigos de opinião, entrevistas e campanhas planejadas fortalecem a presença pública da ciência.

Recomendação 1: Estimular parcerias com jornalistas, designers, roteiristas, programadores, educadores e influenciadores.

Recomendação 2: Criar núcleos de divulgação científica dentro das instituições, com equipe técnica dedicada.

Recomendação 3: Desenvolver planos de comunicação estratégicos para grandes projetos astronômicos.

IV.2.2.5. Avaliação Contínua e Escuta Ativa

Diagnóstico: Falta sistematização na avaliação de impacto das ações de divulgação, o que dificulta ajustes e melhorias. Saber se a mensagem foi bem recebida e compreendida é parte essencial da comunicação científica.

Recomendação 1: Implementar métricas qualitativas e quantitativas de avaliação.

Recomendação 2: Coletar feedbacks regulares do público e usá-los para redirecionar conteú-

dos.

Recomendação 3: Incentivar o diálogo e a escuta ativa como parte do processo comunicacional.

IV.2.2.6. Frequência, continuidade e presença digital

Diagnóstico: A maioria das iniciativas ainda é pontual e desarticulada, sem continuidade nem identidade comunicacional. Um dos seus grandes desafios é manter uma presença constante, com conteúdos regulares, canais abertos de comunicação e identidade visual consistente, o que contribui para criar vínculos duradouros com o público. Na época atual em que a comunicação digital é extremamente dinâmica, o ritmo, a coerência e a autenticidade são atributos que constroem relevância e engajamento.

Recomendação 1: Criar calendários editoriais com postagens regulares e campanhas temáticas.

Recomendação 2: Estabelecer presença institucional contínua nas redes sociais e plataformas digitais, com política efetiva de atualização contínua das informações publicadas.

Recomendação 3: Construir uma identidade visual consistente para facilitar o reconhecimento público.

IV.2.2.7. Acessibilidade e compromisso com a Inclusão

Diagnóstico: Barreiras linguísticas, sensoriais e culturais ainda limitam o acesso equitativo à divulgação científica. O acesso aos resultados científicos deve ser um direito de todos, portanto iniciativas de inclusividade devem sempre ser implementadas, pois são formas concretas de promover equidade na divulgação científica.

Recomendação 1: Produzir conteúdos com legendas, Libras, audiodescrição e linguagem simples.

Recomendação 2: Desenvolver ações voltadas a comunidades periféricas, rurais e com baixa escolarização.

Recomendação 3: Integrar os princípios de acessibilidade desde o planejamento de qualquer atividade.

IV.2.3. Olimpíada Brasileira de Astronomia e Astronáutica (OBA)

A Olimpíada Brasileira de Astronomia e Astronáutica (OBA), criada em 1998, tornou-se uma das maiores iniciativas de popularização científica do país, alcançando estudantes de todas as regiões e promovendo o interesse pelas ciências espaciais. Com atividades como a aplicação anual de provas em escolas, a Mostra Brasileira de Foguetes (MOBFOG) e a Jornada Espacial, a OBA tem buscado estimular o aprendizado, identificar talentos e ampliar o acesso de jovens à Astronomia. Seu caráter inclusivo e nacional tem potencial para contribuir de forma significativa para a democratização do conhecimento científico.

Dentre essas ações, destaca-se a MOBFOG como uma atividade que valoriza a colaboração entre estudantes, atenuando o caráter competitivo das provas individuais. Esse formato, mais horizontal e cooperativo, pode ser um caminho estratégico para aumentar o engajamento de diferentes perfis estudantis, especialmente daqueles historicamente sub-representados nas ciências (Bartelmebs *et al.*, 2024).

Apesar do crescimento expressivo de inscritos na OBA, os dados demonstram uma preocupante queda na participação de meninas nessa faixa escolar. A participação de estudantes negros, indígenas, e de outras comunidades tradicionais não pode ser mapeada devido à ausência de dados neste sentido (Canalle, *et al.* 2019).

Diagnóstico: A OBA existe desde 1998, consolidando-se como uma das mais impactantes olimpíadas científicas do país, articulando escolas (professores e estudantes) em todo o país. Em 2024, foram mobilizados 1 milhão e 500 mil estudantes e 14 mil escolas.

Recomendação 1: Ampliar os recursos para a OBA, tanto aqueles oriundos das agências de fomento e dos colegiados de órgãos federais como MCTI e MEC, bem como recursos de estados, municípios e entidades privadas. Tais ações devem também garantir políticas de ações afirmativas, bem como projetos diferenciados de escolas (quilombolas, indígenas, do campo, entre outras) tenham plena participação na OBA.

Recomendação 2: Incentivar, por meio das agências de fomento e órgãos colegiados do MCTI e do MEC, ações como as Mostras de Foguetes e/ou similares, por permitir a apresentação de projetos desenvolvidos em parceria.

IV.2.4. O Selo da SAB

A promoção de certificação de conteúdos em Astronomia pela Sociedade Astronômica Brasileira (SAB) revela-se fundamental para garantir a confiabilidade de informações divulgadas por instituições e associações não vinculadas aos órgãos de Astronomia profissional. Este particular se mostra importante, pois pesquisas apontam que educadores enfrentam inseguranças e limitações metodológicas para o ensino do tema, e têm dificuldades em buscar fontes de informação confiáveis (Nardi & Langhi, 2005). A presença de conteúdos certificados ou criados especificamente pela SAB pode fornecer suporte confiável para professores e divulgadores de Astronomia, mitigando dúvidas e facilitando o acesso a materiais claros, contextualizados e cientificamente apropriados.

Além disso, diante da complexidade de interpretação das imagens astronômicas, cuja produção envolve processos complexos de tratamento, e das facilidades em se gerar imagens por sistemas de inteligência artificial, a certificação da SAB pode atuar para distinguir conteúdos de desinformação em Astronomia.

IV.2.5. Astroturismo

O astroturismo, entendido como uma modalidade de turismo que integra a observação do céu noturno com a visita às instalações astronômicas e a interação com a natureza, tem se consolidado como uma prática capaz de articular ciência, cultura e desenvolvimento sustentável²². Essa atividade reconhece o céu noturno como um recurso natural não finito, valorizando experiências que aproximam os visitantes da Astronomia em ambientes preservados, como parques, museus e observatórios. Ao fazer isso, amplia o acesso público ao conhecimento científico e fomenta a valorização da natureza e do patrimônio imaterial associado ao Cosmos.

No Brasil, iniciativas como o projeto “Astroturismo nos Parques Brasileiros” da UFRJ têm revelado o potencial de unidades de conservação para esse tipo de turismo, sendo o Parque Estadual do Desengano (PED), no Rio de Janeiro, um exemplo emblemático. Com céu escuro e baixa interferência luminosa, o PED permite a observação de milhares de estrelas e objetos celestes invisíveis nos grandes centros urbanos. Esses locais, além de funcionarem como santuários astronômicos, tornam-se espaços educativos, culturais e turísticos de alto valor, especialmente em comunidades rurais que historicamente têm menos acesso à ciência e a oportunidades de desenvolvimento. Estas iniciativas, dão oportunidade de acesso à cultura científica por meios inusitados, favorecendo tanto aqueles que buscam por ecoturismo quanto os moradores de comunidades rurais (Pontes Silva, 2022).

Dada a extensão territorial do país e a existência de diversas unidades de conservação já protegidas por lei, há um grande potencial para identificar outros “dark sky parks” brasileiros. O reco-

²² Definição segundo John Barentine, diretor do Dark Sky Association, em entrevista concedida ao The New York Times em 2018. Disponível em: <https://walkway.org/your-next-trip-its-written-in-the-stars/>

nhecimento formal desses espaços pode desencadear benefícios socioeconômicos e ambientais importantes, como a valorização cultural local, o fortalecimento de economias sustentáveis baseadas no turismo científico e a ampliação da divulgação científica. Além disso, essa prática contribui para a preservação do céu escuro — um patrimônio natural ameaçado pela crescente poluição luminosa —, assegurando seu usufruto por gerações futuras

Diagnóstico 1: O Brasil ainda não explora de forma sistemática e estratégica outras áreas protegidas que poderiam ser certificadas como “dark sky parks”.

Diagnóstico 2: O astroturismo demanda uma abordagem intersetorial, integrando instituições científicas, órgãos ambientais, setor turístico e comunidades locais para que seus benefícios sejam amplamente distribuídos e sustentáveis.

Diagnóstico 3: A implementação do astroturismo em regiões rurais pode fortalecer a economia local, promover a valorização dos saberes e culturas do território e ampliar a divulgação científica junto a públicos diversos.

Recomendação 1: Realizar um levantamento nacional das áreas com baixa poluição luminosa, com vistas à criação de uma rede brasileira de *dark sky parks*, integrando parques estaduais, nacionais e reservas ambientais com potencial para o turismo astronômico.

Recomendação 2: Estabelecer mecanismos de articulação intersetorial para a promoção do astroturismo, garantindo ações integradas de gestão, formação e divulgação científica nos locais de céus escuros.

Recomendação 3: Incentivar projetos que desenvolvam a atividade de astroturismo com editais especialmente criados, integrados com o ministério do turismo.

IV.3. Centros de Divulgação/Popularização da Astronomia

IV.3.1. Planetários

Os planetários representam um dos instrumentos mais poderosos para a democratização do conhecimento astronômico no Brasil, funcionando como espaços híbridos que unem educação não formal, popularização da ciência e inclusão social. Conforme demonstrado por Langhi e Nardi (2012), esses espaços desempenham um papel fundamental na complementação da educação formal, na correção de concepções alternativas sobre fenômenos astronômicos e no estímulo a vocações científicas, especialmente entre jovens em idade escolar. Barrio (2007) reforça essa perspectiva ao destacar a dupla função dos planetários: educativa, ao facilitar a transposição didática de conceitos complexos por meio de recursos visuais e experiências imersivas; e cultural, ao valorizar o céu como pa-

patrimônio imaterial e elemento unificador da relação entre ciência e sociedade. No entanto, apesar desse potencial, os planetários brasileiros enfrentam desafios estruturais que limitam seu impacto, como a distribuição geográfica desigual, com cerca de 70% das unidades concentradas nas regiões Sudeste e Sul, conforme dados da Rede Brasileira de Planetários (2021), além da subutilização pedagógica, já que muitos funcionam prioritariamente como centros de entretenimento, sem integração sistemática com redes escolares, e da falta de acessibilidade, pois poucos dispõem de recursos adequados para pessoas com deficiência (De Abreu et al., 2019).

Planetários são espaços privilegiados para a popularização da ciência, em especial da Astronomia. Ao combinarem projeções visuais imersivas com narrativas sobre o Universo, promovem um tipo de experiência estética e cognitiva singular, que desperta interesse, admiração e curiosidade. A International Planetarium Society (IPS) destaca que os planetários têm valor singular como espaços de inspiração e aprendizagem ao explorarem o "Universo compartilhado da humanidade" (IPS, 2023). Além disso, os planetários atuam como espaços de fronteira entre o campo científico e o campo social, permitindo a construção de sentido e a valorização da ciência por públicos diversos (Watanabe; Munhoz; Kawamura, 2020).

Planetários são espaços não formais de formação científica, estética e emocional. Embora sejam frequentemente associados ao entretenimento, seu potencial como ferramenta educativa é vasto e ainda subutilizado. A realidade brasileira, conforme mostra a pesquisa de Resende (2017), revela que muitos planetários, sobretudo os da esfera pública, carecem de estrutura pedagógica, planejamento institucional e integração com a educação formal.

Os planetários se constituem como espaços privilegiados de educação não formal, por meio dos quais é possível simular o céu noturno em diferentes épocas e locais da Terra. Além disso, graças à tecnologia digital e às ferramentas multimídia, os planetários tornaram-se verdadeiros centros de imersão sensorial, capazes de aliar ciência, arte e narrativa em experiências altamente significativas. No entanto, a plena realização de seu potencial educativo requer intencionalidade pedagógica, articulação com a educação formal e o financiamento estruturado por parte das esferas estadual e federal.

Apesar de sua importância, a distribuição de planetários pelo território brasileiro é extremamente desigual. Enquanto as regiões Sudeste e Sul concentram o maior número de equipamentos, as regiões Norte e Nordeste apresentam forte carência desses espaços. Muitas capitais e praticamente todos os municípios do interior das regiões Norte e Nordeste não possuem qualquer tipo de planetário, seja ele fixo ou móvel. Isso dificulta a difusão da Astronomia e da cultura científica justamente nas regiões que mais precisam de políticas de inclusão científica.

Um dos principais desafios é a ausência de financiamento contínuo para aquisição, manutenção e operação desses equipamentos. Muitos planetários públicos enfrentam problemas de obsolescência tecnológica, falta de pessoal qualificado, ausência de materiais pedagógicos e escassa integra-

ção com as redes escolares locais. Em diversos casos, estruturas construídas com recursos pontuais acabaram desativadas por falta de políticas de sustentação.

Essas experiências mostram que, mesmo em contextos adversos, é possível estruturar e manter espaços de Astronomia de forma integrada ao ensino e à cultura local. O que falta, no entanto, é a replicação desses modelos com suporte das instâncias federais e o incentivo à criação de redes cooperativas entre instituições (estaduais e federais) que mantenham planetários em regiões periféricas e interiorizadas. O desafio central reside na transformação desses espaços em pontos de apoio permanentes às escolas públicas, promovendo a imersão científica como experiência formativa e cidadã.

IV.3.1.1. Planetário, educação e formação científica

Os planetários têm potencial comprovado para apoiar a educação e o ensino formal de ciências e a formação científica inicial, sobretudo quando integrados aos currículos escolares. Estudos demonstram que seu uso didático melhora significativamente a compreensão de conceitos como o Sistema Solar, constelações, e movimentos celestes (Oktay; Ekinci; Şen, 2020).

O conceito de “gosto por ciência” (Anderhag et al., 2015) tem sido usado para demonstrar que o contato com atividades imersivas em planetários contribui para o desenvolvimento de motivações intrínsecas e o reconhecimento dos estudantes como competentes em ciência, o que favorece o pertencimento à cultura científica (Lima Junior et al. 2025).

Além disso, planetários têm promovido o engajamento de comunidades escolares com temas como sustentabilidade, mudanças climáticas e lixo espacial, entre outros temas relacionados à saúde planetária e às questões africanas, afro-brasileiras e indígenas (Alves-Brito, 2020; 2024).

IV.3.1.2. Inclusão social e desigualdades

Planetários itinerantes têm se destacado como ferramentas de democratização do acesso à ciência, pois superam barreiras geográficas e sociais. Estudos recentes revelam que a apreciação das experiências em planetários não depende de sexo, cor ou renda, especialmente quando os planetários são levados até os territórios mais afastados (Marranghello et al., 2021).

Atualmente estão cadastrados no site da Associação Brasileira de Planetários²³, 102 planetários fixos e móveis. A distribuição nas regiões do país é desigual, assim como a distribuição territorial por estado (capital e interior). Conforme também discutido em Alves-Brito (2020), é preciso ainda correlacionar/discutir a localização geográfica dos planetários no contexto dos territórios racializados. Questões sociais econômicas apenas não dão conta da realidade de desigualdade brasileira, marcadamente racializada na intersecção de gênero.

Além disso, planetários têm demonstrado importante papel na promoção da acessibilidade. Projetos como o “Audio Universe”, desenvolvidos no Reino Unido e Itália, criaram sessões com so-

23 Disponível em: <https://planetarios.org.br/planetarios-do-brasil/>. Acesso em: 26/06/2025.

nificação de dados astronômicos, permitindo que pessoas cegas ou com baixa visão experimentem o Cosmos por meio do som (Harrison; Zanella; Girdhar, 2023).

IV.3.1.3. Extensão universitária e compromisso social

A extensão universitária encontra na Astronomia uma potente aliada. Os planetários operados por universidades permitem a integração ensino-pesquisa-extensão, alcançando públicos periféricos e promovendo letramento científico em escala ampliada.

Experiências de planetários universitários, como os da UEFS, UFG, UFRGS, UFSM, UNIPAMPA, UFRN, UFMG, UFJF, UFSJ, para citar alguns, têm sido exemplos notáveis de como essas instituições podem atuar na formação cidadã e na inclusão social, em especial com o uso de planetários itinerantes.

Iniciativas internacionais, apoiadas pelo Office of Astronomy for Development (OAD/IAU), demonstram que atividades com planetários e Astronomia em comunidades indígenas, quilombolas e favelas promovem a valorização cultural, o fortalecimento da identidade e a equidade no acesso ao conhecimento (Alves-Brito et al., 2019; Ferreira et al., 2023).

Diagnóstico 1: Falta de políticas públicas permanentes para aquisição, operação e manutenção de planetários móveis; há, além disso, baixa qualificação técnica e pedagógica das equipes operacionais; concentração urbana dos equipamentos fixos e desarticulação entre planetários e secretarias municipais/estaduais de educação.

Diagnóstico 2: A distribuição dos planetários no território nacional reflete desigualdades históricas no acesso a equipamentos culturais e educativos. Segundo levantamentos da Associação Brasileira de Planetários (ABP) e do cadastro do Ano Internacional da Astronomia (2009), o país conta com aproximadamente 120 planetários registrados, incluindo fixos e móveis, dos quais apenas 84 (70%) estavam em operação em 2020. Desses, 48 (57%) estão localizados no Sudeste. O Sul abriga 18 unidades (21%), enquanto o Centro-Oeste possui 10 (12%). As regiões Nordeste e Norte, por sua vez, concentram apenas 8 planetários em funcionamento (10%). Além da concentração regional, outro problema grave é a inatividade de cerca de 30% das unidades, muitas vezes devido à falta de manutenção, recursos humanos qualificados ou apoio institucional, como apontam relatórios da ABP (2020). Essa realidade contrasta com a demanda potencial por atividades de divulgação científica em regiões com menor infraestrutura educacional, onde os planetários poderiam atuar como polos de transformação social e estímulo ao aprendizado em ciências.

Diagnóstico 3 — Divulgação Científica: Os planetários despertam forte interesse e encantamento, sendo espaços privilegiados de mediação científica sensível e interativa. O engajamento do público depende da qualidade das experiências, da mediação humana e da linguagem acessível.

Diagnóstico 4 — Educação Formal: Planetários favorecem a aprendizagem de conceitos astronômicos e científicos, além de ampliar o gosto por ciência. Podem apoiar práticas pedagógicas interdisciplinares e o desenvolvimento de pensamento crítico.

Diagnóstico 5 — Inclusão Social: O acesso aos planetários é desigual no território brasileiro. Os modelos itinerantes são altamente eficazes na ampliação do acesso em territórios vulnerabilizados. Projetos com acessibilidade sensorial mostram grande potencial de inclusão.

Diagnóstico 6 — Extensão Universitária: Planetários operados por universidades têm grande potencial de integração ensino-pesquisa-extensão, com forte atuação social. Conectam comunidades com a universidade, valorizando saberes diversos.

Diagnóstico 7 — Desenvolvimento Cultural e Regional: Planetários podem compor estratégias de astroturismo e desenvolvimento sustentável, articulando ciência, cultura e identidade territorial. Já existem experiências com impactos locais positivos.

Diagnóstico 8 — Formação Docente: Planetários oferecem um ambiente inovador para a formação continuada de professores, proporcionando vivências interativas e recursos interdisciplinares que ampliam o repertório metodológico dos educadores. Essas experiências permitem o desenvolvimento de práticas pedagógicas contextualizadas, com ênfase na inclusão, nas ciências e na cultura científica.

Para que os planetários cumpram seu papel estratégico no novo Plano Nacional de Astronomia, é essencial adotar medidas concretas.

Recomendação 1: Fomentar a expansão e modernização da rede existente, com estímulos que priorizem as regiões Norte e Nordeste, por meio de editais do MCTI e MEC para a construção de pelo menos 20 novas unidades até 2030, além da modernização tecnológica dos equipamentos atuais, com recursos do FNDCT para aquisição de sistemas de projeção.

Recomendação 2: Focar na integração com a educação básica, através de programas como "Planetário na Escola", em parceria com secretarias estaduais e municipais, para garantir visitas escolares regulares financiadas por verbas destinadas ao transporte, e na formação de professores, com cursos presenciais ou EADs, desenvolvidos por universidades públicas e que abordem o uso pedagógico desses espaços.

Recomendação 3: Abordar a acessibilidade e inclusão, com a criação de diretrizes nacionais que tornem obrigatórias sessões adaptadas (audiodescrição, libras e recursos táteis) e o desenvolvimento de projetos comunitários em periferias.

Recomendação 4: Fomentar pesquisa e inovação, com editais específicos para o desenvolvimento de softwares educativos gratuitos, como versões customizadas do Stellarium, e a produção de conteúdos alinhados à BNCC, em colaboração com institutos de pesquisa e sociedades científicas.

Recomendação 5: Estabelecer metas claras e indicadores de impacto. Como metas quantitativas, sugere-se elevar para 180 o número de planetários em operação até 2040, com 40% localizados nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste, e garantir que 50% das escolas públicas realizem visitas anuais sistemáticas nestes ambientes.

Recomendação 6: Monitorar, qualitativamente, o número de sessões pedagógicas oferecidas, a participação em projetos de extensão universitária e o desempenho de estudantes em avaliações, como a Olimpíada Brasileira de Astronomia.

Recomendação 7: Integrar os planetários às políticas públicas nacionais e locais de popularização da ciência, valorizando a mediação qualificada, experiências imersivas e produções interativas.

Recomendação 8: Incluir os planetários como recursos pedagógicos nos currículos escolares e na formação docente, articulando temas de ciências, meio ambiente e cultura. Os planetários podem ser associados a atividades de contraturno escolar.

Recomendação 9: Expandir os planetários fixos e itinerantes com foco em periferias e áreas rurais. Desenvolver políticas públicas de acessibilidade territorial e sensorial, incluindo recursos para pessoas com deficiência.

Recomendação 10: Estimular programas de extensão, ensino e pesquisa por meio de políticas públicas e editais de fomento, bem como por meio de iniciativas locais, com planetários em universidades públicas e planetários municipais, priorizando territórios periféricos e parcerias com escolas e movimentos sociais.

Recomendação 11: Fomentar o uso de planetários em parques naturais, centros culturais e roteiros turísticos regionais, vinculando educação científica e valorização do território.

Recomendação 12: Implementar programas regulares de formação de professores em parceria com planetários universitários/municipais e itinerantes, com foco na construção de metodologias ativas, desenvolvimento de materiais didáticos acessíveis e inclusão de saberes territoriais e ambientais.

Recomendação 13: MCTI: Criar editais voltados à aquisição e itinerância de planetários móveis em parceria com IES e secretarias de educação. Incentivar programas de formação de operadores e mediadores científicos.

Recomendação 14: MEC: Estimular o uso dos planetários em atividades curriculares e extracurriculares, prevendo logística de transporte e alimentação escolar vinculadas.

Recomendação 15: SAB: Promover a normatização mínima para atuação didática de planetários e desenvolver manuais de boas práticas.

Recomendação 16: IES: Envolver estudantes de licenciatura e pós-graduação em projetos de extensão vinculados aos planetários e fomentar núcleos interdisciplinares de produção de conteúdo científico acessível.

A viabilidade dessas ações depende, contudo, de um diagnóstico preciso da situação atual, que deve ser feito preferencialmente em colaboração com a Associação Brasileira de Planetários — ABP, para que seja possível combinar a popularização científica com pesquisas educacionais. Com uma abordagem sistêmica, os planetários podem se tornar peças centrais na construção de uma cultura científica inclusiva e transformadora no Brasil.

IV.3.2. Museus e Centros de Divulgação/Popularização da Astronomia

IV.3.2.1. O Museu de Astronomia e Ciências Afins (MAST)

O Museu de Astronomia e Ciências Afins (MAST), vinculado ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, é uma instituição de referência na preservação e pesquisa do patrimônio material e imaterial da ciência e tecnologia no Brasil, com ênfase especial na Astronomia. Seu acervo museológico reúne mais de dois mil objetos, incluindo instrumentos científicos históricos provenientes principalmente do Observatório Nacional, além de itens de outras instituições científicas do país. O MAST também preserva um valioso patrimônio arquitetônico, composto por edificações históricas e cúpulas de observação, e desenvolve ações de educação patrimonial, exposições e projetos de conservação por meio de seus laboratórios especializados.

A atuação integrada entre pesquisa, preservação e divulgação científica faz do MAST uma instituição estratégica para a construção da memória científica brasileira. Seus arquivos, coleções e projetos contribuem para a valorização da história da ciência e para o fortalecimento da cultura científica no país. Como guardião de importantes acervos e espaço de produção de conhecimento, o MAST destaca-se pelo compromisso com a conservação da herança científica nacional e com a formação de profissionais qualificados nas áreas de museologia, patrimônio e história da ciência (Ribeiro de Andrade & Cazelli, 2014).

Essa experiência é ilustrada em diversas publicações da instituição que retratam a história da Astronomia no país, como, por exemplo: *Da Serra da Mantiqueira às Montanhas do Havaí — A história do Laboratório Nacional de Astrofísica* (Barboza & Lamarão, 2017) e *História da Astronomia no Brasil*, volumes 1 e 2 (Matsuura, 2014). Além de guardar o patrimônio material — museológico, arquivístico e documental — o MAST possui também um Programa de História Oral, cujo objetivo é incentivar a produção, guarda, preservação, pesquisa e divulgação de entrevistas com pesquisadores que contribuam para o entendimento da história e do processo de constituição da Ciência e Tecnologia (C&T) no Brasil. Por conta destas características, museus com acervo históricos, sejam de caráter pessoais ou institucionais possuem diversas potencialidades no que diz respeito tanto a preservação da memória da Astronomia no Brasil quanto ao desenvolvimento de ações de divulgação científica que apresentem a ciência de forma contextualizada (ver por exemplo, Benitez-Herrera & Spinelli, 2019; Spinelli & Ribeiro, 2018).

Diagnóstico: Nos últimos anos, o MAST não tem recebido acervos institucionais ou pessoais — sejam arquivísticos ou documentais — provenientes da comunidade de profissionais da Astronomia. Essa ausência limita a ampliação e o enriquecimento dos acervos, comprometendo a preservação e a continuidade da memória da Astronomia no Brasil.

Recomendação 1: Incentivar a doação de acervos institucionais por parte de observatórios, planetários, Unidades de Pesquisa e departamentos de Astronomia de universidades ao MAST, assegurando a guarda, conservação e divulgação científica adequadas desses acervos; Promover a articulação entre o MAST e as Unidades de Pesquisa em Astronomia do país, para a criação de diretrizes que incentivem a implantação de seus próprios espaços de memória.

Recomendação 2: Conscientizar a comunidade de pesquisadores da SAB sobre a importância da doação de seus arquivos pessoais — como cadernos de campo, correspondências, registros fotográficos, relatórios técnicos e outros documentos — ao Arquivo de História da Ciência do MAST.

Recomendação 3: Investir na pesquisa sobre a história, sociologia e antropologia da Astronomia com foco no Brasil.

IV.3.2.2. Outros museus e centros de ciências com ênfase em Astronomia

A trajetória dos museus de ciência no Brasil remonta ao início do século XX, mas sua consolidação como espaços interativos e educativos só ganhou força nas últimas três décadas. A popularização da ciência tornou-se uma demanda urgente frente aos baixos indicadores de letramento científico da população brasileira, especialmente entre jovens. Para os variados Museus e Centros de Ciências com Ênfase em Astronomia, temos:

Diagnóstico 1: Subfinanciamento crônico e dependência de editais esporádicos.

Diagnóstico 2: Carência de pessoal técnico e baixa institucionalização dentro das IES.

Diagnóstico 3: Ausência de redes regionais de colaboração e intercâmbio.

Recomendação 1: MCTI: Criar o Programa Museu Ciência Viva com repasses estáveis para museus de ciência de instituições públicas. **MEC:** Incluir visitas a museus como parte do currículo escolar e prever bolsas para estudantes atuarem como monitores culturais. **SAB:** Organizar um diretório nacional de museus e exposições de Astronomia e apoiar itinerâncias regionais. **IES:** Incorporar atividades de museus como parte dos estágios e disciplinas obrigatórias para licenciaturas em ciências.

IV.3.3. Observatórios Astronômicos

Observatórios astronômicos são instrumentos didaticamente poderosos não apenas para a pesquisa científica, mas também para a educação básica e o despertar vocacional (científico ou não). Diferente da imagem tradicional de observatórios como estruturas complexas e inacessíveis, muitos centros universitários têm investido em telescópios escolares, minicursos e noites de observação, assim como observação solar, abertas ao grande público e comunidades locais. Essas experiências, quando bem articuladas, geram efeitos significativos no interesse pela ciência e na autoestima de estudantes de escolas públicas.

Outro aspecto relevante é a possibilidade de cooperação entre observatórios universitários e grandes centros nacionais, como o OPD (Observatório do Pico dos Dias) vinculado ao Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA) localizado em Brasópolis, Minas Gerais. Essa articulação pode ser feita por meio de observações remotas (um deles é o telescópio Perkin-Elmer de 1.6 metros), permitindo que estudantes do Brasil possam acompanhar sessões de observação em tempo real. Além de ser uma ferramenta pedagógica poderosa, essa interconexão estimula o sentimento de pertencimento a uma comunidade científica nacional. A integração dos observatórios com a formação docente é uma oportunidade ainda pouco explorada.

Diagnóstico 1: Ausência de política nacional para observatórios escolares ou populares.

Diagnóstico 2: Falta de conexão com redes nacionais como o LNA/OPD.

Diagnóstico 3: Pouco uso educacional de telescópios remotos ou automáticos.

Recomendação: MCTI: Criar a Rede Nacional de Observatórios Populares, com apoio técnico e interligação remota ao OPD. **MEC:** Incluir conteúdos de Astronomia observacional

nas trilhas formativas do Ensino Médio e apoiar formações em escolas do campo. **SAB:** Apoiar clubes escolares de Astronomia e publicações com uso de dados reais oriundos de observações. **IES:** Utilizar telescópios universitários como espaços de estágio, pesquisa e extensão, com incentivo a parcerias com escolas municipais e estaduais.

IV.4. Diversidade, Equidade e Inclusão na Astronomia

Não há como refletir sobre processos de desarticulação de sistemas perversos de violência no Brasil e nem como propor ações e políticas públicas para a promoção da diversidade, equidade e inclusão nas ciências e tecnologias sem que haja, por parte da sociedade brasileira e, em particular, cientistas, uma recuperação histórica profunda de como as ciências e as tecnologias modernas e contemporâneas foram (e têm sido) construídas a partir da articulação de três complexos sistemas de dominação global: o colonialismo, o capitalismo e o patriarcado.

É evidente que há um perfil *identitário* marcante na ciência moderna e contemporânea que precisa ser problematizado. As ciências e as tecnologias são racializadas, desenhadas e definidas majoritariamente por meio do pensamento de homens, de pessoas brancas, heterossexuais, cisgêneras, bem nascidas em diferentes localidades do Norte e do Sul Global, que professam preferencialmente uma espiritualidade cristã e que, em geral, estão baseadas em epistemologias positivistas, a partir de uma ideia ateórica, ahistórica, neutra, objetiva e excludente das ciências e das tecnologias.

Distintos conjuntos de evidências científicas, por meio de pesquisas, nacionais e internacionais, têm, nas últimas décadas, ressaltado o abismo étnico-racial, de gênero, de orientação sexual, de classe, de origem geográfica, geracional e capacitista nas relações interpessoais e interinstitucionais no campo das ciências e de suas tecnologias.

No caso particular da Física e da Astronomia, conforme estudo realizado em 2019²⁴, o perfil das pessoas que compõem, por exemplo, a Sociedade Brasileira de Física (SBF), é excludente. Estudos nacionais voltados para a composição do perfil da Academia Brasileira de Ciências, bem como para as questões de assédio sexual e moral nas IES e Unidades de Pesquisas brasileiras, bem como dados internacionais para os múltiplos marcadores sociais da diferença no campos das ciências físicas (por exemplo, no âmbito da União Astronômica Internacional e da União Internacional de Física Pura e Aplicada) não deixam dúvida de que precisamos criar estratégias para garantir a justiça social, racial, de gênero e cognitiva, em suas intersecções com outras variáveis sociais, no contexto da vida acadêmica e científica. A inclusão, diversidade e equidade são questões centrais para o Brasil do século 21, sobretudo a partir dos avanços que o país alcançou, nos últimos anos, com a instauração de

24 Disponível em: <https://journals.aps.org/prper/abstract/10.1103/PhysRevPhysEducRes.16.010136>. Acesso em: 02/06/2025.

políticas públicas de ações afirmativas que têm garantido o acesso de pessoas negras (pretas e pardas), indígenas, quilombolas, pessoas pobres e pessoas com deficiências nos sistemas universitários e de pesquisa do país. Além disso, a garantia de políticas de equidade no âmbito da existência das pessoas trans e travestis, imigrantes/refugiadas têm sido também refletidas nos espaços científicos.

Diagnóstico: Faltam estudos detalhados sobre a composição da Sociedade Astronômica Brasileira (SAB) no que tange à diversidade, equidade e inclusão, apontando os desafios e as oportunidades para corpos que têm sido excluídos dos espaços científicos da Astronomia, a saber: mulheres cis, pessoas negras, indígenas, quilombolas, LGBTQIA+ e PcDs.

Recomendação 1: A SAB deve criar mecanismos para o enfrentamento permanente do racismo, do sexismo, da LGBTQIA²⁵+fobia, de assédios, preconceitos, discriminações e outras violências no âmbito da Instituição e estimular que as IES e Unidades de Pesquisa que trabalham com Astronomia criem espaços seguros para garantir a inclusão, a diversidade e a equidade.

Recomendação 2: MEC e MCTI, com seus órgãos filiados, devem aprimorar as suas políticas de inclusão, diversidade e equidade, com foco nas ciências físicas, compreendendo que tais políticas são necessárias para garantir o crescimento equitativo e sustentável, indispensáveis para impactar os esforços globais no enfrentamento aos desafios presentes e futuros.

Recomendação 3: As instituições devem criar e fortalecer comitês de Gênero e/ou Equidade, Diversidade e Inclusão.

IV.4.1. Questões étnico-raciais

Segundo dados recentes do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no Censo 2022, 55,5% da população se identifica como preta ou parda. O Brasil reconhece oficialmente 305 povos indígenas, que falam 275 línguas. No entanto, a maior parte da população brasileira não se vê incluída nos espaços de poder, sobretudo aqueles que estão relacionados ao conhecimento (universidades, escolas, museus, planetários, observatórios, sociedades científicas). Esse dado, obviamente, não é uma realidade biológica, não é um dado natural, mas faz parte de como os nossos projetos de sociedades têm sido desenvolvido historicamente baseado em relações viscerais entre o colonialismo, o capitalismo e o patriarcado. O Brasil, vale lembrar, manteve um perverso sistema de escravização que perdurou 350 anos, sendo o último país das Américas a abolir, em 1888, a escravização que vitimou milhões de pessoas escravizadas do continente africano e a população indígena que já estava presente no continente antes da invasão colonial europeia. Processos históricos do passado e

25 Sigla para lésbicas, gays, bissexuais, trans, travesti, queer, intersexo, assexuados e outras identidades de gênero.

do tempo presente têm garantido desigualdades históricas e, as ciências, como são parte da vida e constituídas por pessoas, acabam por reproduzir as desigualdades sociais em seus processos.

Diagnóstico 1: Do ponto de vista do potencial que as ciências físicas e tecnologias associadas desempenham na sociedade global, ressalta-se que estas têm historicamente excluído as formas de pensar e de se organizar no mundo de pessoas negras, indígenas, quilombolas e outros povos e comunidades tradicionais, como ribeirinhos, de terreiro, ciganos, entre outras experiências dissidentes da hetero-cis-normatividade. A diversidade de raças e etnias nos espaços científicos apenas amplia as possibilidades de criação e de proposição de soluções científicas e tecnológicas criativas para os problemas que nos atravessam.

Diagnóstico 2: Levando-se em conta um dos resultados do estudo realizado em 2019, no âmbito da SBF, para mapear suas formas de diversidade, equidade e inclusão, a maioria das pessoas membras da SBF se autodeclara como de cor/raça branca (61%). As pessoas negras, indígenas e quilombolas, sujeitos de ações afirmativas no país, estão subrepresentadas na Física e, conseqüentemente, na Astronomia.

Diagnóstico 3: A história da Astronomia, bem como as percepções do céu são ainda dominados por uma visão ocidental que cria uma discriminação de diferentes formas de conhecimento, apesar das Diretrizes Curriculares Nacionais para a Educação das Relações Étnico-Raciais (Artigo 26A da LDB), no qual todas as escolas e universidades deveriam ensinar a cultura e história indígena. Projetos de extensão/divulgação que visam mostrar como diferentes percepções do céu podem se complementar e enriquecer mutuamente, em vez de se excluírem, incorporando relações céu-terra de povos indígenas e afro-brasileiros encontram desafios na continuidade do desenvolvimento devido à falta de financiamento, além da limitação de pessoal qualificado.

Diagnóstico 4: Escolas, observatórios, museus e/ou planetários e IES frequentemente se encontram em territórios racializados, dos quais são completamente alienados, perdendo a possibilidade de criar um diálogo científico-cultural, pensando não só na Astronomia na perspectiva hegemônica, mas também o seu uso como ferramenta de diálogo com diferentes culturas, que visa promover uma nova forma de letramento do mundo e formação docente com base na interculturalidade.

Diagnóstico 5: Segundo o Censo 2022 do IBGE, 16,4 milhões de brasileiros vivem em favelas, o que representa 8,1% da população. As favelas são hoje, majoritariamente, habitadas por uma população negra que, apesar de décadas de perseguições e baixos rendimentos, preserva e cria uma cultura única de origem africana, que reverbera na música e nas artes. Crianças dessas comunidades, devido às desigualdades sociais e raciais, têm menos oportunidades de

desenvolvimento pessoal e profissional. Frequentam escolas públicas onde, segundo o SAEB (2021), 69% dos alunos não alcançam níveis satisfatórios em língua portuguesa e 95% em matemática. Poucos têm acesso a atividades extracurriculares ou se veem representados na universidade.

Recomendação 1: MEC e MCTI, com seus órgãos filiados: respeitar a Lei 12.990/2014 (atualizada pela Lei 15.142/2025), que prevê Cotas Raciais em Concursos Públicos e, além disso, observar a contratação de mulheres, indígenas, pessoas trans, travesti e pessoas com deficiências nas ciências físicas. Trata-se de medida fundamental para garantir a equidade, inclusão e diversidade não apenas do ponto de vista físico, mas também epistemológico.

Recomendação 2: CNPq, CAPES e outras agências de fomento: aprimorar e expandir os programas de bolsas, em todos os níveis (IC, pós-graduação, pós-doutorado, Bolsas de Produtividade, etc), para garantir a inclusão, a diversidade e a equidade no campo das ciências físicas.

Recomendação 3: Promover e apoiar projetos que incentivem a colaboração interdisciplinares, nas quais astrônomos, antropólogos, professores e artistas de populações originárias, co-criam conteúdos inovadores que enriquecem o currículo escolar, conforme a legislação vigente, combatendo a discriminação ao colocar diferentes formas de conhecimento em pé de igualdade.

Recomendação 4: CNPq, CAPES e outras agências de fomento: financiar projetos que visam promover a educação intercultural e os letramentos de mundos entre estudantes universitários, cientistas, alunos de escolas públicas e comunidades afrodescendentes, quilombolas e indígenas. A cultura de cada indivíduo e suas raízes ancestrais são uma porta de conexão com o Universo e com nossas origens cósmicas e a co-criação de conteúdos científicos entre astrônomos e agentes culturais e artistas das comunidades se mostra fundamental para a divulgação da ciência, e da Astronomia em particular, entre parcelas da sociedade historicamente alienadas, mas coexistentes.

Recomendação 5: CNPq, CAPES e outras agências de fomento: financiar projetos em favelas, quilombos, comunidades indígenas e de outros povos tradicionais que oferecem atividades de divulgação científica, oficinas culturais e cursos extracurriculares, ampliando os repertórios em mão dupla (comunidades-IES/IES-comunidades) e fortalecendo as chances de seguirem trajetórias educacionais e científico-culturais sólidas. É fundamental oferecer modelos inspiradores de cientistas negros e negras, e trabalhar em colaboração com educadores e artistas locais, valorizando seu papel dentro da academia. Um passo importante também é

oferecer bolsas para as alunas, muitas já envolvidas com afazeres domésticos e cuidados com familiares, demonstrando que o estudo pode ser um caminho para a autonomia

IV.4.2. Questões de gênero

Desde que o prêmio Nobel de Física existe, cerca de 2% dos prêmios foram concedidos a mulheres. Na SBF, as mulheres correspondem a cerca de 33% (dados de 2019) do total de membros dessa comunidade. Na SAB, as mulheres são um pouco mais, cerca de 45%. A grande barreira para a atuação das mulheres nas ciências físicas é, certamente, o patriarcado, um sistema de poder que tem garantido, historicamente, lugar de privilégio para os homens. A política científica no Brasil é definida, portanto, em grande parte, quase que exclusivamente por homens. A participação das mulheres nas ciências físicas é marcada por distintos efeitos: (i) efeito tesoura: ainda que bem preparadas e entrando cada vez mais na graduação, a presença das mulheres reduz-se drasticamente nas posições de liderança e cargos mais altos da carreira; (ii) efeito Matilda: fenômeno social marcado pela desconsideração frequente das contribuições de mulheres à ciência, minimizando-as ou atribuindo-as a homens; (iii) efeito teto de vidro (*glass ceiling*): barreiras invisíveis, porém marcantes, que impedem que mulheres alcancem os níveis mais altos da carreira, especialmente posições de poder (cargos de liderança); (iv) efeito *leaky pipeline*: “perda” efetiva de mulheres com o avanço da carreira.

As experiências das mulheres nas ciências físicas são, portanto, atravessadas por questões diversas, tais como: (i) discriminação de gênero; (ii) falta de modelos e mentoria; (iii) falta de oportunidade de liderar grandes projetos; (iv) desigualdade salarial; (v) dupla jornada de trabalho; (vi) responsabilidade quase que exclusiva com a maternidade, sem qualquer suporte familiar e/ou institucional muitas das vezes; (vii) assédio moral e sexual; (viii) pressão social.

Outra questão fundamental é atentar-se às questões específicas, em todos os aspectos que já foram anteriormente levantados, das experiências de mulheres que fogem às regras da branca-hétero-cis-normatividade: mulheres negras, indígenas, quilombolas, LGBTQIA+ e pessoas com deficiência.

Diagnóstico 1: Do ponto de vista do potencial que as ciências físicas e tecnologias associadas desempenham na sociedade global, ressalta-se que estas têm historicamente excluído as formas de pensar e de se organizar no mundo de mulheres brancas, negras, indígenas, quilombolas, de outros povos e comunidades tradicionais, como ribeirinhos, de terreiro, ciganos, trans e travestis, lésbicas, bissexuais, entre outras experiências. A diversidade de gênero nos espaços científicos amplia as possibilidades de criação e de proposição de soluções científicas e tecnológicas criativas para os problemas que nos atravessam.

Diagnóstico 2: Levando-se em conta um dos resultados do estudo realizado em 2019, no âmbito da SBF, para mapear suas formas de diversidade, equidade e inclusão, a maioria das pessoas membras da SBF se autodeclara como homens (68%), heterossexuais (88%), cisgêneros (95%). Mulheres, homossexuais e pessoas trans estão sub-representados(as) na Física e, consequentemente, na Astronomia.

Recomendação 1: MEC e MCTI, com seus órgãos filiados: assegurar a igualdade e a equidade de gênero, obedecendo as especificidades do termo, de forma a incluir pessoas LGBTQIA+, no recorte racial, social e de deficiências.

Recomendação 2: CNPq, CAPES e outras agências de fomento: aprimorar e expandir os programas de bolsas, em todos os níveis (IC, pós-graduação, pós-doutorado, Bolsas de Produtividade, etc), para garantir a inclusão, a diversidade e a equidade no campo das ciências físicas nas questões de gênero.

Recomendação 3: CNPq, CAPES e outras agências de fomento: aprimorar e expandir programas específicos para atração de meninas e mulheres nas ciências físicas, sem perder de vista a multiplicidade de experiências: negras, quilombolas, indígenas, ciganas, LBTQIA+, entre outras.

Recomendação 4: MEC e MCTI: criar prêmios específicos para as mulheres, nas intersecções de raça, classe e gênero.

Recomendação 5: MEC e MCTI: criar concursos públicos específicos para assegurar a igualdade e a equidade de gênero em todos os seus órgãos filiados.

IV.4.3. Classe social

Sabemos, conforme resultados de inúmeras pesquisas nacionais e internacionais, que um dos grandes problemas estruturais do Brasil é a concentração de renda, que afeta sobretudo as pessoas negras. Além disso, levando-se em conta um dos resultados do estudo realizado em 2019, no âmbito da SBF, para mapear suas formas de diversidade, equidade e inclusão:

Diagnóstico: O principal obstáculo enfrentado por discentes de graduação para seguir na carreira científica em física é a vulnerabilidade socioeconômica.

Recomendação: MEC e MCTI, com seus órgãos filiados: assegurar políticas de ações afirmativas com foco na Redução da Pobreza Multidimensional, ou seja, levando em conta as intersecções de classe com raça, gênero e outros marcadores sociais da diferença, desarticulando as barreiras sociais que atingem o corpo docente, discente e técnico com que interajam.

IV.4.4. Pessoas com Deficiências

Levando-se em conta um dos resultados do estudo realizado em 2019, no âmbito da SBF, para mapear suas formas de diversidade, equidade e inclusão,

Diagnóstico: Quando questionados sobre deficiências, apenas 6,2% dos entrevistados declararam ter alguma deficiência. Entre eles, as respostas mais comuns (não excludentes) foram baixa visão ou anormalidade visual (61 respostas), limitações físicas e motoras (27), transtorno global do desenvolvimento (7). Na categoria “outros”, o caso mais frequente foi transtorno bipolar (7). Entre os que declararam ter alguma deficiência, 27% são mulheres. Mais da metade dos casos correspondem a deficiências visuais. Entre as pessoas com deficiência, 41% delas declararam que atingiram o grau mais alto em sua carreira tão rápido quanto os demais colegas.

Recomendação 1: Realizar uma investigação detalhada, no âmbito da SAB, sobre quais são as dificuldades associadas a deficiências específicas e que impactam o ingresso e a permanência de discentes, docentes, técnicos(as) e pesquisadores(as) com deficiência.

Recomendação 2: Instituições científicas e de fomento: tornar os seus espaços de trabalho e equipamentos culturais (laboratórios, museus de ciências, observatórios, planetários, entre outros) lugares de acessibilidade física, atitudinal e comunicacional, para visitantes e equipes, garantindo a inclusão, a diversidade e a equidade para pessoas com deficiência, incluindo deficiências físicas, sensoriais (auditivas e visuais), intelectuais, neurodivergência e múltiplos.

IV.4.5. Origem geográfica

Levando-se em conta um dos resultados do estudo realizado em 2019, no âmbito da SBF, para mapear suas formas de diversidade, equidade e inclusão:

Diagnóstico: A representatividade regional de cientistas das ciências físicas nas sociedades científicas do país é assimétrica, privilegiando pessoas do Sul e do Sudeste.

Recomendação 1: Assegurar que cientistas do Norte, Centro-Oeste e Nordeste, principalmente das duas primeiras regiões do país, estejam representados(as) nas sociedades e academias de ciências. Isso passa por planejamento estratégico de distribuição equânime e propor-

cional de recursos e oportunidades para desenvolvimento pleno nas ciências físicas e tecnologias associadas.

IV.4.6. Assédios

Levando-se em conta um dos resultados do estudo realizado em 2019, no âmbito da SBF, para mapear suas formas de diversidade, equidade e inclusão,

Diagnóstico: Os assédios moral e sexual são práticas recorrentes no contexto da SBF, sendo mais pronunciados contra as mulheres, principalmente as mulheres negras e as que são parte da comunidade LGBTQIA+. Os homens são mais afetados pelo assédio moral. Ainda que não haja um estudo dessa natureza para a SAB, nota-se que a grande maioria das pessoas trabalhando profissionalmente em Astronomia são oriundas da Física.

Recomendação 1: Instituições e agências científicas: promover ações coordenadas de prevenção de assédios e discriminações, por intermédio de estratégias educativas que abordem a formação e a sensibilização da comunidade científica astronômica.

Recomendação 2: Criar, no âmbito da SAB, espaços e mecanismos de acolhimento, escuta ativa, orientação e acompanhamento das pessoas afetadas por assédios e discriminações, criando o Código de Conduta da SAB, prevendo sanções para as pessoas assediadoras e providendo procedimentos administrativos disciplinares que resguardecem as vítimas.

IV.4.7. Questões de parentalidade na Astronomia

Diagnóstico: A maternidade tem sido uma barreira, principalmente para as mulheres cientistas.

Recomendação 1: As instituições: investir em pesquisas sobre os desafios enfrentados por pessoas no âmbito da parentalidade em Astronomia, estabelecendo critérios específicos nos financiamentos de bolsas e projetos de pesquisa, bem como na realização de avaliações regulares dos processos institucionais, considerando questões de diversidade, equidade e inclusão.

Recomendação 2: Acompanhar e avaliar as políticas de parentalidade implementadas, propondo melhorias e novas iniciativas conforme necessário.

IV.5. Astronomia como vetor de inovação para a sociedade produtiva

O PNA 2010 reconheceu a Astronomia, enquanto ciência experimental e observacional, como um vetor extremamente importante de inovação tecnológica. Como descrito,

As ciências experimentais ou observacionais como a Astronomia são reconhecidamente vetores extremamente importantes de inovação tecnológica, pois pesquisa competitiva de ponta exige sempre o estado da arte em tecnologia. Consequentemente, investimentos feitos para criar capacidades e uma cultura para o desenvolvimento tecnológico aplicado em ciência, p.ex., na construção de instrumentação científica, geram retorno para o país muito além da área originalmente beneficiada (PNA, 2010).

Isso significa que os investimentos feitos em Astronomia não se restringem somente a geração de conhecimento apenas, mas geram retornos tecnológicos que se estendem a outras áreas (veja, por exemplo, as discussões apresentadas no Capítulo II deste plano).

Para este comitê, o diagnóstico apresentado no PNA 2010 foi um ponto de partida da construção do atual PNA. Nesse sentido, vale ressaltar que embora muitos dos problemas e soluções ainda sejam relevantes, o contexto tecnológico e de mercado evoluiu drasticamente. A inteligência artificial, a ciência de dados, a computação quântica, a manufatura aditiva, a nanotecnologia e as ciências dos materiais, por exemplo, eram áreas menos proeminentes ou não tão maduras em 2009 quanto são hoje.

Como comumente diagnosticado a Astronomia brasileira possui elevado potencial inovador, com capacidade de impactar diretamente a sociedade produtiva e o mercado criativo para além da produção acadêmica. Resultados de pesquisas astronômicas frequentemente originam tecnologias de fronteira em instrumentação, óptica de precisão, análise avançada de dados, sensores, automação e visualização científica. Estes desenvolvimentos abrem caminho para a criação de *spin-offs* e *start-ups* acadêmicas, permitindo que conhecimento científico de ponta seja transformado em soluções inovadoras, negócios sustentáveis e empregos qualificados, com impacto econômico e social.

Ao mesmo tempo, a interação entre grupos de pesquisa, empresas e setor industrial amplia as possibilidades de transferência de tecnologia e favorece novas parcerias estratégicas. Parcerias estruturadas fomentam a circulação de conhecimento, potencializam inovação e contribuem para a inserção de astrônomos/as no ecossistema empreendedor do país. Essa aproximação tem se mostrado fundamental para incluir cada vez mais pesquisadores(as), técnicos(as) e estudantes em ambientes produtivos e criativos, promovendo inclusão, diversidade de oportunidades e valorização do saber científico gerado nas instituições brasileiras.

No entanto, a efetivação desse potencial requer esforços coordenados para superar desafios institucionais, culturais e legais. É necessário criar mecanismos que incentivem o surgimento de *start-ups* e *spin-offs* de base astronômica, fortalecendo a cultura de empreendedorismo nas universidades e institutos de pesquisa. Políticas de fomento à inovação, editais específicos, programas de capacitação em empreendedorismo e parcerias com incubadoras e aceleradoras são medidas recomendadas para promover a maturação tecnológica de ideias e projetos, facilitando o seu caminho até o mercado.

Portanto, fortalecer a ponte entre academia, empresas e a sociedade criativa será crucial para consolidar a Astronomia como um eixo estruturante da inovação nacional. Ao potencializar a transferência de tecnologia, disseminar boas práticas de empreendedorismo e estimular o diálogo com o setor produtivo, a Astronomia brasileira se posiciona como geradora de valor, excelência científica e desenvolvimento plural para a sociedade.

Assim, este subitem do atual PNA focado na Astronomia como Vetor de Inovação para a Sociedade Produtiva busca incentivar a interação com a iniciativa privada e o empreendedorismo, promovendo um trabalho mais próximo entre empresas e ambientes acadêmicos, estimulando uma visão empreendedora e um mapeamento de novos mercados.

Diagnóstico: A Astronomia brasileira vive um momento singular em seu potencial de interação com a sociedade produtiva e criativa. As pesquisas desenvolvidas nos institutos e universidades nacionais frequentemente resultam em avanços tecnológicos de alto impacto, como o desenvolvimento de sensores, sistemas ópticos, automação, processamento de grandes volumes de dados, hardware e software especializados — competências que dialogam diretamente com demandas contemporâneas dos setores industriais, de serviços, e da economia criativa.

Entretanto, apesar dessa vocação, a realidade ainda é marcada por alguns desafios estruturais. O surgimento de *spin-offs* e *start-ups* provenientes da Astronomia é pontual e, em grande parte, depende da iniciativa individual de pesquisadores egressos, em vez de uma política institucionalizada de valorização do empreendedorismo científico. Muitas vezes, a transferência de tecnologia ocorre de maneira informal ou é limitada por questões burocráticas, insegurança jurídica, falta de incentivo financeiro e carência de conhecimento sobre os caminhos para transformar uma ideia de laboratório em negócio sustentável. Além disso, a distância cultural entre a academia e o setor produtivo ainda é expressiva, dificultando a comunicação, o entendimento mútuo de demandas e a identificação de oportunidades reais de parceria.

Do lado empresarial, há desconhecimento sobre as capacidades da Astronomia nacional e desconfiança sobre o retorno do investimento em ciência básica. No setor criativo, apesar de a Astronomia ser fonte inesgotável de inspiração, poucos projetos exploram o potencial de cocriação artística e inovação tecnológica a partir do diálogo com pesquisadores e seus dados, imagens e narrativas.

A ausência de programas e editais dedicados, de ambientes de pré-incubação, de cultura estruturada para empreendedorismo em Astronomia, e de estratégias institucionais de valorização da inovação, priva o país de uma geração de empresas inovadoras capazes de atuar em setores estratégicos: agritech, saúde, energia, tecnologia da informação, educação, entretenimento, turismo científico, entre outros.

Adicionalmente, são raros os exemplos de fluxos bem estabelecidos de transferência de tecnologia, de instrumentos patenteados e licenciados, ou de plataformas de inovação que conectam grupos de pesquisa com incubadoras, fundos de investimento ou indústrias de médio e grande porte. O mesmo vale para os canais de diálogo com o terceiro setor, onde metodologias e ferramentas astronômicas poderiam contribuir para projetos de impacto social.

Objetivando transformar o potencial da Astronomia brasileira em riqueza social, econômica e cultural de maneira estruturada, recomenda-se:

Recomendação 1: *Estruturar Programas de Estímulo ao Empreendedorismo Científico* através de programas específicos para capacitação em empreendedorismo, gestão de negócios e inovação direcionados a astrônomos(as), estudantes e técnicos(as). Assim, fomentar a cultura de criação de *spin-offs* e *start-ups* dentro dos institutos de pesquisa e universidades, oferecendo mentorias, trilhas de pré-incubação e formação continuada sobre modelos de negócios, mercados e propriedade intelectual.

Recomendação 2: *Criar e Fortalecer Ambientes de Transição Academia-Mercado* estabelecendo escritórios ou núcleos de inovação exclusivos para Astronomia (ou em rede entre instituições) que atuem como pontes entre pesquisadores e o setor produtivo. Incentivar a criação de laboratórios de prototipagem, hubs de inovação e plataformas digitais para divulgação de tecnologias, conectando desenvolvedores astronômicos a investidores, empresas industriais e agentes do setor criativo.

Recomendação 3: *Fomentar Programas Específicos e Editais Públicos* junto a agências de fomento federais, estaduais e fundações de apoio à pesquisa, editais exclusivos para transferência de tecnologia, maturação de protótipos, provas de conceito, aceleração de produtos e inserção de *spin-offs/start-ups* de Astronomia no mercado. Priorizar nos editais projetos que envolvam parcerias com setores industriais estratégicos ou que visem resolver desafios nacionais, bem como iniciativas que dialoguem com o ecossistema criativo (audiovisual, educação, games, turismo, cultura).

Recomendação 4: *Aproximar Pesquisa e Indústria; Estimular Parcerias Estruturadas* através da criação de fóruns regulares de diálogo entre academia, empresas e setor criativo, promovendo *matchmaking* de desafios produtivos com soluções astronômicas. Criar casos-piloto de projetos colaborativos e valorizar a coautoria de soluções cientificamente avançadas com impacto social e econômico.

Recomendação 5: *Facilitar a Transferência de Tecnologia* simplificando processos jurídicos e administrativos para licenciamento de patentes, compartilhamento de infraestrutura pública e formalização de contratos de Pesquisa e Desenvolvimento entre universidades e empresas. Incentivar a formação de profissionais especialistas em transferência tecnológica em Astronomia.

Recomendação 6: *Valorizar o Impacto Social e Protagonismo do Terceiro Setor* com estimulando o uso de ferramentas e dados astronômicos em projetos socioambientais, de educação cidadã ou monitoramento ambiental, em diálogo direto com ONGs e organizações sociais. Incentivar projetos que promovam a inclusão produtiva de públicos historicamente sub-representados, especialmente negros, indígenas, mulheres, pessoas com deficiência e moradores de regiões menos atendidas.

Recomendação 7: *Promover o Reconhecimento Institucional do Empreendedorismo* incorporando critérios de valorização do empreendedorismo, participação em *spin-offs* e projetos de inovação nos mecanismos de progressão de carreira acadêmica e científica. Destacar casos de sucesso nacionais e internacionais como exemplos de liderança e protagonismo para as novas gerações.

Recomendação 8: *Fortalecer a Cultura de Comunicação Transversal* ao incentivar práticas de divulgação dos benefícios concretos da Astronomia para o cotidiano da população, mostrando aplicações, histórias de sucesso de empresas derivadas e impactos positivos em soluções tecnológicas, ambientais e culturais. Apoiar eventos,

cursos, exposições e projetos interativos de ciência cidadã que articulem Astronomia, arte, literatura e inovação.

Em síntese, investir em uma estratégia nacional para empreendedorismo, transferência de tecnologia e aproximação produtiva permitirá à Astronomia brasileira reafirmar sua relevância científica e transformar potencial de inovação em desenvolvimento, inclusão e reconhecimento internacional, em sintonia com os grandes desafios do país e do mundo contemporâneo.

IV.6. Acervos e Memória, Patrimônio Material e Imaterial da Astronomia

A Astronomia no Brasil tem raízes profundas, que atravessam séculos, estendem-se por todo o território nacional e envolvem diversas culturas. Os saberes indígenas sobre os astros são exemplos deste patrimônio e são demonstrados, por exemplo, no sítio arqueoastronômico de Calçoene/AP. O observatório astronômico construído por Georg Marcgrave na Recife holandesa do século 17 e as pesquisas desenvolvidas no Imperial Observatório do Rio de Janeiro a partir de sua fundação em 1827 são outros grandes exemplos. Destes primeiros passos até os avanços científicos contemporâneos, construiu-se no Brasil um rico patrimônio material e imaterial que precisa ser reconhecido, valorizado e preservado.

Abaixo são apresentados os principais aspectos envolvidos na preservação da memória astronômica brasileira e sua importância para a ciência, a cultura e a identidade nacional, com diagnósticos da situação atual e recomendações para seu desenvolvimento.

IV.6.1. A importância da memória na Astronomia

Diagnóstico: Toda a ciência é construída com base no acúmulo de conhecimento ao longo do tempo. Na Astronomia, essa herança se manifesta não apenas nas descobertas e teorias, mas também em instrumentos, documentos, edificações, registros fotográficos e narrativas orais. A memória astronômica brasileira é ampla e multifacetada, abrangendo tanto aspectos científicos quanto culturais. No entanto, ela ainda é pouco valorizada como elemento constitutivo da identidade nacional e ferramenta estratégica de educação e inclusão científica. A ausência de políticas estruturadas de preservação limita sua integração ao patrimônio cultural brasileiro. Preservar essa memória é essencial para entender a trajetória da ciência no país, reconhecer a contribuição de diferentes povos, comunidades e culturas, inspirar novas gerações de cientistas e educadores e valorizar a cultura científica como parte do patrimônio nacional.

Recomendação 1: Incluir a memória da Astronomia nas políticas públicas de ciência, cultura e educação.

Recomendação 2: Incentivar pesquisas interdisciplinares sobre história e memória da Astronomia no Brasil.

Recomendação 3: Criar programas educativos que integrem história da ciência ao ensino básico e superior, promovendo o reconhecimento da Astronomia como parte do patrimônio cultural.

IV.6.2. Patrimônio material da Astronomia no Brasil

O patrimônio material inclui os objetos físicos e os espaços construídos relacionados à prática astronômica. No Brasil há um acervo rico e diversificado nesta área, porém muitas vezes negligenciado ou em risco de deterioração. Uma lista inicial de instituições de ensino e pesquisa do Brasil que abrigam patrimônios históricos importantes na área de Astronomia inclui:

- Museu de Astronomia e Ciências Afins (MAST), no Rio de Janeiro (RJ). É o principal centro de preservação do patrimônio astronômico no Brasil. Possui a maior coleção de instrumentos científicos históricos da América Latina, com mais de 2 mil peças. Abriga documentos, fotografias, mapas celestes, manuscritos e arquivos do Observatório Nacional. Administra um campus com antigas cúpulas de observação, incluindo o telescópio refrator de 21 cm Carl Zeiss, de 1920. Desenvolve projetos de educação patrimonial, digitalização e exposições interativas.
- Observatório Nacional (ON) — Rio de Janeiro (RJ). Fundado em 1827 por D. Pedro I, é um dos mais antigos do Hemisfério Sul. Seu acervo foi parcialmente transferido ao MAST, mas ainda abriga instrumentos científicos, arquivos meteorológicos, geofísicos e astronômicos históricos, além de documentação sobre a medição do tempo e o cálculo de efemérides no Brasil. Foi o centro oficial de Astronomia e geofísica no país durante o Império e boa parte da República. Hoje continua a ser um importante centro de pesquisas em Astronomia, com um programa de pós-graduação na área.
- Observatório do Valongo — Universidade Federal do Rio de Janeiro (OV/UFRJ). Criado em 1881 e ainda em atividade acadêmica, contando com o Bacharelado em Astronomia mais antigo do Brasil e com um programa de pós-graduação. Possui instrumentos históricos, livros raros, documentos e cúpulas preservadas.
- Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) — Universidade de São Paulo (USP). Surgido a partir do Observatório de São Paulo, fundado em 1912, o IAG foi in-

corporado à Universidade de São Paulo em 1946. Embora mais recente que as instituições do Rio de Janeiro, abriga acervos importantes como telescópios históricos e fotografias astronômicas, além de parte da memória da Astronomia moderna brasileira. Possui coleções que documentam a trajetória de pesquisadores e projetos pioneiros no país.

- Observatório Astronômico — Universidade Federal do Rio Grande do Sul (OA/UFRGS) — Porto Alegre (RS): o Observatório Astronômico da UFRGS, fundado no início do século XX, é um dos mais antigos do país em seu prédio original e ainda está em atividade educacional.
- Universidade Federal do Paraná (UFPR) — Curitiba (PR): possui equipamentos históricos e atividades de extensão desde o século XX.
- Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) — Belo Horizonte (MG): o Observatório Astronômico Frei Rosário, nas cercanias de Belo Horizonte, tem instrumentos antigos e promove ações de divulgação.
- Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS) — Feira de Santana (BA): sedia o Museu Antares de Ciência e Tecnologia, com planetário e observação pública.

IV.6.2.1. Instrumentos Científicos Históricos

Diagnóstico: Equipamentos como telescópios, teodolitos, sextantes, cronômetros, lunetas e outros aparelhos utilizados em observações astronômicas desde o período colonial até o século XX existem dispersos em muitas instituições de ensino e pesquisa em todo o país. Muitas dessas peças encontram-se em museus, universidades ou instituições públicas, entre as quais destaca-se o Museu de Astronomia e Ciências Afins — MAST, no Rio de Janeiro, a única instituição nacional constituída com o fim específico de preservar a memória da Astronomia.

Recomendação 1: Realizar inventários técnicos com especialistas em conservação científica.

Recomendação 2: Desenvolver programas regulares de restauração e manutenção de instrumentos.

Recomendação 3: Criar exposições permanentes e itinerantes que valorizem esse acervo como patrimônio científico.

IV.6.2.2. Instituições ligadas à Astronomia Cultural e Indígena

Diagnóstico: Os saberes astronômicos de povos indígenas e tradicionais estão presentes em diversas instituições, mas ainda carecem de políticas específicas de preservação e valorização. A abordagem ainda é fragmentada e dependente de projetos isolados. Como exemplo, pode-se citar a Fundação Nacional dos Povos Indígenas (FUNAI), que tem entre suas missões a preservação da cultura dos povos nativos, área em que também atua o Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN). Outro exemplo importante é o Museu Pa-

raense Emílio Goeldi (Belém/PA), também uma instituição pública, que documenta os saberes tradicionais sobre o céu entre povos indígenas amazônicos. Diversas outras instituições privadas e do Terceiro Setor desempenham papel importante na preservação da cultura indígena. Diversos projetos em universidades federais, como UFRGS, UFSCar, UnB, UFAM e UFRR, também investigam e registram o patrimônio imaterial relacionado à Astronomia de matriz indígena e afro-brasileira.

Recomendação 1: Estabelecer políticas públicas para registro e proteção dos saberes astronômicos tradicionais como patrimônio imaterial.

Recomendação 2: Estimular a formação de parcerias entre universidades, povos originários e órgãos de patrimônio.

Recomendação 3: Criar espaços museológicos ou centros de interpretação voltados à Astronomia indígena e afro-brasileira.

IV.6.2.3. Arquivos Documentais e Fotográficos

Diagnóstico: Arquivos históricos com registros observacionais, fotografias e documentos administrativos encontram-se em várias instituições, mas muitos estão em risco por falta de digitalização, pessoal técnico e recursos para conservação.

Diversas instituições ocupam-se atualmente destes arquivos:

- Arquivo Nacional e a Biblioteca Nacional, ambos no Rio de Janeiro, guardam manuscritos, mapas celestes e documentos administrativos sobre expedições astronômicas.
- Bibliotecas universitárias (como as da USP, do Observatório Nacional e da UFRJ) preservam livros raros, atlas astronômicos e revistas científicas dos séculos XIX e XX, com algumas obras raras de séculos anteriores.
- Observatórios astronômicos mais antigos como os do Rio de Janeiro e de São Paulo guardam registros de observações, cartas celestes, manuscritos, catálogos estelares, correspondências científicas, mapas e livros raros.
- O Laboratório Nacional de Astrofísica (MCTI) opera o Observatório do Pico dos Dias, primeiro observatório moderno do Brasil, desde 1979. Nele estão armazenados os registros de observação e os dados obtidos desde o início da operação do mesmo.
- Fotografias de eclipses, cometas e outros objetos celestes, da construção de observatórios e de eventos astronômicos históricos encontram-se armazenadas em múltiplas instituições no Brasil.

Recomendação 1: Criar consórcios interinstitucionais para digitalização e compartilhamento de acervos históricos.

Recomendação 2: Estabelecer protocolos de preservação digital de longo prazo.

Recomendação 3: Desenvolver catálogos online e portais de acesso público com metadados padronizados.

IV.6.2.4. Edifícios e Estruturas Arquitetônicas

Diagnóstico: Em distintos locais do país existem observatórios astronômicos, cúpulas, relógios solares, marcos de meridianos e outros marcos astronômicos construídos ao longo da história. Alguns são imóveis tombados pelo Patrimônio Histórico, outros não. O estado de preservação deste patrimônio é muito irregular, enquanto alguns estão preservados e recebem manutenção regular, outros estão quase abandonados.

Alguns exemplos emblemáticos de grandes instalações destinadas a observações astronômicas são o Observatório Nacional e o MAST, localizados no Morro de São Januário, na cidade do Rio de Janeiro, o Observatório do Valongo, no centro da cidade do Rio de Janeiro, o Parque CIENTEC, o antigo observatório da USP, no bairro da Água Funda em São Paulo, o Observatório Central da UFRGS, no centro da cidade de Porto Alegre e o Observatório da Escola de Minas de Ouro Preto, na cidade do mesmo nome.

Outras edificações desapareceram completamente, porém é possível que existam registros de sua existência e/ou das observações neles feitas. Alguns exemplos são o observatório dos monges beneditinos na Serra da Cantareira, em São Paulo, ou o observatório da Ponte Grande, às margens do rio Tietê, também na cidade de São Paulo.

Em síntese, as edificações relacionadas à Astronomia no Brasil estão em diferentes estados de conservação. Algumas são tombadas e preservadas, outras em abandono ou já perdidas. Há carência de um inventário nacional e de diretrizes específicas de proteção.

Recomendação 1: Criar um inventário nacional dos edifícios e estruturas astronômicas.

Recomendação 2: Incluir observatórios e estruturas correlatas nos programas de tombamento e proteção arquitetônica.

Recomendação 3: Promover a recuperação funcional desses espaços como centros de educação e cultura científica.

IV.6.3. Patrimônio Imaterial da Astronomia Brasileira

IV.6.3.1. Saberes tradicionais e indígenas

Diagnóstico: Os povos indígenas possuem conhecimentos profundos sobre os ciclos celestes, constelações, orientação espacial e relação entre céu e terra. Esses saberes são transmitidos oralmente e estão associados a práticas agrícolas, mitologias, rituais e formas de organização social.

Existem vários exemplos significativos — e em muitos casos ainda pouco explorados — dos saberes astronômicos dos povos nativos do Brasil:

- A Astronomia sofisticada dos Tupinambás, que habitavam a região onde hoje é o Estado do Maranhão, descrita pela primeira vez no século XVII por Claude d'Abbeville, religioso francês que conviveu com eles.
- O sítio arqueoastronômico de Calçoene, no Amapá, um observatório astronômico com orientações precisas das direções do Sol nos solstícios.
- O mapeamento do céu em constelações pela cultura Tupi-Guarani.
- Os calendários dos povos do Xingu.

Os saberes astronômicos dos povos originários são ricos, mas sua transmissão oral os torna vulneráveis à perda. Faltam políticas de documentação respeitosa e reconhecimento como patrimônio cultural.

Recomendação 1: Apoiar projetos de etnoAstronomia com metodologias participativas.

Recomendação 2: Reconhecer formalmente esses saberes como patrimônio cultural imaterial.

Recomendação 3: Fomentar materiais didáticos bilíngues e multilinguísticos com base em saberes indígenas que possibilitem o registro e preservação destes conhecimentos.

IV.6.3.2. Narrativas populares e cultura oral

Diagnóstico: A Astronomia está presente em histórias, cantigas e tradições populares, mas esse conteúdo permanece à margem dos debates patrimoniais e educacionais. Histórias sobre o céu estão presentes em mitos, cantigas, literatura de cordel e expressões populares, especialmente em comunidades rurais e sertanejas. A Astronomia popular brasileira, manifestada

em personagens como o “Homem na Lua”, o “Veado Celeste” ou o “Barco das Estrelas” são partes importantes da cultura oral.

Recomendação 1: Mapear e registrar essas narrativas em projetos de cultura oral.

Recomendação 2: Integrar o conteúdo popular sobre o céu às práticas de ensino e divulgação científica.

Recomendação 3: Valorizar a oralidade como forma legítima de preservação e transmissão de conhecimento astronômico.

IV.6.3.3. Experiências e Práticas Pedagógicas

Diagnóstico : Experiências educativas inovadoras em Astronomia, desenvolvidas por professores, astrônomos amadores e clubes, constituem patrimônio vivo, mas são pouco sistematizadas e documentadas. Essas práticas compõem um patrimônio vivo que se reinventa continuamente e também merece registro e reconhecimento.

Recomendação 1: Criar um repositório nacional de práticas pedagógicas em Astronomia.

Recomendação 2: Incentivar políticas de memória educativa que registrem e divulguem essas experiências.

Recomendação 3: Estimular a formação de redes de educadores e divulgadores da Astronomia.

IV.6.4. Desafios para a preservação

Diagnóstico: A memória astronômica brasileira sofre com a falta de políticas públicas específicas, escassez de recursos, infraestrutura deficiente e risco iminente de perda, tanto material quanto imaterial. Apesar de sua relevância, a preservação da memória astronômica no Brasil enfrenta diversos desafios: (i) *Falta de políticas públicas específicas*, com financiamento contínuo para restauração, catalogação e digitalização de acervos, bem como para a conservação e preservação dos imóveis históricos e dos equipamentos. (ii) *Falta de valorização do patrimônio científico*, em comparação com outros bens culturais mais visíveis. (iii) *Carência de infraestrutura e pessoal especializado* nas instituições responsáveis pelos acervos. (iv) *Risco de perda de conhecimento oral*, principalmente entre comunidades tradicionais e professores mais antigos.

Recomendação 1: Incluir a preservação da memória científica nas agendas do Ministério da Cultura, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e do IPHAN.

Recomendação 2: Estabelecer linhas de financiamento contínuas para projetos de preservação.

Recomendação 3: Formar e capacitar equipes multidisciplinares para lidar com o patrimônio astronômico.

IV.6.5. Caminhos para a valorização e preservação

IV.6.5.1. Inventário e catalogação de acervos

Diagnóstico: A ausência de um inventário nacional unificado impede o conhecimento pleno do que existe e dificulta estratégias de preservação integradas.

Recomendação 1: Implantar uma plataforma nacional de inventário colaborativo de acervos astronômicos. Que permita um mapeamento nacional de acervos históricos (materiais e imateriais), com apoio de universidades, museus e entidades de patrimônio.

Recomendação 2: Criar bancos de dados acessíveis ao público e a pesquisadores.

Recomendação 3: Elaborar e implementar políticas de restauração e preservação dos bens materiais, incluindo edificações, monumentos, marcos e demais edificações.

Recomendação 4: Elaborar e implementar programas de restauro e conservação de instrumentos antigos.

Recomendação 5: Estimular a formação de consórcios entre universidades, museus e arquivos para compartilhar informações sobre os respectivos acervos.

Recomendação 6: Associar acervos materiais e imateriais em sistemas integrados de informação.

IV.6.5.2. Digitalização e acesso público

Diagnóstico 1: Grande parte dos acervos bibliográficos e fotográficos está inacessível ao público e em risco de degradação.

Recomendação 1: Desenvolver planos nacionais de digitalização de documentos, imagens e registros de observações com infraestrutura descentralizada.

Recomendação 2: Criar repositórios de acesso aberto com metadados padronizados.

Recomendação 3: Publicar catálogos digitais

Recomendação 4: Promover exposições digitais e interfaces educativas para diferentes públicos.

IV.6.5.3. Educação patrimonial e divulgação científica

Diagnóstico: A memória da Astronomia raramente é incluída em atividades regulares de educação e divulgação científica.

Recomendação 1: Promover formações para educadores com foco em patrimônio científico.

Recomendação 2: Integrar a memória astronômica às práticas de ensino de ciências e história.

Recomendação 3: Produzir materiais acessíveis e atrativos sobre o patrimônio astronômico.

Recomendação 4: Integrar o tema da memória astronômica em projetos de educação científica e cultural.

Recomendação 5: Realizar exposições, oficinas, roteiros históricos, publicações e documentos voltados ao grande público.

IV.6.5.4. Políticas de preservação integrada

Diagnóstico: É muito importante que a Astronomia seja reconhecida como parte do patrimônio cultural brasileiro, por meio de políticas públicas coordenadas. A fragmentação institucional impede ações coordenadas e eficientes para a proteção do patrimônio astronômico.

Recomendação 1: Integrar o tema ao Plano Nacional de Cultura e aos planos estaduais e municipais.

Recomendação 2: Reconhecer o patrimônio astronômico como bem cultural em legislação específica.

Recomendação 3: Garantir recursos financeiros e técnicos para ações de preservação local com protagonismo comunitário.

IV.6.5.5. Parcerias interinstitucionais

Diagnóstico: A cooperação entre instituições é pontual e depende da iniciativa individual de pesquisadores e gestores. São também escassos os projetos interdisciplinares que unam história da ciência, antropologia, museologia e Astronomia.

Recomendação 1: Estimular redes formais entre universidades, museus, observatórios e comunidades.

Recomendação 2: Criar editais específicos para projetos interdisciplinares em patrimônio astronômico.

Recomendação 3: Valorizar o trabalho colaborativo entre ciência, educação, cultura e sociedade.

IV.7. A Astronomia a serviço da sociedade

A consolidação da Astronomia, como uma das ciências básicas mais importantes para o fortalecimento do país em termos de ensino, pesquisa, extensão, divulgação, educação, desenvolvimento científico e tecnológico, sem perder de vista as questões sociais na promoção da diversidade, equidade e inclusão é, certamente, uma decisão política. Temos, por meio da Astronomia, o desafio ético, político, comunicacional e educacional, que depende de uma atuação coordenada entre escolas, IES, museus, observatórios, planetários, indústrias, agências governamentais, sociedades científicas e distintas pessoas, todas e todos comprometidas e comprometidos com o aprofundamento da democracia no país.

O Plano Nacional da Astronomia 2025 trata-se, assim, de um contrato socio-científico que servirá de inspiração para toda a comunidade SAB na busca por construções mais efetivas e afetivas de relações Astronomia e Sociedade que traduz os anseios de todas as pessoas que fazem a Astronomia brasileira e aquelas pessoas que ainda precisarão chegar, rompendo as barreiras históricas.

A Astronomia, enquanto ciência que nos convida a pensar sobre a existência humana e nossa relação com o Cosmos, deve nos provocar não apenas com soluções para as perguntas que nos inquietam sobre o Universo, mas também nos ajudar a refletir sobre quem são as pessoas que estão fazendo essas perguntas.

A Astronomia tem o potencial raro de despertar admiração e provocar questionamentos profundos. Quando bem conduzida, sem perder de vista as relações viscerais com a sociedade, seus processos educativos e de divulgação científica promovem a apropriação crítica de conhecimentos e a valorização da ciência como parte do cotidiano, ou seja, das culturas. Há, assim, a construção dos diálogos interculturais e a democratização do conhecimento, fortalecendo o papel social da ciência, e da Astronomia em particular, como agente essencial para o desenvolvimento e o engajamento crítico das sociedades.

Capítulo Final

Conclusões e Recomendações

Atualmente, vivemos uma situação de estrangulamento no que diz respeito às possibilidades de pesquisa em Astronomia óptica no país. Embora haja diversos projetos em elaboração, o financiamento para completá-los não está garantido. O grande desafio para o governo nas próximas décadas em termos da Astronomia do país é ampliar o acesso da comunidade a centros de dados e instalações observacionais de alto nível, proporcionando aos pesquisadores brasileiros condições de serem competitivos internacionalmente. Com esse objetivo em mente, listamos uma série de recomendações que buscam sintetizar as principais discussões deste plano. Recomendações mais específicas podem ser encontradas nos capítulos temáticos anteriores.

V.1. Recomendações transversais e oportunidades para a Astronomia brasileira

Estamos à beira de uma nova era de descobertas transformadoras no campo da Astronomia. Ao combinar levantamentos observacionais em grande escala, novas gerações de telescópios e modelos físicos avançados, seremos capazes de nos posicionar como comunidade dentro de um panorama internacional ambicioso, mas realizável. O conjunto de grandes questões aqui detalhadas — da matéria escura às condições para a vida, passando pela física de extremos, pela formação de galáxias e pela arqueologia da Via Láctea — aponta para prioridades comuns que exigem coordenação nacional e cooperação internacional. A seguir sintetizamos as recomendações que emergem de todos os temas.

A comunidade científica brasileira manifesta, de forma clara, a necessidade de fortalecer o desenvolvimento nacional de instrumentação astronômica, priorizando capacitação técnica, criação de laboratórios experimentais e formação de equipes multidisciplinares. Garantir a manutenção contínua das facilidades existentes e fomentar novas iniciativas são passos fundamentais nesse processo.

A comunidade também destaca a necessidade de proteger o céu noturno, mitigar os efeitos das constelações de satélites e articular a Astronomia com outras áreas do conhecimento — como física de partículas, ciência de dados e engenharias — de modo a ampliar a capacidade do Brasil de atuar nas fronteiras mais avançadas e áreas de ponta que exigem forte coordenação internacional.

Fortalecimento da infraestrutura observacional multiescala, promovendo a sinergia entre facilidades espaciais e terrestres atuais e futuras

- Rede nacional (OPD, SOAR, Gemini, CFHT): modernizar óptica, instrumentação (SPARC4, STELES, SPIRou, SouthPol) e modelos de operação para levantamentos e monitoramento de longo prazo; incentivar a criação de redes nacionais do tipo AMON (Astrophysical Multimessenger Observatory Network) para distribuição em tempo real de alertas (óptico, raios X, rádio) e desenvolvimento de follow-up automático em telescópios de 1 a 4 m. É a vitrine do

desenvolvimento de tecnologia astronômica pelo Brasil, que deve receber um enfoque mais cuidadoso do poder público.

- Observatórios espaciais de grande escala (Euclid, Nancy Grace Roman, SPHEREx, Athena, PLATO, TESS, Ariel e o futuro HWO): é importante assegurar adesão formal a consórcios internacionais, participação em equipes científicas e acesso rápido aos dados especialmente quando os dados não forem públicos.
- Com relação aos equipamentos de ponta na superfície da Terra — tanto os já existentes (ALMA, ESO/VLT, LSST/Vera C. Rubin Observatory) quanto os de próxima geração (ELT, GMT, CTAO, SKA) —, a estratégia nacional deve consolidar e ampliar o envolvimento científico e técnico da comunidade astronômica brasileira. Isto implica promover acordos de adesão que, por um lado, insiram a comunidade brasileira como agente de peso nos espaços decisórios e, por outro, garantam acesso a tempo de telescópio de forma a fomentar o crescimento de uma massa crítica de usuários. No contexto emergente da Astronomia multimessenger e da física em condições extremas, a participação de forma estruturada em projetos como LIGO-Índia, Einstein Telescope, LISA, IceCube-Gen2 e KM3NeT, bem como na construção de infraestruturas como o CTAO, o ASTRI Mini-Array e o SWGO, asseguraria o desenvolvimento de expertise nacional em rápidas respostas a alertas de fontes transientes e consolidando a posição do Brasil no cenário astronômico global.
- Criação de infraestrutura para observação, simulação e análise de dados astrobiológicos e astroquímicos, que requerem laboratórios específicos, distintos daqueles usados em astrofísica.
- Proteção do céu: políticas de mitigação de constelações de satélites e de poluição luminosa, articuladas com órgãos ambientais e agências espaciais.

Construção de capacidade computacional e de ciência de dados

- Criar um Centro Nacional de Astrofísica de Dados e Simulações, integrado à rede SINAPAD (Sistema Nacional de Processamento de Alto Desempenho) — com possível hospedagem inicial em unidades já consolidadas, como o LNCC —, oferecendo computação de alto rendimento (HPC) em escala de petabytes, nuvem pública para dados abertos e suporte a inteligência artificial (IA).

Impulsionar formação de recursos humanos, inclusão e interdisciplinaridade

- Expandir a oferta de disciplinas de Astronomia na educação básica e superior, com formação continuada de professores e produção de materiais didáticos inclusivos e acessíveis.
- Expandir bolsas de formação (iniciação científica → pós-doc), com ênfase em jovens de grupos sub-representados, e programas de mobilidade internacional de longa duração.

- Equiparar o valor da bolsa de pós-doc do CNPq a valores próximos usados pela FAPESP, para evitar a concentração de cérebros em apenas um único Estado da Federação.
- Estimular colaborações interdisciplinares, criando programas que integrem Astronomia, Astrofísica, física de partículas, engenharia, ciência de dados, química, biologia, física solar e geociências — para fomentar inovação, novas tecnologias e transferência de conhecimento.
- Implementar políticas afirmativas para garantir a participação de grupos sub-representados e combater assédios e discriminações no ambiente científico.
- Criar e estruturar programas permanentes de divulgação, com financiamento regular, descentralização de planetários e observatórios, e formação de comunicadores científicos.

Fortalecer governança e financiamento

Com a combinação de novos telescópios, parcerias internacionais e poder computacional crescente, a Astronomia coloca o Brasil diante de uma escolha estratégica: ser mero usuário de grandes descobertas ou participar ativamente de sua construção. Cada real investido nesta agenda retorna em três frentes concretas:

- Formação de talentos altamente qualificados — jovens treinados em ciência de dados, instrumentação de precisão e inteligência artificial, competências centrais para a economia digital.
- Geração de tecnologias exportáveis — detectores criogênicos, óptica adaptativa, algoritmos de aprendizado profundo e infraestrutura de supercomputação que transbordam para setores como saúde, energia e segurança.
- Projeção internacional do país — liderança científica em colaborações globais, atração de parcerias industriais e reforço da imagem do Brasil como provedor de conhecimento de fronteira.

Estímulo à inovação tecnológica

- Criar um Sistema Nacional de Instrumentação Astronômica, com certificação, governança, metas e compartilhamento estruturado de laboratórios, e transformar essas instituições em Infraestruturas Estratégicas de Estado — com previsão de recursos plurianuais garantidos para instrumentação, para evitar descontinuidade que impedem a conclusão de projetos já iniciados.
- Fomentar a criação de *spin-offs* e *start-ups* a partir de pesquisas astronômicas, com editais específicos, parcerias com a indústria e estímulo ao empreendedorismo científico.
- No campo das pesquisas astronômicas a partir do Espaço, a sinergia natural com a Agência Espacial Brasileira deveria ser mais explorada, no sentido de unir aplicações científicas e desenvolvimento tecnológico, previsto no Programa Espacial Brasileiro.

Preservação e Valorização do Patrimônio Astronômico

Criar um inventário nacional unificado do patrimônio material e imaterial da astronomia, com digitalização de acervos, políticas de conservação e integração desse patrimônio em atividades educativas e de divulgação científica.

Apostar na investigação da natureza oculta do Universo, do Universo em Condições Extremas, da origem e o destino das Galáxias, da Via Láctea e o Lugar da Terra no Universo, e da vida no Cosmos não é apenas buscar respostas cósmicas; é cultivar inovação, soberania tecnológica e inspiração coletiva. O Brasil, ao articular sua comunidade astronômica em torno desses temas, pode não apenas se manter alinhado com a fronteira do conhecimento, mas contribuir de forma original e significativa. Essa inserção estratégica exige planejamento, investimento e vontade política, mas representa um caminho de alto retorno científico, educacional e tecnológico. Mais do que uma questão de ciência, trata-se de uma oportunidade de desenvolvimento nacional. A capacidade de interpretar grandes volumes de dados, formar quadros qualificados e integrar redes internacionais de conhecimento é um ativo estratégico para o século XXI. Ao investir em pesquisa de ponta em Astrofísica, o Brasil fortalece não apenas seu sistema de ciência e tecnologia, mas sua soberania científica, seu capital humano e sua capacidade de imaginar e construir futuros possíveis.

V.2. A situação do Brasil no European Southern Observatory

A adesão do Brasil ao Observatório Europeu do Sul (ESO) constitui decisão estratégica de fundamental importância para o futuro da Astronomia nacional. O processo, iniciado com a assinatura do Acordo de Adesão em 29 de dezembro de 2010, pelo então Ministro da Ciência e Tecnologia, Sérgio Machado Rezende (mediante Carta de Plenos Poderes), e pelo Diretor-Geral do ESO, o astrônomo holandês Tim de Zeeuw, subsequentemente aprovado pelo Senado Federal mediante o Decreto Legislativo nº 99 de 14 de maio de 2015, encontra-se atualmente em impasse, impossibilitando o país de usufruir plenamente dos benefícios científicos, tecnológicos e educacionais desta parceria.

Recomendamos a imediata constituição de uma comissão interministerial, envolvendo o MCTI, Ministério da Economia e Ministério das Relações Exteriores, entre outros atores, com o objetivo estudar meios para viabilizar financeira e operacionalmente a efetivação desta adesão. Tal medida é crucial para consolidar a posição do Brasil no cenário astronômico internacional e para efetivar a nossa participação no que é, por sua natureza única, o principal projeto estruturante para a astronomia nacional: um observatório de classe mundial que integra três sítios de observação de exce-

lência, abriga uma frota diversificada de telescópios (como o VLT, ALMA e o futuro ELT) e opera instrumentos que cobrem praticamente todas as faixas do espectro eletromagnético, assegurando assim acesso completo e competitivo da comunidade científica a infraestruturas observacionais de última geração.

A experiência prévia, entre 2010 e 2015, demonstrou o potencial desta colaboração, com pesquisadores e empresas brasileiras já participando ativamente em projetos de instrumentação antes da interrupção do processo.

No âmbito industrial, a adesão garantirá ao país participação em licitações anuais que superam € 100 milhões, com mecanismos que asseguram até 70% de retorno dos recursos investidos através de contratos com empresas nacionais. Projetos em desenvolvimento, como o espectrógrafo MOSAIC para o ELT e o NIRPS, atestam a capacidade da indústria nacional de alto desempenho em contribuir com componentes de precisão, software especializado e soluções avançadas em óptica e eletrônica.

Paralelamente, os programas educacionais e de divulgação científica do ESO representam oportunidade ímpar para fortalecer o ensino de STEM em todas as regiões do país, impactando milhões de estudantes e formando novas gerações de cientistas e engenheiros. A concretização desta adesão colocará o Brasil na vanguarda da pesquisa astronômica mundial, enquanto promove desenvolvimento tecnológico endógeno e consolida uma política de Estado para ciência, tecnologia e inovação.

V.3. Sobre a adesão do Brasil a grandes colaborações internacionais

A participação brasileira em grandes colaborações internacionais deve ser estrategicamente orientada por critérios que garantam o uso racional dos recursos públicos e a internalização efetiva de conhecimento. Nesse sentido, é fundamental condicionar o financiamento à produção nacional de equipamentos e/ou software para uso na colaboração, assegurando que o investimento transcenda o acesso a dados e se traduza em domínio tecnológico, capacitação de engenheiros e técnicos, e estímulo à inovação no parque industrial nacional. Essa internalização de métodos e tecnologias assegura que os recursos aplicados gerem um legado duradouro para o país, formando competências críticas e reduzindo a dependência externa em áreas estratégicas.

Além do retorno tecnológico, é imperioso maximizar o impacto científico e a governança da participação nacional. Para tanto, a participação deve garantir, sempre que possível, um assento para o grupo brasileiro nos conselhos deliberativos da colaboração, assegurando voz ativa nas decisões ci-

entíficas e estratégicas. Paralelamente, a seleção do grupo representante deve ocorrer mediante chamada pública ampla, promovida pelo MCTI ou instituição por este delegada. Este processo transparente e competitivo é vital para identificar as propostas de maior mérito científico e viabilidade técnica, assegurando que as oportunidades sejam abertas a toda a comunidade e que o Brasil seja representado por sua melhor capacidade, otimizando assim o retorno do investimento para a nação.

V.4. O papel das Fundações de Amparo à Pesquisa

As Fundações de Amparo à Pesquisa (FAPs) estaduais desempenham um papel estratégico na consolidação do Plano Nacional de Astronomia 2025, atuando como agentes fundamentais na articulação entre as políticas nacionais do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e as demandas regionais. A promoção de editais conjuntos entre o MCTI e as FAPs representa um mecanismo particularmente eficaz para esta articulação, permitindo alinhar prioridades nacionais com especificidades regionais. Sua atuação deve ser orientada para o cofinanciamento de projetos estruturantes, complementando os recursos federais e garantindo que as iniciativas alcancem diferentes territórios, especialmente aqueles com menor infraestrutura científica. Ao alinhar suas agendas ao MCTI, inclusive por meio de chamadas públicas cooperativas, as FAPs podem potencializar investimentos em áreas como a expansão de planetários, a formação de redes de observatórios e o fomento a programas de divulgação científica, assegurando que as ações do plano não se restrinjam a polos consolidados, mas promovam desenvolvimento equitativo em todas as regiões.

É fundamental que as FAPs evitem comprometer recursos em projetos de grande escala sem a garantia de cofinanciamento federal desde sua concepção. Iniciativas como a construção de observatórios, modernização de laboratórios ou lançamento de programas de inovação tecnológica exigem investimentos iniciais e custos de manutenção continuada. A ausência de um compromisso formal de cofinanciamento do MCTI pode levar a um cenário onde as FAPs, após financiarem a implantação, não assumam a manutenção futura do projeto, forçando o ministério a arcar com custos operacionais não previstos no Plano Nacional de Astronomia. A participação do MCTI desde a fase de planejamento assegura não apenas a viabilidade financeira de longo prazo, mas também a correta alocação de responsabilidades e a integração desses projetos a uma estratégia nacional, evitando duplicidade de esforços e garantindo sinergia entre as ações.

Dessa forma, a colaboração entre FAPs e MCTI deve ser pautada por planejamento conjunto, transparência na alocação de recursos e compromisso com a sustentabilidade das ações. Ao atuarem como parceiras estratégicas, as fundações estaduais fortalecem a implementação do PNA 2025, con-

tribuinco para que a Astronomia brasileira se consolide como vetor de desenvolvimento científico, tecnológico e social em todas as unidades da federação.

V.4. Sobre o acompanhamento e execução deste plano

Para acompanhar a execução de itens deste plano, propomos a criação da Rede Nacional de Astronomia, doravante RenAst, que teria as seguintes características:

1. Objetivo

A ReNAst tem como função principal assessorar o MCTI no direcionamento estratégico de recursos e políticas para projetos estruturantes em Astronomia, alinhando-se ao Plano Nacional de Astronomia 2025. Suas atribuições incluem:

- Identificar prioridades para investimentos em infraestrutura, grandes equipamentos e projetos nacionais.
- Propor editais temáticos e otimizar a alocação de recursos entre regiões.
- Articular cooperações internacionais e interdisciplinares.

2. Composição

A ReNAst teria um Conselho Assessor (CA), um Conselho Técnico-Científico (CTC) e uma Coordenação.

O Conselho Assessor (CA) será composto por membros do MCTI e demais ministérios ligados ao financiamento à pesquisa.

O Conselho Técnico-Científico será composto por 10 pesquisadores doutores de reconhecida competência, obedecendo aos critérios:

- Não mais de um representante por instituição.
- Representatividade de gênero (mínimo de 40% de cada gênero).
- Representatividade regional (mínimo de 4 regiões do país).

A coordenação será composta por 1 coordenador e seu substituto indicados pela Sociedade Astronômica Brasileira.

3. Mecanismo de Indicação e Seleção

Todos os programas de pós-graduação em Astronomia (nota 4+ na CAPES) e unidades de pesquisa do MCTI (ON, LNA, INPE, MAST) poderão enviar ao MCTI listas de indicações de até 5 nomes para compor o CTC da ReNAst.

A SEPPE/MCTI fará a seleção dos membros do CTC a partir dessas listas considerando:

- Excelência acadêmica e liderança em sua área.
- Equilíbrio institucional, regional e de gênero.
- Experiência em gestão de projetos e cooperação nacional.

Deste modo a rede teria legitimidade (ao ter nomes indicados pelos centros de produção de pesquisa astronômica), sem que o MCTI perdesse a autonomia de escolher seus membros.

4. Funcionamento

Os membros do CTC e da Coordenação da ReNAst terão um mandato: 3 anos, renovável apenas uma vez.

As reuniões serão trimestrais (virtuais ou presenciais), com relatórios técnicos entregues ao MCTI.

Subcomissões: Podem ser criadas para temas específicos (ex.: infraestrutura, formação de recursos humanos).

Vinculação: A rede será hospedada institucionalmente no Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA).

Apêndice A

Linha do tempo dos diferentes projetos listados no Capítulo II, separados em três categorias: Infraestrutura & Desenvolvimento, Infraestrutura Observacional e Instrumentação.

Infraestrutura e desenvolvimento

- Atualização de equipamentos para Instrumentação astronómica avançada: 2025 – 2034
- Nova Infraestrutura Multiusuários do LNA: 2022 – 2026
- Sensor estelar: 2014 – 2028
- Nanossatélites: 2026 – 2036

Infraestrutura observacional

- Ampliação e modernização do Observatório do Pico dos Dias: 2022 – 2030
- BINGO: 2025 – 2035
- Brazilian Decimetric Array (BDA): 2012 – 2027
- BRICS Intelligent Telescope and Data Network: 2027 – 2037
- Telescópio Gigante Magellan (GMT): 2014 – 2037
- Galileo Solar Space Telescope (GSST/SOLAR50): 2013 – 2030
- IMPACTON: 2020 – 2055
- Instalação do ASTRI-Mini Array: 2014 – 2055
- LLAMA: 2020 – 2026
- South American Gravitational wave Observatory - SAGO: 2027 – 2036
- Southern Wide-Field Gamma-ray Observatory (SWGGO): 2025 – 2030
- TLS0: 2026 – 2046
- T80-Sul - S-PLUS: 2017 – 2047
- PLATO: 2025 – 2036

- CHEOPS: 2019 – 2029
- CASSTOR: 2023 – 2029

Instrumentação

- Cassegrain u-Band Efficient Spectrograph: 2022 – 2030
- GCDs skipper para a astronomia: 2025 – 2030
- Desenvolvimento de Shutter Mecânicos Customizados: 2022 – 2026
- Desenvolvimento do Filter Box e Participação brasileira no MANIFEST: 2020 – 2038
- Espectrografo ECHARPE: 2012 – 2025
- Participação brasileira no ComCam para GMT: 2024 – 2035
- Participação brasileira no desenvolvimento do GMACS no GMT: 2016 – 2038
- Participação brasileira no desenvolvimento do AOTC: 2023 – 2038
- Renovação e Operação do Radio Observatório Pierre Kaufmann: 2023 – 2028
- STF5/Skipper: 2026 – 2028
- SAMPuls (SOAR Adaptive Module Upgrade): 2024 – 2027
- MOSAIC para E-ELT - Design & Construction do ICOS: 2023 – 2032

Apêndice B

Limites para a Astronomia de Big Data

Com base nas propriedades enumeradas abaixo, constata-se que geração de dados brutos acima de 0,1 PB/ano é o ponto em que requisitos de armazenamento, rede, HPC e governança mudam de escala e passam a demandar soluções de classe *petabyte* (Petabyte-Class Storage (ver Glossário)). Portanto, ao dimensionar Big Data em Astronomia, é crucial explicitar o Fator de Amplificação de Dados (FAD), que multiplica o volume bruto para estimar o footprint efetivo anual de cada levantamento, incorporando *derivados* (coadds, catálogos, fotometria), metadados/QA, artefatos intermediários, versionamento, replicações/backups e políticas ILM/HSM.

Além FAD, o dimensionamento deve contemplar: I/O e reprocessamento (paralelismo e *throughput* sustentado em escala PB), rede e distribuição (links $\geq 10\text{--}40$ Gb/s, *caches/mirrors* e políticas de *egress*), consulta e análise (particionamento espacial/temporal, índices e motores distribuídos), operação e custos (armazenamento em camadas quente/morna/fria, ILM/HSM, CAPEX/OPEX e equipe) e poder discriminativo (critérios objetivos que separam projetos com impacto infraestrutural elevado). Esses vetores, em conjunto com o FAD, determinam a classe Big Data do projeto e orientam requisitos de armazenamento, HPC, rede e orçamento.

Propriedades considerando 5 PB/ano:

(i) FAD: 0,5 PB/ano de brutos pode atingir valores de 1–3 PB/ano com *coadds*, catálogos, metadados, versões e 2–3 $\times$ em réplicas/backups, montantes que demandam storage em escala *petabyte* contínuo e escalável e uso de tecnologias de armazenamento em ambientes de Big Data/HPC (objeto + fita / Lustre / Ceph).

(ii) I/O e reprocessamento: ler 0,5 PB uma única vez a 1 GB/s consome ~ 6 dias; a 500 MB/s, ~ 12 dias. Reprocessos anuais exigem paralelismo massivo e filas HPC.

(iii) Rede e distribuição: transferir 0,5 PB leva ~ 46 dias a 1 Gb/s sustentado; na prática, demanda enlaces ≥ 40 Gb/s, *caches* e *mirrors*.

(iv) Consulta e análise: catálogos derivados atingem $10^9\text{--}10^{10}$ entradas, pedindo particionamento (HEALPix), índices espaciais/temporais e SQL distribuído/engines de *data lake* além de outras tecnologias de curadoria por agentes.

(v) Operação e custos: esse patamar impõe SLA de curadoria, pipelines versionados, AAI, DOIs e orçamentos de capex/opex típicos de centros de dados dedicados.

(vi) Poder discriminativo: separa levantamentos médios (J-PLUS, S-PLUS, SDSS histórico) daqueles que operam próximos ao regime petabyte/ano (p.ex., J-PAS em anos intensos), alinhando o termo “Big Data” ao impacto infraestrutural e não só ao bruto.

Comparação, exceto FAD, com 0,1 PB/ano (≈ 100 TB/ano):

- Reprocessamento: ler 0,1 PB a 1 GB/s ≈ 28 h; 0,5 PB ≈ 6 dias. Múltiplos *passes* tornam inviável sem forte paralelismo.
- Rede: mover 0,1 PB a 1 Gb/s ≈ 9 dias; 0,5 PB ≈ 46 dias — na prática exige ≥ 10 –40 Gb/s, *caches* e *mirrors*.
- Backups: LTO-9 (~ 18 TB nativo): 0,1 PB ≈ 6 fitas; 0,5 PB ≈ 28 fitas (duas cópias $\rightarrow 12$ vs 56).
- Armazenamento: 0,1 PB cabe num NAS único bem equipado; 0,5 PB normalmente pede objeto + fita e operações distribuídas.
- Análise: em 0,5 PB catálogos e *logs* já pressionam particionamento/índices distribuídos e orquestração de pipelines.

Conclusão: 0,1 PB/ano é de “alto volume institucional” e pode, sem considerar os produtos, ser tratado ainda fora da classe PSC; 0,5 PB/ano marca o salto operacional típico de Big Data (armazenamento, rede, HPC e governança de classe *petabyte*). Por isso recomendamos o uso de 0,5 PB como limiar mais discriminativo. Acima desse patamar, o ciclo de vida completo (exposições repetidas, metadados/QA, calibrações, mosaicos/coadds, catálogos/fotometria, artefatos intermediários, documentação/portais), somado a réplicas e backups, eleva o *footprint* anual típico para ~ 1 –3 PB. Esse volume exige Armazenamento em Classe Petabyte (PCS (camadas quente/morna/fria), rede ≥ 10 –40 Gb/s para ingestão/distribuição, HPC para processamento cíclico (passadas múltiplas sobre centenas de TB–PB) e governança FAIR. Abaixo desse nível (p.ex., 0,1 PB/ano), vários cuidados ainda se aplicam, mas sem o mesmo salto infraestrutural e de custos.

É importante salientar que para obter os valores apresentados na Tabela 1, compilamos ordens de grandeza publicadas/estimadas por projeto e ajustamos para refletir o ecossistema completo de dados (bruto + derivados). Assim, os valores apresentados na Tabela 1 são faixas indicativas por ano e podem variar com cadência observacional, eficiência de compressão, políticas de versionamento e janela operacional. Para planejamento de infraestrutura, recomenda-se considerar multiplicadores (3–10 $\times$) sobre o volume bruto devido a derivados, reprocessamentos e backups, além de políticas de retenção e espelhamento.

Apêndice C

Valores de Referência

Panorama Nacional: Atualmente, o Brasil investe cerca de 1% do seu Produto Interno Bruto (PIB) em ciência, tecnologia e inovação (CT&I), o que corresponde a aproximadamente R\$ 89,5 bilhões por ano, segundo dados da Apufsc-Sindical e do jornal *Valor Econômico*. Essa proporção é considerada modesta quando comparada a países desenvolvidos, como Alemanha e Estados Unidos, cujos investimentos superam 3% do PIB. O Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT) é a principal fonte de financiamento para pesquisa e desenvolvimento no país, e seus aportes vêm crescendo nos últimos anos — em 2023, foram investidos R\$ 9,96 bilhões, com previsão de R\$ 12,72 bilhões para 2024, conforme informações da *Agência Brasil*. O Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) mantém programas estratégicos para impulsionar a inovação e o desenvolvimento tecnológico, como o *Programa Mais Inovação* e o *Programa Centelha*. No campo emergente da inteligência artificial, o Plano Brasileiro de Inteligência Artificial (PBIA) prevê investimentos da ordem de R\$23 bilhões até 2028, segundo a *Agência Brasil*. Paralelamente, o governo federal direciona recursos a projetos de telecomunicações e outras áreas estratégicas, visando acelerar a transformação digital e aumentar a competitividade da indústria nacional, conforme divulgado pelas agências federais de fomento e notícias.

Pesquisa e Desenvolvimento: O Brasil investe cerca de 1,2% do PIB em pesquisa e desenvolvimento, um valor que pode ser aumentado para 2,5% conforme projetos como a PEC (Proposta de Emenda à Constituição) que prevê essa alocação. Projetos de Apoio: O Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) tem destinado mais de R\$26,3 bilhões do Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT) para fortalecer a ciência brasileira, incluindo projetos de Astronomia. Grande Telescópios: O Brasil é um membro fundador do Giant Magellan Telescope (GMT), que terá uma capacidade de observação 200 vezes maior que os telescópios atuais, e o investimento do estado de São Paulo de 50 milhões de dólares garante cerca de 4% do tempo anual de observação para cientistas. Nos últimos cinco anos, o investimento médio anual em tecnologia no Brasil é de cerca de US\$50 bilhões. Este valor inclui investimentos em software, hardware e serviços, e coloca o Brasil em 10º lugar no ranking mundial de investimentos em TI e HPC. A tendência é que os investimentos em transformação digital continuem crescendo na taxa média de 15% ao ano, com foco em áreas como Nuvem, Big Data & Analytics, Inteligência Artificial, Segurança da Informação, Robótica e Internet das Coisas.

Astronomia: As informações utilizadas para as estimativas apresentadas na seção 3.2 estão baseadas em fontes disponíveis na internet sobre investimentos em Astronomia no Brasil e projeção do custo de HPC para os próximos dez anos. Fonte Google: O investimento anual em Astronomia no Brasil não é precisamente divulgado em um valor único, mas sim em diversos projetos e iniciativas, como o investimento em telescópios, projetos de pesquisa e desenvolvimento, e apoio a estudantes e pesquisadores. O orçamento anual para os telescópios SOAR, Gemini e CFHT, por exemplo, é de aproximadamente US\$ 2.58 milhões desde 2009. Além disso, o Brasil investe em pesquisa e desenvolvimento cerca de 1,2% do PIB, e há projetos de aumentar essa porcentagem para 2,5%. Detalhes do investimento para Telescópios: o investimento anual em telescópios como SOAR, Gemini e CFHT é de US\$ 2.58 milhões, com o Gemini a representar cerca de 1,652 milhões, o SOAR 0,509 milhões e o CFHT 0,424 milhões.

Referências

- ALVES-BRITO, Alan et al. Astronomy for development in Portuguese-speaking countries. **Nature Astronomy**, v. 3, p. 366–368, 2019.
- ALVES-BRITO, Alan. Os corpos negros: questões étnico-raciais, de gênero e suas intersecções na Física e na Astronomia Brasileira. **Revista da Associação Brasileira de Pesquisadores/as Negros/as (ABPN)**, [S.l.], v. 12, n. 34, p. 816-840, 2020.
- ALVES-BRITO, Alan. A resiliência de corpos celestes museológicos: os céus como patrimônios históricos, culturais e naturais da humanidade. **Revista da Associação Brasileira de Pesquisadores/as Negros/As (ABPN)**, v. 18, n. 46, 2024.
- ANDERHAG, Per; WICKMAN, PER.-OLOF; HAMZA, KARIM. M. Signs of taste for science: a methodology for studying the constitution of interest in the science classroom. **Cultural Studies of Science Education**, v. 10, n. 2, p. 339–368, 2015.
- AUSTRALIAN ACADEMY OF SCIENCE. **Astronomy decadal plan 2026–2035**. 2025. Disponível em: <https://www.science.org.au/supporting-science/science-policy-and-analysis/decadal-plans-for-science/astro2035>. Acesso em: 02 set. 2025.
- BARBOZA, Christina Helena da Motta; LAMARÃO, Sérgio Tadeu de Niemeyer; SILVA, Tamires Nogueira da. O Observatório do Pico dos Dias: lugar de uma memória fluida. **História Oral**, v. 20, n. 1, p. 7-32, 2017.
- BARRES ALMEIDA, Ulisses et al. **Information technology & astronomical data in Brazil: Perspectives and proposals**. 2020. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2006.08703>. Acesso em: 02 set. 2025.
- BARTELMEBS, Roberta; FIGUEIRA, Maria Milena Tegon; IACHEL, Gustavo. Análise das questões da prova de III nível da Olimpíada Brasileira de Astronomia e Astronáutica: Contribuições da Epistemologia Genética. **Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia**, v. 1, n. 37, p. 51–86, 2024.
- BARRIO, Juan B. M. A Função Educativa dos Planetários: Entre a Cultura Científica e a Pedagogia da Astronomia. **Revista Astronomy Brasil**, v. 14, p. 68-75, 2007.
- BENITEZ-HERRERA; SPINELLI, Patricia Figueiró. Girls of Today and Women from the Past: When the History of Female Scientists Is Used to Engage Girls With Science. **Transversal: International Journal for the Historiography of Science**, n. 6, jun. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.24117/2526-2270.2019.i6.05>.
- BRASIL. **Lei nº 9.394, de 20 de dezembro de 1996**. Institui a Lei de diretrizes e bases da educação nacional. Brasília, DF: Presidência da República, 1996.
- BRASIL. **Resolução nº 1, de 17 de junho de 2004**. Institui Diretrizes Curriculares Nacionais para a Educação das Relações Étnico- Raciais e para o Ensino de História e Cultura Afro-Brasileira e Africana. Brasília, DF: Conselho Nacional de Educação, 2004.

- BRASIL. Conselho Nacional de Educação. Resolução nº 08, de 20 de novembro de 2012. Parecer CNE/CEB nº 16 de 2012. Define diretrizes curriculares nacionais para educação escolar quilombola na educação básica. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF: MEC, 2012a.
- BRASIL. Conselho Nacional de Educação. Resolução nº 05, de 22 de junho de 2012. Define diretrizes curriculares nacionais para educação escolar indígena na educação básica. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF: MEC, 2012b.
- BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular**. Brasília, DF: MEC, 2018. Disponível em: http://basenacionalcomum.mec.gov.br/images/BNCC_EI_EF_110518-versaofinal_site.pdf. Acesso em: 17 out. 2025.
- BUCCHI, Massimiano; TRENCH, Brian. Science communication research: themes and challenges. In: BUCCHI, Massimiano; TRENCH, Brian (ed.). **Routledge Handbook of Public Communication of Science and Technology**. 2. ed. London: Routledge, 2014. p. 1–13. DOI: 10.4324/9780203483794.
- CANALLE, João Batista Garcia et al. **XXII Olimpíada Brasileira de Astronomia e Astronáutica**. Rio de Janeiro: OBA, 2019.
- DE ABREU, William et al. Acessibilidade em planetários e observatórios astronômicos: uma análise de 15 instituições brasileiras. **JCOMAL**, v. 2, n. 2, p. A04, 2019.
- DICKMAN, Adriana Gomes; FERREIRA, Amauri. Ensino e aprendizagem de Física a estudantes com deficiência visual: desafios e perspectivas. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 8, n. 2, p. 1-14, 2008.
- DRLICA-WAGNER, Alex et al. **Report of the Topical Group on Cosmic Probes of Dark Matter for Snowmass 2021**. 2022. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2209.08215>. Acesso em: 02 set. 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2209.08215.
- FERREIRA, A. A. et al. Astronomia e culturas sob outros céus: saberes tradicionais e inclusão no ensino não formal. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 23, 2023.
- FIGUEIRA, M. M. T. **Ensino de Astronomia básica para deficientes visuais**. 2019. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Ciências Exatas) - Universidade Federal do Paraná, Setor Palotina, Palotina, 2019.
- HARRISON, J.; ZANELLA, A.; GIRDHAR, A. **Evaluation and insights from a sonification-based planetarium show intended for improving inclusivity**. 2023. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2401.04188>. Acesso em: 17 out. 2025.
- INTERNATIONAL PLANETARIUM SOCIETY. **The value of the planetarium in education**. 2023. (IPS Position Paper).
- LANGHI, Rodolfo.; NARDI, Roberto. **Educação em Astronomia: repensando a formação de professores**. São Paulo: Escrituras Editora, 2012.
- LIMA JUNIOR, P. et al. Quem gosta de ir ao planetário? **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 28, 2025 (no prelo).

- MAHABAL, Ashish et al. **AstroInformatics: Recommendations for Global Cooperation**. 2024. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/2401.04623>. Acesso em: 02 set. 2025.
- MARRANGHELLO, G. F. et al. A frequência de licenciandos em Geografia/EAD/UNIPAMPA aos planetários: contribuições para a política de popularização da ciência. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 26, n. 3, p. 43-55, 2021.
- MARRANGHELLO, G. F. et al. O planetário da Unipampa e a divulgação da ciência na região da campanha sul-rio-grandense. **Revista Pesquisa e Debate em Educação**, v. 13, n. 2, p. 147–162, 2025.
- MARTI, Frieda Maria; ALMEIDA, Wallace Carriço de; SPINELLI, Patrícia Figueiró. ‘Fake News e Verificação de Fatos em Astronomia e Ciências Afins’: Experiências de Um Curso de Formação a Distância no/com o Museu de Astronomia e Ciências Afins (MAST). In: **Seminário internacional as redes educativas e as tecnologias — tessituras de solidariedade e de convivências nos diferentes espaços tempos educativos**, 12, 2024, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://doity.com.br/anais/redes2024/trabalho/373790>. Acesso em: 17 out. 2025.
- MASSONI, N. T.; ALVES-BRITO, A.; CUNHA, A. M. Referencial curricular gaúcho para o Ensino Médio de 2021: contexto de produção, ciências da natureza e questões étnico-raciais. **Revista Educar Mais**, v. 5, n. 3, p. 583-605, 2021.
- MATSUURA, Oscar T. (org.). **História da Astronomia no Brasil**. Volume 1. Recife: CEPE, 2014.
- MATSUURA, Oscar T. (org.). **História da Astronomia no Brasil**. Volume 2. Recife: CEPE, 2014.
- NARDI, Roberto; LANGHI, Rodolfo. Dificuldades interpretadas nos discursos de professores dos anos iniciais do ensino fundamental em relação ao ensino da Astronomia. **Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia**, n. 2, p. 75-92, 2005.
- NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE. **Pathways to Discovery in Astronomy and Astrophysics for the 2020s**. Washington, DC: The National Academies Press, 2023. DOI: 10.17226/26141.
- NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (NIST). **Special Publication 1500-1r1**. [S. l.]: NIST, 2018. (Natl. Inst. Stand. Technol. Spec. Publ. 1500-1r1). DOI: 10.6028/NIST.SP.1500-1r1.
- OKTAY, Ö.; EKINCI, S.; ŞEN, A. İ. Investigation of middle school students’ thoughts about a mobile planetarium activity. **Elementary Education Online**, v. 19, n. 2, p. 695–707, 2020.
- PENTEADO, Eduardo M. et al. What to do in Extreme Times? An Analysis of the Astronomy Communication Actions in Brazil during the Covid-19 Pandemic. **CAPjournal**, v. 30, p. 6-16, 2021. Disponível em: [link suspeito removido]. Acesso em: 17 out. 2025.
- PLANO NACIONAL DE ASTRONOMIA (PNA). **Plano Nacional de Astronomia**. Brasília, DF: Ministério da Ciências e Tecnologia, 2010.
- POMPEA, S.; RUSSO, P. Astronomers Engaging with the Education Ecosystem: A Best-Evidence Synthesis. **Annu. Rev. Astron. Astrophys.**, v. 58, p. 313–361, 2020.

- PONTES SILVA, Ester de. **Potencialidades do Astroturismo Terrestre em Parques Estaduais do Rio de Janeiro**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Turismo) - Instituto Multidisciplinar, Universidade Federal Rural do Rio De Janeiro, Nova Iguaçu, 2022.
- RESENDE, Kizzy Alves. **A interação entre o planetário e a escola: justificativas, dificuldades e propostas**. 2017. Dissertação (Mestrado em Ensino de Astronomia) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.
- RIBEIRO DE ANDRADE; CAZELLI, Sibele. MAST, Um projeto precursor. In: MATSUURA, Oscar T. (org.). **História da Astronomia no Brasil**. Volume 2. Recife: CEPE, 2014. p. 358-374. Disponível em: http://site.mast.br/pdf_volume_2/mast_projeto_precursor.pdf. Acesso em: 17 out. 2025.
- ROSA, Reinaldo R. Astronomia do futuro: ciência de dados e tecnologia da informação. **Revista Brasileira de Astronomia**, n. 4, 2019. Disponível em: <https://sab-astro.org.br/wp-content/uploads/2022/01/RBA-4online.pdf>. Acesso em: 17 out. 2025.
- ROSA, Reinaldo R. Data Science Strategies for Multimessenger Astronomy. **An. Acad. Bras. Ciênc.**, v. 93, suppl. 1, 2021. DOI: 10.1590/0001-3765202020200861.
- SLOVINSCKI, Luciano. **Um diagnóstico da pesquisa em ensino de Astronomia no Brasil: contribuições para a formação de professores da educação básica**. 2022. Tese (Doutorado em Ensino de Física) – Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.
- SPINELLI, Patrícia Figueiró; RIBEIRO, Alice. Historical Telescopes and Astronomy Outreach. **Proceedings of the International Astronomical Union**, v. 13, S349, p. 464-469, 2018. DOI: 10.1017/S1743921319000619.
- WATANABE, G.; MUNHOZ, M. G.; KAWAMURA, M. R. Contribuições da sociologia para o estudo da divulgação científica na interface campo científico e espaço escolar. **Ensaio: Pesquisa em Educação em Ciências**, 2020.
- WYNSTRA, Finn; HURKENS, Krisje. Total Cost and Total Value of Ownership. In: EBIG, M. (ed.). **Perspektiven des Supply Management**. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005. p. 463–482. DOI: 10.1007/3-540-27018-3_21.