

CADERNOS DE ASTRONOMIA

NÚCLEO DE ASTROFÍSICA E COSMOLOGIA DA UFES

A CIÊNCIA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

O RENASCIMENTO DA RELATIVIDADE GERAL

Análise histórica das teses que sustentam um período de nova popularidade da teoria entre 1950 e 1960

ARQUEOASTRONOMIA DE SUPERNOVAS

A busca por referências a supernovas antigas em sítios arqueológicos no Brasil

INFORMAÇÃO ANTICIENTÍFICA

Campanhas de propaganda e produção de dúvida científica no meio do debate das mudanças climáticas



CADERNOS DE ASTRONOMIA

ISSN 2675-4754

www.periodicos.ufes.br/astronomia

CORPO EDITORIAL

Prof. Dr. Felipe Tovar Falciano (CBPF)
ftovar@cbpf.br

Prof. Dr. Hermano Velten (UFOP)
hermano.velten@ufop.edu.br

Prof. Dr. Júlio C. Fabris (Ufes)
julio.fabris@cosmo.ufes.org

Prof. Dr. Júnior Diniz Toniato (Ufes)
junior.toniato@ufes.br

CONSELHO CIENTÍFICO

Prof Dr. Adriano Mesquita Oliveira (Ifes)
adriano.oliveira@ifes.edu.br

Prof. Dr. José A. F. Pacheco (OCA, França)
pacheco@oca.eu

Prof. Dr. Sergio Mascarello Bisch (Ufes)
sergiobisch@gmail.com

DESIGN E LAYOUT

Julia Rocha de Oliveira
julia.oliveira.73@edu.ufes.br

Bruna da Silva Amorim Bragato
bruna.bragato@edu.ufes.br

Denis Campos Rodrigues
deniscr@gmail.com

ENDERECO

Núcleo de Astrofísica e Cosmologia.
Universidade Federal do Espírito Santo.
Av. Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras.
Vitória - ES. CEP 29075-010

E-mail: cadernos@cosmo-ufes.org

SOBRE A REVISTA

A revista Cadernos de Astronomia é uma publicação semestral do Núcleo Cosmo-Ufes da Universidade Federal do Espírito Santo e que conta também com recursos humanos do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas e da Universidade Federal de Ouro Preto (vide o Corpo Editorial).

Propõe-se a publicar artigos destinados à divulgação científica, história da ciência, ensino e pesquisa em astronomia e áreas correlatas. O objetivo é tornar acessível a um amplo público, que inclui estudantes secundários, graduandos e simpatizantes da área, o conhecimento científico relacionado à astronomia, cosmologia e gravitação.

Possuindo acesso totalmente gratuito, cada número dedica uma seção inteira a um tema específico, onde especialistas nacionais e internacionais discutem em detalhes aspectos qualitativos e quantitativos do tópico em questão.

SUBMISSÕES

A revista Cadernos de Astronomia aceita artigos inéditos versando sobre temas de divulgação científica, história da ciência, ensino e pesquisa nas áreas de astronomia, cosmologia e disciplinas afins. Além de artigos que busquem traduzir para uma linguagem simples tópicos avançados de ciências, também se aceita a submissão de textos que introduzam aspectos técnicos de temas variados visando estudantes de graduação e início de pós-graduação. Espera-se assim contribuir para a ampliação de uma bibliografia qualificada para a formação de jovens cientistas.

Para mais informações acesse:

<https://periodicos.ufes.br/astronomia/about/submissions>

ARTE DE FUNDO DA CAPA

Tracking Amazon Deforestation from Above

Créditos: Visible Earth/NASA

(<https://visibleearth.nasa.gov/images/145988/tracking-amazon-deforestation-from-above>)

CONTRACAPA

Fires raged in the Amazon again in 2020

Créditos: NASA's Earth Observatory

(<https://earthobservatory.nasa.gov/images/147946/fires-raged-in-the-amazon-again-in-2020>)



Cosmo-ufes

Carta ao Leitor

A evolução do Clima constitui um dos debates científicos mais acirrados da atualidade. Sabemos que o Clima evolui, que o nosso planeta, a Terra, já passou por diversas fases de aquecimento e de resfriamento. Estas fases deixaram marcas na geologia, na fauna e na flora. Os ciclos climáticos são relativamente bem conhecidos. A última glaciação, conhecida como Idade do Gelo, terminou há 10 mil anos atrás, tendo durado aproximadamente 100 mil anos. A Idade do Gelo marcou várias transições importantes. Durante o período glacial, o nível do mar diminui, o que facilitou o trânsito das espécies, inclusive a humana, entre várias regiões, em princípio separadas por mares. Na transição desta última glaciação para um período mais quente, animais de grande porte, como o Mastodonte, desapareceram. Argumenta-se que fenômenos como o desaparecimento de animais de grande porte e outros similares teriam levado à sedentarização do homem, e o início da agricultura e da criação animal. Outros períodos glaciais ocorreram em épocas mais remotas, sempre seguidos por períodos de temperaturas mais elevadas. Estudos de paleoclimatologia tentam traçar os diversos ciclos climáticos, alguns deles conhecidos como ciclos de Milankovitch estando relacionados às variações periódicas dos diversos movimentos da Terra.

Entretanto, o debate atual sobre o Clima adquiriu novos contornos com as evidências de que estamos vivendo um período de aquecimento global. O aumento da taxa de aquecimento conectado às atividades humanas no planeta, suscita discussões onde os aspectos científicos acabam se defrontando com questões políticas, assumindo por vezes contornos que podemos denominar de ideológicos. Os *Cadernos de Astronomia* dedicam a presente edição a textos que abordam a questão climática sob diversos pontos de vista, desde a paleoclimatologia, as grandes extinções já verificadas, até os estudos sobre os impactos da evolução climática na Amazônia, na Antártica e em outros biomas importantes. O monitoramento da evolução climática é abordado, assim como as técnicas para se medir os fluxos dos recursos hídricos usando gravimetria.

Em um momento de forte debate sobre a evolução do Clima, procuramos abordar os diversos aspectos da análise do clima em um contexto científico, buscando esclarecer como certas afirmações sobre o aquecimento global, e sua possível origem antrópica, se fundamentam em estudos objetivos e técnicos. O aprofundamento das discussões exige este enfoque. Ao mesmo tempo, os aspectos sociológicos e políticos do debate sobre o clima, influenciados por questões relacionadas à disseminação de informações de origem incerta, são discutidos em um artigo da seção *Divulgação Científica, Ciência e Sociedade*. No contexto atual, não se pode deixar de abordar também a vertente política e sociológica que surge na discussão sobre o clima.

O Brasil sediará neste ano a COP 30 (Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas de 2025). Ela ocorrerá, significativamente, entre 10 e 21 de novembro, em Belém do Pará, uma das mais importantes portas de entrada para a Amazônia, bioma cuja extensão

e importância é impossível negligenciar. Nesta conferência todos os aspectos citados acima, científicos em sua maioria, mas também suas implicações políticas, sociais e econômicas, estarão em pauta, e poderão nortear iniciativas futuras para lidar com os impactos das mudanças climáticas. Procuramos, nesta edição dos *Cadernos de Astronomia*, refletir pelo menos uma parte substancial dos tópicos que poderão ser discutidos nesta importante conferência sobre o Clima.

Apresentamos também neste número a tradução comentada do artigo do químico Svante Arrhenius, escrito há mais de 100 anos, e que foi um dos primeiros a abordar de forma científica as consequências da ação humana no Clima. Há também, um exercício científico de estimativa da vida média do CO₂ na atmosfera e o consequente aumento de temperatura até 2050.

A presente edição é complementada por outros trabalhos científicos. Na área da história da física, discute-se a historiografia que sustenta as teses do chamado renascimento da relatividade geral, ocorrido nas décadas de 1950 e 1960. A arqueoastronomia é abordada em um artigo que busca evidências arqueológicas no Brasil de supernovas antigas. Por fim, um ensaio sobre o problema da legitimação do conhecimento científico é discutido em um dos artigos da edição.

Boa leitura.

Os editores

Sumário

Seção Temática

Mudanças climáticas atuais	
<i>Amanda Rehbein e Tercio Ambrizzi</i>	6
Mudanças Climáticas e os Desafios Enfrentados pela Amazônia	
<i>Marco Aurélio de Menezes Franco</i>	11
Monitoramento oficial da vegetação nativa brasileira por imagens de satélite: o programa BiomasBR e os sistemas Prodes, Deter e TerraClass	
<i>Cláudio Aparecido de Almeida et al.</i>	23
O clima antártico e as quatro décadas de pesquisa no Programa Antártico Brasileiro	
<i>Cesar Amaral et al.</i>	39
Extinções massivas e o clima	
<i>J. A. de Freitas Pacheco</i>	48
Da gravidade à água: analisando as mudanças climáticas no Brasil com métodos computacionais	
<i>Fabian Trigo</i>	60
Raios Cósmicos e suas conexões com o Clima na Terra	
<i>André Massafferri Rodrigues</i>	72
Divulgação Científica, Ciência e Sociedade	
A Produção de ignorância sobre ciência: uma análise das relações entre propaganda, emergência climática e ética da informação	
<i>Carlos Eduardo Barros</i>	81
O renascimento da relatividade geral: teses e perspectivas historiográficas	
<i>Juliana Correia Ferreira, Juliana Youssef e Thiago Hartz</i>	95

Algumas reflexões sobre a construção e legitimação do conhecimento científico

Jorge Ernesto Horvath 113

Artigos

A vida média do CO₂ na atmosfera terrestre e o aumento de temperatura no horizonte 2050

José Antônio de Freitas Pacheco 120

Arqueoastronomia de Supernovas

Bianca Bulhões Martins et al. 126

Textos Clássicos

Tradução comentada do artigo "On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground" de Svante Arrhenius (1896)

Matheus Barbosa Rasch e Maria Tereza Weitzel Dias Carneiro Lima; Felipe Tovar Falciano (tradutor) 141

Mudanças climáticas atuais

Amanda Rehbein e Tercio Ambrizzi

Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas - USP

Resumo

O desenvolvimento humano, iniciado há cerca de 300 mil anos, sempre ocorreu em paralelo às variações naturais do clima. No entanto, desde a Revolução Industrial, a ação antrópica intensificou o efeito estufa, elevando a temperatura média global e alterando os padrões climáticos, resultando em impactos severos, como o aumento das temperaturas, alterações nos padrões de precipitação e aumento na frequência de eventos severos de tempo, como tempestades, tornados e furacões. Este artigo explora as principais mudanças climáticas atuais e como elas são monitoradas por meio da análise de dados históricos. Além disso, apresenta projeções de modelos climáticos que permitem antecipar cenários futuros, incluindo o aumento das temperaturas e mudanças nos padrões de precipitação, especialmente na América do Sul. Por fim, o texto destaca a importância de ações concretas para mitigar as emissões de gases de efeito estufa, responsáveis pelas mudanças climáticas atuais, utilizando tecnologias já disponíveis. Concluímos que, para enfrentar a emergência climática, é fundamental integrar os recursos humanos e naturais do Brasil, aliados ao conhecimento científico, a fim de implementar soluções eficazes para reduzir os impactos e proteger as populações mais vulneráveis.

Abstract

Human development, which began around 300,000 years ago, has always occurred in parallel with natural climate variations. However, since the Industrial Revolution, human action has intensified the greenhouse effect, raising the average global temperature and altering weather patterns, resulting in severe impacts such as rising temperatures, changes in precipitation patterns and an increase in the frequency of severe weather events such as storms, tornadoes and hurricanes. This article explores the main current climate changes and how they are monitored through the analysis of historical data. In addition, it presents projections from climate models that allow us to anticipate future scenarios, including rising temperatures and changes in precipitation patterns, especially in South America. Finally, the text highlights the importance of concrete actions to mitigate greenhouse gas emissions, responsible for current climate change, using technologies already available. We conclude that, in order to face the climate emergency, it is essential to integrate Brazil's human and natural resources, combined with scientific knowledge, in order to implement effective solutions to reduce impacts and protect the most vulnerable populations.

Palavras-chave: mudanças climáticas, aquecimento global, projeções climáticas, América do Sul, mitigação.

Keywords: climate change, global warming, climate projections, South America, mitigation.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v6n1.47590](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v6n1.47590)

1 Introdução

O desenvolvimento da humanidade, iniciado cerca de 300 mil anos atrás, ocorreu em uma escala temporal muito menor, comparado com a história da Terra (mais de 4,5 bilhões de anos). Esse desenvolvimento foi acompanhado das variações naturais da atmosfera. Isso implica que nosso clima passou por constantes, embora lentas, mudanças naturais. Tais mudanças climáticas naturais foram relacionadas aos ciclos de Milankovitch, reguladores da quantidade de ra-

diação solar recebida pela Terra em escala geológica, grandes erupções vulcânicas capazes de injetar na alta atmosfera grande quantidade de partículas refletoras de radiação solar incidente e a própria atividade solar com ciclos de aproximadamente 11 anos. Esses fenômenos foram responsáveis por períodos de resfriamento da atmosfera, resultando em eras do gelo, e aquecimento, levando aos períodos interglaciares.

Com a evolução das atividades industriais, iniciadas por volta de 1750, outra forçante climática surgiu e está amplamente associada ao aumento

das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) resultantes, entre outros, da queima de combustíveis fósseis, desmatamento e práticas agrícolas insustentáveis, ou seja, é uma forçante antrópica (devido ao Homem) e não ocorrida na natureza espontaneamente, ocasionando mudanças no clima ao redor do mundo. Os impactos são muitos e descritos extensivamente nos relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, acrônimo em inglês) [1]. O aquecimento global, caracterizado pelo aumento das temperaturas médias globais, é o exemplo mais evidente da alteração do clima, com registros de temperaturas recordes nos últimos anos. A alteração nos padrões de precipitação tem levado a secas prolongadas em algumas regiões, enquanto outras enfrentam chuvas intensas e inundações. O aumento do nível do mar, causado pelo derretimento das calotas polares e expansão térmica da água dos oceanos, ameaça as áreas costeiras, afetando milhões de pessoas e ecossistemas. Além disso, eventos climáticos extremos, como furacões e ondas de calor, tornaram-se mais frequentes e intensos, representando uma ameaça crescente à segurança humana e à biodiversidade.

A relevância do tema das mudanças climáticas é imensa, pois elas afetam diretamente a qualidade de vida das populações, com impactos profundos na saúde pública, na produção de alimentos e na estabilidade econômica. As mudanças climáticas também exacerbam desigualdades sociais, atingindo de forma mais severa as comunidades mais vulneráveis, que possuem menos capacidade de adaptação e resiliência. Portanto, compreender as causas, os efeitos e as possíveis soluções para o fenômeno das mudanças climáticas é essencial para que possamos mitigar seus impactos e nos adaptar aos novos desafios que surgem. Este artigo tem como objetivo apresentar de uma forma simples as principais mudanças climáticas atuais, como elas são monitoradas e projetadas.

2 O aquecimento global e as mudanças climáticas

As condições atmosféricas observadas, como temperatura, umidade, precipitação, ventos, etc., em um determinado lugar e em um curto período

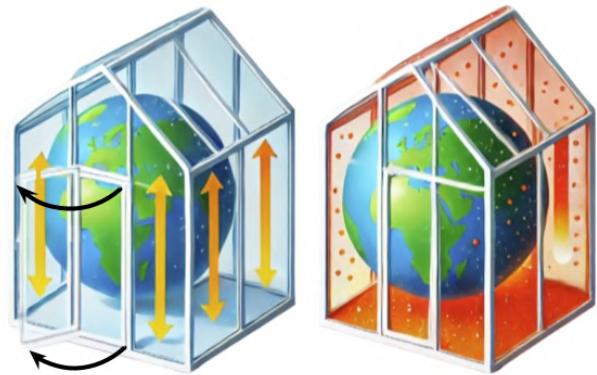


Figura 1: Esquemas de uma estufa vegetal (esquerda) e da atmosfera terrestre com os gases de efeito estufa (direita).

de tempo, geralmente horas ou dias, descrevem as condições de tempo deste lugar. Desta forma, se em um determinado dia está chovendo e a temperatura está mais baixa que no dia anterior, estamos descrevendo o tempo neste dia. Por outro lado, quando nos referimos às condições atmosféricas médias de uma região durante um período mais longo, geralmente décadas ou séculos, estamos falando do clima. O clima inclui a análise das variações do tempo, mas no contexto de uma média estatística ao longo do tempo. Portanto, enquanto o tempo pode mudar rapidamente, o clima é um fenômeno mais estável e a longo prazo. Por exemplo, o clima de uma região tropical é caracterizado por temperaturas elevadas e chuvas frequentes, enquanto uma região polar tem um clima frio e seco. As mudanças climáticas referem-se a alterações significativas e duradouras nos padrões climáticos da Terra. Nos últimos três séculos, as atividades humanas têm sido a principal força motriz das mudanças climáticas observadas atualmente em todo o mundo, especialmente através do aumento de emissões de GEE.

O efeito estufa é um fenômeno natural na atmosfera da Terra e é responsável por manter o planeta aquecido o suficiente para sustentar a vida. Esse fenômeno é comparável a um efeito que ocorre em uma estufa de plantas: enquanto as paredes de vidro ou plástico transparente da estufa permitem a entrada de luz solar, elas impedem que o calor escape, criando um ambiente mais quente (Figura 1). Na Terra, certos gases presentes em nossa relativamente fina atmosfera (aproximadamente 12 km) agem de maneira se-

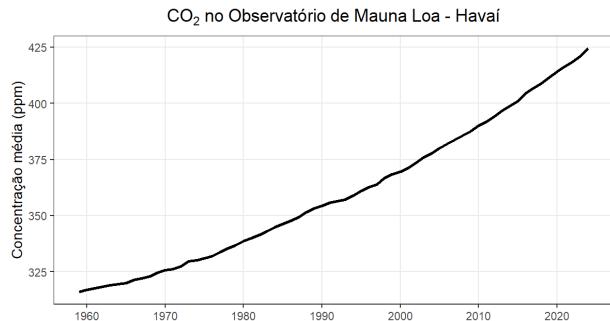


Figura 2: Concentrações médias anuais globais de CO₂. Fonte de dados: NOAA/GML (gml.noaa.gov/ccgg/trends/).

melhante às paredes de vidro ou plástico transparente da estufa, aprisionando o calor na forma de radiação infravermelha emitida pela superfície da Terra que deveria escapar para o espaço (Figura 1).

Os gases que causam o efeito estufa que nos referimos são principalmente vapor d'água (H₂O; 50%), nuvens (25%), dióxido de carbono (CO₂; 20%), entre outros (5%), incluindo o gás metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), ozônio (O₃) e hidrofluorcarbonetos (HFCs) e formam uma espécie de “cobertura” que impede que parte do calor da Terra escape para o espaço. Sem o efeito estufa natural, a temperatura média da Terra seria cerca de -18°C , ou seja, modificando completamente as condições favoráveis para a vida no nosso planeta na forma que conhecemos. No entanto, quando a concentração de GEE aumenta devido às atividades humanas, como a queima de combustíveis fósseis e o desmatamento, por exemplo, seu efeito se intensifica. Isso resulta no aquecimento excessivo da atmosfera, o que tem causado o aquecimento global e as mudanças climáticas associadas.

A Figura 2 mostra a evolução das concentrações de CO₂ desde 1958, quando as medições foram iniciadas no Observatório de Mauna Loa, no Havaí. Mauna Loa é uma estação de monitoramento de CO₂ de referência, especialmente importante por ser um local relativamente isolado, longe de grandes fontes de emissão de CO₂, o que permite observações mais representativas das concentrações globais desse gás. Note que a linha apresenta um aumento constante deste gás ao longo do tempo. Ao observar a Figura 3, a qual apresenta as temperaturas médias globais desde

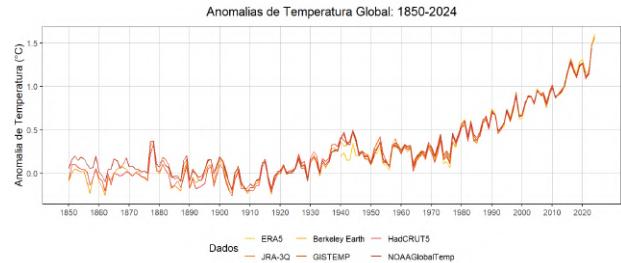


Figura 3: Temperatura média global (°C). Fonte de dados: C3S (<https://climate.copernicus.eu/about-data-and-methods>).

1850, vemos que a partir do final dos anos 1950, a temperatura média do planeta começa a subir, coincidindo com o aumento constante do CO₂ observado na Figura 2.

Voltando ao efeito da estufa para cultivo de plantas, à medida que aumenta o calor no interior da estufa, janelas são abertas para haver ventilação e não causar um superaquecimento, que poderia comprometer a saúde das plantas cultivadas em seu interior. Na Terra, à medida que o planeta esquenta, não existem janelas a serem abertas. Ao invés, o calor é absorvido pelos oceanos e outros ecossistemas, causando um desequilíbrio e comprometendo o bom funcionamento de todos os organismos vivos. Desta forma, alguns dos efeitos ambientais resultantes das mudanças climáticas aceleradas que observamos com auxílio de medições locais e sensoriamento remoto via satélites em todo o globo, incluem o aumento em si da temperatura média na superfície da Terra, causando o derretimento das calotas polares e dos glaciares; elevação do nível do mar devido à expansão da água dos oceanos que vem absorvendo o calor extra da atmosfera, somado às águas do derretimento de geleiras e mantos de gelo sobre terra, tendo já ocasionado um aumento de 23 centímetros acima dos níveis observados em 1850; alterações nos ecossistemas, como, por exemplo, o aumento da acidificação dos oceanos, que podem levar à extinção de espécies; além do aumento da frequência e intensidade de eventos climáticos extremos, como secas severas prolongadas ou inundações devido a altos volumes de precipitação em um curto espaço de tempo.

De fato, ano após ano registramos e sentimos os efeitos descritos anteriormente. A Organização Meteorológica Mundial [2] relatou a ocorrência de 11.778 desastres climáticos e hídricos, causando

Mudanças na Temperatura Média ($^{\circ}\text{C}$) em 2041-2060

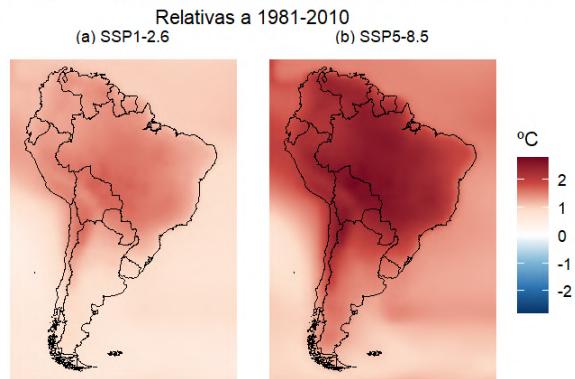


Figura 4: Mudanças na temperatura média ($^{\circ}\text{C}$) prevista para a metade do século XXI (2041-2060) em relação ao período de 1981-2010 [1850-1900]. Dois cenários do IPCC foram usados: a) SSP1-2.6 e b) SSP5-8.5, onde os resultados apresentaram uma média de, respectivamente, 32 e 34 diferentes modelos. Fonte dos dados: [4].

2 milhões de mortes e US\$4,3 trilhões em perdas econômicas entre 1970 e 2021. Só em 2024, segundo o último relatório “Climate and Catastrophe Insight” da AON seguradora britânica [3], ciclones tropicais, tempestades convectivas severas e inundações foram responsáveis pela maioria dos desastres, perdas de vidas (cerca de 18 mil) e econômicas (mais de US\$ 300 bilhões) ao longo do ano. Através das leis da termodinâmica, à medida que a temperatura média global aumenta, a capacidade da atmosfera de reter mais vapor d’água aumenta. Combinados, o calor e a umidade, são os principais combustíveis para a formação e desenvolvimento de sistemas de tempestades, como as relatadas pela OMM e AON. Portanto, já estamos observando efeitos claramente associados ao aquecimento global de forçante antrópica.

3 Projeções climáticas

Para nos ajudar a entender e prever os impactos do aquecimento global são utilizadas diversas ferramentas robustas, como uma rede de medições de variáveis meteorológicas globais e modelagem numérica do clima [5, 6].

Apesar da complexibilidade do sistema climático terrestre, os modelos numéricos que descrevem o clima atingiram um estágio onde podem ser muito úteis para descrever o clima futuro sob determinadas circunstâncias. Por isso, usamos diferentes dados, abordagens e cenários. Na Amé-

Mudanças na Precipitação Média (%) em 2041-2060

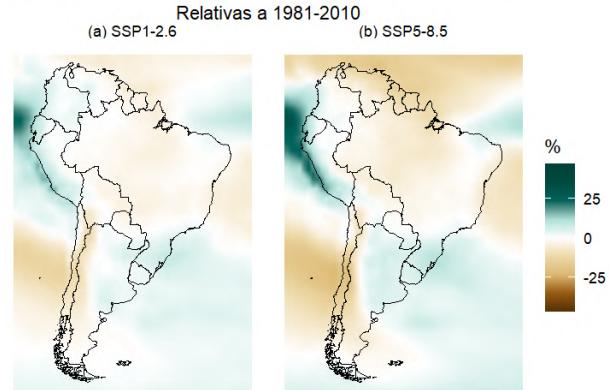


Figura 5: Mudanças na precipitação média (%) prevista para a metade do século XXI (2041-2060) em relação ao período de 1981-2010. Dois cenários do IPCC foram usados: a) SSP1-2.6 e b) SSP5-8.5, onde os resultados apresentam uma média de respectivamente 31 e 33 diferentes modelos. Fonte de dados: [4].

rica do Sul, particularmente, encontramos desafios como a extensão latitudinal do continente, a cordilheira dos Andes e as características climáticas locais e regionais, que são influenciadas por múltiplos fatores. A seguir apresentamos os mais recentes prognósticos produzidos dentro desses esforços científicos globais para entender e simular nosso clima. As Figuras 4 e 5 apresentam, respectivamente, as projeções das mudanças nas temperaturas médias e precipitação para a metade deste século (2041-2060) comparado à climatologia de 1981 a 2010, onde assumiu-se que nosso planeta poderia aquecer com menos intensidade (Figura 4a e Figura 5a) e com projeções de grande aumento dos GEE neste período (Figura 4b e Figura 5b).

4 Conclusões

Com mais de 8 bilhões de habitantes e aumentando, diariamente, produzindo constantemente lixo em forma sólida, líquida e gasosa, é inevitável que o sistema climático natural responda à altura. É importante notar que, enquanto o tempo pode variar de maneira imprevisível e rápida, as mudanças climáticas referem-se a alterações mais lentas e duradouras nos padrões climáticos globais. As mudanças climáticas, portanto, não são observadas em eventos de curto prazo, como uma onda de calor ou uma tempestade, mas em tendências a longo prazo, como o aumento das

temperaturas médias anuais e mudanças nos padrões de precipitação em uma região, aumento da frequência e/ou intensidade destes fenômenos.

As projeções para um futuro próximo (metade deste século) indicam aumentos significativos da temperatura média na América do Sul, mesmo em um cenário de emissões de GEE mais brando. Por outro lado, os padrões de precipitação variam ao longo do continente, com uma porcentagem maior de mudanças positivas (mais chuvas) na porção sudeste do continente e negativa (menos chuvas) na parte norte, que envolve a Amazônia.

Atualmente existem diferentes tecnologias que poderiam mitigar as emissões de gases de efeito estufa, particularmente o CO₂ (dióxido de carbono) que vem do uso de combustíveis fósseis e queimadas, correspondendo a quase 80% das emissões. Impossível continuarmos vivendo sem existir um plano concreto de ação. O Brasil é um país economicamente rico, possui recursos humanos e naturais em abundância, com excelentes universidades formadoras de profissionais em meteorologia, climatologia, hidrologia e tantas outras áreas imprescindíveis para garantir uma previsão e estratégias de qualidade para toda a população. O que falta para combinar essas sinergias? Estamos passando por uma emergência climática e se nada for feito para mitigá-la, muitas vidas e bens patrimoniais ainda serão perdidos.

Sobre os autores

Amanda Rehbein (amanda.rehbein@usp.br) é pós-doutoranda no Departamento de Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (USP), Brasil, e integrante do Núcleo de Pesquisa em Mudanças Climáticas da USP (INCLINE - INTER-disciplinary CLimate INvestigation cEnter).

Tercio Ambrizzi (tercio.ambrizzi@iag.usp.br) é Professor Titular do Departamento de Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (USP), Brasil. É coordenador do Núcleo de

Pesquisa em Mudanças Climáticas da USP (INCLINE - INTER-disciplinary CLimate INvestigation cEnter). Membro titular da Academia Brasileira de Ciências. É atualmente diretor do Instituto de Energia e Ambiente da USP.

Referências

- [1] S. K. Gulev et al., *Changing State of the Climate System*, in *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, editado por V. Masson-Delmotte et al. (Cambridge University Press, 2021), 287–422.
- [2] Organização Meteorológica Mundial, *Mais de 90% das mortes por desastres naturais ocorreram em países em desenvolvimento*, ONU News (2023). Disponível em <https://news.un.org/pt/story/2023/05/1814787>, acesso em jan. 2025.
- [3] AON plc, *Climate and Catastrophe Insight* (2025). Disponível em <https://assets.aon.com/-/media/assets/aon/reports/2025/2025-climate-catastrophe-insight.pdf>, acesso em jan. 2025.
- [4] J. M. Gutiérrez et al., *Atlas*, in *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, editado por V. Masson-Delmotte, P. Zhai et al. (Cambridge University Press, 2021), 1927–2058.
- [5] T. Ambrizzi et al., *The state of the art and fundamental aspects of regional climate modeling in South America*, *Annals of the new york academy of sciences* **1436**(1), 98 (2019).
- [6] M. Iturbide et al., *Implementation of FAIR principles in the IPCC: the WGI AR6 Atlas repository*, *Scientific Data* **9**(1), 629 (2022).

Mudanças climáticas e os desafios enfrentados pela Amazônia

Marco Aurélio de Menezes Franco

Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo

Resumo

A Amazônia, um dos biomas mais ricos em biodiversidade do planeta, desempenha um papel essencial na regulação climática global e no ciclo hidrológico da América do Sul. No entanto, as mudanças climáticas e a intensificação das atividades humanas, como o desmatamento e as queimadas, têm causado impactos significativos na estabilidade ecológica da região. Este artigo analisa os efeitos das transformações no uso da terra no clima amazônico, enfatizando a relação entre a degradação florestal, a emissão de gases de efeito estufa (GEE) e as alterações nos padrões de precipitação. Também são discutidos os impactos da poluição atmosférica, incluindo aerossóis de origem local e transcontinental, que afetam o balanço radiativo e a formação de chuvas. Diante desse cenário, reforça-se a necessidade de políticas ambientais rigorosas e cooperação internacional para mitigar os efeitos das mudanças climáticas e preservar a resiliência do bioma. A realização da COP 2025 em Belém do Pará é destacada como uma oportunidade estratégica para fortalecer compromissos globais voltados à conservação da floresta e à mitigação dos impactos ambientais.

Abstract

The Amazon, one of the most biodiverse biomes on the planet, plays a crucial role in global climate regulation and the hydrological cycle of South America. However, climate change and the intensification of human activities, such as deforestation and wildfires, have significantly impacted the region's ecological stability. This article analyzes the effects of land-use changes on the Amazonian climate, emphasizing the relationship between forest degradation, greenhouse gas emissions, and alterations in precipitation patterns. It also discusses the impacts of atmospheric pollution, including locally and transcontinentally sourced aerosols, which affect the radiative balance and rainfall formation. Given this scenario, the need for strict environmental policies and international cooperation is reinforced to mitigate the effects of climate change and preserve the biome's resilience. The upcoming COP 2025 in Belém do Pará is highlighted as a strategic opportunity to strengthen global commitments to forest conservation and environmental impact mitigation.

Palavras-chave: Amazônia, mudanças climáticas, uso da terra.

Keywords: Amazon, climate change, land use.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v6n1.47433](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v6n1.47433)

1 Introdução

A floresta amazônica é considerada um gigantesco e complexo laboratório natural, composto pela maior biodiversidade vegetal e animal do planeta [1, 2]. Ela abriga cerca de 40.000 espécies de plantas, mais de 400 espécies de mamíferos e em torno de 1300 espécies de aves, além de uma incomensurável quantidade de espécies de invertebrados e micróbios [3]. A bacia amazônica possui uma área estimada de 6,7 milhões de km², abrangendo diversos países e territórios ultramarinos, dentre eles, Brasil, Colômbia, Peru, Equador, Bolívia, Suriname, Guiana e Guiana Francesa [4]. A maior parte da floresta amazônica encontra-se no

Brasil, de aproximadamente 62%, com uma área de aproximadamente 5,02 milhões de km², o que, em termos quantitativos, representa quase a metade do território brasileiro [5].

A Amazônia é uma das regiões de maior diversidade cultural do planeta, sendo lar de centenas de povos originários, cada um com sua própria língua, costumes, conhecimentos tradicionais e modos de vida intimamente ligados ao ecossistema florestal [6]. Essas comunidades desempenham um papel fundamental na preservação da biodiversidade e na manutenção do equilíbrio ecológico da floresta, uma vez que seu conhecimento ancestral sobre plantas medicinais, manejo sus-

tentável dos recursos naturais e práticas agrícolas adaptadas à floresta contribui para a resiliência socioambiental da região [7,8]. Um exemplo importante, dentre incontáveis outros, do papel dos povos originários na bacia amazônica é a característica do solo conhecida como terra preta de índio [9]. Esse tipo de solo fértil, encontrado em diversas áreas da Amazônia, é resultado de práticas agroecológicas indígenas realizadas ao longo de milênios [10,11]. A terra preta é caracterizada por sua elevada concentração de matéria orgânica, carvão pirogênico, fragmentos de cerâmica e resíduos biológicos, tornando-se extremamente rica em nutrientes essenciais para a agricultura.

Diferente dos solos amazônicos naturais, que são geralmente pobres em nutrientes devido à alta lixiviação — processo no qual a água da chuva dissolve e transporta minerais e nutrientes para camadas mais profundas do solo, reduzindo sua fertilidade —, a terra preta retém sua fertilidade por séculos e tem sido objeto de estudos sobre sustentabilidade e recuperação de áreas degradadas. Além disso, pesquisas indicam que esse solo é um dos primeiros exemplos de engenharia ecológica, demonstrando o conhecimento avançado das populações originárias sobre a gestão do ambiente e a melhoria da produtividade agrícola sem comprometer a floresta [12]. No entanto, esses povos enfrentam desafios crescentes devido ao desmatamento, à exploração ilegal de recursos e às mudanças climáticas, ameaças que impactam não apenas suas formas de vida, mas também o equilíbrio dos ecossistemas amazônicos [13].

A Amazônia é uma das poucas regiões continentais do planeta em que a atmosfera de sua região central se aproxima de condições sem impacto antropogênico no período das chuvas, compreendido entre fevereiro e maio [14]. Isto significa que a maior parte das interações entre biosfera e atmosfera consiste em processos naturais, ou seja, sem a direta interferência antropogênica. Estudos mostram que essa condição de atmosfera é aproximadamente similar àquela encontrada nos períodos pré-revolução industrial, especialmente no que se relaciona às baixas concentrações de materiais particulados, denominados aerossóis atmosféricos [15].

É importante ressaltar que esses aerossóis podem ser classificados em duas categorias principais: primários e secundários [16]. Os primá-

rios são emitidos diretamente por fontes naturais, como esporos de plantas e poeira do solo, ou por atividades humanas, como queima de combustíveis fósseis e processos industriais. Já os aerossóis secundários se formam na atmosfera por meio de reações químicas entre gases precursores, como compostos orgânicos voláteis (alguns exemplos são o isopreno e o monoterpeno, compostos muito emitidos pela vegetação) e óxidos de enxofre e nitrogênio. Os aerossóis apresentam uma grande diversidade de composições químicas, podendo conter sulfatos, nitratos, carbono orgânico, carbono negro (amplamente conhecidos como *black carbon*, BC), poeira mineral, dentre muitos outros. Essa variabilidade na composição química influencia diretamente suas propriedades ópticas e seus impactos radiativos, determinando se eles atuam predominantemente como dispersores da radiação solar (resfriando a atmosfera) ou como absorvedores (contribuindo para o aquecimento).

No ecossistema amazônico, a distribuição de aerossóis é fortemente dependente da localidade, variando conforme fatores como proximidade de fontes de emissão, padrões de circulação atmosférica e sazonalidade [17,18]. Em áreas mais preservadas, os aerossóis são predominantemente de origem biogênica, formados a partir da emissão de compostos orgânicos voláteis por vegetação e processos naturais. Em locais distantes da atividade humana, como no Observatório da Torre Alta da Amazônia (ATTO), a concentração numérica de partículas durante os períodos de atmosfera mais limpa, o que ocorre durante a estação chuvosa, pode chegar a 250 - 300 partículas cm^{-3} , e a concentração em massa da ordem de 2 $\mu\text{g m}^{-3}$ [17,19]. Isto permite, por exemplo, investigações de processos que controlam a geração e os impactos de gases e aerossóis no ecossistema. Deve-se mencionar também que a bacia é conhecida como oceano verde (na literatura, o termo em inglês *Green Ocean* é amplamente usado), devido às similaridades nas concentrações de partículas e gases e na microfísica de nuvens com regiões oceânicas remotas [15,20].

Já em regiões impactadas pela atividade humana, como áreas próximas a centros urbanos e ao longo do arco do desmatamento, observa-se um aumento significativo na concentração de aerossóis de origem antrópica, provenientes da queima

de biomassa, transporte e atividades industriais. Na porção sudoeste da Amazônia, por exemplo, a concentração em massa de aerossóis com diâmetro aerodinâmico de até $2.5 \mu\text{m}$ (fração das partículas conhecida como PM2.5) varia entre 10 e $30 \mu\text{g m}^{-3}$, com concentrações numéricas entre 700 e 20000 partículas cm^{-3} , nas estações chuvosa e seca, respectivamente [17]. O contraste entre ação humana e ecossistema natural é gigantesco.

A bacia amazônica exerce tamanha influência na atmosfera a ponto de ser considerada um reator biogeoquímico, regulando os processos climáticos regionais. A floresta estoca cerca de 123 petagramas (10^{15}g) de carbono (Pg C) de biomassa em sua superfície e no solo [21, 22]. Suas emissões biogênicas, combinadas com vapor de água e a intensa radiação solar, tornam a atmosfera amazônica uma região particularmente susceptível às mudanças em sua composição. Isso significa, por exemplo, que a formação de nuvens através dos processos de evaporação e convecção e sua eventual precipitação estão atreladas à quantidade de gases e aerossóis na atmosfera, o que regula o ciclo hidrológico da bacia. Além disso, a interação entre aerossóis naturais, como os biogênicos emitidos pela vegetação, e aerossóis de origem antrópica, provenientes da queima de biomassa e da poluição urbana, pode modificar as propriedades microfísicas das nuvens, influenciando sua formação, duração e intensidade da precipitação [5]. Assim, alterações na composição atmosférica da Amazônia podem impactar não apenas o clima regional, mas também o balanço energético e os padrões climáticos de larga escala.

O ciclo hidrológico da Amazônia desempenha um papel crucial na manutenção da umidade em diversas regiões da América do Sul, através do fenômeno conhecido como rios voadores [23, 24]. Esses fluxos atmosféricos transportam enormes quantidades de vapor d'água da floresta para regiões ao sul do continente, incluindo o Cerrado e áreas agrícolas do Centro-Oeste, Sudeste e Sul do Brasil, além de partes da Bolívia, Paraguai e Argentina. A evapotranspiração intensa promovida pela vasta cobertura florestal é responsável por alimentar esses rios voadores, garantindo umidade essencial para a formação de chuvas em regiões distantes [25].

Mudanças críticas têm ocorrido na atmosfera

amazônica, as quais estão associadas às emissões oriundas de queimadas, adição de novas estradas, mudanças no uso da terra, além da poluição do ar urbana nas proximidades de grandes cidades, como Manaus, com mais de 2 milhões de habitantes [26–28]. Essa adição antrópica de gases de efeito estufa (GEE) e material particulado ao meio afeta diretamente o balanço radiativo atmosférico, o que impacta o ecossistema amazônico [29, 30]. Isto se relaciona com a quantidade e periodicidade de chuvas e com os processos de circulação e transporte de energia associados aos regimes convectivos. O desmatamento e as mudanças climáticas ameaçam diretamente os rios voadores, reduzindo a capacidade da floresta de reciclar a umidade e potencialmente alterando os padrões de precipitação em áreas agrícolas estratégicas.

Além disso, aerossóis e gases oriundos da ação antrópica podem ser transportados para a alta troposfera e se propagar para regiões distantes da emissão, o que ocasiona impactos ambientais e climáticos em diferentes escalas geográficas [31, 32]. Discutiremos ao longo das próximas seções os efeitos das mudanças no uso da terra e da intensificação das mudanças climáticas no clima amazônico, apresentando caminhos possíveis para a redução de danos a médio e longo prazo.

2 Mudanças no uso da terra e impactos no clima da Amazônia

A Amazônia tem passado por transformações significativas no uso da terra ao longo das últimas décadas, impulsionadas pelo avanço da fronteira agrícola e pela expansão da agropecuária. A Figura 1 apresenta a evolução do desmatamento na região entre os anos de 1985 e 2023, com dados extraídos da plataforma MapBiomass¹ [33]. Em 1985, a área de floresta correspondia a 380.456.615 hectares, cerca de 90% do bioma amazônico. No entanto, até 2023, essa área foi reduzida para 77,6% da extensão original do bioma. Paralelamente, a ocupação agropecuária aumentou consideravelmente. Em 1985, essa atividade ocupava 12.905.675 hectares, equivalente a 3% do bioma, enquanto em 2023 a agropecuária passou a representar 15,8% da Amazônia.

¹<https://brasil.mapbiomas.org/>

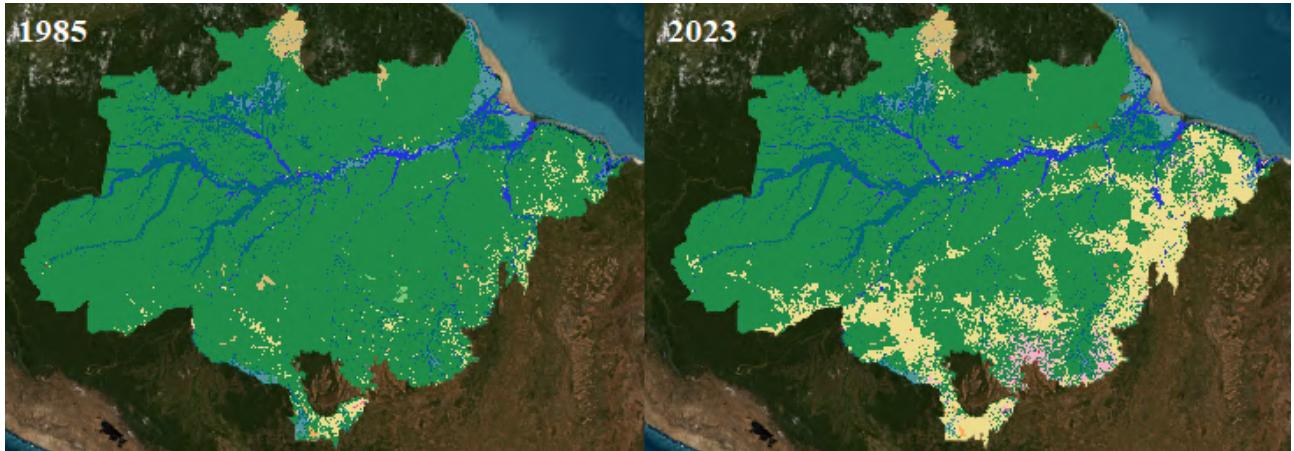


Figura 1: Evolução do desmatamento na Amazônia entre os anos de 1985 e 2023. Dados obtidos da plataforma MapBiomas.

Análises complementares foram recentemente discutidas [34], em que se mostrou que o principal motor de transformações no bioma amazônico, em diferentes regiões, é, de fato, a transformação do uso da terra em áreas agricultáveis. Dados históricos mostram que o desmatamento atingiu seu ápice na década de 1990, seguido por uma redução significativa no início dos anos 2000, devido a políticas públicas de conservação. No entanto, desde 2012, o desmatamento e, especialmente, as queimadas na Amazônia voltaram a aumentar, atingindo um total de 8.661.336 hectares em 2023.

O desmatamento na Amazônia segue um padrão característico, geralmente iniciado pela abertura de estradas, que se expandem para dar lugar à exploração agrícola e mineração, criando um fenômeno conhecido como "espinha de peixe" [35]. Esse modelo de ocupação facilita a interiorização da degradação florestal, impulsionando a fragmentação da vegetação e reduzindo a capacidade da floresta de manter sua biodiversidade e funções ecossistêmicas. Um dos principais eixos da expansão do desmatamento é a região do arco do desmatamento, que abrange o sul e leste da Amazônia brasileira, onde a pressão pela conversão da floresta é mais intensa. Essa região tem sido historicamente associada a altas taxas de desmatamento devido à presença de infraestrutura viária, como a rodovia BR-163 e a BR-230, que facilitam o acesso a novas áreas e incentivam a ocupação para atividades extrativistas.

A Figura 2 ilustra a evolução do número de focos de queimadas desde 1998 a 2024 com da-

dos obtidos da plataforma Queimadas², do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) [36]. Ela evidencia três fases distintas na exploração do bioma: um crescimento acentuado até 2005, seguido por uma redução significativa entre 2006 e 2013, e uma retomada gradativa a partir de 2014, culminando em um dos maiores registros da última década em 2024. Essa dinâmica reflete diretamente a influência das políticas ambientais no controle das queimadas, com reduções associadas ao fortalecimento da fiscalização e aumento das áreas protegidas, e o crescimento recente indicando um relaxamento dessas medidas e a intensificação das pressões sobre a floresta.

A conversão de florestas em áreas agrícolas e pastagens tem um impacto profundo nas emissões de GEE, alterando o balanço de carbono e comprometendo a regulação climática global. O Brasil, atualmente o sétimo maior emissor global de GEE, responde por cerca de 3% das emissões totais globais [37]. Diferente de economias industrializadas, onde as emissões são majoritariamente provenientes do setor energético e industrial, no Brasil, a mudança no uso da terra e florestas é a principal responsável, representando 49% das emissões totais em 2021, seguida pela agropecuária (25%) e pela geração de energia (21%). Além disso, a alta do desmatamento, sobretudo na Amazônia, tem intensificado as emissões de GEE no Brasil. Em 2021, o país registrou um aumento de 18,5% nas emissões por mudanças no uso da terra, alcançando 1,19 bilhão de tone-

²<https://terrabrasilis.dpi.inpe.br/queimadas/portal/>

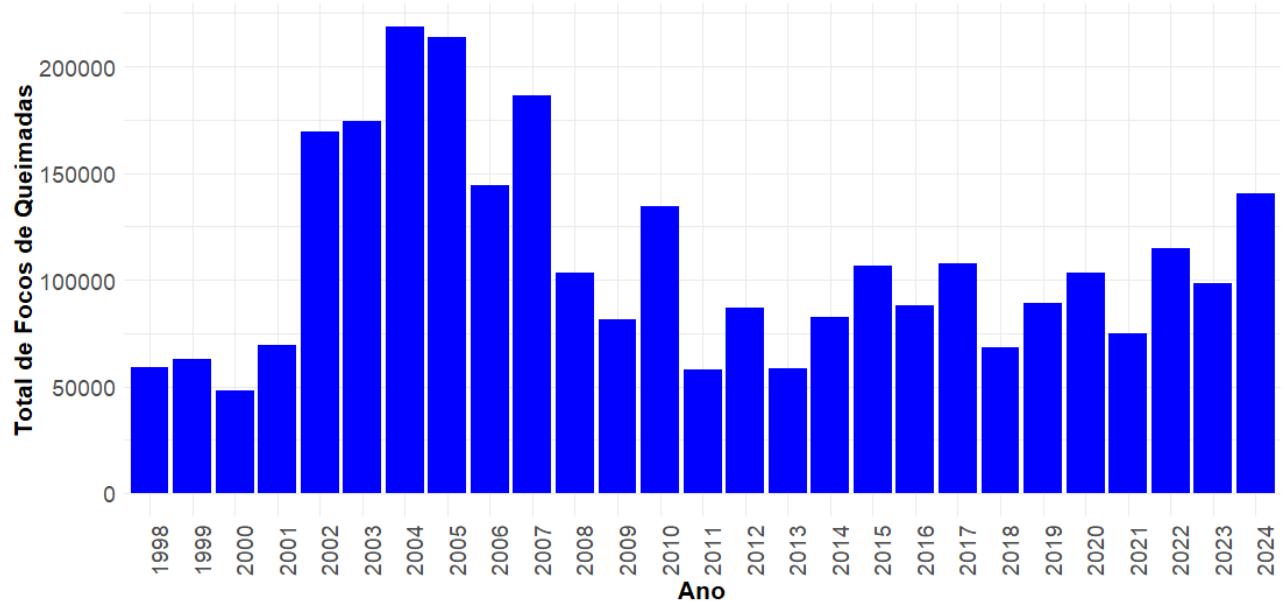


Figura 2: Evolução do número de focos de queimadas na Amazônia entre os anos de 1994 e 2024. Dados obtidos da plataforma Queimadas, do INPE.

ladas brutas de dióxido de carbono (CO_2) equivalente (Gt CO_2e), mais do que as emissões de países como o Japão.

A perda de cobertura florestal na Amazônia está diretamente associada à redução da biomassa superficial e à liberação de carbono para a atmosfera [38]. Tem-se observado uma relação direta entre a extensão da floresta e a concentração de biomassa acima do solo, com áreas mais degradadas apresentando menores estoques de carbono por hectare. Essa perda de biomassa compromete a capacidade da floresta de atuar como um sumidouro de carbono, aumentando a concentração de GEE na atmosfera e agravando as mudanças climáticas. Além disso, a degradação do solo é um fator ainda mais relevante do que o próprio desmatamento no que diz respeito às emissões de carbono, sendo responsável por aproximadamente 73% das emissões associadas à mudança no uso da terra, enquanto o desmatamento contribui com 23%.

A degradação florestal ocorre tanto por causas antrópicas quanto naturais, como incêndios recorrentes, extração seletiva de madeira e fragmentação da paisagem. Esses distúrbios, além de comprometerem a capacidade da floresta de estocar carbono, aumentam sua vulnerabilidade a eventos climáticos extremos. Estudos recen-

tes indicam que a degradação já afetou aproximadamente 17% da área original da Amazônia até 2017, indicando que uma grande parcela das emissões de carbono na região pode estar subestimada [39].

Além do desmatamento e da degradação, as transformações no uso da terra em conjunto às mudanças climáticas também impactam diretamente a resiliência da floresta. Projeções indicam que a capacidade de absorção de carbono da Amazônia tem diminuído ao longo dos anos, sugerindo uma possível transição do bioma de sumidouro para fonte de carbono no futuro próximo [40]. Isto, na verdade, pode estar acontecendo neste exato momento, como será mostrado adiante. A resiliência da floresta amazônica é um fator crucial não apenas para a biodiversidade local, mas também para a regulação do clima regional e global. Estudos indicam que mais de 75% da Amazônia já perdeu resiliência desde o início dos anos 2000, com as áreas mais afetadas sendo aquelas que recebem menos precipitação e que estão próximas a atividades humanas intensivas, localizadas mais a leste e ao sul do bioma [41]. Esse declínio na resiliência significa que a floresta está se tornando menos capaz de se recuperar de perturbações, aumentando o risco de colapso em resposta a eventos climáticos extremos e mudan-

ças no uso da terra.

O regime de precipitação na Amazônia tem sido profundamente alterado pela interação entre mudanças no uso da terra e mudanças climáticas globais. O desmatamento extensivo e a degradação florestal comprometem a capacidade da floresta de reciclar a umidade por meio da evapotranspiração, um processo essencial para a formação de chuvas na região e em áreas adjacentes. Como resultado, observam-se tendências de redução da precipitação, particularmente durante a estação seca, agravando os impactos das mudanças climáticas sobre o bioma [42, 43].

A perda de cobertura florestal está diretamente associada à redução da precipitação na Amazônia. O desmatamento altera o equilíbrio atmosférico ao diminuir a umidade disponível, reduzindo a formação de nuvens e alterando os padrões de circulação atmosférica. Pesquisas recentes indicam que as áreas desmatadas há mais tempo apresentam tendências negativas de precipitação durante a estação seca, sugerindo que a idade do desmatamento influencia a capacidade da floresta de sustentar seu próprio ciclo hidrológico [44]. Conjuntamente a isto, tem-se observado que a estação seca está se prolongando em cerca de aproximadamente 13 dias por década, e demora 9 dias a mais por década para terminar, o que compromete a resiliência da floresta e sua capacidade de recuperação [45]. Modelos climáticos sugerem que, caso o desmatamento e o aquecimento global continuem na taxa atual, grandes áreas da Amazônia podem atingir um ponto crítico de aridificação, favorecendo a transição para ecossistemas mais secos e menos produtivos [46, 47]. Esse ponto de não retorno pode ser atingido quando cerca de 20% do bioma for desmatado. No entanto, estudos recentes sugerem que essa limiar pode ser ainda menor do que se estimava anteriormente [48, 49].

É importante ressaltar que a seca extrema de 2023-2024, uma das mais severas já registradas na Amazônia, foi impulsionada pela combinação entre um forte e atípico evento de El Niño e temperaturas anormalmente elevadas no Atlântico Tropical Norte [50]. Essas condições resultaram em um déficit de precipitação de 50 a 100 mm/mês e temperaturas até 3°C acima da média, levando ao atraso de quase dois meses no início da estação chuvosa. Além disso, essa seca extrema teve

impactos socioeconômicos significativos, como a redução dos níveis dos rios a valores históricos mínimos, afetando populações ribeirinhas, transporte fluvial e aumentando o risco de incêndios florestais.

O aumento da temperatura média na Amazônia está diretamente ligado à intensificação do desmatamento e da degradação florestal, tornando o bioma mais vulnerável a eventos climáticos extremos. Dados mostram que em todas as regiões da Amazônia, a anomalia de temperatura está crescendo, com gradientes que variam de 0,1°C a 0,4°C por década [46]. Além disso, modelos computacionais têm indicado que a temperatura média cresce com a fração de área desmatada. Áreas com mais de 20% de desmatamento apresentam aumentos significativos na temperatura, enquanto regiões com perdas superiores a 50% podem registrar elevações de até 5°C.

É importante notar que o aquecimento regional altera os gradientes de pressão atmosférica, impactando os padrões de circulação de umidade e reduzindo a frequência e intensidade das chuvas. Esse fenômeno contribui para a degradação progressiva da floresta, acelerando a perda de resiliência do ecossistema e aproximando a Amazônia do seu ponto de não retorno, onde as condições climáticas tornam inviável a regeneração da floresta, favorecendo a transição para uma paisagem mais seca e suscetível a incêndios recorrentes.

A relação entre emissões de GEE, precipitação e mudanças no uso da terra na Amazônia evidencia um ciclo de retroalimentação que compromete a estabilidade climática regional e global. Estudo recente mostrou que as mudanças no uso da terra na Amazônia, especialmente o desmatamento mais intenso à leste do bioma, têm resultado em fluxos de carbono significativamente maiores, tornando essa região uma fonte líquida de carbono para a atmosfera [51]. A precipitação na estação seca diminuiu 24% a 34% no leste, enquanto a temperatura aumentou 1,86°C a 2,54°C, intensificando o estresse hídrico e reduzindo a capacidade fotossintética da floresta. A Amazônia ocidental, apesar de relativamente menos impactada pelo desmatamento (11% da área total) e de apresentar um balanço de carbono mais equilibrado, registrou uma redução de 20% na precipitação da estação seca e um aumento de temperatura mais moderado, entre 1,6°C e 1,9°C.

Além disso, o avanço da degradação em terras indígenas (TIs) na Amazônia brasileira tem se tornado um fator crítico. Um trabalho recente apontou que o desmatamento dentro das TIs aumentou 129% entre 2013 e 2021, com uma intensificação de 195% no período de 2019-2021 [52]. Essa expansão foi acompanhada por um avanço de 30% da fronteira de desmatamento para o interior dessas áreas, agravando as emissões líquidas de carbono, que totalizaram 96 milhões de toneladas de CO₂ ao longo do período analisado. O impacto climático desse desmatamento crescente se soma à redução da precipitação e ao aumento da temperatura observados na região, reforçando a vulnerabilidade da floresta a ciclos de retroalimentação negativos que podem comprometer sua resiliência e sua função como sumidouro de carbono.

3 Aerossóis atmosféricos e impactos climáticos na Amazônia

As mudanças no uso da terra, a redução da precipitação, o aumento das temperaturas e o crescimento do número de focos de incêndio têm levado a um aumento significativo na quantidade de aerossóis atmosféricos. Esse efeito é observado na Figura 3, na qual foram utilizados dados de seis diferentes sítios amazônicos (Alta Floresta (MT), Rio Branco (AC), Cuiabá (MT), Ji-Paraná (RO), Santarém (PA), Manaus (AM) e ATTO (AM)), pertencentes à rede AERONET(*Aerosol Network*) da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) [53]³

A Figura 3 apresenta a variabilidade temporal da profundidade óptica dos aerossóis (AOD) a 500 nm em diferentes locais da Amazônia, destacando sua forte sazonalidade ao longo dos últimos quase 25 anos. A AOD é uma medida da quantidade de partículas em suspensão na atmosfera que interagem com a radiação solar, influenciando diretamente o balanço energético da Terra. Valores elevados de AOD indicam uma alta concentração de aerossóis na atmosfera, geralmente associada a queimadas e emissões naturais ou antropogênicas, enquanto valores baixos refletem uma atmosfera mais limpa, com menos partículas em suspensão [16].

³<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>

A figura apresenta um padrão sazonal bem definido, com picos recorrentes de AOD durante a estação seca, especialmente em regiões mais impactadas pelo desmatamento e queimadas, como Alta Floresta, Rio Branco e Cuiabá, sítios estes localizados no arco do desmatamento. Durante a estação chuvosa, os valores de AOD caem significativamente, refletindo a remoção de aerossóis pela precipitação intensa, que age como um mecanismo natural de limpeza da atmosfera [5].

A relação entre o aumento do número de focos de queimadas na Amazônia, evidenciado na Figura 2, e a variabilidade temporal da AOD mostrada na Figura 3 é notável. A partir de 2013, observa-se uma retomada no crescimento do número de queimadas, o que coincide com picos mais intensos de AOD durante a estação seca em diversos sítios amazônicos. Esse padrão reforça a forte influência das emissões da queima de biomassa na carga de aerossóis atmosféricos. Além disso, um aspecto particularmente relevante é a anomalia registrada em 2024, que apresenta valores de AOD extremamente elevados e atípicos, comparáveis apenas aos anos de 2005 e 2007. Esses anos foram marcados por secas severas na Amazônia, associadas a eventos de El Niño, que intensificaram queimadas e reduziram a capacidade da floresta de remover aerossóis da atmosfera por meio das chuvas. O padrão observado em 2024 está diretamente relacionado à seca extrema registrada na região, discutida anteriormente, reforçando o impacto das mudanças climáticas e da degradação ambiental na qualidade do ar e no balanço radiativo da Amazônia.

Trabalhos recentes indicam, inclusive, que esses particulados também influenciam diretamente a evapotranspiração da floresta [54]. A relação entre a AOD e a evapotranspiração apresenta um comportamento não linear: para concentrações moderadas de aerossóis (AOD entre 0,10 e 1,5), a difusão da radiação solar aumenta a eficiência da fotossíntese, estimulando a transpiração vegetal. No entanto, para valores mais elevados de AOD (>1,5), a atenuação excessiva da radiação reduz a energia disponível para a evapotranspiração, limitando o transporte de vapor d'água para a atmosfera.

A composição dos aerossóis atmosféricos também reflete essas mudanças, especialmente na relação entre o carbono negro (BC) e o carbono

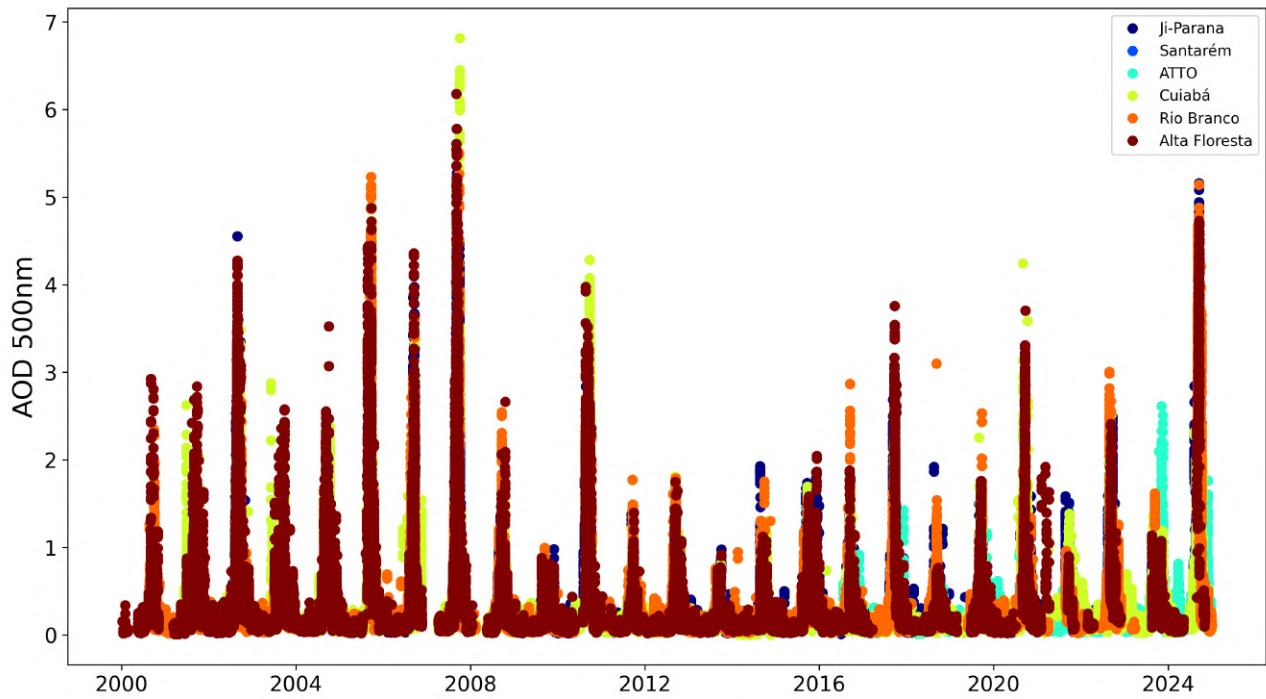


Figura 3: Série temporal da profundidade óptica dos aerossóis (AOD) em 500 nm em seis diferentes sítios amazônicos. Dados obtidos a partir da rede NASA/AERONET.

marrom (amplamente conhecido pelo termo em inglês, *Brown Carbon*, BrC). O BC, altamente absorvente em todo o espectro visível e, especialmente, no infravermelho, domina a fração de aerossóis nas regiões mais impactadas pelo desmatamento, como o arco do desmatamento, onde representa cerca de 85–90% da absorção total de aerossóis a 440 nm [34].

Em contraste, o BrC, que absorve preferencialmente em comprimentos de onda mais curtos (entre o ultravioleta próximo e o visível próximo), tem uma contribuição significativamente maior nas áreas de floresta preservada, como a Amazônia Central, chegando a aproximadamente 25%. Essa diferença espacial evidencia o impacto direto das mudanças no uso da terra: à medida que florestas são convertidas em áreas agrícolas, a proporção de BrC diminui e a de BC aumenta, refletindo a predominância das emissões de queima de biomassa sobre os processos naturais de formação de aerossóis orgânicos. Além de intensificar a carga total de aerossóis na atmosfera, essa alteração modifica suas propriedades ópticas e sua interação com a radiação solar, ampliando o efeito de aquecimento na região e mudando os regimes de precipitação.

Além das mudanças locais e regionais causadas pelo desmatamento, queimadas e alterações no uso da terra, a Amazônia também sofre influência de processos atmosféricos de larga escala, incluindo o transporte de aerossóis de regiões distantes. Um exemplo notável é a chegada de partículas provenientes do deserto do Saara e de queimadas na África, que impactam significativamente a composição da atmosfera amazônica [14, 31, 55]. Esses aerossóis transportados a longas distâncias podem modificar as propriedades microfísicas das nuvens, afetar a radiação solar incidente e influenciar os padrões de precipitação na região, exacerbando os impactos das emissões locais.

A poluição atmosférica sobre a Amazônia não se restringe às emissões regionais, mas inclui uma contribuição substancial de aerossóis transportados da África, representando até 60% do BC na estação chuvosa e 30% na estação seca [56]. Essa poluição transcontinental intensifica os impactos já severos das queimadas locais e regionais, alterando a interação dos aerossóis com a radiação solar e possivelmente modificando os ciclos de carbono na floresta. Esses resultados reforçam a necessidade de estratégias coordenadas em nível

internacional, combinando esforços para reduzir as emissões de queima de biomassa na América do Sul e na África.

4 Comentários Finais

Diante das evidências apresentadas, torna-se fundamental reforçar políticas ambientais voltadas para o controle do desmatamento, manejo de áreas degradadas e da poluição atmosférica na Amazônia. O transporte transatlântico de aerossóis e a intensificação das emissões locais de queimadas ressaltam a necessidade de uma abordagem global e integrada para a mitigação dos impactos climáticos na região. Medidas como a fiscalização rigorosa contra o desmatamento ilegal, incentivos a práticas agrícolas sustentáveis e o fortalecimento de acordos internacionais, como o Acordo de Paris e as iniciativas de proteção das florestas tropicais, são essenciais para conter o avanço das emissões de carbono e preservar a função climática da Amazônia.

Além disso, políticas voltadas para a redução de queimadas e o desenvolvimento de modelos climáticos mais precisos, que incluem a variabilidade espacial e temporal das emissões de aerossóis, são fundamentais para uma melhor previsão dos impactos atmosféricos e hidrológicos na região. O futuro da Amazônia depende de ações coordenadas que reconheçam sua importância global e busquem equilibrar conservação ambiental e desenvolvimento socioeconômico sustentável.

Neste contexto, a realização da Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP) em novembro de 2025, em Belém do Pará, representa uma oportunidade crucial para a consolidação de acordos internacionais que reforcem o compromisso global com a preservação da Amazônia. A expectativa é que esse evento proporcione avanços significativos na cooperação internacional e na implementação de políticas eficazes para garantir a sustentabilidade desse bioma essencial para a regulação climática do planeta.

Agradecimentos

Marco Aurélio de Menezes Franco agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), projeto número

407752/2023-4, e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), projeto número 2023/04358-9.

Sobre o autor

Marco Aurélio de Menezes Franco (marco.franco@usp.br) é especialista em ciclo de vida de aerossóis atmosféricos e gases de efeito estufa em florestas tropicais e regiões urbanas, além de trabalhar com modelagem estatística e com aprendizado de máquina de poluentes atmosféricos, emissões de gases de efeito estufa e relações com uso da terra. Desde julho de 2023, é Professor do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) da Universidade de São Paulo e credenciado como orientador no Programa de Pós-Graduação em Meteorologia do IAG. Além disso, é integrante do Centro de Estudos Amazônia Sustentável (CEAS-USP).

Referências

- [1] C. Hoorn et al., *Amazonia through time: Andean uplift, climate change, landscape evolution, and biodiversity*, *Science* **330**(6006), 927 (2010).
- [2] F. Wittmann et al., *Habitat specificity, endemism and the neotropical distribution of Amazonian white-water floodplain trees*, *Ecography* **36**(6), 690 (2013).
- [3] J. M. C. Da Silva, A. B. Rylands e G. A. da Fonseca, *The fate of the Amazonian areas of endemism*, *Conservation Biology* **19**(3), 689 (2005).
- [4] M. Goulding, R. Barthem e E. J. G. Ferreira, *The Smithsonian atlas of the Amazon* (Smithsonian Institution, 2003).
- [5] P. Artaxo et al., *Tropical and Boreal Forest – Atmosphere Interactions: A Review*, *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* (2022).
- [6] E. Heck, F. Loebens e P. D. Carvalho, *Amazônia indígena: conquistas e desafios*, *Estudos avançados* **19**, 237 (2005).

- [7] N. Peralta, *Decolonialidade e Saberes Tradicionais em Práticas Científicas na Amazônia*, Revista da UFMG **28**(3), 89 (2021).
- [8] N. C. P. Pinheiro, *Relatos históricos dos séculos XVIII e XIX povos indígenas e plantas nas margens do alto rio Tapajós*, Revista do Museu de Arqueologia e Etnologia (42), 186 (2024).
- [9] B. Glaser e J. J. Birk, *State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (terra preta de Índio)*, Geochimica et Cosmochimica acta **82**, 39 (2012).
- [10] W. I. Woods e W. M. Denevan, *Amazonian dark earths: the first century of reports*, Amazonian dark earths: Wim Sombroek's vision 1–14 (2009).
- [11] E. G. Neves et al., *Historical and socio-cultural origins of Amazonian dark earth*, Amazonian Dark Earths: Origin Properties Management 29–50 (2003).
- [12] C. Steiner et al., *Indigenous knowledge about terra preta formation*, Amazonian dark earths: Wim Sombroek's vision 193–204 (2009).
- [13] P. Artaxo, *Working together for Amazonia*, Science **363**(6425), 323 (2019).
- [14] M. L. Pöhlker et al., *Long-term observations of cloud condensation nuclei in the Amazon rain forest – Part 1: Aerosol size distribution, hygroscopicity, and new model parametrizations for CCN prediction*, Atmospheric Chemistry and Physics **16**(24), 15709 (2016).
- [15] M. O. Andreae, *Aerosols before pollution*, science **315**(5808), 50 (2007).
- [16] O. Boucher e O. Boucher, *Atmospheric aerosols* (Springer, 2015).
- [17] P. Artaxo et al., *Atmospheric aerosols in Amazonia and land use change: from natural biogenic to biomass burning conditions*, Faraday discussions **165**, 203 (2013).
- [18] R. d. S. Palácios et al., *Long Term Analysis of Optical and Radiative Properties of Aerosols in the Amazon Basin*, Aerosol and Air Quality Research **20**(1), 139–154 (2020).
- [19] M. A. Franco et al., *Occurrence and growth of sub-50 nm aerosol particles in the Amazonian boundary layer*, Atmospheric Chemistry and Physics **22**(5), 3469 (2022).
- [20] M. Andreae et al., *Carbon monoxide and related trace gases and aerosols over the Amazon Basin during the wet and dry seasons*, Atmospheric Chemistry and Physics **12**(13), 6041 (2012).
- [21] Y. Malhi et al., *The regional variation of aboveground live biomass in old-growth Amazonian forests*, Global Change Biology **12**(7), 1107 (2006).
- [22] Y. Malhi, *The carbon balance of tropical forest regions, 1990–2005*, Current Opinion in Environmental Sustainability **2**(4), 237 (2010).
- [23] E. Salati et al., *Recycling of water in the Amazon basin: an isotopic study*, Water resources research **15**(5), 1250 (1979).
- [24] E. Salati e P. B. Vose, *Amazon basin: a system in equilibrium*, Science **225**(4658), 129 (1984).
- [25] A. D. Nobre, *O futuro climático da Amazônia*, Relatório de Avaliação Científica. São José dos Campos, São Paulo (2014).
- [26] C. P. Barber et al., *Roads, deforestation, and the mitigating effect of protected areas in the Amazon*, Biological conservation **177**, 203 (2014).
- [27] L. Ferrante e P. M. Fearnside, *The Amazon's road to deforestation*, Science **369**(6504), 634 (2020).
- [28] L. Ferrante, M. B. Andrade e P. M. Fearnside, *Land grabbing on Brazil's Highway BR-319 as a spearhead for Amazonian deforestation*, Land use policy **108**, 105559 (2021).
- [29] E. T. Sena, P. Artaxo e A. L. Correia, *Spatial variability of the direct radiative forcing of*

- biomass burning aerosols and the effects of land use change in Amazonia*, *Atmospheric Chemistry and Physics* **13**(3), 1261 (2013).
- [30] J. P. Nascimento et al., *Aerosols from anthropogenic and biogenic sources and their interactions – modeling aerosol formation, optical properties, and impacts over the central Amazon basin*, *Atmospheric Chemistry and Physics* **21**(9), 6755 (2021).
- [31] B. A. Holanda et al., *Influx of African biomass burning aerosol during the Amazonian dry season through layered transatlantic transport of black carbon-rich smoke*, *Atmospheric Chemistry and Physics* **20**(8), 4757 (2020).
- [32] L. de Almeida Viana, M. A. de Menezes Franco e L. V. Rizzo, *Variabilidade temporal da concentração de metano na média troposfera e associação com variáveis globais e regionais no nordeste da Amazônia*, *Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto* **4**(3) (2023).
- [33] C. M. Souza Jr et al., *Reconstructing three decades of land use and land cover changes in brazilian biomes with landsat archive and earth engine*, *Remote Sensing* **12**(17), 2735 (2020).
- [34] F. G. Morais et al., *Relationship between land use and spatial variability of atmospheric brown carbon and black carbon aerosols in Amazonia*, *Atmosphere* **13**(8), 1328 (2022).
- [35] M. Teixeira et al., *Analyzing and Forecasting the Morphology of Amazon Deforestation*, *SSRN* 5092417 (2025).
- [36] L. F. FG Assis et al., *TerraBrasilis: a spatial data analytics infrastructure for large-scale thematic mapping*, *ISPRS International Journal of Geo-Information* **8**(11), 513 (2019).
- [37] R. F. Potenza et al., *Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil (1970-2021)*, Observatório do Clima (2023). Disponível em <https://www.oc.eco.br/wp-content/uploads/2023/03/SEEG-10-anos-v4.pdf>, acesso em fev. 2025.
- [38] Y. Qin et al., *Carbon loss from forest degradation exceeds that from deforestation in the Brazilian Amazon*, *Nature Climate Change* **11**(5), 442 (2021).
- [39] E. L. Bullock e C. E. Woodcock, *Carbon loss and removal due to forest disturbance and regeneration in the Amazon*, *Science of The Total Environment* **764**, 142839 (2021).
- [40] R. J. Brienen et al., *Long-term decline of the Amazon carbon sink*, *Nature* **519**(7543), 344 (2015).
- [41] C. A. Boulton, T. M. Lenton e N. Boers, *Pronounced loss of Amazon rainforest resilience since the early 2000s*, *Nature Climate Change* **12**(3), 271 (2022).
- [42] X. Xu et al., *Deforestation triggering irreversible transition in Amazon hydrological cycle*, *Environmental Research Letters* **17**(3), 034037 (2022).
- [43] X. Xu et al., *Climate regime shift and forest loss amplify fire in Amazonian forests*, *Global Change Biology* **26**(10), 5874 (2020).
- [44] Y. Mu e C. Jones, *An observational analysis of precipitation and deforestation age in the Brazilian Legal Amazon*, *Atmospheric Research* **271**, 106122 (2022).
- [45] *Science panel for the Amazon: executive summary*, in *Amazon Assessment Report 2021*, editado por C. Nobre et al. (United Nations Sustainable Development Solutions Network, New York, 2021).
- [46] J. A. Marengo et al., *Chapter 22: Long-term variability, extremes and changes in temperature and hydro meteorology in the Amazon region*, in *Amazon Assessment Report 2021*, editado por C. Nobre et al. (United Nations Sustainable Development Solutions Network, New York, 2021).
- [47] C. A. Nobre e L. D. S. Borma, ‘*Tipping points’ for the Amazon forest*’, *Current Opinion in Environmental Sustainability* **1**(1), 28 (2009).
- [48] T. E. Lovejoy e C. Nobre, *Amazon tipping point*, *Science advances* **4**(2), eaat2340 (2018).

- [49] T. E. Lovejoy e C. Nobre, *Amazon tipping point: Last chance for action*, *Science Advances* **5**(12), eaba2949 (2019).
- [50] J. A. Marengo et al., *The drought of Amazonia in 2023-2024*, *American Journal of Climate Change* **13**(03), 567 (2024).
- [51] L. V. Gatti et al., *Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change*, *Nature* **595**(7867), 388 (2021).
- [52] C. H. Silva-Junior et al., *Brazilian Amazon indigenous territories under deforestation pressure*, *Scientific Reports* **13**(1), 5851 (2023).
- [53] B. N. Holben et al., *AERONET—A federated instrument network and data archive for aerosol characterization*, *Remote sensing of environment* **66**(1), 1 (1998).
- [54] R. Palácios et al., *ENSO effects on the relationship between aerosols and evapotranspiration in the south of the Amazon biome*, *Environmental Research* **250**, 118516 (2024).
- [55] C. Pöhlker et al., *Land cover and its transformation in the backward trajectory footprint region of the Amazon Tall Tower Observatory*, *Atmospheric Chemistry and Physics* **19**(13), 8425 (2019).
- [56] B. A. Holanda et al., *African biomass burning affects aerosol cycling over the Amazon*, *Communications Earth & Environment* **4**, 154 (2023).

Monitoramento oficial da vegetação nativa brasileira por imagens de satélite: o programa BiomasBR e os sistemas Prodes, Deter e TerraClass

Cláudio Aparecido de Almeida, Letícia Palazzi Perez, Mariane Souza Reis, Wagner Luis Camilotti, Cassiano Gustavo Messias, Erison Carlos dos Santos Monteiro, Taise Farias Pinheiro, João Felipe Sobrinho Kneipp Cerqueira Pinto, Luciana de Souza Soler, Lubia Vinhas, Luiz Eduardo Pinheiro Maurano, Marcos Adami, Tatiana Mora Kuplich, Igor da Silva Narvaes, Gustavo F. Balué Arcoverde e Silvana Amaral

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Resumo

O governo brasileiro possui três sistemas oficiais de monitoramento por satélite da supressão da vegetação nativa dos biomas brasileiros, concebidos e executados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), por meio do Programa de Monitoramento dos Biomas Brasileiros (BiomasBR): 1) o Prodes – Monitoramento Anual da Supressão de Vegetação Nativa; 2) o Deter - Monitoramento Diário da Supressão e Degradação de Vegetação Nativa; e 3) o TerraClass - Monitoramento Sistêmico da Cobertura e Uso da Terra, este em colaboração com a Empresa Brasileira de Agropecuária (EMBRAPA). Neste artigo são apresentadas as principais características de cada um destes sistemas, os resultados mais recentes do monitoramento da vegetação nativa brasileira, as principais políticas públicas baseadas no BiomasBR e o papel do programa no cumprimento dos compromissos climáticos internacionais assumidos pelo país.

Abstract

The Brazilian government has three official satellite monitoring systems for monitoring native vegetation loss in its six biomes, designed and executed by the National Institute for Space Research, through the Brazilian Biomes Monitoring Program (BiomasBR): 1) Prodes - Annual Monitoring of Native Vegetation Suppression; 2) Deter - Daily Monitoring of Suppression and Degradation of Native Vegetation; and 3) TerraClass - Systematic Monitoring of Land Cover and Use. This article presents the main characteristics of each of these systems, the most recent results of Brazilian native vegetation monitoring, the main public policies based on BiomasBR, and the role of the program as a tool for achieving goals within international climate agreements

Palavras-chave: BiomasBR, Prodes, Deter, TerraClass, desmatamento, mudanças climáticas

Keywords: BiomasBR, Prodes, Deter, TerraClass, deforestation, climate change

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v6n1.47411](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v6n1.47411)

1 Introdução

Mudanças no uso e cobertura da terra estão entre as ações antrópicas mais antigas e abrangentes [1] sobre a superfície do planeta. Os termos uso e cobertura da terra possuem significados diferentes. Cobertura da terra se refere diretamente aos elementos presentes na superfície terrestre, como, por exemplo, a quantidade e o tipo

de cobertura vegetal, água, estruturas naturais ou construídas. Por sua vez, uso da terra denota o propósito de utilização da terra, considerando os interesses humanos [2]. Por exemplo, uma área cuja cobertura da terra é “floresta” destinada à preservação teria como uso da terra “área de proteção ambiental”. A mesma área, caso destinada para extração seletiva de madeira, poderia ter o uso “extração madeireira”. Um tipo de cobertura

pode ter vários tipos de usos simultâneos, e mudanças na cobertura da terra podem ou não estar associadas às mudanças de uso, e vice-e-versa.

Quando as mudanças de uso ou cobertura alteram sensivelmente a superfície terrestre, é possível detectar e categorizar essas mudanças a partir de imagens coletadas por sensores a bordo de diferentes plataformas, como veículos aéreos não-tripulados, aviões e satélites orbitais. Ou seja, a partir de imagens é possível detectar diretamente informações sobre a cobertura da terra, mas não necessariamente de uso. A identificação do uso se dá por inferências acerca da cobertura e/ou com a utilização de dados auxiliares, como informações de campo, por exemplo. No Brasil, uma das alterações de cobertura da terra mais importantes é a supressão da vegetação nativa, isto é, a remoção da vegetação original de uma dada área. Quando essa vegetação é do tipo floresta, adotam-se os termos desmatamento ou desflorestamento.

Dadas as dimensões continentais do Brasil, as taxas elevadas de supressão da vegetação nativa, historicamente registradas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), podem impactar negativamente a biodiversidade e diversos processos ambientais, tais como a produção primária e o funcionamento de ciclos biogeoquímicos, como de água e de carbono, em escalas locais, regionais e globais [1,3]. A remoção da vegetação nativa tem influência também no sistema climático, uma vez que pode alterar a composição da atmosfera, o albedo da superfície (fração da energia solar refletida pela superfície terrestre) e as fontes e os sumidouros de gases do efeito estufa [4].

A diminuição e o controle da supressão de vegetação nativa dependem de informações provenientes de sistemas de monitoramento. Tratam-se de conjuntos de metodologias e dados necessários para informar sobre a cobertura da terra de forma consistente e periódica.

O governo brasileiro possui três sistemas de monitoramento oficiais concebidos e executados pelo INPE, por meio do Programa de Monitoramento dos Biomas Brasileiros (BiomassBR): 1) o Prodes – Monitoramento Anual da Supressão de Vegetação Nativa; 2) o Deter - Monitoramento Diário da Supressão e Degradação de Vegetação Nativa; e 3) o TerraClass - Monitoramento Sistêmico da Cobertura e Uso da Terra, esse exe-

cutado em parceria com a Empresa Brasileira de Agropecuária (Embrapa). Juntos, esses sistemas objetivam fornecer, ao governo federal brasileiro, informações sistemáticas sobre a supressão da vegetação nativa em todos os biomas brasileiros, incluindo a supressão causada por queimadas e/ou processos de degradação florestal nos biomas Amazônia, Cerrado e Pantanal. O presente artigo tem por objetivo apresentar de forma sintética e objetiva o funcionamento e os principais resultados desses sistemas de monitoramento.

2 O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e o programa BiomassBR

Como signatário do Acordo de Paris, o Brasil se comprometeu a cumprir metas de redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, instituídas nas chamadas Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC) que, de forma muito simplificada, são o cálculo da contribuição de cada país nas emissões de GEE, considerando todas as fontes de emissões e todas as fontes de sumidouros de GEE [5]. Assim, a proteção da vegetação nativa brasileira é parte fundamental das NDC, que inclui atingir a meta de emissões líquidas zero até 2050 [6].

A exemplo, a Amazônia, que tem 60% de sua extensão em território brasileiro, é responsável por 50% dos estoques de carbono do planeta [7], apesar das incertezas relacionadas ao tema [8]. No entanto, diversos eventos, extremados pela própria crise climática e pelo desmatamento [9] comprometem a capacidade da floresta em desempenhar o papel essencial de armazenar carbono.

Dentro da Política Nacional sobre Mudança do Clima [10] e por meio do Decreto 10.144/2019, foram aprimorados os Planos de Ação para a Prevenção e Controle do Desmatamento (PPCD) da Amazônia (PPCDam), expandido para o Cerrado (PPCDCerrado), com expansão prevista para os demais biomas. Os PPCDs são estruturados em 4 eixos, sendo eles: (i) atividades produtivas sustentáveis; (ii) monitoramento e controle ambiental; (iii) ordenamento fundiário e territorial; e (iv) instrumentos normativos e econômicos voltados à redução do desmatamento e à efetivação das ações abrangidas pelos demais eixos [11]. O eixo (ii) é baseado nos dados do BiomassBR.

Tabela 1: Características do Sistema Prodes do BiomasBR

Sistema	Abrangência	Satélite (resolução)	Frequência, datas	Área mínima mapeamento	Classes de mapeamento	Referências
Prodes	Amazônia	Até 2023 LANDSAT (30m); a partir de 2024 MSI/Sentinel-2 (10m)	Taxa anual desde 1988 (Amazônia Legal) Incremento anual desde 2008 (bioma Amazônia)	1 ha. Apenas os polígonos maiores que 6,25 ha são contabilizados na taxa de desmatamento	Supressão por corte raso e por degradação progressiva (a partir de 2022 as classes passaram a ser diferenciadas para divulgação)	[16]
	Cerrado	Até 2023 Landsat (30m); a partir de 2024 Sentinel (10m)	A série histórica começa em 2001. Porém, o incremento foi inicialmente mapeado de forma bienal ou quadrienal, o que varia conforme a metodologia adotada por cada bioma.	1 ha	Supressão da vegetação nativa	[13, 17-20]
	Pampa, Pantanal, Caatinga, Mata Atlântica	Até 2022 Landsat (30m); a partir de 2023 Sentinel (20m)	Desde 2019, o incremento é anual para todos os biomas (exceto para o bioma Cerrado, cujo incremento anual iniciou em 2013)			
	Áreas Não Florestais da Amazônia (NF)	Até 2014 Landsat (30m); a partir de 2016 Sentinel (20m)				

Além do acompanhamento dos PPCDs, o principal uso dos dados do Programa BiomasBR se dá na fiscalização e controle do desmatamento pelo IBAMA, Polícia Federal, Ministério da Justiça e governos estaduais e municipais. Além disso, os dados do BiomasBR são utilizados no rastreamento de *commodities*¹ e na sua certificação de origem de áreas sem desmatamento recente ou pretérito, em especial para atender legislações, como as do Mercado comum da União Europeia. Estes dados também são utilizados no acompanhamento das mudanças da cobertura da terra e uso da terra pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA).

Neste contexto, o programa BiomasBR é chave para o cumprimento das NDC brasileiras e contribuir para a mitigação do impacto dos GEE em es-

cala planetária, pois ele é o principal mecanismo institucional que mede a remoção da vegetação nativa no Brasil.

3 Sistemas BiomasBR

3.1 Prodes: monitoramento anual da supressão de vegetação nativa

No final dos anos 1980, foi criado o primeiro projeto de monitoramento sistemático de desmatamento no Brasil, o Prodes, com o objetivo de mapear e divulgar, anualmente, a área desmatada na Amazônia Legal Brasileira. Em 2016, a metodologia Prodes foi adaptada para monitorar também a perda de vegetação natural no bioma Cerrado [12, 13] e, através de projeto financiado pelo Fundo Amazônia, o INPE, em parceria com a Fundação de Ciências, Aplicações e Tecnologia Espaciais - FUNCATE, gerou mapas base para o ano de 2000 e uma série histórica de incrementos anuais entre 2001 e 2022, publicados em forma

¹Commodities são mercadorias originárias do setor primário e de baixo valor agregado, ou seja, em seu estado bruto ou pouco modificadas. Alguns exemplos são soja, minério de ferro e petróleo.

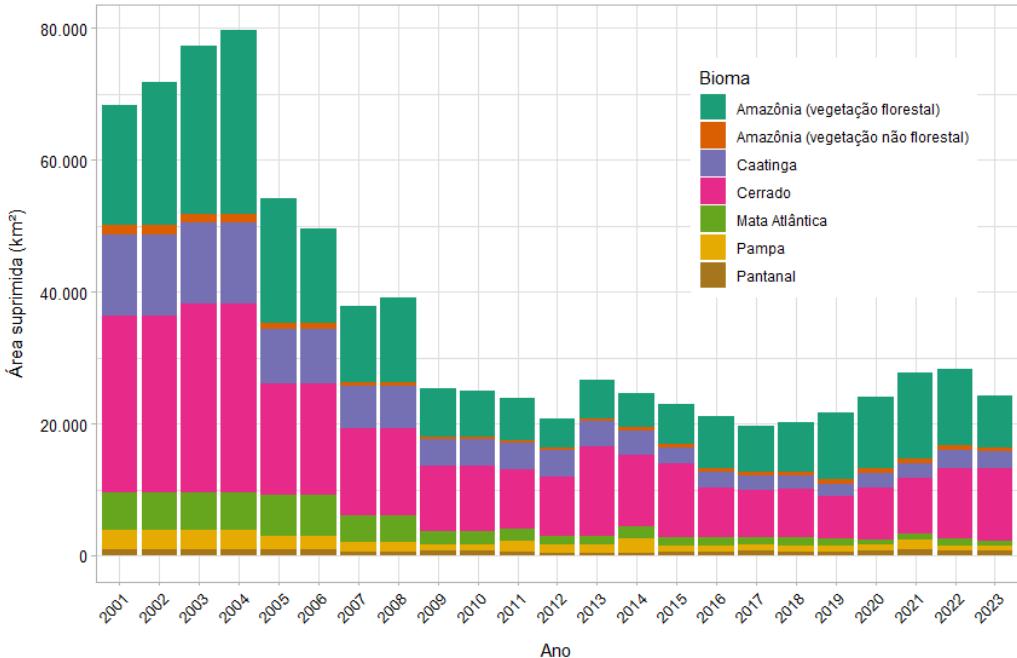


Figura 1: Supressão da vegetação nativa por bioma detectado pelo Prodes de 2001 a 2023

de mapas de desmatamento para os biomas Mata Atlântica, Caatinga, Pampa e Pantanal. Em 2023 o INPE assumiu de forma exclusiva a continuidade deste mapeamento anual para estes 4 novos biomas.

Em 2023, o mapeamento da vegetação não florestal da Amazônia (savanas, campinas e campinaranas, campos gerais e vegetação pioneira de várzeas), até então não monitorada, teve sua série histórica gerada com a criação do Prodes Amazônia Não Floresta (Prodes NF) [14]. Atualmente, os sistemas Prodes nos diferentes biomas configuram o Prodes Brasil.

O mapeamento da supressão é feito com base na interpretação visual de imagens de satélite. Na fronteira do conhecimento, desde os anos 2010, o INPE tem se dedicado também à pesquisa e à inclusão de técnicas de inteligência artificial para auxiliar na detecção de eventos de supressão da vegetação nativa, a fim de automatizar ainda mais a geração dos dados pelos projetos [15]. As principais características para cada bioma e referências contendo os detalhes metodológicos estão sintetizadas na Tabela 1.

3.1.1 Resultados do Prodes

Os resultados do Prodes consistem em mapas e valores de área de supressão de vegetação nativa

para diferentes recortes espaciais (biomas, estados, municípios, Unidades de Conservação, Terras Indígenas). Esses dados são publicamente divulgados e estão acessíveis a partir na plataforma web TerraBrasilis. Dados recentes indicam que a área total de perda de vegetação nativa para o Brasil, até o ano de 2023, foi de 3.129.462,88 km², ou 36,77% da área do território nacional.

A Figura 1 ilustra a área da vegetação nativa suprimida detectada pelo Prodes de 2001 a 2023 para todos os biomas brasileiros. Entre 2001 e 2004, observa-se que ocorreu um aumento da supressão da vegetação nativa em todo o país. A partir de 2005, essa tendência se inverteu, com valores de área de supressão decrescendo de forma praticamente constante.

Em 2012, foi registrado o menor valor de desmatamento (termo aqui utilizado como sinônimo de supressão da vegetação nativa) da série histórica até aquele momento. Em 2013, houve novo aumento das áreas de supressão, seguido por reduções sucessivas até 2017, quando alcançou valor menor que o verificado em 2012. Entre 2018 e 2022, o desmatamento cresceu novamente, e em 2023, apresentou nova queda. A Tabela 2 sintetiza os resultados Prodes, entre 2001 e 2023, para cada bioma.

Tabela 2: Síntese dos resultados Prodes, entre 2001 e 2023 para cada bioma e as principais condicionantes para a supressão da vegetação nativa.

Bioma	Supressão da vegetação nativa
Mata Atlântica Supressão: 790.364,17 km ² (71,37 % do bioma, 9,29 % do Brasil)	A exploração inicial do território brasileiro concentrou-se na Mata Atlântica, a região mais antropizada até meados do século XX. Ciclos econômicos como o pau-brasil, cana-de-açúcar e café contribuíram significativamente para a perda de vegetação natural [21]. Atualmente, a vegetação nativa é convertida principalmente em pastagens, agricultura, silvicultura, infraestrutura, mineração e áreas urbanas [22].
Pampa Supressão: 114.164,65 km ² (58,90 % do bioma, 1,34 % do Brasil)	No bioma Pampa, a vegetação de campos, muito utilizada na criação extensiva de gado, nas últimas décadas passou a ser composta também por agricultura de grãos, predominantemente soja e arroz, ditada pela oscilação do preço destas <i>commodities</i> no mercado internacional, se estabelecendo como o principal fator de supressão da vegetação nativa [20].
Cerrado Supressão: 1.017.161,26 km ² (51,29 % do bioma, 11,95 % do Brasil)	O povoamento do bioma Cerrado pelos europeus ocorreu após a descoberta do ouro em Minas Gerais e Goiás, no final do século XVII [23], e este é atualmente um dos biomas mais ameaçados no Brasil [24]. Nos últimos 40 anos, o modelo de produção agrícola do Cerrado se consolidou com base no latifúndio e no uso de modernas tecnologias [25], progressivamente transformando o bioma em áreas de pastagens e monoculturas [26].
Caatinga Supressão: 370.764,05 km ² (42,97 % do bioma, 4,36 % do Brasil)	Na Caatinga, a antropização está relacionada principalmente com a expansão da agricultura e de áreas de pastagem. Desde 2010, a expansão de projetos de energia solar e eólica de grande escala também atua como um fator de supressão da vegetação nativa [27].
Pantanal Supressão: 30.393,6 km ² (20,13 % do bioma, 0,36 % do Brasil)	No Pantanal, apesar da grande parte do gado utilizar a pastagem nativa como alimento, fazendeiros têm removido diferentes tipos de vegetação natural para inserir pastagens plantadas [28].
Amazônia Supressão: 776.802,80 km ² (19,75 % do bioma, 9,13 % do Brasil) Amazônia NF Supressão: 29.812,31 km ² (10,65% do bioma, 0,35% do Brasil)	A vegetação do bioma Amazônia foi pouco antropizada até a década de 1970, porém, fatores como políticas desenvolvimentistas, ampliação das estradas, incentivos fiscais para a ocupação da região Norte do país a partir da exploração das riquezas naturais, e a ampliação das áreas de soja e de pastagens intensificaram o processo de degradação dos recursos naturais no bioma, inclusive nas áreas não florestais [14, 29].

3.1.2 Políticas públicas baseadas em dados Prodes

Os dados resultantes do Prodes têm sido utilizados, desde os anos 1990, pelo governo federal, para estabelecer políticas públicas de controle e combate ao desmatamento [16] e são essenciais para definir estratégias relacionadas às mudanças climáticas.

A partir dos resultados do Prodes, o governo federal brasileiro estabelece anualmente a lista de municípios prioritários para a alocação de recursos de combate e prevenção ao desmatamento nos níveis estaduais e municipais [30]. Para estes municípios, são oferecidos apoios técnicos e políticas públicas para a redução do desmatamento, a recuperação dos ecossistemas, além de incentivos a investimentos em economias florestais sustentáveis, de baixa emissão de carbono.

Os dados Prodes são utilizados também para o rastreamento e regularização de *commodities* (produtos agrícolas produzidos em larga escala e

destinados ao comércio exterior), como os acordos conhecidos como Moratória da Soja e Termo de Ajustamento de Conduta (TAC) da carne. Estes são pactos ambientais que passaram a restringir a venda de soja e de carne produzidas em áreas desmatadas, em discordância com o Código Florestal brasileiro [31, 32]. A União Europeia, por exemplo, não permite a compra de produtos agrícolas produzidos em áreas desmatadas após 31/12/2020.

3.2 Deter: monitoramento diário da supressão e degradação de vegetação nativa

O sistema Deter é responsável por monitorar a vegetação nativa dos biomas Amazônia, Cerrado e Pantanal, de forma periódica e em intervalos de tempo os mais curtos possíveis após a aquisição das imagens.

Esse sistema utiliza imagens diárias obtidas com alta-freqüência para emitir alertas de supres-

Tabela 3: Características do Sistema Deter do BiomasBR.

Sistema	Abrangência	Satélite (resolução)	Período de operação	Área mínima Mapeamento	Classes de mapeamento	Referências
Deter MODIS (original)	Amazônia Legal Brasileira	MODIS/ TERRA (250 m) e WFI/CBERS-2B (250 m).	2004-2015	25 ha	Supressão e degradação, sem separação de classes	[35]
Deter Amazônia (ou Deter-B)	Florestas da Amazônia Legal Brasileira	WFI/CBERS-4 (64 m), WFI/4A (64 m), WFI/Amazônia-1 (64 m), AWIFS/IRS-R2 (56 m)	2015-atual	3 ha	Diferencia tipos de supressão e degradação	[16]
Deter Cerrado	Bioma Cerrado		2017-atual	3 ha	Supressão	[36]
Deter Pantanal	Bioma Pantanal		2023-atual	3 ha	Diferencia tipos de supressão e degradação	https://terrabrasilis.dpi.inpe.br/app/report/pantanal/
Deter Não-Floresta	Vegetação natural não-florestal do Bioma Amazônia		2023-atual	3 ha	Diferencia tipos de supressão e degradação	[34]
Deter Intenso	Áreas florestais prioritárias na Amazônia Legal Brasileira	WFI/CBERS-4 (64 m), MUX/CBERS-4, OLI/Landsat8 (30 m) e MSI/Sentinel-2 (20 m)	2019-2023	1 ha	Diferencia tipos de supressão e degradação	[37]
Deter-Radar	Áreas florestais do bioma Amazônia	Sentinel-1 (5 m por 20 m, modo IW)	2021-2024	1 ha (Coleção 1) 0,4 ha (Coleção 2)	Supressão	[38]
Deter-RT			previsto para 2025	0,4 ha	Supressão	[39]

são e degradação da cobertura florestal para agências responsáveis pela fiscalização, como o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e Secretarias Estaduais do Meio Ambiente.

O Deter foi lançado em 2004, como instrumento para auxiliar nas estratégias de redução e controle de desmatamento propostas pelo PPCDAm. Inicialmente, o sistema se limitava à detecção de desmatamentos nas florestas da Amazônia Legal Brasileira. O Deter foi ampliado para monitorar outras regiões do Brasil, usando novas técnicas e tipos de imagens. Atualmente, o Deter monitora a supressão e a degradação da vegetação do bioma Amazônia, incluindo áreas de vegetação natural não-florestal, Cerrado e Panta-

nal (veja Refs. [33, 34]).

Para a Amazônia foram estabelecidos alguns sistemas dedicados, como por exemplo, o Deter Intenso e o Deter-Radar. E novos sistemas são previstos, como o Deter-RT que deverá ser uma versão aprimorada do Deter-Radar. Os sistemas Deter Amazônia, Cerrado e Pantanal são baseados em interpretação visual de imagens de satélites de resolução mediana, mas com elevada taxa de revisita. O Deter-R e Deter-RT diferem dos anteriores, uma vez que se baseiam em métodos automáticos de detecção de desmatamento em imagens de radar.

Diariamente, novas imagens são processadas e analisadas por uma equipe de intérpretes altamente qualificada, auditadas e distribuídas para

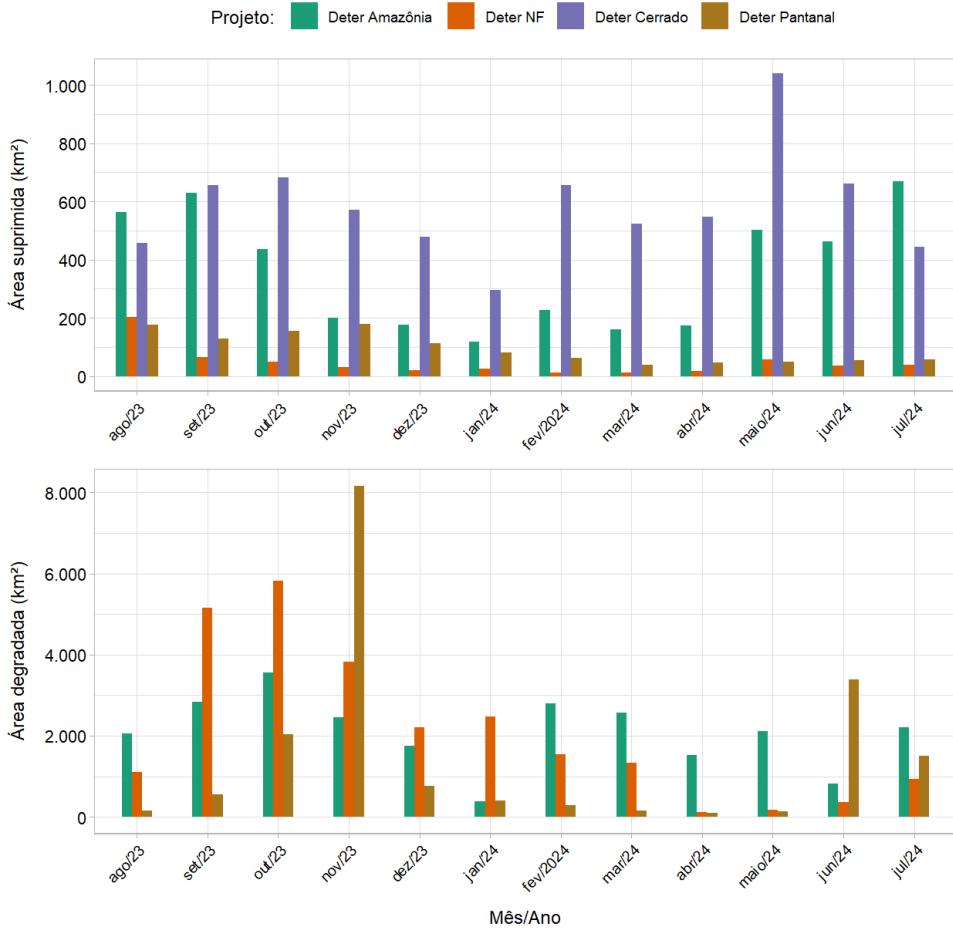


Figura 2: Supressão e degradação da vegetação nativa detectada por projetos selecionados do Deter entre agosto de 2023 e julho de 2024 (ano de referência 2023/2024).

agências de fiscalização. As principais características desses sistemas estão resumidas na Tabela 2.

3.2.1 Resultados do Deter

Os resultados do Deter Amazônia, NF, Cerrado e Pantanal, para o ano de referência 2023/2024 (que vai de agosto de 2023 a julho de 2024, ou o chamado ano Prodes 2024), estão ilustrados na Figura 2, com as classes agregadas em “Supressão” (classes de desmatamento, supressão e mineração) e “Degradação” (classes de corte seletivo, degradação e cicatrizes de queimada). Os resultados de outros projetos, períodos e agregações de classes podem ser consultados na plataforma web TerraBrasilis, disponível em <https://terrabrisilis.dpi.inpe.br/>. Percebe-se que a área suprimida da vegetação nativa não é constante ao longo do ano. Em particular, destaca-se a queda de detecção do sistema Deter Amazônia de novembro a abril, que são meses de maior

nebulosidade devido à intensidade de chuvas na Amazônia.

Essa queda pode ocorrer por dois motivos concomitantes: 1) queda real nos eventos de supressão ou 2) cobertura de nuvens que impedem a detecção. O Deter é também o único sistema oficial do governo brasileiro monitorando eventos de degradação na Amazônia e no Pantanal.

3.2.2 Políticas públicas baseadas no Deter

Por ser utilizado como instrumento para apoio às atividades de fiscalização e controle do desmatamento, o Deter tem historicamente contribuído para a redução das áreas de supressão. Informações do Deter também são utilizadas pelo governo brasileiro para a proposta de leis e incentivos ao combate de queimadas, degradação e supressão ilegal da supressão da vegetação nativa. Estima-se que o Deter para ações de fiscalizações em campo que, aliadas à delimitação de

Tabela 4: Características do Sistema Deter do BiomasBR.

Sistema	Abrangência	Satélite (resolução)	Frequência, datas	Referência
TerraClass Amazônia	Bioma Amazônia	LANDSAT (30m) até 2020 e Sentinel-2/MSI (10m) a partir do mapeamento de 2020	2008, 2010, 2012, 2014, 2018, 2020 e 2022	[47]
TerraClass Cerrado	Bioma Cerrado		2018, 2020 e 2022	

áreas protegidas, reduziram as taxas de desmatamento da Amazônia Legal brasileira em 83% de 2004 a 2012 [40]. No Mato Grosso, 25% dos autos de infração entre 2005 e 2010 foram em áreas apontadas pelo Deter [41]. No bioma Amazônia, a utilização dos dados do Deter pelo Ibama aumentou não apenas o número de infrações, mas permitiu responsabilizar 12,5% dos culpados pelo desmatamento entre 2004 e 2011 [42].

Importante ressaltar que os dados do Deter não são adequados para quantificar com precisão o valor da área suprimida de vegetação nativa. Contudo, por sua frequência diária, estes dados têm sido eficientemente utilizados como indicador da intensidade do processo de “desmatamento” dos biomas Amazônia, Cerrado e Pantanal. Ao serem comparados os dados do Deter com o mesmo período nos anos anteriores, tem-se uma estimativa da tendência da supressão que deverá ser computada com precisão a partir dos dados Prodes. Estes dados têm sido regularmente anunciados pelo governo federal e divulgados pela imprensa (veja, por exemplo, a Ref. [43]).

3.3 TerraClass: monitoramento sistêmico da cobertura e uso da terra

O TerraClass é um sistema resultante do esforço colaborativo entre a Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) e o INPE, que utiliza imagens de satélite para classificar a cobertura e o uso da terra em áreas cuja vegetação nativa foi suprimida. Enquanto o Prodes fornece dados essenciais sobre a área da supressão, o TerraClass informa a cobertura e o uso da terra atual das regiões anteriormente cobertas por vegetação nativa. Juntos, esses sistemas oferecem uma visão abrangente sobre as mudanças da paisagem. O sistema TerraClass produz mapas bienais da terra para os biomas Amazônia e Cer-

rado, e a partir de 2025 deverá abranger todos os biomas brasileiros. As principais características e referências contendo os detalhes metodológicos do TerraClass estão sintetizadas na Tabela 3.

O TerraClass utiliza uma metodologia robusta para mapear e caracterizar o uso e a cobertura em áreas onde o Prodes já identificou a supressão da vegetação nativa, combinando análises de imagens de satélite, classificação semiautomática e interpretação visual. A validação dos dados é feita por instituição parceira em pontos aleatórios e assegurada por informações de campo e imagens de alta resolução espacial, garantindo qualidade e consistência no mapeamento.

Nos últimos anos, a metodologia do TerraClass tem incluído o uso de séries históricas de imagens de satélite para mapear os diferentes usos e coberturas da terra. Tecnologias avançadas, desenvolvidas no Brasil, como o Brazil Data Cube - BDC [44] e o pacote Satellite Image Time Series Analysis on Earth Observation Data Cubes - SITS [45], ambos desenvolvidos pelo INPE, possibilitaram a organização e processamento de grande volume de imagens. Para gerar a informação algoritmos de Inteligência Artificial, especialmente Aprendizado Profundo (deep learning), estão sendo utilizados para classificar as séries temporais.

Desta forma, diferentes classes de uso e cobertura são identificadas, como: pastagens, diferentes classes de agricultura, vegetação secundária, áreas urbanas, mineração, corpos d’água, entre outras.

3.3.1 Resultados do TerraClass

O sistema TerraClass atualizou recentemente os mapeamentos da transição do uso e cobertura da terra nos biomas Amazônia e Cerrado para os anos de 2018, 2020 e 2022, e atualmente está finalizando o dado de 2024. Estes biomas, que juntos somam 6,2 milhões de km², possuem cerca de

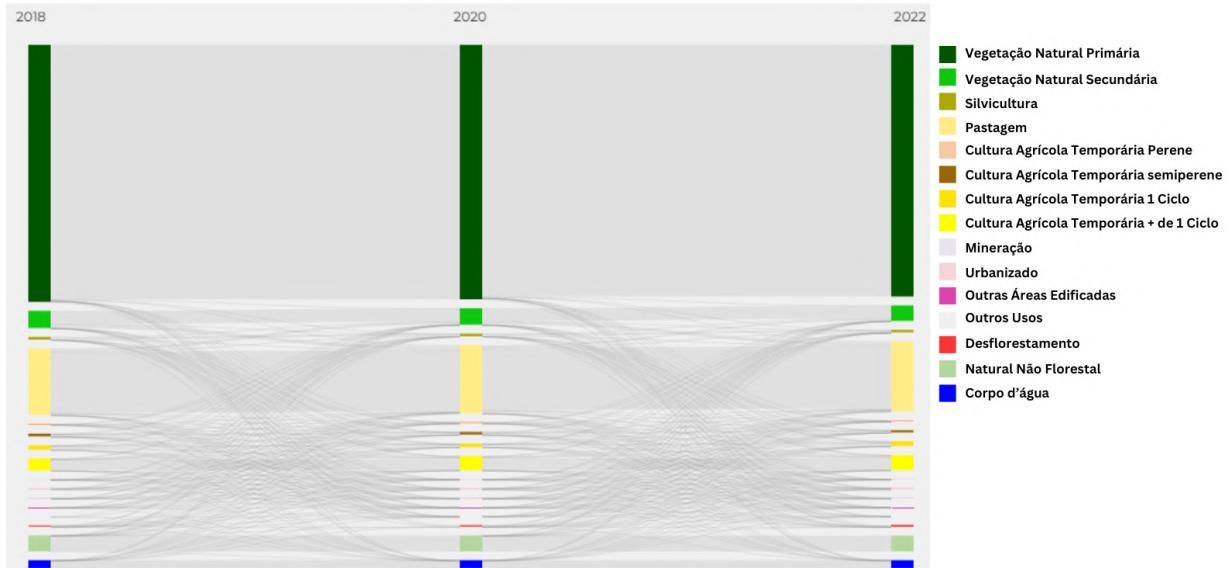


Figura 3: Mudanças no uso e cobertura do solo entre 2018, 2020 e 2022 para Amazônia e Cerrado, conforme dados do TerraClass.

65% de sua área (4 milhões de km²) preservada, com cobertura de vegetação nativa.

A Figura 3 apresenta as mudanças no uso e cobertura do solo dos biomas Amazônia e Cerrado de 2018 para 2020 e 2020 para 2022. No diagrama, as linhas em cinza representam a dinâmica do uso e cobertura do solo. Ou seja, as linhas horizontais representam a permanência, enquanto as linhas curvas representam as mudanças de classes entre os anos. Pastagens ocupam aproximadamente 18% (1,1 milhão de km²), enquanto 6% (400 mil km²) são utilizados para agricultura, incluindo os cultivos temporários, semi-perenes, perenes e silvicultura. Outros 4% (246 mil km²) correspondem à Vegetação Natural Secundária, sendo o restante distribuído entre categorias de menor expressão territorial.

As áreas antropizadas nesses biomas somam aproximadamente 1,8 milhão de km², das quais 62% são cobertas por pastagens, 22% por culturas agrícolas relacionadas à produção de alimentos, energia, fibras e madeira, e 14% por vegetação natural secundária em diferentes estágios de regeneração. Dentro das áreas antropizadas, as Culturas Agrícolas Temporárias correspondem a 17% (313 mil km²), com destaque para a Agricultura Temporária de Mais de 1 Ciclo, que representa 76% dessas áreas produtivas.

Os resultados indicam uma expansão de 22% na agricultura anual em ambos os biomas entre

2018 e 2022, ocupando mais 56 mil km². Notadamente, mais de 94% dessa expansão ocorreu sobre áreas previamente utilizadas para agropecuária, principalmente pastagens, enquanto aproximadamente 1% afetou áreas de vegetação natural primária (vegetação nativa que nunca sofreu supressão anteriormente) e secundária (vegetação nativa que sofreu regeneração após supressão).

Esses dados sugerem que a agricultura tem se expandido predominantemente sobre áreas já antropizadas, reduzindo a necessidade de desmatamento de novas áreas naturais. No entanto, a conversão de vegetação natural para pastagens continua sendo a principal causa de desmatamento. Apesar da dinâmica de conversão entre vegetação secundária e pastagens, há uma quantidade significativa de áreas em regeneração que permanecem estáveis nos dois biomas.

A regeneração da vegetação é um aspecto essencial a ser monitorado nos biomas Amazônia e Cerrado, especialmente considerando que a idade da vegetação secundária está diretamente relacionada ao aumento da biodiversidade [46]. Estudos indicam que, com o passar dos anos, a estrutura e a funcionalidade dos fragmentos de vegetação secundária tendem a melhorar devido ao aumento da diversidade e à composição de espécies.

Na Amazônia, as áreas de vegetação natural florestal secundária, formadas em locais que sofreram corte raso e foram abandonadas, cobriam

cerca de 169 mil km² em 2022, sendo que 31% (53 mil km²) estavam em regeneração há pelo menos 14 anos. Além disso, aproximadamente 39% (67 mil km²) dessas áreas estavam em regeneração por 10 anos ou mais. No Cerrado, a vegetação natural secundária ocupava 77 mil km² em 2022, o equivalente a 4% da superfície do bioma. Destas, 55% (42,5 mil km²) estavam em regeneração há pelo menos 4 anos. Monitorar a idade dessas áreas é fundamental, pois a vegetação secundária mais antiga tende a apresentar maior biodiversidade e estabilidade ecológica, desempenhando um papel fundamental na conservação ambiental.

3.3.2 Políticas públicas embasadas pelo TerraClass

O TerraClass é uma importante fonte de informação para políticas públicas relacionadas ao planejamento territorial. Analisar se há relação espacial entre o crescimento de áreas agrossilvipastoris e a supressão da vegetação nativa é parte da política de enfrentamento ao desmatamento e também de incentivos regionais para impulsionar a agricultura sustentável.

Além disso, o TerraClass apresenta dados oficiais para monitorar os compromissos assumidos pelo país com o reflorestamento, sendo o número de referência para o Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa (Planaveg) e garantindo a continuidade de investimentos e financiamentos internacionais que visam a recuperação ambiental, gerando informação também para a mensuração das estimativas de captura de GEE. Por outro lado, o monitoramento do crescimento das áreas agrossilvipastoris permite mensurar as estimativas de emissões de GEE.

4 Acesso aos dados BiomasBR

Os dados de monitoramento dos sistemas Prodes e Deter são sistematizados e disponibilizados ao público através da plataforma TerraBrasilis, desenvolvida e mantida pelo INPE (<https://terrabrasilis.dpi.inpe.br>). Essa plataforma é uma ferramenta que permite a visualização e o download de dados dos dois sistemas de monitoramento de desmatamento e degradação ambiental, em formatos tabulares, raster e

vetorial, proporcionando informações detalhadas sobre a dinâmica do uso da terra no Brasil. Há ainda recursos interativos, como gráficos instantâneos (dashboard) e mapas, produzidos a partir das consultas feitas pelo usuário.

A partir das consultas, é possível quantificar áreas totais para as diferentes classes de desmatamento e de degradação monitoradas pelo Prodes, para diferentes recortes geográficos como estados, municípios, unidades de conservação e terras indígenas para todos os biomas. O sistema Deter, até o momento, disponibiliza dados em dashboard apenas para os biomas Amazônia e Cerrado. Dessa forma, a TerraBrasilis não apenas disponibiliza dados essenciais para gestores públicos, pesquisadores e ambientalistas, mas também oferece uma plataforma de fácil acesso para o monitoramento contínuo e a tomada de decisões sobre políticas ambientais e ações de preservação, identificando prontamente onde direcionar políticas e ações de comando e controle. Os dados do TerraClass estão disponíveis para qualquer usuário por meio do site <https://data.inpe.br/big/web/biomasbr/terraclasse-monitoramento-sistematico-de-uso-e-cobertura-da-terra>, permitindo amplo acesso às informações e promovendo transparência no monitoramento e análise do uso da terra nos biomas brasileiros. Também é possível consultar os dados TerraClass em uma plataforma de recursos interativos, gerados a partir das consultas feitas pelo usuário, por bioma, por ano e por tipo de visualização, no endereço <https://www.terraclass.gov.br/webgis>.

5 Considerações finais

Os sistemas Prodes, Deter e TerraClass, desenvolvidos pelo INPE, representam pilares fundamentais para o monitoramento ambiental no Brasil, destacando-se pela robustez científica e tecnológica. Cada um desses sistemas desempenha um papel único, mas complementar, no entendimento das dinâmicas ambientais, contribuindo significativamente para a proteção dos biomas brasileiros, em especial a Amazônia Legal.

O Prodes, ativo desde 1988 para a Amazônia, e reconhecido mundialmente pela consistência de sua longa série histórica, é a base oficial para a mensuração das taxas anuais de perda florestal.

Esse sistema tem sido um elemento-chave para o Brasil cumprir compromissos climáticos internacionais, como o Acordo de Paris, fornecendo dados confiáveis e transparentes para relatórios nacionais e globais.

Além disso, os resultados do Prodes permitem identificar padrões espaciais e temporais do desmatamento, orientando ações estratégicas de conservação e fiscalização.

O Deter, por sua vez, complementa o Prodes ao oferecer alertas quase em tempo real sobre eventos de desmatamento e degradação florestal, essenciais para ações rápidas de combate ao desmatamento ilegal. Este sistema tem sido amplamente utilizado por órgãos de fiscalização ambiental, como o IBAMA e Secretarias Estaduais de Meio Ambiente, e forças policiais, permitindo intervenções mais ágeis e eficazes. Em cenários de intensificação do desmatamento, o Deter demonstrou ser uma ferramenta indispensável para reduzir perdas ambientais em áreas de grande pressão antrópica.

O TerraClass oferece uma visão detalhada da dinâmica de uso e ocupação do solo nas áreas previamente desmatadas, preenchendo lacunas críticas no entendimento do destino dessas áreas. Desde 2008, o sistema classifica as terras desmatadas em categorias como pastagens, agricultura, regeneração natural e áreas urbanizadas, proporcionando um panorama mais amplo das transformações socioeconômicas e ecológicas associadas ao desmatamento. Esses dados têm sido utilizados em estudos acadêmicos, formulação de políticas públicas e estratégias de gestão territorial.

Até janeiro de 2025, foram computados 1.674 artigos, em 539 revistas científicas que fazem citação ao Prodes Amazônia [48]. Contudo, a relevância dos sistemas do BiomasBR transcende a esfera científica. Eles desempenham um papel central na promoção da transparência, permitindo à sociedade acompanhar e avaliar o cumprimento das metas ambientais do Brasil. Além disso, o acesso público aos dados promove um ambiente democrático, informações qualificadas estão disponíveis para subsidiar debates e decisões em diferentes setores, desde a gestão pública até iniciativas do setor privado.

Do ponto de vista ambiental, os sistemas contribuem para a conservação dos serviços ecossistêmicos e da biodiversidade, alertando para as con-

sequências da perda de cobertura vegetal. Socialmente, auxiliam no planejamento de ações de desenvolvimento sustentável, incluindo programas que buscam aliar conservação e geração de renda em áreas críticas. Em termos de políticas públicas, as informações geradas pelo Prodes, Deter e TerraClass têm sido fundamentais para a formulação e avaliação de políticas ambientais, como o Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm), que já demonstrou resultados significativos na redução do desmatamento. Assim, os sistemas Prodes, Deter e TerraClass não apenas consolidam o papel do INPE como uma referência internacional em monitoramento ambiental, mas também reforçam a importância de garantir recursos para ciência, tecnologia e inovação no enfrentamento dos desafios ambientais globais. Ao integrar dados científicos de alta qualidade com ações práticas, esses sistemas contribuem para a conservação dos recursos naturais, promovendo uma relação mais harmoniosa entre sociedade, economia e meio ambiente, em prol de um desenvolvimento verdadeiramente sustentável.

6 Agradecimentos

Agradecimento ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Científico (CNPq) – processo 422354/2023-6 (Monitoramento e avisos de mudanças de cobertura da terra nos Biomas Brasileiros – capacitação e semiautomatização do programa BiomasBR), sediado e executado pelo INPE.

Sobre os autores

Cláudio Aparecido de Almeida (claudio.almeida@inpe.br) é agrônomo, com mestrado em Sensoriamento Remoto pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e doutorado em Geomática pela Université de Montpellier. Tecnologista sênior no INPE, atualmente é o coordenador do programa BiomasBR.

Letícia Palazzi Perez (leticia.palazzi@gmail.com) é aeógrafa, mestre em Engenharia e doutora em Geografia Física pela Universidade de São Paulo. Desenvolve

pesquisa relacionada aos impactos, vulnerabilidade e adaptação às mudanças climáticas em assentamentos humanos e compõe a equipe BiomasBR do INPE, no Prodes Amazônia.

Mariane Souza Reis (mariane.reis@inpe.br) é engenheira ambiental, mestre em Sensoriamento Remoto e doutora em Ciência do Sistema Terrestre pelo INPE. Desenvolve pesquisas em processamento de imagens e aprendizado de máquina para a análise do uso e cobertura da terra e atua como especialista em radares de abertura sintética no Deter, do Programa BiomasBR do INPE.

Vagner Luis Camilotti (vagner.camilotti@gmail.com) é Médico Veterinário (UFSM), Tecnólogo em Geoprocessamento (FATEC Jacareí), mestre em Ecologia (UFRGS) e Doutor em Ciência do Sistema Terrestre (INPE). Desenvolve pesquisas na área de Ecologia da Paisagem e uso e cobertura da terra e compõe a equipe Prodes Amazônia do Programa BiomasBR do INPE.

Cassiano Gustavo Messias (cassiano.messias@inpe.br) é geógrafo, com mestrado e doutorado em Geografia pela Universidade Estadual de Campinas. Trabalha com produtos de sensores remotos no monitoramento do uso e cobertura da terra e é coordenador técnico das equipes Prodes Amazônia, Prodes Pantanal, Deter não-floresta e Deter Pantanal, no programa BiomasBR do INPE.

Erison Carlos dos Santos Monteiro (oierison@gmail.com) é biólogo, mestre em Ecologia pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul e doutor em Ecologia pela Universidade Estadual Paulista. Pesquisa dinâmica da paisagem com o uso de inteligência artificial e Sensoriamento Remoto, e atua no programa BiomasBR do INPE como coordenador técnico do TerraClass Cerrado.

Taise Farias Pinheiro (pinheirofataise@gmail.com) é bióloga, mestre em Sensoriamento Remoto e doutora em Ciência do Sistema Terrestre pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Atua no uso de Geotecnologias para a análise da paisagem na Amazônia e no Cerrado, e atualmente é auditora no Prodes e Deter Cerrado, do Programa BiomasBR do INPE.

João Felipe Sobrinho Kneipp Cerqueira Pinto (jfkneipp@gmail.com) é geógrafo, mestre em Ciências Ambientais pela Universidade Federal do

Pará. Atua nas áreas de geoprocessamento, sensoriamento remoto e monitoramento do uso e cobertura da terra no Cerrado brasileiro e é coordenador técnico das equipes Prodes Cerrado e Deter Cerrado do programa BiomasBR do INPE.

Luciana de Souza Soler (luciana.soler@inpe.br) é bacharel em física pela UFMS, mestre em Sensoriamento Remoto pelo INPE, PhD em Ecologia de Produção e Conservação de Recursos pela Universidade de Wageningen, Holanda, e Pós-doutora pelo CCST/INPE. Atua como coordenadora geral de gestão em RH, pesquisa, desenvolvimento e inovação do Programa BiomasBR do INPE, nos sistemas Prodes, Deter e TerraClass.

Lubia Vinhas (lubia.vinhas@inpe.br) é bacharel em Ciência da Computação, com mestrado e doutorado em Computação Aplicada pelo INPE. É Pesquisadora Sênior do INPE desde 1997, e atua no suporte tecnológico para os projetos de monitoramento e na manutenção e aprimoramento da plataforma TerraBrasilis do programa BiomasBR.

Luis Eduardo Pinheiro Maurano (luis.maurano@inpe.br) é graduado em Computação e mestre em Sensoriamento Remoto pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Atua desde 2013 como Tecnologista Sênior do INPE e participa como membro da equipe técnica do programa BiomasBR nas áreas de geoprocessamento, banco de dados e desenvolvimento de sistemas webgis.

Marcos Adami (marcos.adami@inpe.br) é economista, com mestrado e doutorado em Sensoriamento Remoto pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. É Pesquisador Titular no INPE, atuando nas áreas de mudança de uso da terra e estatísticas agrícolas e compõe a equipe do BiomasBR do INPE como coordenador do TerraClass Amazônia.

Tatiana Mora Kuplich (tatiana.kuplich@inpe.br) é bióloga, com Mestrado em Sensoriamento Remoto pelo INPE e Doutorado em Geografia pela University of Southampton na Inglaterra. É Tecnologista Senior do INPE e pesquisa sobre os biomas brasileiros, especialmente o Pampa.

Gustavo F. Balué Arcoverde (gustavo.arcoverde@inpe.br) é geógrafo, com mestrado e doutorado em Sensoriamento Remoto pelo Instituto Nacional de Pesquisas

Espaciais. É Tecnologista Pleno pelo INPE desde 2015 e atua como coordenador da equipe Prodes no bioma Caatinga.

Igor da Silva Narvaes (igornarvaes@inpe.br) é Engenheiro Florestal, com Mestrado em Engenharia Florestal pela UFSM e Doutorado em Sensoriamento Remoto pelo INPE. É Pesquisador Sênior do INPE e pesquisa sobre os biomas brasileiros, especialmente o Pampa e a região sul da Mata Atlântica.

Silvana Amaral (silvana.amaral@inpe.br) é ecóloga, com mestrado em Sensoriamento Remoto pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, e doutorado em Engenharia/Informação Espacial pela Universidade de São Paulo. Pesquisadora do INPE desde 1995, é atualmente coordenadora substituta do Programa BiomasBR do INPE.

Referências

- [1] W. Steffen et al., *Global Change and the Earth System: A Planet Under Pressure* (Springer, Berlin, 2004).
- [2] B. L. Turner II e W. B. Meyer, *Global Land Use and Land Cover Change: An Overview*, in *Changes in land use and land cover: a global perspective*, editado por W. Meyer e B. L. Turner II (Cambridge University Press, 1994), 3–10.
- [3] A. Chhabra et al., *Multiple Impacts of Land-Use/Cover Change*, in *Land-Use and Land-Cover Change: Local Processes and Global Impacts* (Springer, 2006), 71–116.
- [4] IPCC, *Climate Change 2014: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, Geneva, 2014). Disponível em <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>, acesso em mar. 2025.
- [5] United Nations Environment Programme - UNEP, *Emissions Gap Report 2024: No more hot air ... please! With a massive gap between rhetoric and reality, countries draft new climate commitments* (UNEP, Nairobi, 2024).
- [6] Brasil, Governo Federal, *BRAZIL'S NDC - National determination to contribute and transform* (Brasil, Brasília, DF, 2024). Disponível em https://unfccc.int/sites/default/files/2024-11/Brazil_Second%20Nationally%20Determined%20Contribution%20%28NDC%29_November2024.pdf, acesso em mar. 2025.
- [7] P. Friedlingstein et al., *Global Carbon Budget 2023*, *Earth System Science Data* **15**(12), 5301 (2023).
- [8] E. Rödig et al., *The importance of forest structure for carbon fluxes of the Amazon rainforest*, *Environmental Research Letters* **13**(5), 054013 (2018).
- [9] L. V. Gatti et al., *Increased Amazon carbon emissions mainly from decline in law enforcement*, *Nature* **621**(7978), 318 (2023).
- [10] Brasil, *Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências* (2009). Disponível em https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm, acesso em jan. 2025.
- [11] Brasil, Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, *Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAM) - 5a fase* (2023 a 2027) (MMA, Brasília-DF, 2023). Disponível em <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/combate-ao-desmatamento-queimadas-e-ordenamento-ambiental-territorial/controle-do-desmatamento-1/amazonia-ppcdam-1/5a-fase-ppcdam.pdf>, acesso em mar. 2025.
- [12] L. Maurano, C. A. Almeida e M. Meira, *Monitoramento do desmatamento do cerrado brasileiro por satélite - PRODES Cerrado*, in *XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, editado por D. F. M. Gherardi, L. E. O. C. Aragão e I. D. A. Sanches (INPE, São José dos Campos, 2019), 191–194. Disponível em <http://urlib.net/ibi/8JMKD3MGP6W34M/3U24F8S>, acesso em mar. 2025.

- [13] INPE, *Metodologia da detecção do desmatamento no bioma Cerrado: Mapeamento de áreas antropizadas com imagens de média resolução espacial* (INPE, São José dos Campos, 2018).
- [14] C. G. Messias et al., *Unaccounted for non-forest vegetation loss in the Brazilian Amazon*, *Commun. Earth Environ.* **5**(1), 451 (2024).
- [15] K. R. Ferreira, L. Santos e M. C. A. Picoli, *Evaluating distance measures for image time series clustering in land use and cover monitoring*, in *2019 European Conference on Machine Learning and Principles and Practice of Knowledge Discovery in Databases (ECML/PKDD)*, editado por T. Corpetti et al. (CEUR, Würzburg, Germany, 2019). Disponível em <https://ceur-ws.org/Vol-2466/paper5.pdf>, acesso em mar. 2025.
- [16] C. A. Almeida et al., *Metodologia utilizada nos sistemas PRODES e DETER - 2^a edição (atualizada)* (INPE, São José dos Campos, 2022). Disponível em <http://urlib.net/ibi/8JMKD3MGP3W34T/47GAF6S>, acesso em mar. 2025.
- [17] C. Almeida et al., *Mapping natural non-forest vegetation removal in the Brazilian Amazon – a pilot project*, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **XLIII-B3-2022**, 1341 (2022).
- [18] F. O. Passos et al., *Efeito da resolução espacial sobre a série histórica de monitoramento de desmatamento da Mata Atlântica*, in *XX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, editado por D. F. M. Gherardi, L. E. O. C. Aragão e I. D. A. Sanches (INPE, 2023), 1598–1601. Disponível em <https://proceedings.science/sbsr-2023/trabalhos/efeito-da-resolucao-espacial-sobre-a-serie-historica-de-monitoramento-de-desmata?lang=pt-br>, acesso em mar. 2025.
- [19] G. F. B. Arcoverde et al., *Patterns of natural vegetation removal in the Caatinga biome in Prodes Project scope*, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **XLVIII-3-2024**, 9 (2024).
- [20] T. M. Kuplich et al., *Brazilian Pampa as part of the INPE's official program for mapping native vegetation removal*, *Abstracts of the ICA* **6**, 1 (2023).
- [21] C. E. F. Young, *Desmatamento e desemprego rural na Mata Atlântica*, *Floresta e Ambiente* **13**(2), 75 (2006). Disponível em <https://www.scielo.br/j/floram/a/bMKBhrMKtcpHt7KvTmGJLKR/>, acesso em mar. 2025.
- [22] S. Amaral et al., *Alarming patterns of mature forest loss in the Brazilian Atlantic Forest*, *Nature Sustainability* (2025).
- [23] M. Bizerril, *O cerrado para educadores(as): sociedade, natureza e sustentabilidade* (Hai-kai, São Paulo, 2021).
- [24] R. Zorzetto, *Cerrado ameaçado*, *Rivista Pesquisa FAPESP* **309**, 52 (2021). Disponível em https://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2021/10/052-057_cerrado_309.pdf, acesso em mar. 2025.
- [25] C. W. Porto-Gonçalves et al., *Os cerrados e os fronts do agronegócio no Brasil*, in *Conflitos no Campo – Brasil 2016*, editado por A. Canuto, C. R. S. Luz e T. P. Andrade (CPT, Goiânia, 2017), 74–87. Disponível em <https://www.cptnacional.org.br/downloads?task=download.send&id=14061&catid=41&m=0>, acesso em mar. 2025.
- [26] J. B. Conti e S. A. Furlan, *Geoecologia: o clima, os solos e a biota*, in *Geografia do Brasil*, editado por J. L. S. Ross (Edusp, São Paulo, 2011).
- [27] D. P. Costa et al., *All deforestation matters: deforestation alert system for the Caatinga biome in South America's tropical dry forest*, *Sustainability* **16**(20), 9006 (2024).
- [28] C. J. R. Alho et al., *Ameaças à biodiversidade do Pantanal brasileiro pelo uso e ocu-*

- pação da terra, Ambiente & Sociedade* **22**, e01891 (2019).
- [29] C. G. Messias et al., *Análise das taxas de desmatamento e seus fatores associados na Amazônia Legal brasileira nas últimas três décadas, Raega - O Espaço Geográfico em Análise* **52**, 18 (2021).
- [30] Brasil, *Decreto nº 11.687, de 5 de setembro 2023* (2023). Disponível em <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-11.687-de-5-de-setembro-2023-508071575>, acesso em jan. 2025.
- [31] M. E. Skidmore et al., *Cattle supply chain fidelity in the Brazilian Amazon: key considerations for deforestation monitoring*, *Environmental Research Letters* **19**(11), 114012 (2024).
- [32] J. Alix-Garcia e H. K. Gibbs, *Forest conservation effects of Brazil's zero deforestation cattle agreements undermined by leakage*, *Global Environmental Change* **47**, 201 (2017).
- [33] T. P. Pinheiro et al., *The near real-time deforestation detection system: Case study of the DETER system for the Cerrado Biome*, *Applied Earth Science: Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy* **132**(3–4), 271 (2023).
- [34] C. G. Messias et al., *DETER Monitoring on Non-Forest Vegetation in the Brazilian Amazon*, *Revista Brasileira de Cartografia* **76**, 1 (2024).
- [35] INPE, *Monitoramento da cobertura florestal da Amazônia por satélites: sistemas Prodes, Deter, Degrad e Queimadas 2007-2008* (INPE, São José dos Campos, 2008). Acesso em 10 jan. 2025. Disponível em http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/degrad/arquivos/Relatorio_Prodes2008.pdf.
- [36] C. A. Almeida et al., *Metodologia dos sistemas Prodes e Deter para o bioma Cerrado* (INPE, São José dos Campos, 2024).
- [37] L. E. P. Maurano et al., *Deter Intenso and forest monitor: improving the alerting of deforestation in the Brazilian Amazon Rainforest*, in *XX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, editado por D. F. M. Gherardi, L. E. O. C. Aragão e I. D. A. Sanches (INPE, 2023), 3219–3222. Disponível em <https://proceedings.science/sbsr/sbsr-2023/trabalhos/deter-intenso-and-forest-monitor-improving-the-alerting-of-deforestation-in-the?lang=pt-br>, acesso em mar. 2025.
- [38] J. Doblas et al., *DETER-R: An operational near-real time tropical forest disturbance warning system based on Sentinel-1 time series analysis*, *Remote Sensing* **14**(15), 3658 (2022).
- [39] J. Doblas et al., *DETER-RT: The new INPE-TropiSCO deforestation monitoring system in the Amazon biome*, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **XLVIII-3-2024**, 127 (2024).
- [40] J. Assunção, C. Gandour e R. Rocha, *DETER-ing Deforestation in the Amazon: Environmental Monitoring and Law Enforcement*, *American Economic Journal: Applied Economics* **15**(2), 125 (2023).
- [41] R. A. Teures e A. C. C. Castilho, *Relação entre Autos de Infração lavrados pelo IBAMA e detecções do sistema DETER no estado de Mato Grosso*, in *XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, editado por J. C. N. Epiphanio e L. S. Galvão (INPE, 2011), 2975–2980. Disponível em <http://urlib.net/ibi/3ERPFQRTRW/39UG69B>, acesso em mar. 2025.
- [42] R. Rajão, A. Alencar e A. Azevedo, *A revolução tecnológica do IBAMA e os limites do comando e controle na Amazônia*, *Boletim Amazônia em Palta* **4** (2015). Disponível em <https://www.lagesa.org/wp-content/uploads/documents/Rajao%202014%20Revolucao%20Tecnologica%20no%20IBAMA%20>

- %20IPAM%20Amazonia%20em%20Pauta.pdf, acesso em jan. 2025.
- [43] Secretaria de Comunicação Social, Brasil, *Amazônia: desmatamento em agosto de 2024 foi o menor em seis anos* (2024). Disponível em <https://www.gov.br/secom/pt-br/assuntos/noticias/2024/09/amazonia-desmatamento-em-agosto-de-2024-foi-o-menor-em-seis-anos>, acesso em jan. 2025.
- [44] K. R. Ferreira et al., *Earth observation data cubes for Brazil: Requirements, methodology and products*, *Remote Sensing* **12**(24), 4033 (2020).
- [45] R. Simoes et al., *Satellite image time series analysis for big earth observation data*, *Re-*mote Sensing **13**(13), 2428 (2021).
- [46] F. V. Costa et al., *Synthesis of the first 10 years of long-term ecological research in Amazonian Forest ecosystem – implications for conservation and management*, *Natureza & Conservação* **13**(1), 3 (2015).
- [47] C. A. Almeida et al., *High spatial resolution land use and land cover mapping of the Brazilian Legal Amazon in 2008 using Landsat-5/TM and MODIS data*, *Acta Amazonica* **46**(3), 291 (2016).
- [48] *Citações ao PRODES Amazônia*, INPE (2025). Disponível em <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes/citacoes-ao-prodes>, acesso em jan. 2025.

O clima antártico e as quatro décadas de pesquisa no Programa Antártico Brasileiro

Cesar Amaral, Dafne Anjos, Anna Donato, Rodrigo Goldenberg-Barbosa e Leticia Eller

Laboratório de Radioecologia e Mudanças Globais, Núcleo de Genética Molecular Ambiental e Astrobiologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Resumo

A Antártica é uma peça-chave na dinâmica climática no planeta. Seu clima frio característico é responsável pela manutenção da temperatura, modulação de fenômenos climáticos globais, sustentação de ecossistemas e da biodiversidade dependente do gelo. Da mesma forma, a região é impactada de maneira expressiva pelas mudanças climáticas globais. Ao longo das últimas décadas, o Programa Antártico Brasileiro vem empregando esforços no estudo da região, com diversos módulos e instalações empregados na captação de dados climáticos, atmosféricos, biológicos, dentre outros. Neste trabalho, é caracterizado o clima antártico, sua importância no contexto global, os impactos das mudanças climáticas na Antártica e os esforços do Programa Antártico Brasileiro no estudo do clima polar.

Abstract

Antarctica plays a key role in the planet's climate dynamics. Its characteristic cold climate is responsible for maintaining temperatures, global climate modulation, sustaining ecosystems and ice-dependent biodiversity. Likewise, the region is significantly impacted by global climate change. Over the past few decades, the Brazilian Antarctic Program has been making efforts to study the region, with several modules and facilities used to collect climatic, atmospheric, and biological data, among others. This paper characterizes the Antarctic climate, its importance in the global context, the impacts of climate change on Antarctica, and the efforts of the Brazilian Antarctic Program to study the polar climate.

Palavras-chave: antártica, clima, PROANTAR.

Keywords: antarctica, climate, PROANTAR.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v6n1.47733](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v6n1.47733)

1 Introdução

1.1 Temperatura, precipitação e cobertura de gelo antártico

A Antártica é o continente mais ao sul do planeta, conhecida por suas condições naturais extremas, como clima mais frio, seco e de ventos mais intensos quando comparado aos demais continentes [1, 2]. É formada por uma porção continental de cerca de 14 milhões de quilômetros quadrados, cerca de 10% da superfície terrestre, uma cobertura de gelo continental, e por extensas plataformas de gelo que contornam aproximadamente 74% da costa antártica [3], formadas pelo congelamento do oceano ao seu redor durante o inverno [4]. O continente é cercado pelo Oceano

Austral, delimitado ao norte pela convergência antártica, ou zona frontal polar sul, onde o encontro de diferentes massas de ar quentes e frias (Frente Polar) leva a variações de temperatura da água em até 10°C entre poucos quilômetros de distância [5]. De modo similar, as condições climáticas na Antártica podem variar de modo amplo entre diferentes regiões: do frio intenso da porção leste, onde foi registrada a temperatura mais baixa do mundo (-89,28°C), à climas mais amenos da Península Antártica, região mais ao norte do continente, onde as máximas de temperatura registradas chegam a 17,58°C e 18,3°C [2]. Cerca de 95% do continente antártico é coberto por gelo, com uma espessura média de 2.700 metros [6–8]. Apesar da Antártica ser classificada

como um deserto polar, onde são poucos os episódios de precipitação sobre o continente, seja na forma líquida ou neve, a formação dessa cobertura ocorre principalmente durante esses eventos [9, 10]. Nevascas ocorrem na costa devido a atividades ciclônicas no Círculo Polar Antártico, enquanto neve fina é mais comum no interior do continente [10, 11].

O Modo Anular do Sul (SAM) desempenha um papel significativo na influência da temperatura e da extensão do gelo marinho na Antártica. O SAM representa o movimento norte-sul do cinturão de vento ocidental que circunda o continente e pode existir em uma fase positiva ou negativa. Em sua fase positiva, o SAM está associado a ventos oeste mais fortes e à redução da extensão do gelo marinho, levando a temperaturas mais quentes na Península Antártica e ao aumento do derretimento glacial. Por outro lado, a fase negativa do SAM está ligada a ventos de oeste mais fracos, temperaturas mais frias, maior precipitação e, por consequência, maior extensão do gelo marinho [12]. Massas de ar marítimas também podem chegar ao interior e causar rápidos e extremos eventos de precipitação [9, 11]. A intrusão dessas massas de ar estão frequentemente associadas a rios atmosféricos [10], correntes de vapor de água, que contribuem de modo substancial na precipitação sobre o continente, principalmente na porção leste da Antártica, mas também no derretimento da cobertura de gelo [13, 14].

As plataformas de gelo marinho podem cobrir em seu período de maior extensão (setembro e outubro) aproximadamente 20 milhões de quilômetros quadrados do Oceano Austral, alcançando o paralelo 55°S [15, 16]. Sua formação auxilia na estruturação do ecossistema antártico, induzindo a circulação termohalina (circulação movida por diferenças na densidade de massas d'água, causada por variações na temperatura e salinidade) [15]. O gelo não incorpora íons de sal em sua estrutura cristalina, o que resulta na concentração dessas substâncias na fase líquida. Durante o crescimento do gelo, grande parte desse sal é expelida para a coluna d'água subjacente, aumentando sua densidade e provocando convecção termohalina [15]. Por outro lado, quando o gelo derrete, a entrada de água doce estabiliza e torna a camada de mistura mais rasa, promovendo o crescimento do fitoplâncton [15]. Discutiremos ao longo das

próximas seções a influência do clima antártico no equilíbrio climático mundial; como as mudanças globais afetam os processos físico-químicos e a biodiversidade antártica; e o papel da participação brasileira em estudos sobre o continente gelado.

2 O que faz o clima na Antártica ser tão importante?

O clima global é influenciado pela Antártica de diversas maneiras, sobretudo por sua extensa cobertura de gelo e pelos elementos retidos em suas camadas. A modulação do clima é influenciada pela intensa frente de circulação atmosférica na região e pela cobertura de gelo no continente, que reflete grande parte da luz solar, reduzindo a quantidade de calor absorvida pela Terra [17]. Além disso, as geleiras antárticas detêm 70% de toda a água doce do planeta, além de outros elementos acumulados nas camadas de gelo [17].

Em áreas profundas do oceano que circunda o continente, grandes quantidades de CO₂ são depositadas por processos bióticos, atuando como um importante sumidouro de CO₂ da atmosfera [17–19]. Nesses oceanos Antárticos também se formam uma integração com a circulação termodifusiva global, atuando como uma das principais regiões de formação de águas profundas que movem os grandes volumes de água pelos oceanos do planeta. Esse processo é essencial para a redistribuição do calor e a regulação do clima global [20].

O resfriamento do oceano que envolve o continente tem um impacto direto nas correntes marítimas, especialmente no Hemisfério Sul. Isso ocorre devido ao encontro das águas quentes com as do Oceano Austral, resultando no transporte de águas mais frias para latitudes menores, enquanto as águas quentes se resfriam ao se aproximarem do continente. Esse ambiente gelado, formado pela Frente Polar, exerce influência significativa na evolução e distribuição de diversas espécies que se limitam a essa região [21] ou dela dependem, cuja principal fonte de alimentação é o Krill Antártico (*Euphausia superba*) [22]. Esses organismos influenciam ou são responsáveis por processos de distribuição de nutrientes ao longo de rotas migratórias e a regulação biológica de CO₂, por meio da produção de pelotas fecais e



Figura 1: A nova Estação Antártica Comandante Ferraz, inaugurada em 2020.

da exportação de carbono particulado para águas mais profundas por parte de organismos relacionados às plataformas de gelo [23].

Ao integrar a rede de influências do continente antártico ao clima global, destaca-se também o vórtice polar antártico. Esse fenômeno atmosférico é caracterizado por uma intensa circulação de ventos de alta altitude que circula a Antártica, especialmente no inverno, formando uma barreira que mantém o ar extremamente frio confinado sobre a região. Esse sistema se desenvolve devido ao forte contraste térmico entre o interior gelado da Antártica e as regiões mais quentes das latitudes médias, aliado aos efeitos da rotação da Terra [24]. Além de seu papel na manutenção do frio antártico, o vórtice polar exerce influência significativa sobre a circulação atmosférica global. Sua estabilidade e força ajudam a definir os padrões dos ventos em grande escala, contribuindo para a formação de correntes de jato e impactando a distribuição das tempestades e das precipitações em partes do Hemisfério Sul [25,26].

Desse modo, o clima Antártico se demonstra uma peça-chave na dinâmica climática do planeta [27]. Assim, qualquer desestabilização dos serviços ecossistêmicos prestados pela Antártica (ex: circulação atmosférica, balanço da criossfera e ciclagem de nutrientes), podem ter efeito sobre todo o globo [27].

2.1 Efeitos das mudanças climáticas na Antártica

A Antártica é um dos continentes que mais vêm sofrendo com as consequências das mudanças cli-

máticas, principalmente com episódios de calor intenso que estão se tornando mais frequentes e intensos [28–31]. Essas ondas de calor podem gerar vários impactos ecológicos. O derretimento acelerado de gelo e neve causado pelo aumento da temperatura pode desestabilizar plataformas de gelo, cuja massa de água armazenada equivale a um aumento de aproximadamente 58m do nível do oceano global [6]. A perda da superfície nevada também reduz a capacidade de refletividade do gelo (albedo), fazendo com que mais radiação solar seja absorvida e acelerando ainda mais o processo de derretimento [32]. Além disso, o "carbono negro" (*black carbon*) originado das queimadas no Brasil e transportado para a Antártica por meio de correntes atmosféricas de longa distância [33], também possui o potencial de reduzir o albedo na Antártica.

O derretimento acelerado das geleiras adiciona grandes volumes de água doce ao oceano, reduzindo a salinidade e afetando a formação de Água de Fundo da Antártica, uma massa de água fria e densa essencial para a circulação global dos oceanos [34, 35]. Isso pode enfraquecer a circulação termohalina, responsável por distribuir o calor pelo planeta, impactando padrões climáticos globais [36] e podendo até interferir no funcionamento da Corrente do Golfo, diminuindo sua intensidade e levando a um resfriamento das regiões da Europa Ocidental e outras áreas próximas, alterando padrões climáticos locais e globais [37–39].

Pinguins e outras espécies marinhas podem ser impactadas pela perda de gelo marinho, que é essencial para a reprodução e a busca por alimento [40]. Por exemplo, o pinguim-de-adélia (*Pygoscelis adeliae*) depende do gelo para acessar suas áreas de alimentação e mudanças em sua distribuição podem comprometer a sobrevivência da espécie [41]. Já o pinguim-imperador (*Aptenodytes forsteri*), que nidifica no gelo marinho, enfrenta riscos cada vez maiores à medida que esse habitat se torna instável [42]. O derretimento da neve e do gelo também pode alterar a estrutura das comunidades microbianas do solo, da água e do ar, afetando a composição e a dinâmica do fitoplâncton, base da cadeia alimentar marinha [43–46]. Assim como a diversidade de microrganismos presente na região, que é transportada através de suas conexões de massas

de ar e de água para outras regiões [47]. Além disso, a presença de mais água líquida e temperaturas mais amenas favorece o crescimento de musgos e líquens em áreas antes cobertas por gelo permanente, alterando a ecologia terrestre da região [48], e a floração de plantas vasculares nativas [49].

3 O PROANTAR e os estudos climáticos na Península Antártica e na Antártica Continental

O Tratado Antártico, assinado em 1959, determina o continente gelado como uma reserva natural dedicada unicamente à paz e à ciência, vetando qualquer reivindicação territorial, atividades exploratórias e militares até 2048, quando esses termos poderão ser revistos. Deste modo, o tratado estabelece como condição essencial aos países que almejam ser membros consultivos (ou seja, ter poder de voto e voto sobre as decisões acerca do continente) a realização de pesquisa científica substancial de qualidade na Antártica [50]. Para tanto, o Brasil mantém desde 1982 o Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR), sendo o programa científico mais duradouro ao longo da história do país. Através dele são desenvolvidos projetos de pesquisa de vários segmentos, os quais participam anualmente das Operações Antárticas (OPERANTAR). Dentre os diversos segmentos de pesquisa desenvolvidos, incluem-se estudos sobre a biodiversidade antártica, alta atmosfera, Oceano Austral, geologia e geofísica, ciências humanas, sociais e sobre o gelo e clima antártico, não apenas investigando os elementos locais, mas também a sua influência sobre o planeta [51, 52].

3.1 A Estação antártica Comandante Ferraz e os estudos climáticos brasileiros na Península Antártica

O Brasil mantém instalações no continente e na Península Antártica a fim de apoiar os projetos de pesquisa e fornecer dados obtidos sobre a região. Em 1984, dois anos após a criação do PROANTAR, foi inaugurada a Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF) localizada na Ilha Rei George ($62^{\circ}05'S$ e $58^{\circ}23'28'E$) [50, 53]. Em 2012 a EACF foi destruída por um incêndio, e a



Figura 2: Módulo de Pesquisa Ipanema na Baía do Almirantado, Ilha Rei George, Antártica.

nova estação foi inaugurada em 2020 (Figura 1). Durante o período sem uma estação brasileira, as atividades de pesquisa ligadas ao PROANTAR tiveram como recurso o Módulos Antárticos Emergenciais (MAE), os navios de apoio Ary Rongel e Almirante Maximiano. Além do apoio nacional, a cooperação com outros países foi fundamental, ao permitir a continuação das atividades de pesquisas em suas instalações [54].

A nova estação conta com uma estrutura moderna, que abriga pesquisadores e militares durante o verão e o inverno antártico, e é composta não apenas de instalações de habitação, mas também de laboratórios equipados para atender a diferentes áreas de pesquisa [55]. Além do bloco de laboratórios internos à estação, ela conta com o apoio de módulos espalhados pela Baía do Almirantado, como o de meteorologia, de análises de baixa frequência (VLF), lavagem de sedimentos, abrigos e módulos de pesquisa avançados, como o módulo Ipanema (Figura 2).

No continente, os módulos Criossfera 1 e Criossfera 2 recebem e fornecem dados atmosféricos, de aerobiologia (estudo de partículas de origem biológica transportadas pelo ar) e geofísica. Em conjunto, as instalações na Península e no continente fornecem dados desde a Antártica marítima até pontos mais próximos ao Polo Sul, e permitem acompanhar e identificar eventos climáticos vindos do polo e que podem chegar dos trópicos até ele (ex: [56]).



Figura 3: Laboratório Avançado Criosfera 1, localizado próximo ao Polo Sul. Fonte: <https://www.criosfera1.com/>

3.2 O Laboratório Avançado CRIOSFERA 1 e a conexão entre a Antártica Marítima e Continental

O Laboratório Avançado Criosfera 1 (Figura 3) é um módulo científico brasileiro mais próximo ao Pólo Sul (84°S , $79^{\circ}29'39''\text{W}$), e foi inaugurado em 2012 para coletar e transmitir de forma autônoma dados meteorológicos, de dióxido de carbono (CO_2) e de particulados atmosféricos para análise de poluentes produzidos em outras regiões do planeta e detectados no continente antártico. O laboratório funciona como um ponto de conexão de uma rede de monitoramento de aerossóis que se estende desde o módulo Ipanema na Península Antártica e o Pólo Sul, formando uma rede contínua que acompanha todo o trajeto percorrido pelas correntes de ar que conectam a Antártica Marítima e a Antártica Continental.

A Antártica Marítima e a Antártica Continental estão interligadas por processos atmosféricos, oceânicos e ecológicos que moldam a dinâmica ambiental do continente [57]. A Antártica Marítima, composta principalmente pelas Ilhas Shetlands do Sul e pela Península Antártica, é caracterizada por um clima mais ameno, forte influência oceânica e maior biodiversidade. Já a Antártica Continental, que abriga a vasta camada de gelo da Antártica Oriental e Ocidental, apresenta temperaturas extremamente baixas e condições ambientais hostis à vida, sendo dominada por desertos frios e geleiras espessas [58].

A Antártica Marítima e a Antártica Continental estão interligadas por processos atmosféricos, oceânicos e ecológicos que moldam a dinâmica ambiental do continente [57]. A Antártica Marítima, composta principalmente pelas Ilhas Shet-

lands do Sul e pela Península Antártica, é caracterizada por um clima mais ameno, forte influência oceânica e maior biodiversidade. Já a Antártica Continental, que abriga a vasta camada de gelo da Antártica Oriental e Ocidental, apresenta temperaturas extremamente baixas e condições ambientais hostis à vida, sendo dominada por desertos frios e geleiras espessas [58].

A conexão entre essas duas regiões se dá, principalmente, através da circulação atmosférica e oceânica. As intensas correntes de ar, impulsionadas pelos ventos predominantes e pelos sistemas ciclônicos sobre o Oceano Austral, transportam umidade, aerossóis marinhos e até mesmo microrganismos do ambiente marítimo para o interior do continente [57, 59]. Em um estudo realizado no Criosfera 1, foi observado que microrganismos marinhos são transportados a longas distâncias através da troposfera (camada mais baixa que constitui a atmosfera terrestre, abaixo de 15 km de altitude) antártica, atingindo latitudes elevadas. Esses microrganismos marinhos chegam ao interior da Antártica associados a aerossóis marinhos e micropartículas insolúveis. Os microrganismos presentes nas camadas de neve compartilham características com comunidades microbianas da água superficial da Península Antártica [57].

Outro aspecto relevante dessa conexão é o impacto das mudanças climáticas. A Península Antártica é uma das regiões que mais aqueceram nas últimas décadas, com temperaturas subindo cerca de $2,5^{\circ}\text{C}$ desde a metade do século XX [60]. Esse aquecimento, que intensifica o degelo, pode alterar os padrões de circulação atmosférica e oceânica, potencialmente afetando a Antártica Continental. Modelos climáticos sugerem que o aumento da temperatura e da umidade na Antártica Marítima pode influenciar a quantidade de neve depositada no interior do continente, modificando seu balanço de massa e contribuindo para a elevação do nível do mar [61].

4 Comentários finais

Ao conhecer o impacto que a Antártica exerce sobre o clima global, é possível determinar a importância de estudos sobre o clima na região e o impacto sofrido por ela, devido às mudanças cli-

máticas globais. Preservar esse continente é fundamental para a manutenção de sua diversidade única e dos ecossistemas globais afetados pela dinâmica de alimentação de organismos cujo ciclo de vida depende do gelo marítimo e terrestre.

A compreensão desses fatores é fonte fundamental de subsídios para a tomada de decisões sobre o manejo dessa área, como a revisão dos termos do Tratado Antártico em 2048 [62], que atualmente contempla a importância da conservação da Antártica como um patrimônio natural que deve ser conversado. Do mesmo modo, a integração de tecnologias atuais e instalações modernas presentes no continente e na Península, permite ao Brasil desenvolver estudos substanciais para se manter como membro consultivo do tratado e entender como o país é afetado por tais mudanças. É preciso levar em conta a importância do PROANTAR nesse contexto, e no investimento em pesquisa brasileira para que essas atividades de monitoramento sejam contínuas e concretas. Com isso, as ações ligadas a estudos climáticos no continente gelado representam uma ferramenta de conservação global e colaboração internacional.

Portanto, a Antártica Marítima e a Antártica Continental estão intrinsecamente conectadas por meio de processos atmosféricos, oceânicos e criostáficos. Essas interações desempenham um papel crucial na regulação do clima global e na manutenção dos ecossistemas polares. Com as mudanças climáticas em curso, entender essa conectividade através dos sistemas de captação e transmissão de dados torna-se ainda mais essencial para prever impactos futuros e desenvolver estratégias de conservação para a região.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ).

Sobre o autor

Cesar Amaral (cesarrlamaral@gmail.com) é especialista em Biologia Molecular Ambiental, atuando na pesquisa de bioaerossois antárticos, mudanças climáticas e Astrobiologia. Desde janeiro de 2020 é Professor do Departamento de Biofísica e Biometria da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) e credenciado como orientador no Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Evolução (PPGEE) da UERJ, atuando como Pesquisador e Vice-Coordenador do Projeto Rios Atmosféricos da Antártica (Projeto RITMOS) junto aos coautores no desenvolvimento de pesquisas junto ao Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR).

Dafne Anjos é doutoranda no PPGEE/UERJ, e tem experiência em Biologia Molecular nos temas aerobiologia, taxonomia e filogenia de organismos antárticos e sub antárticos.

Anna Donato é doutoranda no PPGEE/UERJ, e tem experiência em Biologia Molecular com ênfase em DNA ambiental, Genética de Populações e Diversidade Genética de mamíferos marinhos.

Rodrigo Goldenberg-Barbosa é doutorando no PPGEE/UERJ, e tem experiência em Biologia Molecular, DNA ambiental, Mudanças Climáticas e ciências Antárticas.

Letícia Eller é bióloga pela UERJ, e tem experiência em Biologia Molecular com ênfase em meio ambiente.

Referências

- [1] P. Krause e K. Flood, *Weather and Climate Extremes*, US Army Corps of Engineers 94 (1997).
- [2] J. Turner et al., *Extreme Temperatures in the Antarctic*, *Journal of Climate* **34**(7), 2653 (2021).
- [3] H. Anna et al., *Extending the record of Antarctic ice shelf thickness change, from 1992 to 2017*, *Advances in Space Research* **68**(2), 724 (2021).
- [4] A. Fox, A. Paul e R. Cooper, *Measured Properties of the Antarctic Ice Sheet Derived from the SCAR Antarctic Digital Database*, *Polar Record* **30**(174), 201 (1994).

- [5] I. L. Boyd, *Antarctic Marine Mammals*, in *Encyclopedia of Marine Mammals*, editado por W. F. Perrin, B. Würsig e J. Thewissen (Academic Press, London, 2009), 42–46, second edition ed.
- [6] P. Fretwell et al., *Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica*, *The cryosphere* **7**(1), 186 (2013).
- [7] S. Andrew et al., *The IMBIE team. Mass balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017*, *Nature* **558**, 219– (2018).
- [8] J. Garbe et al., *The hysteresis of the Antarctic Ice Sheet*, *Nature* **585**, 538 (2020).
- [9] T. John et al., *The dominant role of extreme precipitation events in Antarctic snowfall variability*, *Geophysical Research Letters* **46**(6), 3502 (2019).
- [10] J. D. Wille et al., *Antarctic Atmospheric River Climatology and Precipitation Impacts*, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **126**(8), e2020JD033788 (2021).
- [11] N. Souverijns et al., *How does the ice sheet surface mass balance relate to snowfall? Insights from a ground-based precipitation radar in East Antarctica*, *The Cryosphere* **12**(6), 1987 (2018).
- [12] D. Thompson e S. Susan, *Interpretation of recent Southern Hemisphere climate change*, *Science* **296**(5569), 895 (2002).
- [13] M. L. Maclennan et al., *Contribution of Atmospheric Rivers to Antarctic Precipitation*, *Geophysical Research Letters* **49**(18), e2022GL100585 (2022).
- [14] K. Marlen et al., *Vertical structure and surface impact of atmospheric rivers reaching antarctic sea ice and land*, *Atmospheric Research* **315**, 107841 (2025).
- [15] H. Eicken, *The role of sea ice in structuring Antarctic ecosystems*, *Polar Biology* **12**(1), 3 (1992).
- [16] R. A. Massom et al., *Snow on Antarctic sea ice*, *Reviews of Geophysics* **39**(3), 413 (2001).
- [17] P. A. Mayewski et al., *State of the Antarctic and Southern Ocean climate system*, *Reviews of Geophysics* **47**(1), RG1003 (2009).
- [18] B. Narissa et al., *Perspective: increasing blue carbon around Antarctica is an ecosystem service of considerable societal and economic value worth protecting*, *Global Change Biology* **27**(1), 5 (2021).
- [19] H. Filip et al., *Modelling ground thermal regime in bordering (dis) continuous permafrost environments*, *Environmental research* **181**, 108901 (2020).
- [20] S. Rahmstorf, *Ocean circulation and climate during the past 120,000 years*, *Nature* **419**(6903), 207 (2002).
- [21] T. John et al., *Antarctic climate change and the environment: an update*, *Polar record* **50**(3), 237 (2014).
- [22] F. Hauke et al., *The association of Antarctic krill *Euphausia superba* with the under-ice habitat*, *PloS one* **7**(2), e31775 (2012).
- [23] M. Gleiber, S. Deborah e D. Hugh, *Time series of vertical flux of zooplankton fecal pellets on the continental shelf of the western Antarctic Peninsula*, *Marine Ecology Progress Series* **471**, 23 (2012).
- [24] M. R. Schoeberl et al., *The structure of the polar vortex*, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **97**(D8), 7859 (1992).
- [25] P. Andrea et al., *Impact of Antarctic polar vortex occurrences on total ozone and UVB radiation at southern Argentinean and Antarctic stations during 1997–2003 period*, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **110**(D3) (2005).
- [26] L. Eun-Pa et al., *Australian hot and dry extremes induced by weakenings of the stratospheric polar vortex*, *Nature Geoscience* **12**(11), 896 (2019).
- [27] L. R. Pertierra et al., *Ecosystem services in Antarctica: Global assessment of the current state, future challenges and managing opportunities*, *Land use policy* **49**, 101299 (2021).

- [28] S. González-Herrero et al., *Climate warming amplified the 2020 record-breaking heatwave in the Antarctic Peninsula*, *Communications Earth & Environment* **3**(1), 122 (2022).
- [29] D. Barriopedro et al., *Heat waves: Physical understanding and scientific challenges*, *Reviews of Geophysics* **61**(2), e2022RG000780 (2023).
- [30] E. Blanchard-Wrigglesworth et al., *The Largest Ever Recorded Heatwave—Characteristics and Attribution of the Antarctic Heatwave of March 2022*, *Geophysical Research Letters* **50**(178), e2023GL104910 (2023).
- [31] J. D. Wille et al., *The Extraordinary March 2022 East Antarctica “Heat” Wave. Part I: Observations and Meteorological Drivers*, *Journal of Climate* **37**(3), 757 (2024).
- [32] M. Seo et al., *Long-Term Variability of Surface Albedo and Its Correlation with Climatic Variables over Antarctica*, *Remote Sensing* **8**(12) (2016).
- [33] N. Magalhães et al., *Seasonal changes in black carbon footprint on the Antarctic Peninsula due to rising shipborne tourism and forest fires*, *Science Advances* **10**(42), eadp1682 (2024).
- [34] S. Zhou et al., *Slowdown of Antarctic Bottom Water export driven by climatic wind and sea-ice changes*, *Nature Climate Change* **13**(7), 701 (2023).
- [35] Q. Li et al., *Abyssal ocean overturning slowdown and warming driven by Antarctic meltwater*, *Nature* **615**(7954), 841 (2023).
- [36] M. Kolbe et al., *Impact of Thermohaline Variability on Sea Level Changes in the Southern Ocean*, *Journal of Geophysical Research: Oceans* **126**(9), e2021JC017381 (2021).
- [37] H. Brix e R. Gerdes, *North Atlantic Deep Water and Antarctic Bottom Water: Their interaction and influence on the variability of the global ocean circulation*, *Journal of Geophysical Research: Oceans* **108**(C2) (2003).
- [38] A. J. Greg O’Hare e R. Pope, *Current Shifts in Abrupt Climate Change: The Stability of the North Atlantic Conveyor and its Influence on Future Climate*, *Geography* **90**(3), 250 (2005).
- [39] G. O’Hare, *Updating our understanding of climate change in the North Atlantic: the role of global warming and the Gulf Stream*, *Geography* **96**(1), 5 (2011).
- [40] J. Forcada e P. N. Trathan, *Penguin responses to climate change in the Southern Ocean*, *Global Change Biology* **15**(7), 1618 (2009).
- [41] M. A. Cimino et al., *Projected asymmetric response of Adélie penguins to Antarctic climate change*, *Environmental Research Letters* **6**(1), 28785 (2016).
- [42] C. Barbraud e H. Weimerskirch, *Emperor penguins and climate change*, *Nature* **411**(6834), 183 (2001).
- [43] D. A. Pearce, *Climate Change and the Microbiology of the Antarctic Peninsula Region*, *Science Progress* **91**(2), 203 (2008).
- [44] B. Abirami et al., *Impacts of global warming on marine microbial communities*, *Science of The Total Environment* **791**, 147905 (2021).
- [45] A. Santos et al., *Measuring the effect of climate change in Antarctic microbial communities: toward novel experimental approaches*, *Current Opinion in Biotechnology* **81**, 102918 (2023).
- [46] A. Ferreira et al., *Climate change is associated with higher phytoplankton biomass and longer blooms in the West Antarctic Peninsula*, *Nature Communications* **15**(1), 6536 (2024).
- [47] M. Cataldo et al., *Aerobiology in High Latitudes: Evidence of Bacteria Acting as Tracer of Warm Air Mass Advection reaching Northern Antarctic Peninsula*, *Anais da Academia Brasileira de Ciencias* **95**(suppl 3), 388 (2023).
- [48] T. P. Roland et al., *Sustained greening of the Antarctic Peninsula observed from satellites*, *Nature Geoscience* **17**(11), 1121 (2024).

- [49] N. Cannone et al., *Acceleration of climate warming and plant dynamics in Antarctica*, *Current Biology* **32**(7), 1599 (2022).
- [50] E. Caminha, *Antártica - Terra de ninguém, futuro de todos*, in *Estação Comandante Ferreira: A casa do Brasil na Antártica*, editado por M. Mossmann (Lisbela Editora, Brasília, 2020), 15.
- [51] H. Evangelista et al., *Ideas and perspectives: Southwestern tropical Atlantic coral growth response to atmospheric circulation changes induced by ozone depletion in Antarctica*, *Biogeosciences* **13**(8), 2379 (2016).
- [52] M. M. Mata, V. M. Tavano e C. A. E. Garcia, *15 years sailing with the Brazilian High Latitude Oceanography Group (GOAL)*, *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* **149**(9), 1 (2018).
- [53] J. E. B. Souza, *Brasil na Antártica 25 Anos de História* (Vento Verde, 2008).
- [54] A. R. Viana et al., *Antarctic Science for Brazil: An action plan for the 2013-2022 period* (2023).
- [55] P. E. Câmara et al., *Brazil in Antarctica: 40 years of science*, *Antarctic Science* **33**(1), 30 (2021).
- [56] H. Evangelista et al., *The Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcanic barometric pressure pulse and meteotsunami travel recorded in several Antarctic stations*, *Anais da Academia Brasileira de Ciências* **96**(suppl 2), e20240556 (2024).
- [57] A. Bendia et al., *Patterns of air mass incursions from Southern Ocean play a role on microbial dispersions into West Antarctic Ice Sheet*, research Square.
- [58] J. Turner et al., *Antarctic Climate Change and the Environment* (SCAR & Scott Polar Research Institute, Cambridge, 2009).
- [59] S. J. Gonçalves et al., *Photochemical reactions on aerosols at West Antarctica: A molecular case-study of nitrate formation among sea salt aerosols*, *Science of The Total Environment* **758**, 143586 (2021).
- [60] D. Vaughan et al., *Recent rapid regional climate warming on the Antarctic Peninsula*, *Climatic change* **60**, 243 (2003).
- [61] G. Krinner et al., *Studies of the Antarctic climate with a stretched-grid general circulation model*, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **102**(D12), 13731 (1997).
- [62] S. Coburn, *Eyeing 2048: Antarctic Treaty System's Mining Ban*, *Columbia Journal of Environmental Law* **42**(2), 1 (2017).

Extinções massivas e o clima

J. A. de Freitas Pacheco

Observatoire de la Côte d'Azur, França

Resumo

Neste artigo são discutidas as principais causas que podem ter sido responsáveis pelas grandes extinções de espécies observadas nos últimos 600 milhões de anos da história da Terra. Em geral, catástrofes cósmicas e um vulcanismo intenso tem sido as razões invocadas. Hoje, aceita-se que as causas são diversas e complexas. As extinções resultam de uma alteração importante e sobretudo rápida do habitat, como por exemplo o clima, impedindo que as espécies tenham tempo de se adaptar às condições do novo ambiente. Existem indícios preocupantes que estejamos presentemente no limiar de uma nova extinção massiva na qual a espécie humana, responsável por ela, pode sofrer graves consequências.

Abstract

In this article are discussed the main causes suspected to be responsible for the massive extinction of species during the last 600 million years of the Earth's history. Generally, cosmic catastrophes and volcanism have been invoked as the main reasons. However, in the present days, there is a consensus among experts that these extinction episodes are due to multiple causes, which modify the habitat, in particular the climate, in a short timescale. Consequently, species do not have enough time to adapt themselves to the new environment and disappear. There are indications that we are in the dawn of a new massive extinction that may have severe implications for the surviving of the humanity.

Palavras-chave: extinções massivas, mudanças climáticas, vida na Terra

Keywords: mass extinctions, climate change, life on Earth

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v6n1.47448](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v6n1.47448)

1 Introdução

A vida na Terra passou por várias crises, que correspondem a extinções massivas de espécies causadas por mudanças drásticas nos ecossistemas marinhos e terrestres. Quais os fatores que atuaram de forma significativa para provocar tais alterações abruptas do clima e do meio ambiente? Nestes últimos anos, estudos biopaleontológicos mostraram que as causas das extinções massivas são muito mais complexas do que se poderia suspeitar. É possível que variações do nível oceânico tenham tido um papel preponderante, assim como períodos de resfriamento ou de aquecimento climático similar ao observado presentemente. Este tema é de atualidade pois mais de 1000 espécies desapareceram nos últimos 500 anos, podendo ser o indicio que estamos no limiar de uma nova extinção massiva, na qual a ação humana não pode ser desconsiderada.

A diversidade das diferentes formas de vida

existentes no nosso planeta são um motivo de admiração e mesmo de êxtase para todos nós. Até hoje, cerca de 2 milhões de espécies foram descritas mas, diferentes estimativas indicam que o número total pode se situar entre 5 e 100 milhões. No entanto, aproximadamente 90% das espécies que surgiram e se desenvolveram durante a evolução da Terra foram extintas.

Formas de vida surgem e desaparecem continuamente no decorrer da evolução. Uma extinção massiva se caracteriza por um aumento considerável da taxa de extinção em relação aos valores médios. Representa, numa escala global, o rápido desaparecimento de diferentes tipos de organismos. É importante mencionar que as extinções ocorridas não constituem nem um grupo nem uma série de eventos homogêneos. Mais ainda, durante os últimos 500 milhões de anos (Ma) a diversidade de espécies tem aumentado, uma vez que espécies viventes criam, em geral, um ambiente favorável para outras e, neste caso, as extin-

ções representam apenas uma queda temporária no processo da diversificação. A existência de sobreviventes num evento de extinção não é uma garantia de que os mesmos participarão da diversificação futura. Registros fósseis das espécies que sobreviveram após quatro das cinco grandes extinções, indicam que entre 10 e 20% de tais espécies desapareceram numa escala de tempo da ordem de 1–3 Ma. Desta forma, os efeitos de um evento de extinção podem se estender bem além do evento ele mesmo.

2 Caracterizando as extinções

As causas das extinções são diversas e constituem um tema atual de debate entre especialistas de diferentes disciplinas, em particular face as alterações climáticas atuais. Especialistas de áreas afins pensam que estamos presenciando uma nova onda de extinção de espécies, na qual a responsabilidade humana não pode ser descartada. Estima-se que aproximadamente 40 espécies desaparecem por dia e, neste ritmo, em apenas 16 mil anos, 96% do biota atual pode ser extinto. Tais valores são comparáveis aos da Grande Mortalidade, ocorrida há 251 Ma, no fim do período Permiano, como veremos mais adiante. Mais ainda, a duração de certas espécies de aves e mamíferos contemporâneos diminuiu de aproximadamente 10 mil anos, tornando-se cerca de 100 a 1000 vezes inferior que à das formas fossilizadas. Se os ecossistemas continuarem sendo destruídos no ritmo atual, a duração de tais espécies será apenas de 200–400 anos! Algumas das causas repertoriadas pelos cientistas são a pesca descontrolada e feita em escala industrial, a destruição das florestas, a poluição industrial, o aquecimento climático, que altera os habitats naturais e a cadeia alimentar, principalmente nos mares, oceanos e florestas.

Embora as extinções sejam eventos observados em estudos paleontológicos, a razão (ou razões) precisa pela qual uma dada espécie animal ou vegetal desaparece é difícil de ser estabelecida. Tal dificuldade reside na forma pela qual os paleontologistas estabelecem a existência de uma extinção. Na realidade, estes eventos são determinados pela ausência de fósseis de uma dada espécie em rochas cada vez mais “jovens”. Entretanto, não se pode excluir que a espécie desapareceu numa re-

gião particular mas tenha sobrevivido por muito mais tempo em outras com condições mais favoráveis. Não se pode, da mesma forma, excluir a possibilidade que a espécie tenha evoluído via seleção natural e, neste caso, as alterações morfológicas dificultam uma identificação dos fósseis sem ambiguidade.

As camadas sedimentares da litosfera mostram a existência de dois grandes níveis nos quais se notam mudanças dramáticas na fauna e na flora. Estes níveis serviram para definir as fronteiras entre as três eras: a Paleozoica (vida antiga), iniciada há 545 Ma, a Mesozoica (vida intermediária), que começa há 250 Ma e a era atual, a Cenozoica (vida nova), que se iniciou há 65 Ma. As eras são divididas em períodos, e a fronteira entre eles está geralmente caracterizada por extinções massivas. A era Paleozoica compreende seis períodos, a saber: o Cambriano, o Ordoviciano, o Siluriano, o Devoniano o Carbonífero e o Permiano, enquanto a era Mesozoica está dividida em três períodos, ou seja: o Triássico, o Jurássico e o Cretáceo.

A [Figura 1](#), construída a partir de uma compilação de dados feita por J. J. Sepkoski Jr., ilustra o porcentual de extinção observado em função dos períodos geológicos. O porcentual dado concerne essencialmente invertebrados, assim como diferentes espécies de corais que habitaram os oceanos primitivos. O intervalo de tempo em que se calcula o fator de extinção denomina-se estágio, com uma duração típica de vários milhões de anos.

Cinco grandes extinções podem ser identificadas neste diagrama: a primeira, ocorrida há $65,5 \pm 0,5$ Ma, marca a transição entre os períodos Cretáceo e a era Cenozoica (daqui por diante, transição C–C). É a mais conhecida, pois nela desapareceram os dinossauros bem como 50% das espécies existentes na época. A segunda ocorreu há 203 ± 4 Ma, marcando a transição entre o Triássico e o Jurássico, quando 53% das espécies marinhas desapareceram. A terceira, também conhecida como a Grande Mortalidade, é a mais importante de todas, marcando a transição entre o Permiano e o Triássico ocorrida há 251 ± 1 Ma e implicando na extinção de 96% de todas as espécies marinhas. Estima-se que 70% das espécies terrestres tenham sido igualmente extintas. A quarta grande extinção culminou no fim do período Devoniano há 376 ± 2 Ma e é constituída

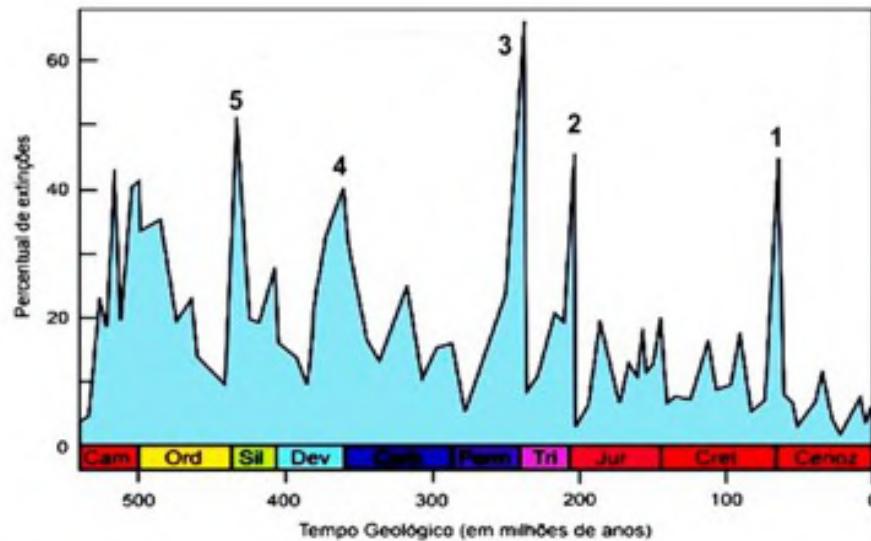


Figura 1: Evolução das extinções de espécies ao longo da história da Terra. As cinco grandes extinções estão assinaladas.

por uma série crescente de extinções na quais desapareceram quase 70% das espécies existentes. A quinta grande extinção, ocorrida há 445 ± 2 Ma, marca a transição entre os períodos Ordoviciano e Siluriano e nela desapareceram aproximadamente 75% das espécies marinhas. Nota-se igualmente uma série de extinções estendendo-se ao longo do Cambriano e do Ordoviciano.

Uma outra característica a ser notada na figura 1 é o declínio lento e gradual das extinções nos últimos 550 Ma. Qual a razão (ou razões)? Existem atualmente três hipóteses para explicar tal tendência. A primeira sugere que o efeito não é real, mas sim uma “ilusão”, consequência do fato que paleontologistas estão mais familiarizados com organismos marinhos modernos que passados. Isto significa que há chances que espécies antigas sejam mal classificadas, aumentando-se artificialmente o número de gêneros não vistos atualmente. A segunda, implica que organismos marinhos mudem de ambiente no decorrer da evolução indo, por exemplo, para as bordas continentais. A terceira e mais recente explicação sugere que os mares e oceanos tornaram-se progressivamente mais favoráveis ao desenvolvimento da vida. No passado, a circulação marinha era bastante lenta e pouco ou nenhum oxigênio estava presente nas águas. Como consequência, o plancto era extremamente ineficiente para produzir material orgânico via fotossíntese, necessário para o estabelecimento da cadeia alimentar. Com o movimento das placas tectônicas e o de-

senvolvimento das plantas, os oceanos começaram a receber nutrientes dos continentes varridos pelos rios. O resultado desse processo foi produzir uma diversidade de plancto responsável pelo desencadeamento de diferentes ecossistemas, diminuindo a possibilidade de uma extinção ocorrer. Mais recentemente, estudos isotópicos da baritina (BaSO_4) em rochas provenientes do extremo norte do Canadá, com idades da ordem de 2 bilhões de anos, indicam uma redução drástica da produtividade primária. Em outras palavras, na transformação do CO_2 atmosférico em compostos orgânicos via fotossíntese. Tal variação sugere uma redução na população de microrganismos como as bactérias cianogênicas, forma de vida dominantes na época.

Deve-se mencionar que, graças a espectroscopia nuclear de massa, é possível se determinar com precisão a razão isotópica $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ nas rochas. Tal razão, em rochas desprovidas de material de origem orgânica é tipicamente 89. Por outro lado, o processamento do CO_2 pelas plantas enriquece os detritos em ^{12}C , fazendo com que rochas constituídas por tais sedimentos tenham uma razão isotópica mais elevada, isto é, aproximadamente 92. Desta forma, excursões negativas do ^{13}C nas camadas sedimentares implicam a presença de material orgânico, indicando com precisão a ocorrência de uma extinção. A Figura 2, adaptada do estudo da transição entre o Permiano e o Triássico por S. A. Bowring e colaboradores, mostra claramente uma variação porcentual

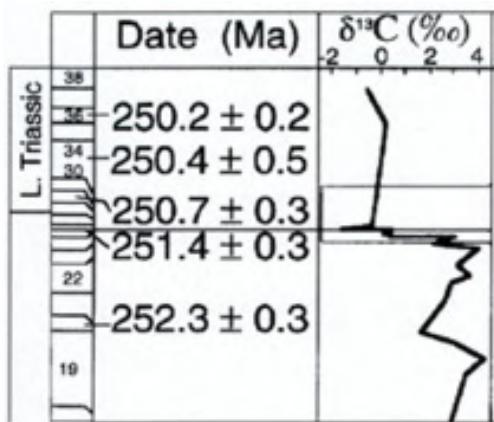


Figura 2: Variação da razão isotópica ao longo da transição Permiano-Triássico $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$.

negativa da ordem de 2% do ^{13}C , indicando a extinção de massa Permiano-Triássico e permitindo sua datação com grande precisão.

3 Causas das extinções

Duas grandes teorias foram desenvolvidas para explicar, em particular, a extinção dos dinossauros. A primeira, devida ao físico e prêmio Nobel Luis Alvarez, sugere que a causa maior da extinção Cretáceo-Cenozoico (C–C) foi um impacto com um asteroide de grandes proporções, isto é, com dimensão comparável a da camada atmosférica (~ 10 km), o que impediria sua desintegração parcial ou total, como ocorre em geral com os pequenos asteroides que impactam a Terra. A segunda, desenvolvida por geólogos e geofísicos como Dewey McLean e Vincent Courtillot entre outros, sugere que uma intensa atividade vulcânica foi responsável não somente pela extinção (C–C) mas também pelas demais.

No entanto, impactos extraterrestres e vulcanismo não são as únicas causas supostas das extinções massivas. Existem evidências que, durante os últimos 500 Ma, houve variações consideráveis do nível dos oceanos. Um abaixamento do nível dos mares reduz a produtividade nas plataformas continentais o suficiente para causar uma extinção das espécies marinhas e, mais ainda, pode introduzir um desequilíbrio nas relações oceano-atmosfera, as quais influenciam o clima global, afetando, por consequência, as espécies terrestres. Estudos recentes mostram que as condições nos oceanos, relacionadas com o ní-

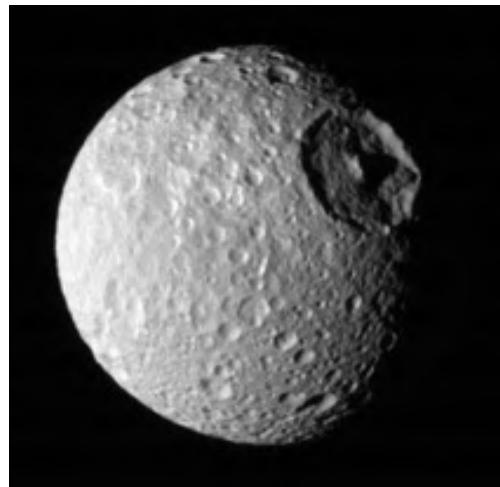


Figura 3: O satélite de Saturno, Mimas e sua cratera de impacto Herschel.

vel das águas, podem controlar as taxas de extinção marinha, selecionar os animais e plantas marinhas que sobreviverão ou perecerão, determinando assim as formas de vida oceânica.

3.1 Impactos cósmicos

A observação de planetas rochosos e luas do sistema solar mostra uma grande abundância de crateras que, na sua grande maioria foram causadas por impactos com asteroides. O estudo do “craterismo” de origem não vulcânica pode nos informar quanto a densidade e a distribuição de dimensões dos pequenos corpos presentes no sistema solar e testar diferentes teorias de formação planetária.

Exemplos típicos de um “craterismo” de impacto são as superfícies da Lua e de Mercúrio. Um outro exemplo interessante é o de Mimas, um pequeno satélite de Saturno, tendo apenas 392 km de diâmetro mas, exibindo em sua superfície uma cratera, denominada Herschel, com um diâmetro da ordem de 130 km ou seja, da ordem de 1/3 da dimensão de Mimas (Figura 3). A cratera se eleva aproximadamente 5 km acima do solo e tem uma profundidade da ordem de 10 km. O impacto que originou Herschel quase destruiu Mimas, produzindo fraturas causadas pelas intensas ondas de choque que resultaram da colisão e que podem ser observadas no lado oposto a cratera. O asteroide responsável por tal impacto deveria ter um diâmetro da ordem de 3,2 km e uma massa de 50 bilhões de toneladas!

Embora a quase totalidade de tais crateras de impacto tenham sido produzidas num passado remoto, existem exemplos de colisões recentes. O mais espetacular refere-se aos impactos dos fragmentos do cometa Shoemaker-Levy 9 com Júpiter em 1994. O núcleo do cometa foi fragmentado por forças de maré durante uma passagem próxima a Júpiter em julho de 1992. Dois anos mais tarde, restos do cometa colidiram sucessivamente com a superfície do planeta, produzindo manchas escuradas na atmosfera, observadas por um grande número de observatórios terrestres e espaciais, como o telescópio Hubble e a sonda Galileo. Tais impactos representaram uma oportunidade única na história da humanidade de testemunhar eventos catastróficos previstos com antecedência. O impacto mais energético, correspondendo ao fragmento L, ocorreu no dia 19 de julho de 1994 por volta de 22h16m TU (tempo universal). O choque, observado pelo telescópio espacial Hubble, produziu uma enorme “pluma” de gases que se elevou por milhares de km acima do limbo de Júpiter. Paradoxalmente, no solo, apenas dois grupos reportaram observações espectroscópicas do evento: um na França, no Observatório do Pico do Midi (nos Pirineus), liderado por M. Roos-Serote e outro no Brasil, no Observatório do Pico dos Dias (MG), do qual faziam parte Roberto D. Costa, Patan Singh, Amaury de Almeida, da Universidade de São Paulo, Said Codina, do Observatório Nacional e o autor deste artigo. No material da “pluma”, provavelmente constituído de gases atmosféricos jovianos (na quase totalidade) e do cometa, pode-se detectar a presença de elementos como o sódio, o ferro, o cálcio e o lítio. O grupo brasileiro estimou, com base em suas observações, que a razão de abundâncias na “pluma” entre o lítio e o sódio é 12/1000, isto é, doze átomos de lítio para cada 1000 átomos de sódio. Tal valor é compatível com os valores encontrados em meteoritos, sugerindo que a composição do material da “pluma”, seja ele joviano ou cometário, reflete provavelmente a abundância da nebulosa que deu origem ao sistema solar.

E no caso da Terra? Estimativas baseadas no número (incerto) de asteroides presentes no sistema solar indicam que a Terra deve sofrer um impacto a cada 40 000 anos com um asteroide de 200 m de diâmetro, o que causaria uma cratera de aproximadamente 5,6 km de diâmetro. Impac-

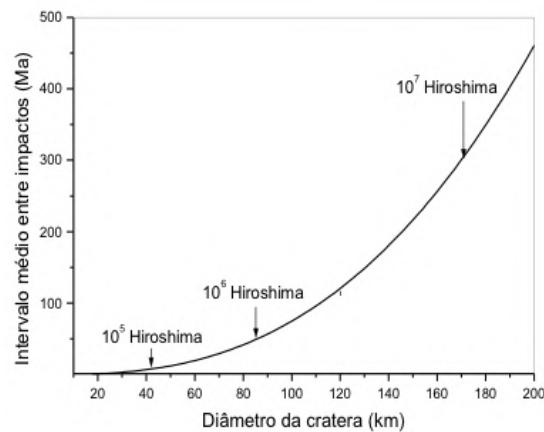


Figura 4: Intervalo médio (em Ma) entre impactos que produzem crateras com dimensões quilométricas. Um impacto com energia equivalente a 10 milhões de vezes a explosão de Hiroshima ocorre uma vez em cada 300 Ma.

tos catastróficos, produzidos por asteroides de dimensões quilométricas, são mais raros e o intervalo de tempo esperado entre colisões de tal natureza é da ordem de algumas centenas de milhões de anos. A Figura 4 mostra o tempo médio estimado entre impactos que produzem crateras com dimensões similares. Também estão indicadas na figura as dimensões correspondendo a impactos equivalentes a 10^5 , 10^6 e 10^7 vezes a bomba atômica que destruiu a cidade de Hiroshima.

A evidência de um impacto ocorrido há 65 Ma, coincidente com a extinção ocorrida no fim do Cretáceo, foi apresentada pela primeira vez pelo geofísico Walter Alvarez, filho de Luís Alvarez e seus colaboradores. Os químicos Frank Asaro e Helen Michels, colaboradores de Alvarez, mostraram que a argila situada na transição em questão possuía uma abundância importante do metal irídio. O irídio foi identificado em inúmeros locais do globo, constituindo uma “fina” camada sedimentar, indicando que foi depositado numa curta escala de tempo. Como tal elemento é extremamente raro (na Terra, em média, encontramos 1 átomo de irídio para cada 1 250 000 átomos de silício) e como a abundância encontrada é comparável à dos meteoritos, a equipe de Alvarez sugeriu que o irídio se depositou numa escala global como consequência das “nuvens de poeira” formadas durante o impacto e transportadas pela circulação atmosférica, de forma similar às cinzas de grandes erupções vulcânicas.

Restos de impactos cósmicos remotos são di-

Tabela 1: Crateras de impacto produzidas por asteroïdes com dimensões quilométricas.

cratera	localização	idade (Ma)	diâmetro (km)	diâmetro do asteroide (km)	Notas
Agraman ^a	Australia	~590	90	4,4	-
Álamo ^c	EUA	~367	45-65	2,0-3,0	-
Araquainha ^a	Brasil	244±3	40	1,8	-
Beaverhead ^a	EUA	~600	60	2,8	-
Charlevoix ^b	Canadá	357±15	54	2,5	-
Chesapeake Bay ^c	EUA	35,5±0,3	90	4,4	-
Chicxulub ^c	México	65±1	~200	10,8	1
Kara ^c	Rússia	70±2	65	3,0	-
Manicouagan ^b	Canadá	214±1	100	5,0	-
Morokweng ^c	África do Sul	145±1	70	3,3	-
Popigai ^b	Rússia	36±1	100	5,0	-
Puchezh-Katunshi ^c	Rússia	220±10	80	3,9	-
Siljan ^b	Suécia	377±2	52	2,4	2
Tookoonooka ^c	Australia	128±5	55	2,6	-
Woolleigh ^c	Australia	364±8	40	1,8	-

Observações: *a* = cratera exposta; *b* = cratera semi-soterrada; *c* = cratera soterrada.

Notas: 1) impacto associado à extinção dos dinossauros; 2) impacto talvez associado aos eventos no fim do Devoniano. Dimensões dos asteroïdes – calculadas admitindo-se um impacto em rochas cristalinas e um asteroide “rochoso” (densidade de $3.0 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$).

fíceis de serem detectados devido aos efeitos da erosão e da evolução natural da crosta terrestre. Mesmo assim existe um número considerável de estruturas geológicas atribuídas a impactos com asteroïdes e/ou cometas. Dois dos maiores impactos já registrados ocorreram respectivamente em Vredefort (África do Sul) e em Sudbury (Canadá). O primeiro há cerca de 2,0 bilhões de anos e o segundo há aproximadamente 1,8 bilhões de anos, produzindo respectivamente crateras com cerca de 300 km e 250 km de diâmetro. A Tabela 1 lista algumas destas estruturas, indicando a localização, dimensões, idade estimada do impacto e as características calculadas do asteroide responsável pelas mesmas. Deve-se mencionar que o Brasil possui uma importante cratera, em Araquainha, com 40 km de diâmetro, produzida por um impacto ocorrido há 244 Ma.

Para depositar a quantidade de irídio observada, estimou-se que o asteroide responsável pelo impacto deveria ter aproximadamente 10 km de diâmetro e uma massa de 1 trilhão de toneladas. Simulações do impacto feitas em computador indicam que o asteroide não sofreria qualquer

desgaste pela atmosfera e produziria uma cratera da ordem de 150–200 km de diâmetro. Uma cratera de forma ovalada, denominada Chicxulub Figura 5, foi encontrada na península de Yucatan (México) por Tony Camargo, um geofísico trabalhando para a companhia petrolífera mexicana PEMEX. O diâmetro, de aproximadamente 180 km, é consistente com as previsões teóricas. A forma ovalada pode ser facilmente explicada se o ângulo de impacto se situar entre 20° – 30° , privilegiando a direção norte no espalhamento dos restos da explosão que se sucedeu. Rochas ígneas na vizinhança da cratera, todas com uma idade da ordem de 65 Ma, possuem inúmeras peculiaridades e, em particular, altos níveis de irídio.

Se tais evidências parecem ser concludentes, existem ainda testemunhos geológicos adicionais. Sabemos que, como consequência do impacto de meteoritos, formam-se estruturas de quartzo comprimido, isto é, que sofreu efeitos de uma forte e súbita compressão, provavelmente por uma onda de choque. Se o quartzo não se fundir, apresenta microestruturas em camadas que são uma assinatura inconfundível de sua origem.

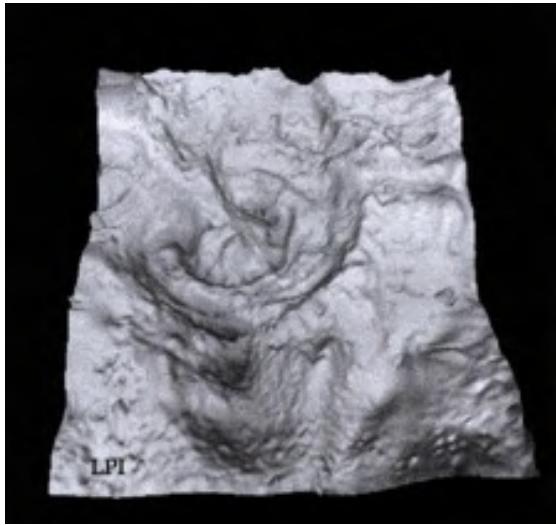


Figura 5: A cratera Chicxulub, associada ao impacto ocorrido há 65 Ma, na transição entre o Cretáceo e o Terciário, encontra-se soterrada na península do Yucatan. A imagem acima foi construída com base em dados de variações gravimétricas e magnéticas.

Formam-se ainda pequenas esferas vitrificadas, consequência da fusão da rocha que sofreu o impacto e que são dispersas pelo sopro da explosão. Em vastas regiões ao norte do Yucatán, como esperado face ao ângulo de impacto, a transição C–C contém, igualmente, tais esferas vitrificadas e quartzo comprimido.

Existem outras evidências de impactos associados a eventos de extinção? Há alguns anos atrás, o geólogo John Gorter, estudando os perfis sísmicos de uma região situada na costa noroeste da Austrália, mostrou a existência de uma cratera soterrada, com um diâmetro aproximado de 200 km, denominada Bedout. Estudos posteriores, publicados em 2004 por uma equipe liderada por L. Becker, indicaram, com grande precisão, que a idade de Bedout é $250,1 \pm 4,5$ Ma. Segundo a equipe de Becker, Bedout é uma cratera de impacto e sua idade coincide com a extinção P–Tr ou a Grande Mortalidade. Neste caso, teríamos um outro exemplo de uma grande extinção associada a um impacto cósmico. No entanto, um grande número de especialistas, entre eles Paul Wignall, Bruce Thomas e Andrew Glikson, contestam a interpretação de um impacto como origem da cratera, acreditando ser a mesma de origem vulcânica e, portanto, nada tendo a ver com a extinção P–Tr. Resta ainda uma segunda possibilidade. R. Schmidt em 1962 e J. G. Weihup em

1976, baseando-se no estudo de anomalias gravimétricas na região de Wilkes Land, no continente Antártico, propuseram a existência de uma gigantesca cratera de impacto no local, situada abaixo da camada permanente de gelo. Observações gravimétricas espaciais feitas pelo satélite GRACE e imagens radar, obtidas igualmente do espaço, são consistentes com uma tal interpretação. A cratera tem um diâmetro estimado de 480 km e, se sua suposta origem for confirmada por estudos futuros, representaria o vestígio de um dos maiores impactos já sofridos pela Terra, superior inclusive ao de Vredefort. Sua idade é bastante incerta mas estimada em cerca de 250 Ma, o que nos levaria a uma associação com a extinção P–Tr. Finalmente, um outro caso suspeito refere-se ao impacto que produziu a cratera Siljan, na Suécia há 377 Ma, que poderia estar associado aos eventos de extinção que ocorreram no fim do Devoniano.

No Cenozoico ocorreram impactos de relativa importância. A cratera Ries, na Alemanha, foi produzida por um impacto há cerca de 15 Ma, lançando restos da colisão através da Suíça e da República Tcheca. Como enfatizado por Richard Cohen, tal evento sequer afetou a fauna local! Outros grandes impactos, como os que ocorreram respectivamente há 50 Ma, que formou no Atlântico Norte (Nova Escócia) a cratera Montagnais de 45 km de diâmetro e há 35 Ma, que impactou a baía de Chesapeake, formando uma cratera de 90 km, não causaram igualmente nenhuma extinção. Isto poderia indicar que, impactos associados a crateras com diâmetros inferiores a ~ 150 km ou ocorrendo isoladamente, não são capazes de produzir extinções a um nível planetário.

3.2 O Vulcanismo terrestre e o clima

Como já mencionado, diferentes pesquisadores pensam que as extinções de espécies ocorridas no passado são devidas a uma intensa atividade vulcânica e não devidas a impactos cósmicos. Erupções vulcânicas produzem uma grande quantidade de cinzas que podem causar um resfriamento do clima mas, igualmente, aerossóis ricos em óxidos de enxofre, que permanecem em suspensão na atmosfera por longos períodos, afetando as condições climáticas e produzindo, em

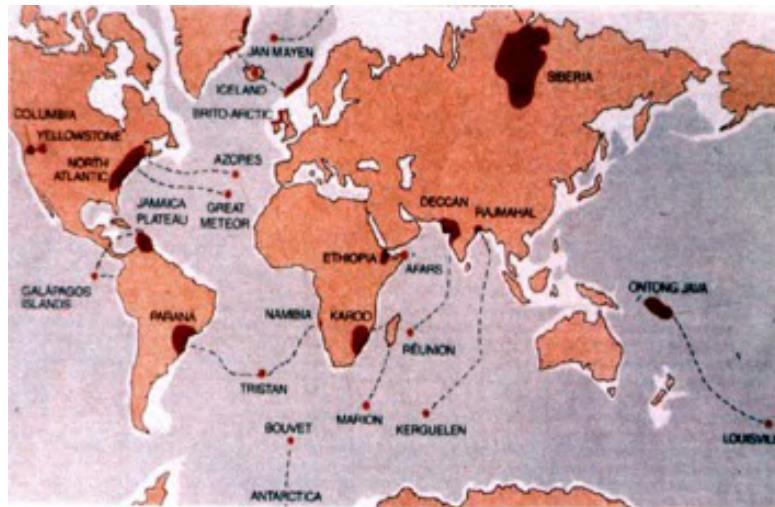


Figura 6: Mapa indicando os grandes derramamentos de lava ocorridos nos últimos 300 Ma bem como a posição atual dos “pontos quentes” responsáveis pela extrusão da lava.

particular, chuvas ácidas. A erupção do Tambora (Indonésia), em 1815, ejetou na atmosfera entre 100 e 150 km³ de cinzas e partículas. A quantidade de cinzas que circulou na alta atmosfera foi capaz de bloquear uma fração não desprezível da radiação solar para produzir o chamado “ano sem verão” de 1816. As colheitas foram afetadas, produzindo a fome em diversas regiões da Terra. Mais recentemente, podemos mencionar a erupção do Pinatubo, vulcão situado ao noroeste de Manilha, na ilha de Luzon. Após permanecer adormecido por quase 500 anos, o vulcão voltou a se manifestar em abril de 1991, atingindo o máximo de atividade no dia 15 de junho do mesmo ano. Estima-se em aproximadamente 25 km³ o volume de material ejetado na atmosfera, assim como em 20 milhões de toneladas a quantidade de SO₂ ejetada que, em 22 dias já cobria toda zona equatorial terrestre. A ejeção de aerossóis pelo Pinatubo foi a mais importante ocorrida desde a erupção do Krakatoa em 1883, quando cerca de 17 milhões de toneladas de SO₂ foram lançadas na atmosfera. A presença desta molécula foi detectada na atmosfera pelo satélite ERBS dezoito meses após a erupção. Como consequência, observou-se um resfriamento em escala mundial, com uma diminuição média da temperatura da ordem de 0,5 °C. O tempo chuvoso em 1992 nos Estados Unidos é, em parte, atribuído ao aumento de poeira e aerossóis na atmosfera, que agiram como sementes de condensação nas nuvens.

No período Triássico os continentes atuais ainda não existiam. Havia um único supercontinente, denominado Pangeia e um superoceano, o Panthalassa. Tal extensão de terras produziu um clima interior extremamente seco, com grandes variações nas regiões costeiras, segundo as estações. No geral, desertos dominavam o interior do continente e bolsões com florestas temperadas ou tropicais existiam nas zonas costeiras. No período Jurássico, devido à atividade tectônica, o supercontinente Pangeia fraturou-se em dois: a Laurásia ao norte e o Gondwana ao sul. Florestas equatoriais começaram a substituir os desertos em ambos os continentes. No fim do Cretáceo, os dois continentes sofreram separações adicionais e a distribuição das terras era praticamente a atual. Neste momento ocorreram importantes variações climáticas que, certamente, afetaram a sobrevivência de inúmeras espécies.

Durante tais períodos de modelagem da superfície terrestre ocorreram vários episódios de intensa atividade vulcânica, em particular na região de Deccan, na Índia. Ali encontramos uma imensa estrutura em forma de escada, formada por sucessivos derramamentos de lava, que se estende por uma superfície de cerca de 500 000 km², representando um volume pouco superior a 2–3 milhões de km³. É quase certo que tais números subestimem os valores reais, pois a erosão deve ter reduzido de forma apreciável a área e o volume originais. A formação das escadas de Deccan é explicada da seguinte maneira: No fim do

Cretáceo, a Índia era uma massa de terra isolada, derivando na direção do norte e prestes a colidir com a Ásia. Quando a Índia se situava a leste de Madagascar e pouco abaixo da linha equatorial, passou sobre um “ponto quente” ou seja uma pluma do manto, que é simplesmente uma coluna de lava presente no manto terrestre e que emerge na litosfera como um vulcão. Vulcões considerados como pontos quentes liberam quantidades importantes de lava basáltica na superfície que, por sua grande fluidez, espalha-se por grandes áreas.

As escadas de Deccan constituem um dos maiores derramamentos de lava da história geológica da Terra. O derramamento iniciou-se alguns milhões de anos antes da transição C–C, mas estima-se que 90% da lava foi liberada naquele momento. Geofísicos franceses e indianos identificaram recentemente uma camada de 600 m de espessura que se formou em apenas 30 000 anos, correspondendo a um fluxo médio de lava da ordem de $10 \text{ km}^3/\text{ano}$. Na formação de tal camada, estima-se que possa ter sido liberada uma grande quantidade de SO_2 capaz de produzir alterações climáticas consideráveis se, por exemplo, guardarmos as proporções observadas na erupção atual (desde 1983) do Kilauea (Havai), isto é, um fluxo médio de lava da ordem de $0,13 \text{ km}^3/\text{ano}$ e uma taxa de emissão de SO_2 da ordem de $5,5 \times 10^5 \text{ toneladas/ano}$. O ponto quente que produziu as escadas de Deccan situa-se hoje na ilha da Reunião. Conhecido como Piton de la Fournaise, é um dos vulcões mais ativos da Terra, contando mais de 100 erupções nos últimos 300 anos.

Um outro aspecto importante da teoria do vulcanismo refere-se ao fato de que a extinção C–C não é a única associada com um grande derramamento de lava. A Grande Mortalidade ou extinção P–Tr, ocorrida há 251 Ma, está também associada a um grande derramamento de lava ocorrido na Sibéria, representando um volume de lava da ordem de 2,5 milhões de km^3 , comparável ao das escadas de Deccan. A razão isotópica $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ indica que o basalto foi expelido há cerca de $249,4 \pm 0,5 \text{ Ma}$, consistente com a idade da transição P–Tr. Ao longo da transição Triássico–Jurássico (203 Ma), durante a formação do Oceano Atlântico, ocorreu um novo e importante derramamento de lava (Central Atlantic Magmatic Province ou CAMP), que se espalhou por uma superfície com um pouco mais de 7 milhões de km^2 . Tal

derramamento de lava suspeita-se estar associado à extinção Tr–J.

4 Como as catástrofes matam?

A ideia original de Alvarez consistia no aparecimento de um clima invernal após o impacto, análogo ao “inverno nuclear” que resultaria de um conflito nuclear global. O impacto de um asteroide com 10 km de diâmetro pode vaporizar uma massa considerável de rochas e dispersá-la na atmosfera, formando uma cobertura de poeira que filtraria a luz solar durante meses. Para uma redução global de 5°C na temperatura média da Terra, uma massa da ordem de 170 milhões de toneladas de grãos de poeira com dimensões da ordem de $5 \mu\text{m}$ seria necessária. Nestas condições, o reino vegetal seria fortemente atingido pois a fotossíntese não mais se realizaria em condições ideais tanto em terra como nos oceanos, através das algas e do plancto. Um outro cenário possível é o seguinte: as rochas na região de Chicxulub são ricas em enxofre e o impacto poderia produzir uma quantidade apreciável de aerossóis ricos em sulfatos. Uma vez presentes na atmosfera, tais aerossóis agiriam como sementes de nucleação de chuvas ácidas, devastadoras para a vegetação. Mais ainda, animais que respiram seriam sufocados e as conchas protetoras de animais marinhos vivendo próximo das praias seriam dissolvidas, com consequências previsíveis. É um tal cenário compatível com dados paleontológicos?

Os registros fósseis indicam algumas tendências que devem ser explicadas por qualquer teoria de extinção massiva. Em geral, o processo de extinção afeta seres marinhos e terrestres sem exceção. O processo se inicia com a destruição de formas de vida tropical e subtropical e continua com formas menos especializadas. Na terra, as plantas resistem melhor que os animais. A seletividade do processo é uma indicação para entendermos “o” ou “os” mecanismos de destruição. Na extinção P–Tr (a Grande Mortalidade) animais com esqueletos massivos e carbonatados foram consideravelmente mais destruídos do que os animais com pouco ou nenhum carbonato no esqueleto. A compreensão do porquê certas espécies sobreviveram é, talvez, uma das chaves para entendermos os mecanismos que fizeram as outras perecer-

rem. Por outro lado, na extinção C–C, animais consumidores diretos de produtos fotossintéticos foram destruídos preferencialmente. Mais ainda, a sobrevivência das aves após este evento é um enigma difícil de ser resolvido. Aves são animais com taxas metabólicas elevadas, com pequenas reservas de energia e que procuram alimentos utilizando a visão. Nestas condições, o “inverno” resultante seja de um impacto ou de vulcanismo, deveria produzir um alto índice de mortalidade, não observado. Fósseis de seres marinhos como os foraminífera (animais microscópicos como as conchas), flagelados e de formas terrestres como o pólen, indicam uma escala de tempo relativamente curta (alguns milhares de anos) para a extinção C–C. No entanto, novos dados paleontológicos e paleoclimáticos indicam que a extinção C–C foi mais progressiva do que abrupta, começando 0,5 Ma antes da transição. A extinção começou num momento de resfriamento global, o qual terminou por um evento de aquecimento cerca de 0,2–0,4 Ma antes da transição e que pode ter sido desencadeado pela extrusão de lava que deu origem às escadas de Deccan. Ao curto pulso de aquecimento seguiu-se um novo resfriamento (2–3 °C) que durou aproximadamente 0,1 Ma. A extinção acelerou-se nesta fase final de resfriamento, atingindo o máximo na transição. Mais ainda, medidas isotópicas da razão nas vizinhanças da transição C–C, indicam importantes flutuações na produtividade oceânica nos 3 milhões de anos antecedendo a extinção final. A produtividade oceânica caiu a níveis baixíssimos e a circulação termohalina praticamente desapareceu por alguns milhares de anos após a transição. O ecossistema marinho foi restabelecido somente 2–3 milhões de anos após o evento. Por outro lado, dados geocronológicos recentes do derramamento de lava CAMP, ocorrido no fim do Triássico, indicam que a duração do episódio foi da ordem de 40 000 anos. A resultante concentração de aerosóis sulfatados na atmosfera aumentou o albedo terrestre, causando um inverno nuclear, responsável pelo desaparecimento de uma fração considerável da flora e da fauna continentais.

O cenário descrevendo a Grande Mortalidade começa ficar mais explícito. Segundo Robert Berner, da Universidade de Yale, no período Carbonífero o conteúdo de oxigênio na atmosfera era 43% maior que o atual. No fim do Permiano e

parte do Triássico, o nível caiu para valores correspondentes a cerca de 60 % do atual. Isto se deve provavelmente ao clima árido da época e a extrusão de lavas na Sibéria, que destruiu o equilíbrio do ciclo do carbono, aumentando a quantidade de CO₂ e diminuindo a de O₂ na atmosfera. Isto é confirmado pelo estudo da razão isotópica ¹³C/¹²C feito por Peter Ward, da Universidade de Wisconsin, em rochas da transição P–Tr e pelo estudo da extinção de briozoários (animais similares aos corais) durante o fim do Permiano, por Catherine Powers e David Bottjer. Eles mostraram que, efetivamente, a taxa de extinção dos briozoários acompanha o aumento de CO₂ nos oceanos. Como consequência, os ecossistemas terrestres ficaram sob forte tensão e animais com alto metabolismo desapareceram. O aumento da temperatura (~6 °C) diminuiu a solubilidade do oxigênio nas águas oceânicas, causando a extinção de animais que constituem a base da cadeia alimentar, tal como se observa atualmente no mar Mediterrâneo e no Mar do Norte. Mais ainda, um baixo teor de oxigênio nos mares favorece o desenvolvimento de bactérias anaeróbicas, capazes de produzir sulfeto de hidrogênio (H₂S), responsável pela destruição da vida marinha em diferentes níveis de profundidade. Tal situação é similar à observada hoje no Mar Negro. Indícios paleontológicos da presença de bactérias que produzem H₂S em sedimentos datando do fim do Permiano foram encontrados, dando um suporte adicional ao cenário em questão.

5 Múltiplas causas

Existe hoje um consenso entre especialistas que as extinções massivas representam um conjunto de fatores que colocam sob tensão diferentes ecossistemas em escalas de tempo muito curtas, impedindo uma adaptação ao novo ambiente.

Assim, na extinção C–C, os principais fatores que influenciaram o desaparecimento de inúmeras formas de vida foram: 1) o grande derramamento de lava que produziu as estruturas do Deccan e que injetou uma grande quantidade de CO₂ e de SO₂ na atmosfera, causando um aquecimento global e chuvas ácidas antes do impacto do asteroide; 2) impacto de um asteroide (cratera Chicxulub), que ocasionou incêndios em escala global e um in-

verno nuclear, causa do colapso de ecossistemas responsáveis pela fotossíntese e da cadeia primária alimentar; 3) variações adicionais do nível dos oceanos durante o Cretáceo aumentaram a tensão existente nos ecossistemas, reduzindo o habitat de inúmeras espécies.

A cronologia dos fatos que antecederam e sucederam a transição C–C sugere fortemente que o impacto do Yucatán não foi a causa maior da extinção. Trabalhos recentes mostram a presença de múltiplos picos de irídio na transição C–C. Isto significa que: ou ocorreram múltiplos impactos, como pretende o geólogo suíço Thierry Adatte, hipótese pouco provável, ou que o irídio não teve origem no impacto que produziu Chicxulub. Neste caso, não podemos excluir uma origem vulcânica, isto é, pela extrusão de lava que deu origem às escadas de Deccan, uma vez que o ponto quente, fonte da lava, o Piton de la Fournaise, produz ainda hoje, em suas erupções, material contendo irídio.

No caso da extinção entre o Triássico e o Jurássico, a causa maior invocada, como discutido acima, é a atividade vulcânica associada ao CAMP, envolvendo a ruptura do supercontinente Pangeia. Tal atividade injetou uma grande quantidade de gases de efeito estufa, causando um rápido aquecimento global e uma acidificação importante dos oceanos. Um aumento da temperatura oceânica produz uma importante anoxia e um colapso da vida marinha. Embora existam fortes suspeitas da ocorrência de impactos cósmicos, não teriam sido a causa principal da extinção.

A Grande Mortalidade, principal extinção massiva ocorrida na Terra, foi provavelmente ocasionada pela intensa atividade vulcânica ocorrida na Sibéria, que injetou grandes quantidades de gases de efeito estufa na atmosfera, causando um severo aquecimento global, intensas chuvas ácidas e anoxia dos oceanos. Há fortes suspeitas, como visto anteriormente, que um impacto cósmico de grandes proporções possa também estar associado a esta extinção.

Por outro lado, a extinção ocorrida no Devoniano tardio é um exemplo onde os ecossistemas foram submetidos a uma forte tensão por razões diversas. Neste período houve uma grande expansão da vegetação na superfície do planeta e as raízes desestabilizaram o solo, alterando o fluxo de nutrientes aos oceanos, bem como produzindo

uma anoxia dos mesmos e uma ruptura da cadeia alimentar primária. Uma série de fases de resfriamento ocorreram, provavelmente causada por variações do conteúdo do CO₂ atmosférico correlacionado à expansão dos vegetais. Embora ainda em debate, a possibilidade que um impacto cósmico tenha contribuído às alterações do ambiente não pode ser excluída completamente.

Finalmente, a transição entre o Ordoviciano e o Siluriano onde desapareceram cerca de 75% das espécies marinhas, está caracterizada por período de glaciação e mudanças no nível dos oceanos. Uma camada de gelo cobriu o supercontinente do Gondwana causando uma queda abrupta do nível oceânico e uma perda dos habitats marinhos, que concentravam na época a maior parte das formas de vida presentes na Terra. Tal queda na temperatura global se deve provavelmente a uma atividade vulcânica reduzida, responsável por um enfraquecimento do efeito estufa. Mais recentemente, o geólogo Shanan Peters, da Universidade de Wisconsin-Madison, mostrou de forma convincente o que já se suspeitava depois de várias décadas: a variação do nível dos oceanos, consequência da deriva das placas tectônicas e de alterações climáticas, está fortemente correlacionada com grandes extinções. O estudo de Peters mostra que os diferentes grupos de animais marinhos tem preferência por um habitat particular. Assim, animais paleozoicos como corais e braquiópodes, preferem um fundo marinho rico em rochas calcáreas enquanto animais cenozoicos como peixes e crustáceos preferem um fundo arenoso. As alterações do nível oceânico mudam o fundo marinho, destruindo o habitat de um ou de outro tipo de animal. Peters encontrou uma forte correlação entre a taxa de extinção e as propriedades físicas do fundo marinho. Assim, existem atualmente fortes indícios que as extinções ocorridas no fim do Ordoviciano e no fim do Devoniano estão relacionadas com quedas do nível dos mares, causadas por uma intensa glaciação.

6 Considerações finais

Na história da Terra, o frágil equilíbrio dos ecossistemas foi quebrado inúmeras vezes por variações climáticas extremas e eventos catastróficos de origem cósmica, que produziram extinções

massivas e reformataram a vida em nosso planeta. Tais extinções marcaram o fim de períodos geológicos e abriram o caminho para novas formas de vida.

As extinções massivas estão, certamente, entre os acontecimentos mais enigmáticos da história de nosso planeta e os novos resultados científicos acima mencionados corroboram a complexidade dos processos que levam a destruição de ecossistemas numa escala global. Não existe uma causa única. A superposição de diferentes processos com diferentes níveis de significância contribuem para produzir uma extinção massiva de espécies. Existe, atualmente, um consenso que, extinções massivas ocorrem quando as condições do ambiente sofrem alterações muito rápidas, sem que as espécies presentes em diferentes ecossistemas tenham tempo de se adaptarem.

O clima passado terrestre sofreu forte influência devido à deriva dos continentes bem como à atividade vulcânica. Tais fatores operam em escaras de milhares e/ou de milhões de anos, causando alterações significantes no ambiente. A prolongada atividade vulcânica durante o Período Permiano, como mencionado anteriormente, produziu uma quantidade importante de gases que contribuem ao efeito estufa, causando um aumento da temperatura global. Ao contrário, a extinção que marca a transição entre o Ordoviciano e o Siluriano foi provavelmente causada por um resfriamento global e uma consequente queda do nível dos oceanos, o que levou ao colapso dos habitats marinhos e uma perda aproximada de 85% das espécies existentes.

Diferentes eventos cósmicos associados ou não a variações climáticas também contribuíram para as extinções massivas observadas no passado da Terra. Além do impacto cósmico ocorrido há 65 Ma, suspeita-se que erupções de raios-gama ou de supernovas próximas possam ter destruído temporariamente a camada de ozônio, expondo a vida na superfície a níveis letais de radiação UV.

As extinções massivas ocorridas no passado de nosso planeta possuem denominadores comuns: 1) variações climáticas rápidas levando a um aquecimento ou resfriamento global, que deixam os ecossistemas sob tensão e sem tempo de adaptação; 2) vulcanismo intenso responsável por alterações da composição química da atmosfera e do efeito de serra; 3) consequente alteração das

condições físico-químicas dos oceanos como a acidificação e a anoxia, que destroem formas de vida marinha; 4) impactos cósmicos, hoje considerados não mais como causa primária mas sim agindo como catalisadores ou amplificadores de ecossistemas sob tensão.

O relatório do Painel Intergovernamental de Mudança Climática indica que, até 30% das espécies poderão desaparecer, se a temperatura média global aumentar de 2 °C nas próximas décadas, acima dos valores registrados em 1990. Se a destruição dos ecossistemas continuar no ritmo atual seremos, talvez, o exemplo singular de uma espécie que contribuiu para o desencadeamento de uma nova extinção massiva, que poderá levar a sua própria destruição!

Sobre o autor

José Antônio de Freitas Pacheco (pacheco@oca.eu) é Professor Emérito do Observatoire de la Côte d'Azur (OCA), na França. Formado na Universidade de São Paulo (USP), foi diretor do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP, do Observatório Nacional, e do próprio OCA. Membro da Academia Brasileira de Ciências, foi agraciado com a medalha do Mérito Científico do Governo Brasileiro. Possui mais de 200 artigos científicos publicados, tendo sido orientador de mais de 20 doutorandos, tanto no Brasil quanto na Europa. Autor do livro *Vida no Universo*, publicado pela EDUSP.

Referências

- [1] A. Hallam, *Phanerozoic Sea-Level Changes* (Columbia University Press, New York, 1992).
- [2] R. Cowen, *The History of Life* (Blackwell Science, 1999).
- [3] D. R. Prothero e R. H. Dott Jr., *Evolution of Earth* (McGraw Hill, New York, 2002).
- [4] P. Skelton, *The Cretaceous World* (Cambridge University Press, New York, 2003).
- [5] J. A. F. Pacheco, *O fim dos dinossauros*, Ciência Hoje **43**, 20 (2008).

Da gravidade à água: analisando a mudança climática no Brasil com métodos computacionais

Fabian Trigo

Universidade de Valparaíso, Chile

Resumo

A previsão de secas e inundações em contextos climáticos complexos exige análises robustas que combinem informações de variabilidade espacial e temporal. Este trabalho emprega dados gravitacionais das missões GRACE para investigar a dinâmica hídrica no Brasil, região de importância estratégica devido à sua extensa rede fluvial e à alta sensibilidade a fenômenos climáticos globais, como o El Niño e a Oscilação Decadal do Pacífico. Adotando uma abordagem computacional apoiada em métodos como a Descomposição em Valores Singulares (SVD), CFAR (deteção de picos) e DBSCAN (agrupamento espacial), identificam-se padrões de variação e áreas de maior vulnerabilidade hídrica, com destaque para as regiões de Manaus, do Mato Grosso e Minas Gerais.

Abstract

Predicting droughts and floods in climatically dynamic regions requires rigorous analyses that integrate both spatial and temporal information. This study leverages gravitational data from the GRACE missions to examine hydrological variability in Brazil, an area of strategic importance due to its extensive river network and high sensitivity to global climate phenomena such as *El Niño* and the Pacific Decadal Oscillation. By adopting a computational framework that includes Singular Value Decomposition (SVD), CFAR (peak detection), and DBSCAN (spatial clustering), key variability patterns are identified and highlight regions with elevated hydrological vulnerability, notably Manaus, Mato Grosso, and Minas Gerais.

Palavras-chave: clima, GRACE, gravidade, Brasil, água, FFT, SVD, DBSCAN

Keywords: climate, GRACE, gravity, Brazil, water, FFT, SVD, DBSCAN

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v6n1.47311](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v6n1.47311)

1 Introdução

Prevê-se um maior risco de secas para mais de 50 países até 2030 [1], afetando adicionalmente 180 milhões de pessoas. A interação não linear entre rios e chuvas exige métodos de previsão sofisticados [2]. Inundações e secas amazônicas, como as documentadas em [3, 4], e eventos mais recentes, como as enchentes na Espanha em 2024, particularmente em Valência [5], ganharam destaque global devido à sua severidade.

No campo da previsão de eventos extremos, embora o senso comum sugira uma relação direta e proporcional entre a quantidade de chuva torrencial e a magnitude das inundações, a Ref. [6] analisa regiões dos Estados Unidos para explorar essa conexão. Os resultados revelam que os padrões espaciais das mudanças na chuva torrencial

explicam menos de 20% das variações espaciais das inundações. Os estudos mostram que existe uma relação altamente não linear, na qual fatores adicionais, como evaporação e transporte, devem ser considerados, o que aumenta os custos para o estudo dessas regiões.

O presente estudo foca na região amazônica da América do Sul, utilizando métodos computacionais e dados gravitacionais do projeto Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) [7, 8] para estabelecer correlações entre as regiões com maior variabilidade hídrica. A realização de uma análise espaço-temporal desta região, caracterizada por sua vasta rede fluvial e geografia complexa, permite validar esses métodos. Além disso, busca-se criar um marco de trabalho replicável para contribuir com mais estudos hidrológicos e climatológicos.

Este estudo emprega ferramentas de análise acessíveis e fáceis de interpretar, priorizando métodos lineares ou moderadamente complexos, em vez de técnicas altamente não lineares, como redes neurais. Essa escolha não se deve à falta de utilidade desses métodos, mas sim à intenção de tornar o texto comprehensível e acessível a leitores sem amplo conhecimento prévio em ferramentas avançadas.

Os dados gravitacionais fornecem informações cruciais sobre a distribuição de massa em regiões específicas, sendo especialmente úteis para estimar o conteúdo de água na crosta terrestre, incluindo águas subterrâneas, que não podem ser detectadas por análises baseadas em imagens de satélite. Em particular, a missão GRACE tem como um de seus objetivos fornecer um mapa de anomalias gravitacionais a cada mês [9], permitindo avanços na precisão de estudos em áreas como geofísica, oceanografia, hidrologia e análise de geleiras.

Os dados do GRACE têm sido utilizados em estudos como [10] para estimar a perda de gelo na Groenlândia e na Antártica entre 2003 e 2013, com reduções na ordem de gigatoneladas por ano (Gt/ano): entre $280 \pm 58 \text{ Gt/yr}$ e $67 \pm 44 \text{ Gt/yr}$, respectivamente, onde 1 gigatonelada corresponde a um quilômetro cúbico de água. Essa perda combinada equivale a uma elevação do nível do oceano de aproximadamente 0,9 mm/ano. Além disso, os dados do GRACE permitem obter informações sobre águas subterrâneas em regiões de difícil acesso, como o norte da Índia [11], onde foram registradas perdas de $54 \pm 9 \text{ Gt/ano}$ entre 2002 e 2008, tornando-se uma das regiões com maior declínio de água subterrânea na Terra. Outras aplicações incluem o uso da variação da pressão no fundo oceânico para estimar correntes marítimas [12], além de estudos do ciclo da água [13–15]. O estudo dos ciclos da água torna-se, assim, uma questão essencial para a vida.

2 Marco teórico

Apresenta-se o fundamento dos dados do GRACE e os diversos algoritmos utilizados em um nível suficiente para compreender e ser capaz de aplicá-los a outras áreas.

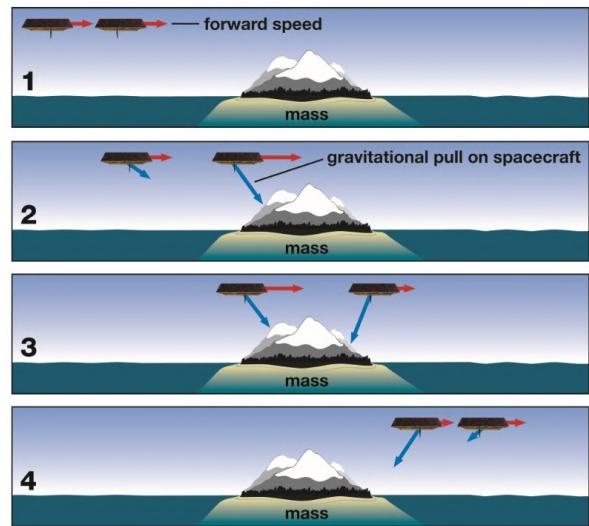


Figura 1: [19] O princípio de funcionamento do GRACE ocorre quando um dos dois satélites, que orbitam alinhados de norte a sul em alta velocidade, completa cerca de 15 órbitas por dia ao redor da Terra. Quando o primeiro satélite se aproxima de uma montanha, ele sofre uma aceleração e se adianta em relação ao segundo satélite; em seguida, o segundo satélite também é afetado pela anomalia gravitacional e alcança o primeiro.

Além do conjunto de dados gravitacionais GRACE, são utilizados datasets hidrológicos, como o HydroSHEDS [16] e o HydroBASINS [17], que correspondem a polígonos hidrográficos em diferentes níveis de resolução, incluindo rios e lagos.

2.1 Dataset GRACE

As missões GRACE e GRACE-FO consistem em dois satélites gêmeos que medem as variações da gravidade na Terra. À medida que um dos satélites se aproxima de uma anomalia de massa, ele sofre uma maior atração gravitacional em comparação com o satélite mais afastado, o que afeta a distância entre eles, conforme ilustrado na Figura 1. Essas mudanças na distância ajudam a identificar variações na massa terrestre [9, 18].

Se forem consideradas as forças provocadas pela atmosfera e outras interações externas, como a gravidade do Sol e da Lua, é possível inferir a interação da massa terrestre exercendo força gravitacional sobre o par de satélites. Por isso, é essencial levar em conta que, caso existam fenômenos não considerados na correção dos dados, podem surgir interpretações equivocadas. Para facilitar esse processo, o GRACE/FO fornece da-

dos de alto nível, já corrigidos para efeitos atmosféricos e relativísticos.

As medidas do GRACE se organizam em quatro níveis de processamento:

- *Nível 0* – Dados sem processamento binário, recorrigidos pelo DLR.
- *Nível 1* – Dados convertidos para unidades de engenharia com uma taxa de amostragem reduzida (sampling rate).
- *Nível 2, Coeficientes de Stokes*: Coeficientes harmônicos esféricos $Z_{\ell m}(t) = \{C_{\ell m}(t), S_{\ell m}(t)\}$ do campo gravitacional processados em centros dos EUA e da Alemanha.
- *Nível 3, Mascons* – Mudanças equivalentes na altura da água derivadas dos dados de Nível 2, cuja representação gráfica pode ser vista na figura Figura 2.
- *Nível 4* – Análise das mudanças nas reservas de água no contexto temporal e espacial.

A missão GRACE ocorreu de março de 2002 até outubro de 2017, sendo sucedida pela missão GRACE-FO (*GRACE Follow On*), lançada em maio de 2018 e ativa até o presente, com melhorias na precisão [20]. Em março de 2024, a NASA anunciou a missão GRACE-C (*GRACE Continuity*), prevista para lançamento por volta de 2028.

2.2 Harmônicos esféricos

Os dados de Nível 2 são os mais utilizados e consistem em coeficientes de harmônicos esféricos. Esses coeficientes existem para o campo gravitacional devido à sua propriedade de ser irrotacional, o que matematicamente é expresso pela equação vetorial $\nabla \times \vec{g}(\vec{r}) = \vec{0}$. Isso implica que o campo gravitacional pode ser escrito como o gradiente de um outro campo escalar, $\vec{g}(\vec{r}) = -\nabla U(\vec{r})$, uma vez que o rotacional de um gradiente é sempre nulo: $\nabla \times (-\nabla U) = \vec{0}$. Seja $U(\vec{r})$ o potencial gravitacional, então:

1. Se a distribuição de massa possui simetria esférica, então o campo segue a equação

$$U(\vec{r}) = -\frac{GM}{r}, \quad (1)$$

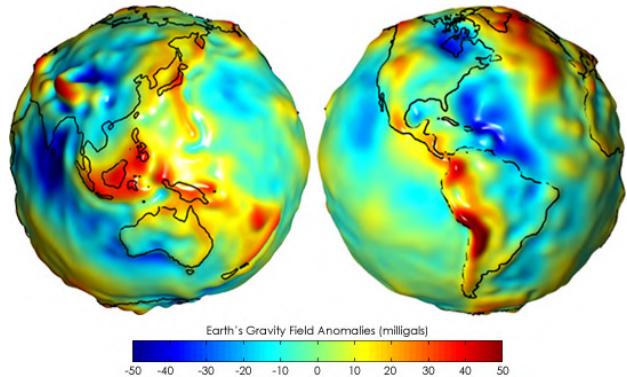


Figura 2: [23] Visualização espacial dos dados de nível 3 do experimento GRACE/FO onde vemos as anomalias gravitacionais na superfície da Terra, que são a diferença na intensidade do campo em relação à média medida em miligals (equivalente a 10^{-3} cm/s^2).

da qual se obtém a equação popular da força gravitacional,

$$\vec{F}(\vec{r}) = -\frac{GMm}{r^2}\hat{r}. \quad (2)$$

Este é um caso simples que considera apenas massas pontuais.

2. Para objetos sem simetria esférica é necessário realizar uma integral nas 3 dimensões, somando todas as informações angulares, ou seja,

$$U = -G \int_{\mathbb{R}^3} \frac{\rho(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} d^3 r'. \quad (3)$$

Podemos aproximar essa expressão satisfatoriamente através de uma soma de multipolos de diferentes graus ℓ e ordem m , resultando em

$$U(\vec{r}) = -G \sum_{\ell=0}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} \frac{1}{r^{\ell+1}} Z_{\ell m} Y_{\ell m}(\theta, \phi). \quad (4)$$

Multipolos são uma ferramenta matemática para expressar objetos em grandes distâncias. Vamos ter um corpo que pode ser encerrado em uma esfera de raio R ; quanto mais próximos estivermos ($r \approx R$), precisaremos de uma resolução maior (incluindo até um grau maior ℓ), enquanto que, se estivermos muito distantes ($r \gg R$), isso não será muito diferente de uma massa pontual (o mesmo que incluir apenas o grau $\ell = 0$).

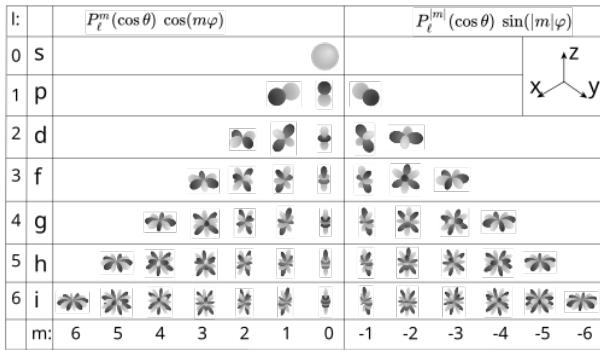


Figura 3: Uma representação dos diferentes modos de oscilação que descrevem os harmônicos esféricos, variando verticalmente a ordem ℓ e horizontalmente o modo m .

É possível dividir a função $Y_{\ell m}$ em duas partes, uma acompanhando a função cosseno da longitude ($C_{\ell m}$) e outra acompanhando a função seno ($S_{\ell m}$), estes são chamadas Coeficientes de Stokes (5)

$$Y_{\ell m}(\theta, \phi) = P_{\ell}^m(\sin \theta) \begin{bmatrix} C_{\ell m} \cos m\phi \\ S_{\ell m} \sin m\phi \end{bmatrix} \quad (5)$$

sendo $P_{\ell m}$ os polinômios de Legendre associados, uma série de funções com propriedades úteis para decompor campos gravitacionais em somas de multipolos. Em (4) $Y_{\ell m}(\theta, \phi)$ são as diferentes funções ℓ, m que representam os variados modos de vibração esféricos. Uma série dessas componentes podem ser observadas na Figura 3.

Na equação (4) $Z_{\ell m}$ estão os coeficientes, parâmetros diferentes para cada objeto que dependerão do tempo se houver massas em movimento. Se escolhermos todos os coeficientes $Z_{\ell m} = 0$ exceto $Z_{00} = 1$ (aquele coeficiente cujo grau é $\ell = 0$ e ordem $m = 0$), então teríamos o caso com simetria esférica da equação (1).

A Terra é um objeto denso, com uma variedade de montanhas, lagos e geleiras que se movem ao longo do tempo, cujo potencial gravitacional varia dependendo da região em que estamos localizados, latitude e co-latitude, θ e ϕ , respectivamente. Este cálculo do Geopotencial [cf. eq. (6)], é aquele em que realizamos uma soma infinita para diferentes ℓ e m ; cada vez que adicionamos um termo com grau mais alto aumentamos

a resolução,

$$U(r, \theta, \phi) = \frac{\mu}{r} \sum_{\ell=0}^{\infty} \left(\frac{a_e}{r} \right)^{\ell} \sum_{m=0}^{\ell} \vec{Z}_{\ell m} \cdot \vec{\varphi} P_{\ell}^m(\sin \theta), \quad (6)$$

onde $\mu = GM$, a_e é o raio médio da Terra e $\vec{\varphi}$, nesta notação, é um arranjo de duas partes, uma dependendo do cosseno e a outra do seno, $\cos(m\phi)$ e $\sin(m\phi)$, respectivamente, ou seja,

$$\vec{\varphi} = \begin{bmatrix} \cos m\phi \\ \sin m\phi \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Operando com o conjunto de coeficientes de Stokes, $\vec{Z}_{\ell m}$ pode ser escrito como

$$\vec{Z}_{\ell m} \cdot \vec{\varphi} = C_{\ell m} \cos m\phi + S_{\ell m} \sin m\phi. \quad (8)$$

A partir da equação (8), $C_{\ell m}$ e $S_{\ell m}$ são os coeficientes de nível 2 do experimento GRACE, que após um processo de filtragem é possível obter mudanças de massa em função da latitude e longitude.

Os *mascons* publicados pelo JPL [21] são úteis para aplicações relacionadas ao movimento da água na superfície da Terra, porque são previamente filtrados e correções atmosféricas foram aplicadas para o mesmo propósito. Entretanto, para aplicações relacionadas ao movimento de placas tectônicas ou qualquer concentração que não esteja diretamente na superfície imediata da Terra, é obrigatório estabelecer um modelo físico e gerar seus próprios *mascons*. Os *mascons* entregues pelo JPL têm aspectos importantes a serem considerados ao prosseguir com o estudo: por serem provenientes de suavização espacial, a medição entre duas células não é independente; a resolução espacial é $1^\circ \times 1^\circ$ aproximadamente 100 [km] no equador e o limite de erro estimado por [22] é 36 [mm] de equivalente de água ou *equivalente de altura de água*, conforme apresentado na documentação do JPL.

2.3 Algoritmos

O conjunto de dados é grande e contém informações espaciais e temporais, então a seguinte lista de algoritmos é usada para refinar e obter as informações importantes.

A decomposição de valores singulares (SVD) é uma técnica matemática que separa uma matriz

de dados G em três matrizes componentes: U , Λ e V . Dada uma matriz G com dimensões (*tempo, latitude, longitude*), a decomposição resulta em

$$G = U\Lambda V^T \quad (9)$$

$$\sigma_j^2 = \frac{\lambda_j^2}{\sum_i \lambda_i^2} \quad (10)$$

onde

- V é uma matriz contendo os *modos espaciais* de variação. Na Eq. (9), V^T representa a matriz transposta.
- Λ é uma matriz diagonal cujos valores indicam a importância relativa de cada modo em V . As componentes desta matriz estão localizadas ao longo da diagonal $\Lambda = \text{diag}(\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_j)$
- U é uma matriz contendo a *informação temporal*, permitindo determinar como os modos de V variam ao longo do tempo.

A Decomposição de Valor Singular (SVD) é amplamente usada para simplificar conjuntos de dados complexos extraíndo padrões-chave e reduzindo o número de dimensões. Em áreas como análise de dados, processamento de imagens e sistemas de recomendação, essa técnica é essencial para identificar recursos significativos. Exemplos incluem o uso em aplicativos como Google, Netflix, Spotify e Facebook. Para ilustrar aplicações relacionadas, o leitor é encorajado a explorar o conceito de *eigen-faces* [24, 25].

No SVD os dados são divididos em modos, que se referem a uma representação dos dados espaciais, que sobrepostos fornecem os dados originais, os dados em um tempo t e a posição latitude longitude (ϕ, θ) é dada pela adição dos diferentes N modos,

$$G(\phi, \theta, t) = \sum_{j=0}^N u_j(t) \vec{v}_j(\phi, \theta). \quad (11)$$

Para um modo único j a distribuição espacial é dada pela matriz V^T selecionando a linha j , que contém em suas colunas os índices correspondentes à latitude longitude $v_j(\phi, \theta) = V^T[j, :] \lambda_j$ é medido em centímetros de água equivalente e $u(t) = U[j, :]$ refere-se à variação temporal.

2.3.1 Espacial

A dimensão espacial do conjunto de dados requer a identificação de padrões-chave e a detecção de regiões de interesse. Para este propósito, dois algoritmos principais são empregados.

A Taxa de Alarme Falso Constante (CFAR) é uma técnica usada para detectar picos significativos em um mapa espacial, como os modos principais obtidos após SVD. Este método avalia cada ponto no espaço considerando sua vizinhança imediata e compara seu valor com um limite adaptativo, calculado dinamicamente para manter uma taxa constante de alarmes falsos. Essa abordagem permite identificar picos relevantes mesmo em conjuntos de dados ruidosos, garantindo que as detecções não sejam afetadas por variações locais.

O agrupamento espacial baseado em densidade de aplicações com ruído (DBSCAN) é um algoritmo de agrupamento que agrupa pontos com base em sua proximidade espacial e densidade local. Isso é útil para analisar padrões espaciais nos picos detectados pelo CFAR, classificando-os em clusters significativos. Para dados geográficos, é utilizada a métrica de distância Haversine, que calcula a menor distância entre dois pontos na superfície da Terra, permitindo uma classificação precisa considerando a curvatura da Terra; a Ref. [26] implementou essa métrica para otimizar rotas entre abrigos temporários e locais de processamento de resíduos.

Dados geofísicos tendem a exibir ruído não uniforme e estruturas densas localizadas, tornando abordagens adaptativas como CFAR e algoritmos baseados em densidade como DBSCAN ideais.

2.3.2 Temporal

Qualquer dado temporal pode ser expresso como uma combinação de funções trigonométricas ($\sin \omega x, \cos \omega x$) com diferentes frequências ω , a transformada rápida de Fourier ou FFT permite que esse cálculo seja realizado de forma rápida e eficiente, obtendo assim a lista de coeficientes associados aos diferentes períodos. Ao representar graficamente a magnitude desses coeficientes em relação ao período, temos um gráfico de *importância versus período*, um “periodograma” que permite estudar os intervalos de tempo mais importantes para os dados em estudo. Entretanto,

devido ao princípio da incerteza, não é possível saber precisamente o conteúdo exato de frequência em um dado momento. A FFT elimina toda precisão temporal e fornece apenas informações sobre as frequências contidas em todo o sinal. Em casos de misturas de frequências, é necessária a Transformada Wavelet, que permite um equilíbrio, fornecendo informações sobre uma faixa de frequências, em menor resolução, contidas em um sinal para um dado momento.

3 Metodologia

Todo o código usado na análise pode ser encontrado em [27], o endereço do arquivo será brevemente mencionado.

A partir da aquisição de dados GRACE, os *mascons* foram baixados da página inicial do experimento [7], usando o script *podaac-subscriber* [28]; o arquivo baixado correspondente a *TELUS_GRAC-GRFO_MASCON_CRI_GRID_RL06.3_V4* é um arquivo do tipo netCDF4 de cerca de 1-2 Gb, correspondendo a cerca de 250 meses diferentes, com uma resolução de $0,5^\circ$, que pode ser lido usando a biblioteca Python *gravity-toolkit* [29] com a classe *spatial*; e que junto com *cartopy* [30] permite representar graficamente e observar todo o globo (Figura 4).

O algoritmo *SVD* requer dados com espaçamento temporal uniforme, então uma interpolação prévia foi realizada para garantir a uniformidade do conjunto. Com o arquivo de dados carregado no objeto *spatial.data* representando a matriz G . A matriz G , com dimensões (*tempo, latitude, longitude*), foi transformada em uma matriz bidimensional para aplicar *SVD*. O código pode ser encontrado em *GRAVCON-GRACE/notebooks/2_svd_analysis/* nos arquivos *1_datapret.ipynb* e *2_svd.ipynb*. A decomposição gerou as matrizes U , Σ e V . Nesse caso:

- V foi interpretada como os mapas espaciais ou modos principais de variação, aos quais foram aplicados CFAR e DBScan para obter pontos de latitude e longitude que representam variação espacial.
- Os valores de Σ determinaram a importância relativa de cada modo nos dados.

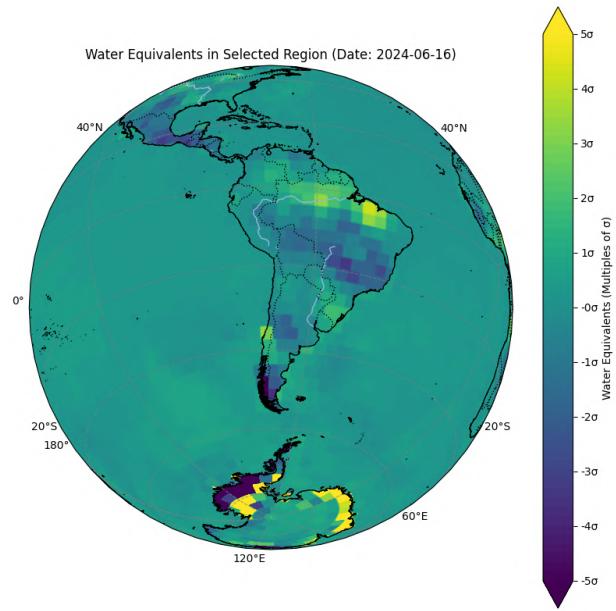


Figura 4: Visualização de dados GRACE/FO para visualizar a região da América do Sul e Antártida com uma visão ortográfica. As cores indicam a intensidade do desvio padrão em relação à média (média ou mediana, tomada sobre toda a extensão de dados: de 2002 a 2024). Há pontos cuja variação absoluta é maior que 5σ e estes são pintados como um amarelo saturado ou roxo.

- U capturou a dinâmica temporal associada aos modos espaciais.

Para entender a evolução e a correlação dos movimentos das águas na região, são selecionados os principais modos que explicam uma porcentagem significativa da variância total. Modos associados a valores singulares menores (menores λ_j) refletem padrões mais específicos ou flutuações locais, o que pode ser indicativo de fenômenos menos representativos ou ruído nos dados.

Métodos de Monte Carlo foram usados para avaliar a influência do ruído nos *mascons*, considerando a precisão dos harmônicos esféricos descritos em (5). O ruído foi simulado com um desvio padrão de ± 36 mm, com base em limites de precisão conhecidos, a fim de estabelecer um teste de hipótese Kolmogorov-Smirnov com a hipótese nula H_0 : que o modo $(V^T)_j$ vem da mesma distribuição que o ruído.

Uma vez determinados os principais modos, aqueles com uma variância explicada acumulada de mais de 95% (9 modos no total), foi possível estudar a variação espacial de cada modo, contida em V^T representando pontos geográficos-chave. O algoritmo de detecção de pico *CFAR* foi apli-

cado a estes para encontrar os pontos geográficos com a maior variabilidade. Os diferentes pontos de máxima variabilidade foram então agrupados usando o algoritmo *DBScan* com ϵ igual à resolução GRACE-FO em radianos (3×10^{-2}) e a métrica *Haversine* para levar em consideração distâncias geográficas.

Em relação à parte temporal, a matriz U foi utilizada para analisar a variação temporal dos principais modos por meio do cálculo do periódograma, representando graficamente a dependência dos modos com diferentes períodos de tempo com o objetivo de identificar o conteúdo de frequência predominante em cada modo principal. Posteriormente, por meio da transformada wavelet, foi examinado como essas frequências variam em função do tempo, permitindo uma análise mais detalhada dos fenômenos transitórios.

Foram calculados coeficientes de correlação de Pearson entre os modos principais e o índice Niño 3.4, com o objetivo de estabelecer sua relação com as oscilações globais e assim estabelecer modos que se acoplem a este índice; o código para esta seção está localizado em `2_svd_analysis/4_wavelet_nino.ipynb` no código do github [27].

Por fim, foi feita uma referência cruzada entre os principais modos com pontos de latitude e longitude do conjunto de dados de inundações [31] para estabelecer os modos altamente correlacionados espacialmente com inundações, que podem ser encontrados na pasta *GRAVCON-GRACE/notebooks/4_flooding/*. Para esse propósito, uma máscara binária foi criada para $U[\text{mode}, \text{time}]$, que é uma matriz de zeros e uns, zero no caso de não haver um evento de inundaçāo no tempo t e um no caso de haver um evento de inundaçāo onde t está entre "Begin" e "End" dado por [31]. Para informações espaciais, este conjunto de dados foi convertido em células binárias representando centróides de inundaçāo com posições de latitude e longitude que foram comparadas com células $V^T[\text{mode}, \text{lat} \times \text{lon}]$ levando em consideração a área afetada e a gravidade de acordo com a equação (12), uma fórmula onde o modo e o índice da célula são abreviados: $[m,c]=[mode, cell]$, \sum_i refere-se à soma dos diferentes eventos de inundaçāo no conjunto de dados; A_i é a área (km^2) afetada por esse evento

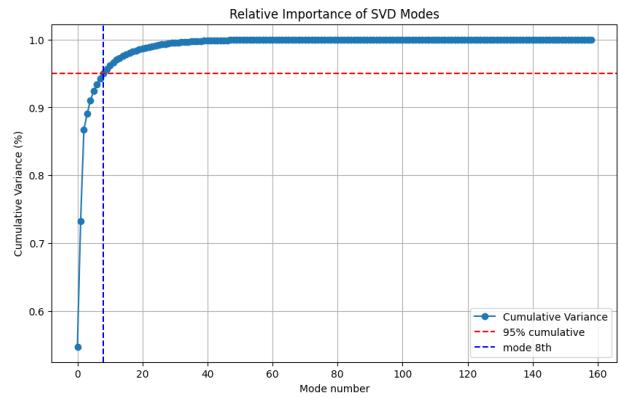


Figura 5: Importância relativa dos modos obtidos por SVD.

e S_i é a gravidade desse evento (1,0 ou 2,0)

$$\text{Index}[m, \phi, \theta] = \sum_{i=0}^{N_i} v_m(\phi, \theta) \log(A_i + 1) S_i \quad (12)$$

4 Resultados das análises

As componentes de variação espacial e temporal obtidos do SVD, representados pelas matrizes U e V^T , incluem um total de 159 modos. Todos, exceto os últimos 5, passam no teste de hipótese de Kolmogorov-Smirnov, sendo considerados como sinal e eliminando ruído.

A importância relativa de cada modo decai exponencialmente, permitindo que 95% da variância acumulada seja explicada com apenas 9 modos [cf. (10)], sendo este o principal filtro para separar os modos representativos da região de ruído; os modos principais estão listados na Tabela 1

Tabela 1: Modos principais e sua informação relevante. A variância é (σ^2)

Modo	Variância
0	5.473×10^{-1}
1	1.854×10^{-1}
2	1.348×10^{-1}
3	2.306×10^{-2}
4	1.989×10^{-2}
5	1.356×10^{-2}
6	1.052×10^{-2}
7	8.010×10^{-3}
8	7.704×10^{-3}

Para os gráficos apresentados, foram seleciona-

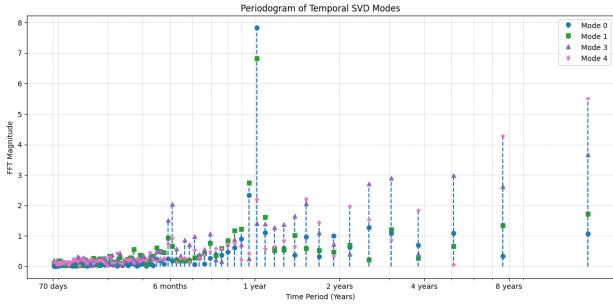


Figura 6: Periodograma dos modos de oscilação, onde a magnitude dos coeficientes da Transformada Rápida de Fourier (FFT) é representada graficamente em função do período associado, os modos 0, 1, 2 são apresentados com maior relevância e 8 como um modo importante devido à sua correlação com o índice de Niño. Os modos são diferenciados por símbolos de cores.

dos os três principais modos (índices 0, 1 e 2), que juntos representam 86% da variação total.

4.1 Temporal

Observando o periodograma na Figura 6, que abrange desde a frequência máxima permitida pelo teorema de Nyquist (correspondente a um período de 70 dias, dado que a amostragem de interpolação é de 35 dias) até aproximadamente 15 anos (a duração da missão GRACE).

Entre os padrões mais relevantes está um pico anual, observável nos três modos principais, que coincide com as estações climáticas recorrentes a cada ano. Adicionalmente, no modo 2 destaca-se um pico semestral, o que sugere a presença de fenômenos climáticos semestrais associados a estações húmidas e secas típicas de determinadas regiões, acompanhados de padrões de precipitação. Um pico de particular interesse aparece no intervalo de 8 anos, predominante no modo 3; embora o ciclo El Niño-Oscilação Sul (ENOS) tenha uma periodicidade variável entre 2 e 7 anos, seu impacto cumulativo em certas regiões pode gerar padrões observáveis em uma escala de aproximadamente 8 anos.

A correlação temporal entre os modos e o índice global Niño 3.4 foi calculada usando *time lags*, onde observamos a correlação atrasando o sinal do índice Niño 3.4 em dias diferentes, observado na Figura 7 cujos valores máximos de correlação estão listados na Tabela 2, onde se observa a importância do modo 3 em relação a este índice global.

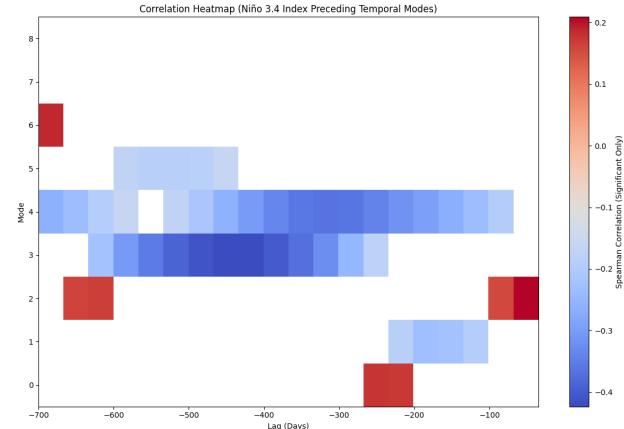


Figura 7: Correlação de Spearman dos modos selecionados com o índice de Niño 3.4. As correlações são apresentadas em formato de cor, azul para correlações positivas e vermelho para negativas, enquanto o eixo horizontal representa o intervalo de tempo do índice Niño 3.4 em relação a esse modo, usando o índice como um preditor para o modo. Enquanto as correlações que não são estatisticamente significativas são apresentadas em branco, ou seja, aquelas que têm um valor de p acima do valor crítico de 5%.

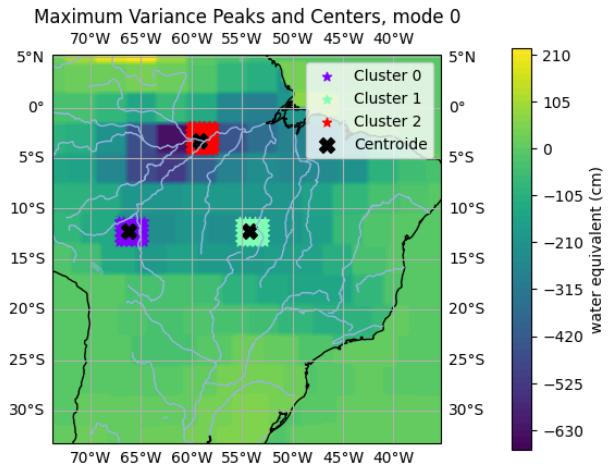


Figura 8: O primeiro modo, com 50% de importância, apresenta uma clara diminuição da massa de água na região de Manaus, Brasil, acompanhada de um aumento da massa nas regiões do entorno. Quando esse modo é encontrado com coeficientes positivos, ele indica um aumento de massa nas regiões costeiras e uma diminuição de massa na região de Manaus.

4.2 Espacial

Os 3 modos foram plotados com pontos coloridos representando os resultados do CFAR e os centróides do DBSCAN: Figura 8, Figura 9, Figura 10. Em termos de identificação das regiões com maior variabilidade dentro dos principais modais, são elas: Manaus, Minas Gerais,

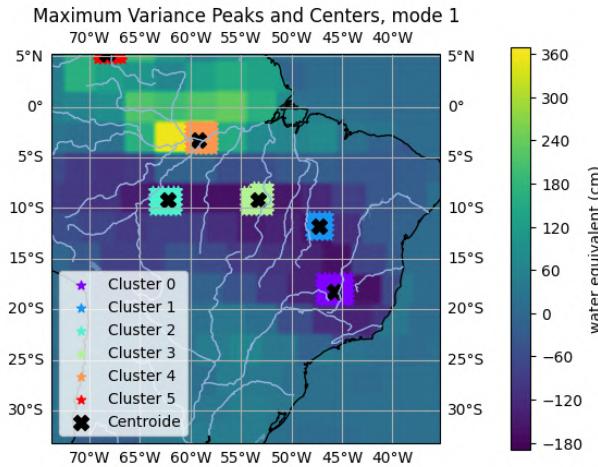


Figura 9: O segundo modo do SVD com importância de 12% também indica uma forte dependência da região de Manaus, particularmente no encontro do Rio Amazonas com o Rio Negro; entretanto, há diminuição de massa nas regiões de Mato Grosso e Minas Gerais.

Mato Grosso.

5 Discussão

Os modos principais da Tabela 1 apresentam variâncias explicadas σ^2 , consideráveis nos primeiros modos e praticamente insignificantes em relação aos modos principais, o que indica a capacidade do SVD de comprimir a informação e permitir estudar separadamente os modos que explicam a fenomenologia do clima.

Os SVD têm a força de descrever os dados em forma de base, conforme expresso na equação (11), neste caso diferentes modos espaciais na matriz V^T que evoluem no tempo guiados pela matriz U , o periodograma da Figura 6 mostra picos consideráveis onde o pico anual é observado, indicando principalmente os modos 0 e 1 como parte das estações.

A correlação calculada e apresentada na Figura 7 é a correlação de Spearman entre a variação temporal dos modos e o índice Niño 3.4 para diferentes mudanças de tempo ou *lags*. As correlações significativas encontradas estão listadas na Tabela 2 e, em particular, demonstram respostas em relação ao índice. No entanto, modelos mais complexos parecem ser necessários para estudar em maior profundidade as correlações como as dos modos 3 e 4, para incluir possíveis não linearidades, autocorrelações e até correlações entre

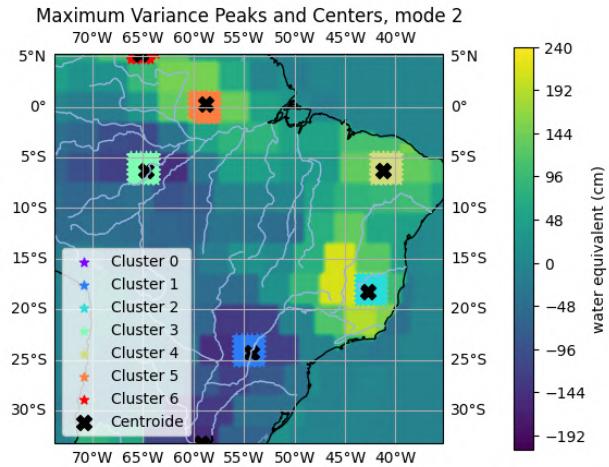


Figura 10: O terceiro modo tem importância de 10%, o que representa uma correlação entre o aumento da massa de água equivalente em Minas Gerais e a diminuição em Mato Grosso.

os mesmos modos.

A equação (12) é utilizada para dar importância às diferentes células para somar todas as inundações ocorridas, a equação é de natureza heurística, escalonando a área logicamente e multiplicando pela severidade para ter intervalos comparativos entre eventos de inundaçao, porém pode ser melhorada incorporando a expertise das áreas de hidrologia com base em argumentos físicos. Por sua vez, os coeficientes de correlação utilizados são os de Spearman e Pearson, mas em fenômenos cíclicos a incorporação da autocorrelação pode fornecer uma grande quantidade de informações, invisíveis à análise atual; índices de correlação conhecidos foram utilizados para manter a simplicidade do modelo. Caso o leitor prefira se aprofundar em técnicas mais poderosas, são recomendados modelos como ARIMA ou técnicas de última geração como redes neurais, que não são difíceis de implementar, mas exigem maiores critérios para interpretar os resultados e considerar o público-alvo.

6 Conclusão

No presente estudo, a decomposição em valores singulares (SVD) foi aplicada em dados gravitacionais do GRACE/FO para a região amazônica, identificando nove modos principais que explicam cerca de 95% da variância. Este resultado confirma a capacidade do SVD de decompor e iso-

Tabela 2: Correlações máximas de Spearman e seus respectivos atrasos de tempo para cada modo significativo. NS* simboliza que nenhuma correlação estatisticamente significativa foi encontrada.

Mode	Max Correlation	Lag (Days)
0	0.17	-245
1	-0.23	-175
2	0.21	-35
3	-0.42	-420
4	-0.36	-315
5	-0.19	-525
6	0.19	-700
7	NS*	—
8	NS*	—

lar padrões espaciais e temporais relevantes, que foram associados a ciclos anuais e semestrais e possíveis interações com o fenômeno El Niño – Oscilação Sul. Adicionalmente, a aproximação das correlações espaciais com eventos de inundação, apesar de sua natureza linear, mostra uma concordância significativa em células de alta mudança de massa, contribuindo para uma melhor compreensão da dinâmica hidrológica da Bacia Amazônica.

Os resultados obtidos estão ligados ao objetivo inicial de fornecer uma estrutura para analisar as variações da água a partir de dados gravimétricos. A seleção de métodos lineares de complexidade moderada baseia-se na necessidade de uma análise transparente e reproduzível, evitando conclusões sensacionalistas. Desta forma, destacando tanto as limitações como o real valor da informação prestada.

Por fim, este estudo contribui para a área de hidrologia e climatologia ao demonstrar que, mesmo utilizando uma abordagem estatística relativamente simples, é possível extrair padrões espaciais e temporais de dados do GRACE/FO e relacioná-los com eventos de inundação. Como linhas futuras, sugere-se o aprofundamento em metodologias não lineares (e.g., redes neurais ou modelos híbridos) que fortaleçam a interpretação dos modos menos dominantes e abordem a com-

plexidade inerente aos fenômenos climáticos na região amazônica, sem perder o rigor ou a clareza necessários para uma comunicação científica adequada.

Referências

- [1] C. Mitchell, *Flood Resilience—A Time for Cathedral-Based Thinking and Action!*, *Journal of Flood Risk Management* **15**(1), e12780 (2022).
- [2] M. I. Brunner et al., *Challenges in Modeling and Predicting Floods and Droughts: A Review*, *WIREs Water* **8**(3), e1520 (2021).
- [3] J. A. Marengo e J. C. Espinoza, *Extreme Seasonal Droughts and Floods in Amazonia: Causes, Trends and Impacts*, *International Journal of Climatology* **36**(3), 1033 (2016).
- [4] J. A. Marengo et al., *The Drought of Amazonia in 2023-2024*, *American Journal of Climate Change* **13**(03), 567 (2024).
- [5] J. Wise, *Spanish Floods: Experts Call for Clearer Warnings*, *BMJ* **387**, q2421 (2024).
- [6] H. X. Do, Y. Mei e A. D. Gronewold, *To What Extent Are Changes in Flood Magnitude Related to Changes in Precipitation Extremes?*, *Geophysical Research Letters* **47**(18), e2020GL088684 (2020).
- [7] *Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)*, Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (2020). Disponível em <https://podaac.jpl.nasa.gov/GRACE>, acesso em out. 2024.
- [8] C. Dahle et al., *GRACE 327-743 (Gravity Recovery and Climate Experiment): GFZ Level-2 Processing Standards Document for Level-2 Product Release 06 (Rev. 1.0, October 26, 2018)*, Scientific Technical Report STR - Data (GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam, 2018).
- [9] *GRACE Documentation*, Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PO.DAAC) (2011). Disponível em <https://podaac.jpl.nasa.gov/gravity/grace-documentation>, acesso em out. 2024.

- [10] I. Velicogna, T. C. Sutterley e M. R. van den Broeke, *Regional Acceleration in Ice Mass Loss from Greenland and Antarctica Using GRACE Time-Variable Gravity Data*, *Geophysical Research Letters* **41**(22), 8130 (2014).
- [11] V. M. Tiwari, J. Wahr e S. Swenson, *Dwindling Groundwater Resources in Northern India, from Satellite Gravity Observations*, *Geophysical Research Letters* **36**(18) (2009).
- [12] *Gravity Data Sheds New Light on Ocean, Climate, Climate Change: Vital Signs of the Planet*. Disponível em <https://climate.nasa.gov/news/152/gravity-data-sheds-new-light-on-ocean-climate>, acesso em out. 2024.
- [13] M. Rodell e J. T. Reager, *Water Cycle Science Enabled by the GRACE and GRACE-FO Satellite Missions*, *Nature Water* **1**(1), 47 (2023).
- [14] S. S. Soltani, B. Ataie-Ashtiani e C. T. Simmons, *Review of Assimilating GRACE Terrestrial Water Storage Data into Hydrological Models: Advances, Challenges and Opportunities*, *Earth-Science Reviews* **213**, 103487 (2021).
- [15] Z. Sun et al., *Reconstruction of GRACE Data on Changes in Total Water Storage Over the Global Land Surface and 60 Basins*, *Water Resources Research* **56**(4), e2019WR026250 (2020).
- [16] B. Lehner, K. Verdin e A. Jarvis, *New Global Hydrography Derived From Spaceborne Elevation Data*, *Eos, Transactions American Geophysical Union* **89**(10), 93 (2008).
- [17] B. Lehner e G. Grill, *Global River Hydrography and Network Routing: Baseline Data and New Approaches to Study the World's Large River Systems*, *Hydrological Processes* **27**(15), 2171 (2013).
- [18] B. D. Tapley et al., *Contributions of GRACE to Understanding Climate Change*, *Nature Climate Change* **9**(5), 358 (2019).
- [19] *Lasers in Space: Earth Mission Tests New Technology*, NASA Sea Level Change Portal. Disponível em <https://sealevel.nasa.gov/news/121/lasers-in-space-earth-mission-tests-new-technology>, acesso em out. 2024.
- [20] F. W. Landerer et al., *Extending the Global Mass Change Data Record: GRACE Follow-On Instrument and Science Data Performance*, *Geophysical Research Letters* **47**(12), e2020GL088306 (2020).
- [21] *GRACE-FO Level-2 Monthly Geopotential Spherical Harmonics CSR Release 06.2 (RL06.2)*, Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PO.DAAC). Disponível em <https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/>, acesso em out. 2024.
- [22] F. W. Landerer e S. C. Swenson, *Accuracy of Scaled GRACE Terrestrial Water Storage Estimates*, *Water Resources Research* **48**(4) (2012).
- [23] *Images Taken by the GRACE Mission*, Photojournal - JPL/NASA. Disponível em <https://photojournal.jpl.nasa.gov/mission/GRACE>, acesso em out. 2024.
- [24] M. Turk e A. Pentland, *Eigenfaces for Recognition*, *Journal of Cognitive Neuroscience* **3**(1), 71 (1991).
- [25] *Principle Component Analysis - Eigenfaces*, Kaggle. Disponível em <https://kaggle.com/code/ritupande/principle-component-analysis-eigenfaces>, acesso em out. 2024.
- [26] R. A. Azdy e F. Darnis, *Use of Haversine Formula in Finding Distance Between Temporary Shelter and Waste End Processing Sites*, *Journal of Physics: Conference Series* **1500**(1), 012104 (2020).
- [27] F. Trigo, *Fbientrigo/Gravcon-Grace: A Project for the Estimation of Water Flow Based on the GRACE Dataset*, GitHub. Disponível em <https://github.com/fbientrigo/gravcon-grace>, acesso em out. 2024.
- [28] *Podaac/Data-Subscriber*, Physical Oceanography Distributed Active Archive Center

- (PO.DAAC) (2024). Disponível em <https://podaac.jpl.nasa.gov/node/1647>, acesso em out. 2024.
- [29] T. Sutterley, [*Tsutterley/Gravity-Toolkit: V1.2.1*](#), Zenodo (2023).
- [30] *SciTools/Cartopy*, SciTools (2024). Disponível em <https://scitools.org.uk/cartopy/docs/latest/>, acesso em out. 2024.
- [31] G. Brakenridge, *DFO - Flood Observatory*, Global Active Archive of Large Flood Events. Disponível em <https://floodobservatory.colorado.edu/index.html>, acesso em out. 2024.

Raios cósmicos e suas conexões com o clima na Terra

André Massafferri Rodrigues

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

Resumo

Já é consenso entre os cientistas que a contribuição humana na emissão de gases do efeito estufa causou um aumento da temperatura global significativa no último século, com indicações, via simulações, de um aumento da ordem de 5,0 °C até 2100. Nestes modelos, a dinâmica de nuvens contribui com as maiores incertezas. Apesar do processo se basear numa cadeia relativamente bem conhecida, desde aerossóis evoluindo para núcleos de condensação até chegarem a nuvens macroscópicas, o papel da indução iônica promovida por raios cósmicos como possível intensificador de processos nucleadores na atmosfera, ainda se mantém inconclusivo. Pesquisas recentes realizadas no laboratório de física de partículas, CLOUD/CERN, ainda que com a difícil tarefa de emular a atmosfera em laboratório, vem tendo resultados que motivam seu estudo em um sistema real, como no projeto brasileiro CRE4AT (*Cosmic Ray Experiment for Atmosphere*).

Abstract

There is now a consensus among scientists that human contribution to greenhouse gas emissions has caused a significant increase in global temperature over the last century, with simulations indicating an increase of around 5.0 °C by 2100. In these models, cloud dynamics contribute the greatest uncertainties. Although the process is based on a relatively well-known chain, from aerosols evolving into condensation nuclei to macroscopic clouds, the role of ionic induction promoted by cosmic rays as a possible intensifier of nucleating processes in the atmosphere remains inconclusive. Recent research carried out at the particle physics laboratory, CLOUD/CERN, despite the difficult task of emulating the atmosphere in the laboratory, has yielded results that motivate its study in a real system, as in the Brazilian project CRE4AT (*Cosmic Ray Experiment for Atmosphere*).

Palavras-chave: raios cósmicos, formação de nuvens, clima.

Keywords: cosmic rays, cloud formation, climate.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v6n1.47661](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v6n1.47661)

1 Raios cósmicos

A Terra é constantemente bombardeada por raios cósmicos galáticos (RCG), os quais são compostos por partículas elementares, prótons em sua maioria, e núcleos de átomos, pois conseguem viajar por longas distâncias sem decair. São produzidas diretamente por fontes astrophysics, como super-novas e aglomerados ativos de galáxias, percorrendo o Espaço em um amplo espectro de energias. Sua descoberta, realizada por Victor Hess [1], teve origem na necessidade da compreensão da variação da condutividade elétrica residual do ar, culminando com o prêmio Nobel, em 1936, por suas medidas realizadas em balões.

Desde então, a pesquisa de raios cósmicos tem proporcionado grandes avanços na compreensão

do cosmos e foi fundamental no início de desenvolvimento do Modelo Padrão de Partículas Elementares (SM, do inglês *Standard Model*). Com o advento dos aceleradores de partículas, iniciada na década de 1950, SM vem sendo aprimorado continuamente e, hoje, consegue descrever a Natureza em pequenas escalas com grande precisão tendo como base três interações fundamentais (e seus respectivos propagadores da interação); eletrromagnética (fóton¹), fraca (W^\pm e Z^0) e forte (glúons). No SM, as partículas elementares são enquadradas em dois grupos; *quarks*, que interagem fortemente, e *leptons*, como elétron, mûon (μ) e neutrino (ν), que não são sensíveis a essa interação. A sua grande intensidade tem con-

¹O fóton, dependendo da faixa de energia que se encontra, pode ser denominado luz visível, raio-X, radiação gamma (γ), ondas de rádio, e outros.

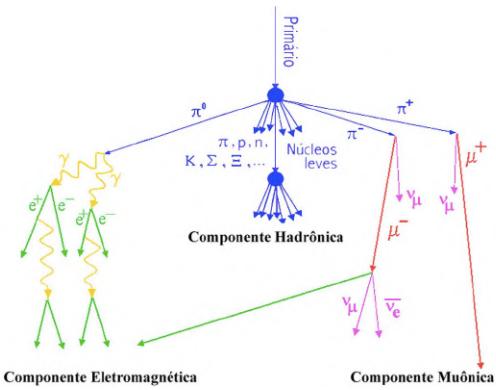


Figura 1: Representação do Chuveiro Atmosférico e seus três tipos de componentes.

sequência importante - os *quarks* sempre se juntam formando estados compostos denominados *hádrons*. Prótons e nêutrons, que compõem o núcleo atômico, e píons (π^0 e π^\pm), que cumprem papel importante na coesão nuclear, são exemplos de hádrons. Para o Brasil, os píons tem significado histórico relevante, já que sua descoberta foi protagonizada pelo grande cientista brasileiro Cesar Lattes.

Quando raios cósmicos galáticos incidem na alta atmosfera desencadeiam uma sequência de colisões com moléculas do ar, seguidos de decaimentos, produzindo uma cascata de partículas secundárias, como mostrado na Figura 1. Esse “chuveiro atmosférico”, como é conhecido, são principiados por uma série de processos hadrônicos, que podem seguir até a superfície terrestre, ou, seguir por processos eletromagnéticos iniciados pelo decaimento $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$, ou muônicos, iniciados tipicamente a 15 km de altitude pelo decaimento $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm\nu$. O fluxo de partículas detectáveis na superfície da Terra (~1% do total) mais intenso é o de múnons, seguido do fluxo de nêutrons [2].²

O Sol também emite partículas no Espaço, decorrente do movimento de rotação do plasma solar, altamente denso, o qual gera um forte campo magnético. A dinâmica complexa deste processo resulta na emissão contínua de prótons, elétrons e íons de baixa energia, conhecidos como ventos solares, com modulação de periodicidade de aproximadamente 11 anos,³ e em diferentes ti-

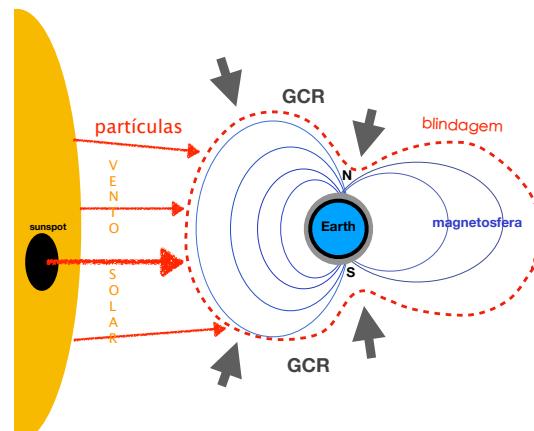


Figura 2: Representação do sistema Sol-Terra no que se refere a magnetosfera, vento solar e raios cósmicos galáticos (GCR).

pos de explosões solares; *flares* solares, ejeção de massa solar (CMEs) e CIR (*Coronating Interaction Regions*). Ainda que as explosões solares tenham um impacto direto mínimo sobre os seres humanos, tempestades magnéticas que acompanham esses eventos podem acarretar problemas de grandes proporções nos sistemas de geração de energia elétrica, infraestrutura eletrônica e de computadores, GPS e sistemas de transporte, especialmente em altas latitudes.

A resultante da interação do campo magnético do Sol com o campo magnético intrínseco da Terra moldam uma região interplanetária denominada magnetosfera. Parte das partículas emitidas pelo vento solar fica aprisionada na magnetosfera, criando uma espécie de filtro para RCG, retendo partículas com energia abaixo de um determinado valor. A Figura 2 ilustra os conceitos envolvidos desta relação Sol-Terra.

A chegada de raios cósmicos na Terra, portanto, se manifesta em várias escalas temporais e de forma diferente dependendo da localização na Terra. Além dos ciclos de ~11 anos, observados na Figura 3), notamos variações sazonais e diárias, além de variações abruptas de intensidade, como o fenômeno conhecido como decréscimo de Forbush [3], que pode ter duração de várias horas a alguns dias, e como a emissão de *bursts*, com duração da ordem de alguns segundos mas que

²Não estamos considerando os neutrinos que interagem fracamente com a matéria e são detectados em experimentos subterrâneos.

³Essa periodicidade já é conhecida desde o século XIX

e era utilizada de forma sistemática por Rudolf Wolf no observatório de Zurich pela contagem do número de manchas solares.

podem chegar a algumas horas.

Medidas da incidência de raios cósmicos em função da localização geográfica, foram iniciados já na década de 1930 baseados em dados provenientes de várias expedições organizadas por grandes cientistas da época, como R. Millikan e A. Compton [5], e foi capaz, já naquela época, de prever que as partículas cósmicas primárias, de origem galáctica, eram predominantemente carregadas e positivas, e que a Terra, do ponto de vista magnético, pode ser representada de forma aproximada por um dipolo simples (imã). Esse modelo geomagnético foi desenvolvido em 1907 por C. Störmer, para explicar o fenômeno das auroras.

2 Nuvens

Nuvens estão presentes em qualquer planeta que possua atmosfera como forma de distribuir a energia acumulada na forma de calor proveniente da irradiação emitida pela sua estrela. É o que os físicos entendem como minimizar a energia do sistema.

2.1 Formação de nuvens

O gás aquecido na superfície, sendo menos denso, é transportado na direção ascendente dissipando energia. Havendo água (no caso da Terra), a mesma pode ser evaporada, absorvendo mais uma parte da energia acumulada. A pressão atmosférica diminui com a altitude, portanto, a medida que o ar quente sobe, carregando vapor, ele se esfria. A certa altitude o vapor condensa, liberando parte da energia, esquentando a região mais alta.

A condensação do vapor, todavia, não é condição suficiente para a formação de nuvens macroscópicas tal qual estamos acostumados. Essa transição requer a presença de partículas suspensas, denominadas aerossóis, na atmosfera, no estado sólido ou líquido, com dimensões que variam entre 1 nm à alguns μm , em torno das quais as moléculas de água vão se acumulando, ou nucleando, até a formação do que chamamos de núcleos de condensação de nuvens (CCN, do inglês *Cloud Condensation Nuclei*).

2.2 Aerossóis

A cada ciclo respiratório inalamos entre 5-50 milhões de partículas de aerossol [6]. Além da ação na saúde, aerossóis exercem impacto direto no clima global, através do espalhamento e absorção da radiação solar e, indiretamente, como sementes na formação de nuvens.

Aerossóis são sistematicamente introduzidos na atmosfera, seja, na forma de poeira, cinza vulcânica, sal proveniente dos mares, seja, de origem antropogênica, como os produzidos pela agricultura, pela queima de combustíveis e por subprodutos industriais [7].

Mais de 50% dos aerossóis observados, no entanto, são criados na atmosfera através de reações químicas e transformações físicas específicas, a partir de vapores. A formação destes novos particulados (*NPF*, do inglês *New Particle Formation*), também denominado aerossol secundário, atinge todas as regiões do planeta.

O estudo sistemático da criação de *NPF* foi iniciado por Aitken em 1880 [8], tendo resultado, anos depois, com Wilson, no primeiro detector de partículas elementares, conhecido como câmara de nuvens [9]. Essa invenção, acoplada a uma câmera fotográfica com a capacidade de tirar fotografias durante tempos bem curtos, permitia registrar as trajetórias das partículas através da imagem do rastro do vapor produzido. Neste instrumento, as condições termodinâmicas, como saturação do ponto de orvalho, eram controladas de tal forma que a troca de energia promovida pela passagem de partículas era suficiente para formar pequenas nuvens. Essa invenção foi decisiva para a comunidade científica de Física de Partículas, perplexa pela previsão teórica da existência das anti-partículas, por Paul Dirac, em 1928.⁴ Utilizando uma câmara de nuvens em balões, Carl David Anderson descobre o anti-elétron, ou pósitron, uma das maiores descobertas da Física.

Desde então, o entendimento sobre a microfísica de *NPF* tem evoluído enormemente, e é representado de forma simplificada na Figura 4. Inicia-se em (I) quando vapores formam agregados moleculares (II). Estes agregados iniciais são

⁴A Equação de Dirac - primeira descrição da dinâmica do elétron compatível com a Teoria Relatividade Especial proposta por Einstein - previa também a existência de anti-partículas, iguais as partículas em tudo, menos na carga elétrica, que deveria ser oposta.

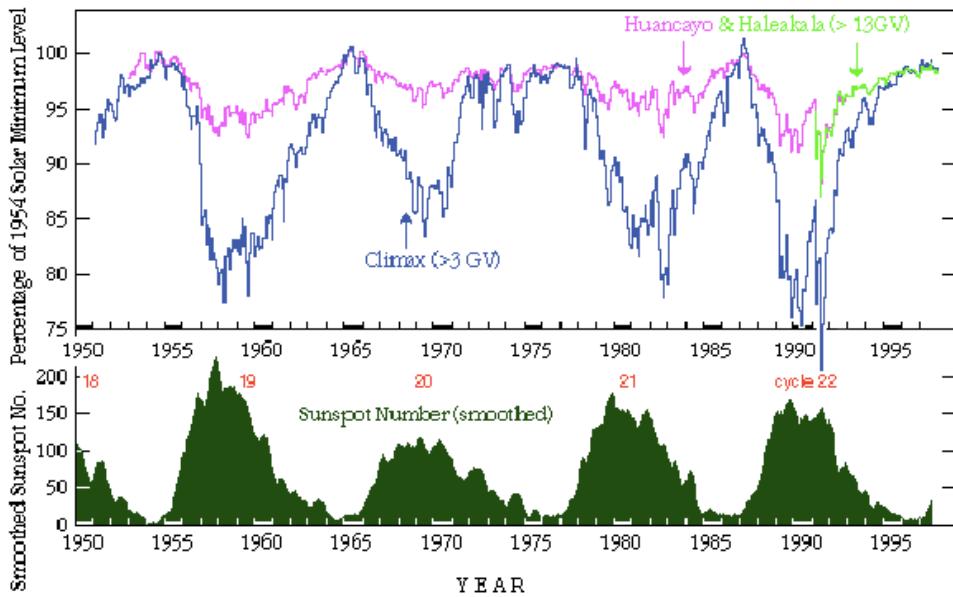


Figura 3: Séries temporais da incidência de raios cósmicos medidas com contadores de nêutrons na Universidade de Chicago, estação Climax, no Colorado (3400 m de altitude e *cutoff* de 3 GeV/c), Huancayo, Peru (3400 m e 13 GeV/c de *cutoff*) e Haleakala, Havaí (3030 m de altitude e 13 GeV/c de *cutoff*), e de número de manchas solares. Note que a maior modulação foi observada na estação Climax devido a seu menor *cutoff* de energia. Figura retirada de [4].

constantemente criados e destruídos em ciclos de condensação e evaporação (III) [10]. O próximo estágio (IV), conhecido como nucleação, acontece quando vapores de baixa volatilidade (com alta capacidade de evaporação) se juntam para formar núcleos estáveis. Estas estruturas nucleadas podem evoluir para a formação de novas partículas (*NPF*) via auto-coagulação (V) e condensação, via adesão de novos vapores de menor volatilidade, como água, resultando em CCN (VI), ou serem perdidas devido a choque com outras partículas ou simplesmente por deposição (VII). Os compostos voláteis⁵ exercem um papel crucial no processo de formação de aerossóis secundários (*NPF*). *NPF* não ocorre constantemente, trata-se de uma competição entre processos químicos com as condições ambientais.

2.3 Importância da nuvens

Nuvens ocupam aproximadamente 75% da área da Terra. A fração da radiação solar que é refle-

⁵Predominantemente ácido sulfúrico [11] e sua composição com amônia e com diferentes tipos de aminas, bem como compostos orgânicos voláteis altamente oxidados [12]

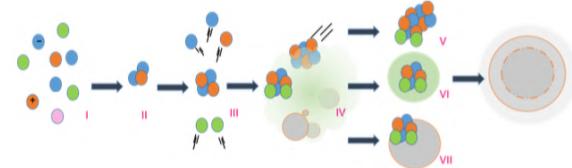


Figura 4: Representação da microfísica da formação de novas partículas. Retirada de [6].

tida ao espaço diretamente pelas nuvens, em média 20% do total, como pode ser visto na Figura 5, e por aerossóis, é chamada de albedo planetário. As nuvens refletem a radiação solar incidente em ondas curtas e possuem a capacidade de reter a radiação de ondas longas emitida pela superfície da Terra, um efeito combinado conhecido como *cloud forcing*. Nuvens tem papel fundamental no resfriamento do planeta, já que a refletividade das nuvens tem um efeito superior a absorção da radiação solar.

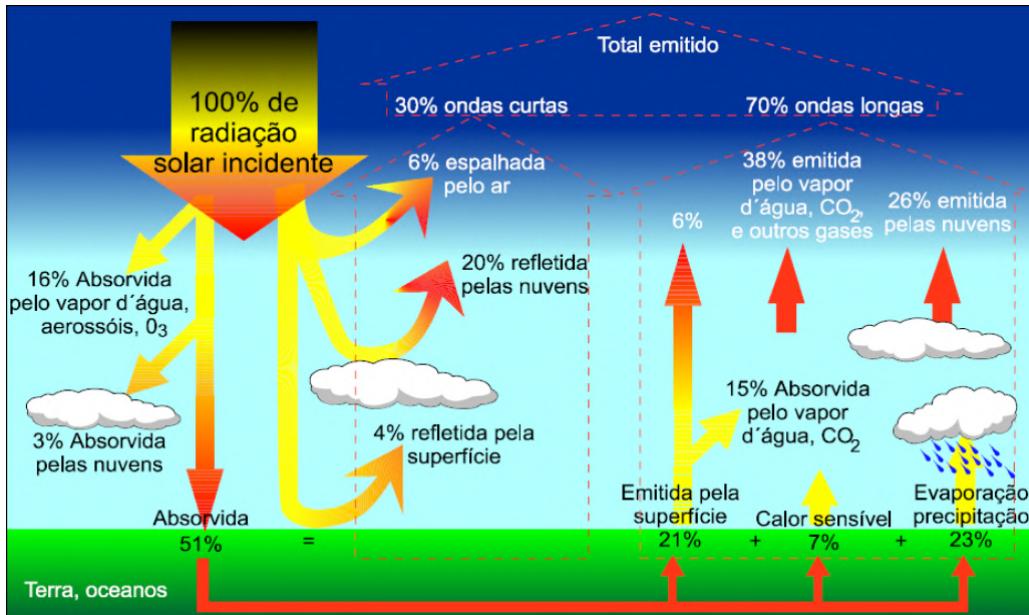


Figura 5: Balanço de energia do planeta em função da irradiação que chega na forma de ondas curtas diretamente do Sol. As contribuições que são refletidas e as que são absorvidas pela Terra e reenviadas na forma de ondas longas, principalmente na faixa do infra-vermelho, são mostradas. Destaque especial para a grande contribuição das nuvens neste balanço energético. Retirada de [13].

3 Possível conexão de raios cósmicos com nuvens

Existem ainda várias questões em aberto sobre a formação de NPF, sempre envolvendo a estabilidade do processo desde a sua origem. Na Química, grande parte das interações entre moléculas se dá através de forças elétricas residuais, portanto representa um dos fatores importantes na estabilidade de quaisquer reações e formação de micro-estruturas. Íons são produzidos naturalmente na atmosfera através da ionização por elementos radioativos presentes na crosta terrestre e principalmente por raios cósmicos. Esses íons podem transferir sua carga para gases, agregados de moléculas e proto-partículas, sendo especialmente importantes como efeito estabilizador no começo dos processos de NPF [14, 15], descritos na Figura 4.

Dada sua importância no clima global, o papel da indução iônica na formação de aerosóis motivou a criação do experimento *Cosmics Leaving Outdoor Droplets* (CLOUD) [4], com o intuito de estudar os processos microscópicos envolvidos na formação de núcleos de condensação e sua relação com a eletrização causada por raios cósmicos. Para tal, CLOUD realiza, no Centro Europeu de Pesquisa em Física Nuclear (CERN), a emulação

da atmosfera, de forma controlada, em câmara de nuvens de 24 m², sujeita tanto a incidência de prótons do feixe do Proton-Syncrotron como de raios cósmicos. Resultados confirmam que a eletrização da atmosfera por ionização aumenta fortemente a eficiência inicial do processo de formação de novas partículas [16], entretanto, a contribuição ao final do processo, com a formação de uma CCN ainda se mantém inconclusiva.

Uma das evidências mais intrigantes de um possível reflexo em larga escala da indução-iônica na formação de CCN é a associação empírica entre medidas de isótopos ¹⁴C, fruto da interação de nêutrons cósmicos com Nitrogênio atmosférico, e a temperatura média da Terra ao longo dos últimos séculos [17]. Na Figura 6 pode-se observar que períodos históricos reconhecidos como de grande incidência de calor (*medieval warm* e *Suess* que corresponde ao início da Revolução Industrial) e frio (*Wolf*, *Sporer* e *Maunder*) coincidem com ciclos coincidentes da diminuição e aumento na incidência de raios cósmicos.

Na mesma direção, em 1997, o trabalho de Christiansen and Svensmark [18] apresenta evidências de uma forte correlação entre incidência de raios cósmicos e formação de nuvens, mostrada na Figura 7, que seguem a modulação da atividade solar de ~11 anos. Esta conexão consistiria em

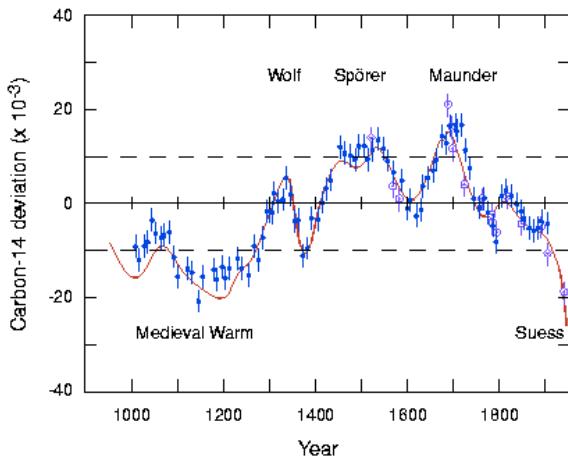


Figura 6: Série temporal de longo-prazo dos desvios da concentração relativa de ^{14}C de análise de material orgânico de árvores do último milênio. Retirado de [4].

elo importante de uma cadeia contendo dois processos bem estabelecidos e já discutidos, representados abaixo, consistindo em mecanismo solar indireto com potencial de contribuir de forma significativa para os efeitos climáticos.

$$\begin{array}{c} (\text{Atividade Solar} \uparrow) \rightarrow (\text{Raios Cósmicos} \downarrow) \\ \quad \downarrow ? \\ (\text{Temperatura} \uparrow) \leftarrow (\text{Nuvens} \downarrow) \end{array}$$

Da série de indicações corroborando a hipótese de uma relação causal entre a incidência de raios cósmicos e a formação de nuvens através de estudos de correlação, seja direta ou indiretamente, como em [19], segue-se também um grupo relativamente grande de trabalhos científicos na direção contrária, como o obtido na análise realizada por Erlykin, Sloan e Wolfendale [20], mostrando incompatibilidades estatísticas relevantes em várias regiões da Terra. Se adicionarmos os resultados ainda inconclusivos da Colaboração CLOUD/CERN, utilizando emulações da atmosfera em laboratório, temos uma situação ainda em aberto para essa questão.

4 Projeto CRE4AT

A quase totalidade de trabalhos relacionados a esse tema utiliza dados provenientes de detectores de nêutrons, já que essa partícula conta com instrumentação de detecção padronizada desde

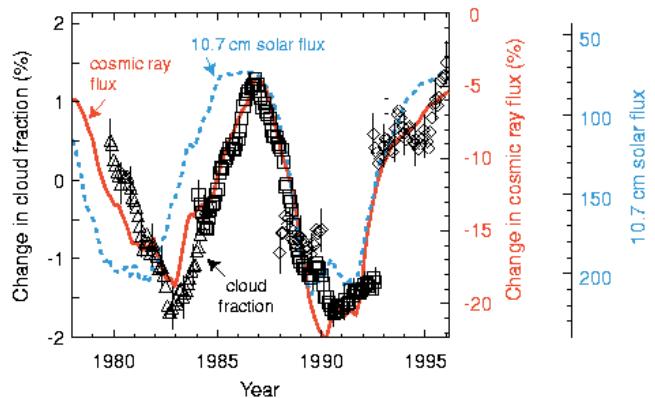


Figura 7: Taxa de variação percentual da cobertura de nuvens global na região dos oceanos observada por satélites (escala à esquerda) e variação relativa do fluxo de raios cósmicos (curva sólida normalizada em Maio de 1965) obtidos por medidas de neutrons na estação Climax. Também é mostrado o fluxo do comprimento de onda de micro-ondas de 10,7 cm.

1950, com instalações em diferentes continentes, gerando séries-temporais bem longas. Nêutrons, não tendo carga elétrica, interagem diretamente no núcleo atômico das moléculas da atmosfera, e tendem a oferecer um representação fiel do fluxo de partículas primárias, ou seja, na origem dos chuveiros atmosféricos. Múons, por sua vez, são produzidos em profusão como fruto de decaimento de píons na baixa atmosfera, onde grande parte das nuvens são formadas. Apesar de perderem pouca energia por ionização, múons decaem em elétrons, os quais interagem com a matéria com grande intensidade.

Estudos científicos com essa abordagem, combinando nêutrons e múons, com capacidade de selecionar partículas de baixa energia, onde, se espera um forte aumento da probabilidade de interação, são extremamente interessantes e ainda pouco explorados. Esse fato se torna ainda mais relevante se a conexão entre a formação de nuvens e raios cósmicos se der predominantemente através do - ainda não bem compreendido - mecanismo conhecido como íon-aerossol próximo à nuvem. Neste mecanismo o principal papel dos raios cósmicos se daria através da eletrização residual no entorno em que a nuvem está se formando e não exatamente na indução iônica direta.

O programa CRE4AT foi criado, em 2014, no

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, e tem a colaboração da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e, mais recentemente, Universidade de São Paulo. Tem como objetivo estudar essa questão, através da instalação de experimentos robustos capazes de detectar mísseis cósmicos em regiões estratégicas do planeta, com baixa atividades humana e alta probabilidade de *NPF*. Utilizando tecnologia a base de cintiladores, foram instalados experimentos nas duas bases antárticas brasileiras; Estação Antártica Comandante Ferraz, localizada nas ilhas Shetland do Sul, e no Módulo Avançada Criosfera 1, nas proximidades do Polo Sul, no continente antártico (vide matéria sobre Antártica nesta edição). Foi instalado também um experimento no Observatório da Torre Alta da Amazônia (ATTO), localizado no meio da floresta amazônica, que possui instrumentos de alta precisão para medidas de aerossóis, e está prevista a instalação na ilha de Trindade, no meio do oceano Atlântico.

Os trabalhos realizados até agora analisam fluxos cósmicos contínuos, em séries temporais longas, envolvendo médias de dados de várias regiões. De modo a separar os termos de 1^a ordem, de dinâmica mais lenta, CRE4AT tem como estratégia correlacionar formações de nuvens embrionárias com variações abruptas do fluxo de raios cósmicos promovidas por partículas ocasionadas tanto por explosões solares como pela incidência de chuveiros extensos de energia mais elevada. Nuvens e núcleos de condensação serão identificados por algoritmo baseado em dados de satélites e por instrumentos de superfície que utilizam Inteligência Artificial (IA) para separar nuvens migratórias de nuvens embrionárias (Figura 8). A vantagem do imageamento terrestre em relação a imagem de satélites é que a performance do modelo não é afetada por características do solo da região que está sendo monitorada, como por exemplo na Antártida, em que o solo fica sistematicamente coberto por neve, o que poderia levar a IA a identificar erroneamente pixels de solo como pixels de nuvem.

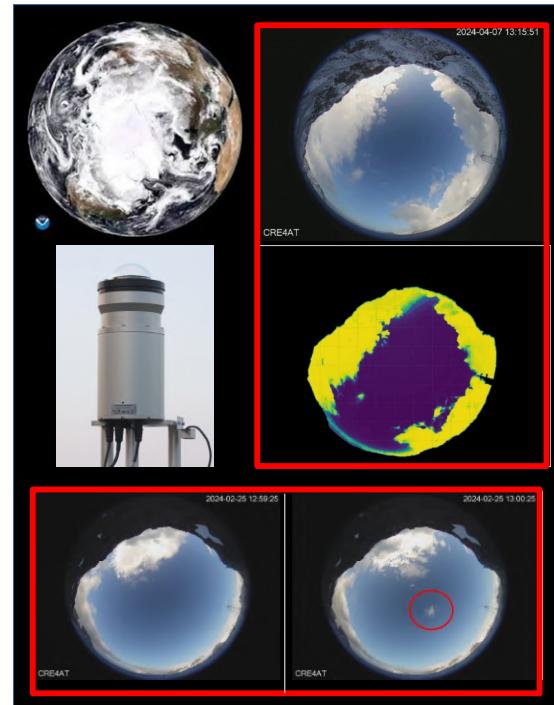


Figura 8: Acima, fotos de nuvens tiradas a partir de satélite e a partir do sistema de imageamento terrestre instalado na EACF. No centro, equipamento de CCD *all-sky* utilizado e registro processado pela IA. Abaixo, fotos de um evento de nuvens convencional seguido da identificação de uma nuvem embrionária, na EACF.

5 Conclusões

Já é consenso entre os cientistas sobre a contribuição da ação humana como causa do aumento da temperatura média global em 0,6 °C observada no último século.

Em 1988, é criada uma organização científico-política pela iniciativa do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente e da Organização Meteorológica Mundial com o objetivo principal de sintetizar e divulgar o conhecimento mais avançado sobre as mudanças climáticas que hoje afetam o mundo, especificamente, o aquecimento global, apontando suas causas, efeitos e riscos para a humanidade e o meio ambiente, e sugerindo maneiras de combater os problemas. Essa Comissão produz relatórios sistematicamente, conhecidos como Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), onde, entre outras coisas, as diferentes componentes que contribuem com o clima são quantificadas em termos de radi-

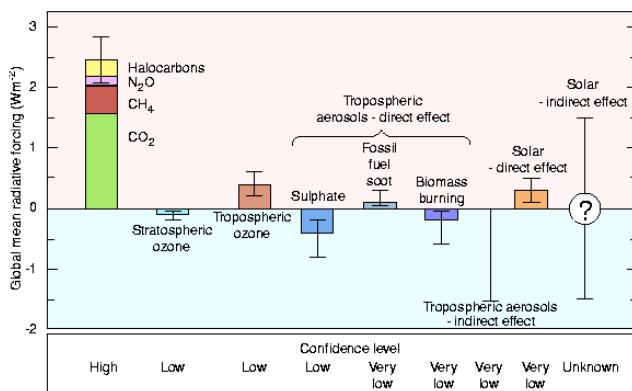


Figura 9: Contribuições das forçantes radiativas e suas incertezas na modelagem envolvidas no *Global Circulation Model*, de 2013.

ância solar, ou *effective radiative forcing* (ERF).

A Figura 9 lista as diferentes contribuições a serem comparadas a contribuição principal, em torno de 342 W/m^2 na superfície, proveniente diretamente da irradiação solar. Ressaltamos aqui a grande incerteza da componente *Solar Indirect Effect*.

O último relatório IPCC de 2013 [21] mostra que a componente antropogênica proveniente das emissões de CO₂ contribuem com ERF de $+2,83 \pm 0,57 \text{ W m}^2$, enquanto que *cloud forcing* tem efeito contrário, $-0,9 \pm 1.0 \text{ W m}^2$. A grande incerteza associada a esta medida torna imperativo que estudos empíricos continuem a ser realizados, preferencialmente utilizando-se diferentes métodos e ferramentas, com a intenção de tornar os modelos climáticos mais precisos na sua tarefa de previsão de cenários futuros.

Agradecimentos

André Massafferri Rodrigues agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ).

Sobre o autor

André Massafferri Rodrigues (massafferi@cbpf.br)

é Físico Experimental em Física de Partículas de Altas Energias do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas e membro da Colaboração do experimento LHCb, um dos 4 grandes experimentos instalado no anel de colisão LHC/CERN. É especialista em instrumentação científica e raios cósmicos. Em 2014, criou o projeto CRE4AT para estudos de mudanças climáticas associadas a formação de nuvens.

Referências

- [1] V. F. Hess, *Über Beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei sieben Freiballondurchfahrten*, Physikalische Zeitschrift **13**, 1084 (1912).
- [2] P.A. Zyla et al. (Particle Data Group), *Review of Particle Physics*, Progress of Theoretical and Experimental Physics **2020**(8), 083C01 (2020).
- [3] O. Musalem-Ramirez et al., *A catalog of Forbush decreases of the cosmic radiation for the period 1997-2007*, in *Proceedings of the 33rd International Cosmic Ray Conference (ICRC2013)*, Rio de Janeiro, Brazil – The Astroparticle Physics Conference (2013), vol. 33, 0393.
- [4] B. Fastrup et al. (CLOUD collaboration), *A study of the link between cosmic rays and clouds with a cloud chamber at the CERN PS*, Relatório técnico-científico, CERN, SPSC-2000-021 (2000). Disponível em <https://cds.cern.ch/record/444592>, acesso em fev. 2025.
- [5] L. Dorman, *Cosmic Rays in Magnetospheres of the Earth and Other Planets* (Springer Netherlands, 2009).
- [6] S. Buenrostro Mazon, *An alternative analysis of new particle formation: Studying the misfits to understand the norm*, Report series in aerosol science **222**, 9 (2019). Disponível em http://www.fhaar.fi/wp-content/uploads/2019/11/SMazon-PhD_final_unigrafia.pdf, acesso em fev. 2025.

- [7] P. et al, *Warming-induced increase in aerosol number concentration likely to moderate climate change*, *Nat. Geosci.* **6**, 438 (2013).
- [8] J. Aitken, *dust, fogs and clouds*, *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh* **11**, 122 (1880). Disponível em <https://www.biodiversitylibrary.org/page/48711064>, acesso em fev. 2025.
- [9] C. Wilson, *Proceedings of the Royal Society of London A* **85**(578), 285 (1911).
- [10] M. Kulmala et al., *Toward Direct Measurement of Atmospheric Nucleation*, *Science* **318**(5847), 89 (2007).
- [11] R. J. Weber et al., *Measured atmospheric new particle formation rates: implications for nucleation mechanisms*, *Chemical Engineering Communications* **151**(1), 53 (1996).
- [12] N. M. Donahue et al., *Critical factors determining the variation in SOA yields from terpene ozonolysis: A combined experimental and computational study*, *Faraday Discussions* **130**, 295 (2005).
- [13] W. Portugal, *Estudo da Influência Solar e Cosmogênica na Variabilidade da Temperatura da Superfície Terrestre*, Tese de Doutorado (2018). Disponível em <http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/09.26.18.37>, acesso em fev. 2025.
- [14] M. B. Enghoff e H. Svensmark, *The role of atmospheric ions in aerosol nucleation – a review*, *Atmospheric Chemistry and Physics* **8**(16), 4911 (2008).
- [15] J. Kirkby et al., *Role of sulphuric acid, ammonia and galactic cosmic rays in atmospheric aerosol nucleation*, *Nature* **476**(7361), 429 (2011).
- [16] J. Kirkby et al., *Ion-induced nucleation of pure biogenic particles*, *Nature* **533**(7604), 521 (2016).
- [17] R. A. R.Kra, *Radiocarbon After Four Decades: An Interdisciplinary Perspective* (Springer New York, 1992).
- [18] H. Svensmark e E. Friis-Christensen, *Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage—a missing link in solar-climate relationships*, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **59**(11), 1225 (1997).
- [19] L. E. A. Vieira e L. A. da Silva, *Geomagnetic modulation of clouds effects in the Southern Hemisphere Magnetic Anomaly through lower atmosphere cosmic ray effects*, *Geophysical Research Letters* **33**(14), 14802 (2006).
- [20] A. Erlykin, T. Sloan e A. Wolfendale, *Cosmic rays and global warming*, *Europhysics News* **41**(1), 27 (2010). [ArXiv:0706.4294](https://arxiv.org/abs/0706.4294).
- [21] IPCC, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Cambridge University Press, 2013). Disponível em <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>, acesso em fev. 2025.

A Produção de ignorância sobre ciência: uma análise das relações entre propaganda, emergência climática e ética da informação

Carlos Eduardo Barros

NetLab/UFRJ - Laboratório de Estudos de Internet e Redes Sociais

Resumo

Apesar de um aparente consenso sobre o valor estratégico da ciência para a sociedade e os ganhos materiais que o desenvolvimento de pesquisas e tecnologias agregam na indústria, na cultura e nas relações de poder, há um debate importante sobre a influência de valores externos, políticos e econômicos, sobre o conhecimento científico. Com a perspectiva conceitual da agnotologia, este artigo analisa como campanhas de propaganda utilizam a ética da informação das plataformas digitais para produzir e disseminar dúvida e ignorância sobre o conhecimento científico da mudança climática antrópica e seus porta-vozes. A partir de uma revisão da literatura, reforçamos o alerta de astrofísicos, geólogos, sociólogos e tantos outros cientistas sobre como a ideia de uma “ciência neutra” enfraquece a comunidade e alimenta o negacionismo. Observamos as principais estratégias e discursos que combatem o consenso sobre a emergência climática e sua relação com um modelo econômico insustentável de exploração dos recursos do planeta, apontando responsabilidades da indústria do petróleo, do agronegócio e das *big techs* nesse cenário.

Abstract

Despite an apparent consensus on the strategic value of science for society and the material gains that the development of research and technologies brings to industry, culture and power relations, there is an important debate about the influence of external political and economic values on scientific knowledge. Using the conceptual perspective of agnotology, this article analyzes how propaganda campaigns use the information ethics of digital platforms to produce and disseminate doubt and ignorance about scientific knowledge of anthropogenic climate change and its spokespeople. Based on a literature review, we reinforce the warning of astrophysicists, geologists, sociologists and many other scientists about how the idea of a “neutral science” weakens the community and fuels denialism. We observe the main strategies and discourses that combat the consensus on the climate emergency and its relationship with an unsustainable economic model of exploitation of the planet’s resources, pointing out the responsibilities of the oil industry, agribusiness and big tech in this scenario.

Palavras-chave: emergência climática, desinformação, ética da informação.

Keywords: climate emergency, disinformation, information ethics.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v6n1.47434](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v6n1.47434)

1 Introdução

Apesar de um aparente consenso sobre o valor estratégico da ciência para a sociedade, há um debate importante sobre a influência de valores externos, políticos e econômicos, sobre o conhecimento científico [1]. Objetivamente, o desenvolvimento de pesquisas e tecnologias é um dos principais motores de valorização da indústria, do bem estar social, mas também é um motor de disputas de poder. Pesquisadores de várias áreas, como astronomia, geologia e biologia, denunciam

que investimentos privados e governamentais podem deturpar a ciência e seus impactos em nome de projetos de dominação [2]. A sobreposição de interesses entre esses grupos e algumas comunidades científicas pode levá-las a colaborar direta ou indiretamente com esses projetos, mesmo a contragosto [3]. A apropriação de conhecimentos científicos é capaz de produzir vantagens inestimáveis aos seus detentores, mas quando a ciência se torna inconveniente, ela também pode acabar bombardeada por ataques nos campos da indús-

tria e da política [4].

Nas últimas décadas, várias áreas do conhecimento têm passado por uma virada computacional com impactos profundos, abrindo novos caminhos teóricos e metodológicos [5]. Os robustos investimentos em tecnologias digitais, iniciados em um contexto de Guerra Fria, deram as bases para uma nova indústria da informação, caracterizada pela explosão informacional [6]. Sob uma perspectiva neoliberal, as instituições científicas são uma referência importante para o conceito de um “livre-mercado de ideias”, se destacando de outras formas de conhecimento por oferecer bases materiais para a tomada de decisões coletivas e individuais, públicas e privadas [7]. Entretanto, o mercado de propaganda digital, que se tornou pivô da indústria da informação, tem viabilizado campanhas de negação e descredibilização da ciência em escala inédita [8].

Os estudos sobre esse fenômeno têm se concentrado em contextos onde as evidências científicas revelam a insustentabilidade de modelos de negócio centrais para a economia estabelecida, como a exploração de petróleo, o agronegócio e a propaganda digital, como a Covid-19 e a emergência climática em curso [9, 10]. Mas a circulação bem-sucedida de discursos anti-científicos on-line, sob uma ética de “liberdade de expressão absoluta”, parece prejudicar a percepção pública sobre os conhecimentos mais diversos e fundamentais, como o formato da Terra e a natureza da diversidade de gêneros e sexualidades [11]. Esse cenário de desordem informacional é utilizado para polarizar os debates e atrasar o avanço de normas e regulamentações recomendadas por cientistas, agravando a emergência climática e a ascensão de ideias conspiratórias e extremistas [12–14]. Assim, as plataformas digitais constituem um importante objeto para o estudo social da produção de ignorância e desinformação na atualidade [12].

Na indústria da propaganda digital das *big techs*, as antigas estratégias dos mercadores da dúvida das big oil encontram recursos inéditos de manipulação e influência, e passam a lucrar juntas com a produção de ignorância [9, 15]. Empresas como Google, Meta, X e Tik Tok concentram as maiores bases de dados sociais já existentes, mas há também um amplo debate sobre precariedades e assimetrias no acesso a esses dados por pesquisadores independentes em diferentes paí-

ses [16]. Apesar de todas elas possuírem políticas de moderação de conteúdos considerados inadequados – por iniciativa própria ou por pressão jurídica – incluindo em alguns casos o negacionismo climático, diversas inconsistências levam a questionar se esses esforços são apenas ineficazes no combate à desinformação ou se realmente não estão comprometidos com esses objetivos [17].

De fato, cada vez mais plataformas de redes sociais afirmam suas alianças com grupos políticos e econômicos que se beneficiam de discursos extremistas e desinformativos sobre a ciência [18]. Além disso, esses atores têm utilizado estratégias de difamação pública e assédio jurídico contra cientistas e centros de pesquisa que atuam nesta área [19], de modo similar ao que fizeram empresas de tabaco e petróleo ao descobrir que a ciência poderia ameaçar os seus negócios. Diante disso, essas empresas passam a ser consideradas não apenas como cúmplices da produção de ignorância sobre ciência por parte de outros setores de mercado, e começam a ter suas ações analisadas sob a perspectiva da agnotologia [20, 21]. Com esse enquadramento conceitual, o presente artigo analisa como a propaganda desinformativa explora as brechas da ética da informação nas plataformas digitais para produzir e disseminar dúvida e ignorância sobre o conhecimento científico em torno da emergência climática.

2 Valores da ciéncia e da ignorância

Durante a história da ciência, a construção social do conhecimento tem sido marcada por uma ampla diversidade metodológica e intelectual, mas também por situações de conflito e autoritarismo que foram na contramão do conhecimento, alimentando a ignorância [4,22,23]. A fim de investigar os motivos pelos quais a sociedade deveria – ou não – confiar na ciência, Oreskes mapeia momentos-chave em que a comunidade científica falhou em identificar inconsistências em teorias amplamente aceitas devido aos valores atrelados a elas, e as consequências políticas e econômicas de questioná-las [2]. Para ela, o caráter social da ciência é o ponto forte da sua confiabilidade, para além das características dos indivíduos que participam da sua produção, dos métodos e práticas utilizados, e das evidências empíricas.

ricas partilhadas e questionadas em conferências, *workshops*, livros, periódicos e associações. O valor da ciência como instituição epistêmica está no todo, na diversidade de uma comunidade científica internacional e em movimento. Nesse sentido, a ciência não opera na busca por “verdades absolutas”, mas sim por acúmulos de evidências constantemente postas à prova em diferentes contextos, que vão se consolidando como consensos na comunidade:

“Politicians, economists, journalists, and others may have the impression of confusion, disagreement, or discord among climate scientists, but that impression is incorrect. The scientific consensus might, of course, be wrong. If the history of science teaches anything, it is humility, and no one can be faulted for failing to act on what is not known... Many details about climate interactions are not well understood, and there are ample grounds for continued research to provide a better basis for understanding climate dynamics. The question of what to do about climate change is also still open. But there is a scientific consensus on the reality of anthropogenic climate change. Climate scientists have repeatedly tried to make this clear. It is time for the rest of us to listen.” (Bedford & Cook, 2013 apud Ref. [2, p. 1686])

Ao apresentar o conceito de agnotologia como uma espécie de epistemologia dedicada à ignorância ao invés do conhecimento, Proctor & Schiebinger discorrem sobre o valor do segredo e do voto de informações em diferentes contextos e grupos sociais [4]. Como também lembram Bezerra, Schneider & Capurro, ao debater as relações entre ética e desinformação, o campo da medicina, por exemplo, é repleto de situações onde se admitem mentiras “piedosas” e pactos de silêncio, e assim é em muitos outros campos [24]. Militares, juristas, padres e governantes convivem com situações nas quais o conhecimento pode representar poder, mas também perigo. A ignorância tem raízes na própria natureza da interação social e da linguagem, podendo ser criada ou manipulada estrategicamente conforme a necessidade ou negociação [20, 21]. Por exemplo, para evitar o risco de uma avaliação enviesada, a maioria dos reviso-

res de artigos acadêmicos idealmente não recebe informações sobre os autores. Mas os critérios e definições sobre o que deve ser ignorado ou conhecido em cada contexto são essencialmente sociais e políticos, e se apresentam como problemas sócio-epistemológicos complexos.

Vindo da sociologia, Bourdieu comprehende que o campo acadêmico é estruturado por disputas constantes de poder, nas quais os critérios de validação são influenciados por diversos tipos de poder simbólico e material com dimensões práticas frequentemente desconectadas dos valores e critérios da ciência [1]. É precisamente contra esse tipo de arranjo sistêmico que se coloca o consenso científico sobre a mudança climática antrópica, que denuncia o colapso iminente de gigantes da indústria extrativista [4, 25]. A perspectiva das ciências socioambientais como guarda-chuva mais amplo das ciências relacionadas à mudança climática também é um ponto-chave nesse cenário, por trabalhar diretamente com outras fontes de conhecimento de povos tradicionais historicamente deslegitimados [2, 26, 27]. Nesse contexto, os meios de comunicação em escala são uma arena chave para a legitimação social do poder, o que leva atores e instituições de outros campos, como a ciência, a política e o mercado, a ocuparem estratégicamente a mídia para disputar o apoio da opinião pública [1].

Vale ressaltar que a ideia de defender a ciência da desinformação apenas invocando sua autoridade acaba por agravar a sua descredibilização – de modo similar ao que acontece com o jornalismo e outras instituições epistêmicas [28]. Não raro a autoridade científica foi instrumentalizada de maneira dogmática, evitando o debate ético sobre os valores exaltados ou oprimidos em seu nome. A colaboração de movimentos políticos tem tido impactos positivos na construção de uma epistemologia social que reconheça a diversidade de gênero, raça, classe e etnia como valores importantes para o desenvolvimento da comunidade e do conhecimento científicos [29–31]. No entanto, campanhas de desinformação frequentemente exploram problemas históricos na relação entre sociedade e ciência, associada a uma elite intelectual, cristalizada em sua autoridade e avessa a críticas de grupos minoritários [25].

No próprio meio acadêmico, é forte uma visão vulgar da herança positivista que entende o co-

nhecimento científico como algo neutro, racional e superior. Essa tradição se relaciona com um clássico debate na filosofia da moral comentado por Capurro, segundo o qual o valor-verdade da cognição humana seria prejudicado pela interferência de emoções [32]. Ainda que a objetividade seja um valor fundamental para a produção científica, ela se alicerça, antes de mais nada, em princípios éticos como honestidade, cuidado e abertura [33], e o mascaramento desses princípios ameaça todo o sistema. Colocar a ciência como verdade absoluta acima das emoções e valores que não estão sujeitos a uma avaliação ética seria uma forma de autorizar o desinteresse e a negligência sobre conhecimentos não considerados científicos [34]. Como efeito colateral, essa visão alimenta o “ceticismo” desorientado dos negacionistas [35, 36].

A indústria da desinformação explora habilmente a linha tênue entre o ceticismo saudável sobre a autoridade e o conspiracionismo. Públicos que valorizam a ciência como instituição, mas especulam que ela possa ser manipulada por valores hegemônicos, tendem a ser mais suscetíveis ao apelo a falsos especialistas que se apresentam como dissidentes boicotados pela comunidade científica [25]. É importante compreender que o que a literatura denomina como “negacionismo” não se trata apenas do fenômeno de que muitas pessoas negam uma série de fatos documentados e validados cientificamente [9]. O negacionismo seria, sobretudo, uma forma organizada de reação a verdades inconvenientes [35, 37]. Portanto, trata-se de algo mais amplo, uma reação coletiva que busca construir – e legitimar na esfera pública – verdades alternativas a uma ciência que constata a incompatibilidade das expectativas de desenvolvimento atuais com as condições materiais do planeta [36].

De fato, muitos estudos sobre negacionismo são direcionados estritamente aos mecanismos psicológicos e sociológicos pelos quais o público se apega a visões equivocadas sobre fatos concretos como o aquecimento global ou o pouso do homem na Lua [38], e não necessariamente à produção organizada de ignorância. Porém, não são poucos os autores que buscam ir além do estudo da ignorância espontânea sobre o conhecimento científico, de modo que os estudos sobre negacionismo e agnotologia estão profundamente ligados em seus objetos de análise. Nesse contexto, destaca-

camos que o debate sobre valores éticos, políticos e ideológicos está no cerne da produção de discursos que comprometem o papel social da ciência – seja aqueles que declaram guerra a suas instituições ou os que emulam versões mais convenientes para os poderes hegemônicos, apresentadas como uma ciência mais livre e democrática.

Além disso, um princípio fundamental da ética em pesquisas científicas é o de que nem tudo vale a pena saber. Muitos tipos de evidências e experimentos científicos são proibidos ou repudiados por serem relacionados a impactos negativos para a sociedade. Proctor & Schiebinger exemplificam que muitos periódicos de arqueologia não publicam artigos sobre artefatos de procedência duvidosa, apesar de ser o caso da maioria das peças em museus pelo mundo, para evitar estimular um mercado ilegal de antiguidades [4]. Esse mesmo argumento baseia acordos que buscam restringir a importação europeia de carne de produtores baseados em regiões com desmatamento recente. Entretanto, consolidar esse tipo de limites éticos demanda arranjos políticos e econômicos complexos. No setor da publicidade digital, por exemplo, a veiculação de anúncios muitas vezes não passa por uma verificação rigorosa dos anunciantes e conteúdos; as grandes plataformas promovem uma série de crimes e violações, incluindo ataques à ciência [15].

3 Vigiar e esconder: a ética da informação nas plataformas digitais

A hierarquização dos valores éticos que vão nortear as ações desejáveis ou repudiáveis em um campo nunca é neutra; ela sempre sofrerá pressões de forças externas, a depender dos valores materiais em jogo para cada ação [1]. Portanto, ao falarmos da ética no campo da comunicação nas plataformas digitais, é preciso lembrar que elas movimentam uma indústria trilionária, estão no centro de uma explosão informacional com um impacto sócio-cultural sem precedentes [13, 39]. A virada tecnológica para as ciências sociais computacionais é comparável a momentos históricos em outras ciências, como a descoberta de microrganismos na biologia ou a invenção do telescópio para a física. São volumes imensos de dados produzidos pela interação cotidiana de bilhões de

usuários nos sistemas das grandes plataformas digitais, como Google Search, Facebook e Tik Tok. Esses rastros digitais alimentam análises complexas encadeadas em algoritmos de aprendizado de máquina que operam a cada segundo decisões de recomendação ou censura, em uma gestão dinâmica da rede sobre os indivíduos e conteúdos que as plataformas hospedam e promovem [15, 40].

Um dos maiores dilemas da relação entre ciência e sociedade no nosso tempo é a ética de pesquisas com os imensos volumes de dados das plataformas de redes sociais. A popularização dos modelos generativos de linguagem em diferentes níveis da indústria da informação impõe questões sensíveis sobre a coleta e gestão dos dados dos usuários. Mais recentemente, a agnotologia também tem se debruçado sobre a precariedade induzida no campo de pesquisas sobre mídias digitais [12]. Um dos pontos-chave nesse cenário é a diferença na hierarquização de valores éticos entre culturas [41], classes [28] e campos sociais [1] que se cruzam no “livre-mercado” da informação – como instituições científicas, ativistas, jornalistas, agências de propaganda, veículos e produtores de conteúdo, intermediários e grandes corporações. As plataformas de redes sociais e publicidade são meios de produção e circulação da informação com uma capacidade inédita de vigilância e microssegmentação [42, 43], ocupando um lugar privilegiado no ordenamento ético e ideológico dos regimes de informação [44, 45].

Entretanto, não é evidente para toda a opinião pública que essa gestão dos conteúdos feita pelas plataformas é um processo ativo de moderação que as tornaria co-responsáveis sobre o conteúdo veiculado [15] – uma vez que toda mediação tem influência sobre os processos de comunicação e manipulação da informação propriamente dita [46]. Esses algoritmos são comumente apresentados como capazes de “tirar o humano da equação”, na tentativa de otimizar processos sem dilemas éticos. Mas, uma vez que são responsáveis por mediar inúmeros processos de formação e informação das sociedades – notícias, serviços, estudos, declarações oficiais, entretenimento, etc. – os impactos das plataformas digitais na produção ideológica como um todo são diversos [13, 28]. Nessas redes, a “mão invisível” dos algoritmos que impulsoram certos conteúdos e restringem outros materializa um tipo de poder que é carac-

terístico dos meios de comunicação em geral, relacionado tanto à infraestrutura quanto à superestrutura do sistema capitalista na definição dos termos, valores e vetores do debate público.

Ainda em um contexto analógico, a chamada “doutrina da equidade”, introduzida nos Estados Unidos em 1949 pela Comissão Federal de Comunicações, foi amplamente explorada pelas indústrias do tabaco para disseminar falsas controvérsias sobre o conhecimento científico em torno do fumo. A premissa da doutrina – de que rádios e televisões deveriam contemplar igualmente diferentes posições sobre temas polêmicos em debate – ampliou desproporcionalmente o impacto de falsos especialistas na opinião pública dos EUA. Pesquisadores argumentam que essa seria uma abordagem equivocada para o problema da diversidade no debate público, pois acaba deixando os cientistas reféns de táticas apelativas de distorção e propaganda que violam diversos valores éticos da própria mídia [2, 21]. Ao colocar em pé de igualdade um geólogo e um terraplanista para falar ao público sobre a natureza da Terra, criase uma falsa equivalência sobre a legitimidade de cada um dos lados na produção de informações sobre o tema.

Todas as grandes plataformas digitais possuem termos de uso e regras de conduta para os usuários, sejam elas mais ou menos restritas. Para citar alguns exemplos, o YouTube afirma combater o negacionismo da mudança climática e vacinas, o Tik Tok diz que não permite pornografia e violência explícita, o X promete não censurar os usuários e o Telegram afirma garantir privacidade a qualquer custo. Desde os termos, portanto, a hierarquia de valores no posicionamento das empresas possui diferenças significativas quanto ao tipo de ambiente que buscam oferecer. A fim de cumprir esse papel, elas usam seus sistemas de vigilância para aplicar políticas de moderação e enforcement, e algumas publicam relatórios periódicos sobre os volumes de contas e conteúdos fiscalizados, assim como o número de solicitações do poder público para acesso a dados e remoções, seja em publicações pagas ou não – mas há uma série de inconsistências na aplicação dessas políticas [15, 47, 48].

Em abril de 2024, o CEO do X e autodeclarado absolutista da liberdade de expressão, Elon Musk, iniciou uma cruzada contra o Governo e o Su-

premo Tribunal Federal brasileiros ao afirmar que o país estaria sob um regime autoritário devido às solicitações de informação e restrição sobre perfis de criminosos investigados [48]. Vale lembrar que a chegada de Musk à plataforma marcou o fim de uma série de políticas de transparência no então Twitter, incluindo os relatórios de ações de enforcement, e que o CEO foi acusado diversas vezes de manipular os algoritmos da rede para censurar usuários em prol de ideologias e interesses pessoais [48]. A premissa parece ser a de que as ações de vigilância e moderação arbitradas em âmbito privado pelas plataformas seriam legítimas, mas as reivindicações do poder público local seriam ameaças do autoritarismo sobre os valores de privacidade e liberdade de expressão.

O mito de que a decisão algorítmica é puramente matemática e isenta de valores atualiza a busca por neutralidade e objetividade absoluta da informação, apresentando as plataformas como uma solução fantástica – e falsa – para a democratização das comunicações [49]. Além disso, a ética da liberdade de expressão nessas redes é seletiva, e acaba sendo usada para dar plataforma – e muitas vezes monetizar – a desinformação sobre ciência [25, 50]. Mas, com cada vez menos transparência sobre os dados e ações das plataformas digitais, como podemos dimensionar a evolução dessas inconsistências ao longo do tempo? As plataformas de redes sociais têm demonstrado pouco interesse em otimizar a transparência do seu modelo de negócios [51] e, embora adotem uma abordagem aparentemente conciliatória, têm dificultado a realização de pesquisas e auditoria de seus serviços [52, 53].

Mapeando os principais recursos de transparência oferecidos pelas principais plataformas de redes sociais e publicidade digital atuantes no Brasil, Santini et al. identificam uma grave assimetria em relação ao que as empresas praticam em outros países, como Estados Unidos e União Europeia [15, 47]. Indo além das informações declaradas pelas plataformas nos seus termos de conduta, políticas e relatórios de ações institucionais, os pesquisadores investigam e comparam os recursos de acesso direto a dados de publicações e anúncios veiculados por cada uma, como APIs - Application Program Interface, bibliotecas e outras ferramentas. Em todas as plataformas, foram destacados problemas de acessibi-

lidade, completude, consistência, acurácia e atualidade dos dados, além de problemas de conformidade e relevância, que dependem de questões externas como a adequação a normas locais - um cenário de “apagão de dados” que demonstra estar piorando [15, 16, 47]. Como não se responsabilizam de fato pelo que veiculam, as plataformas parecem ter entendido que remover os recursos de transparência direta seria uma tática eficaz para manter o “teatro” do comprometimento que declaram ter com questões como a defesa da ciência e dos direitos dos usuários vulneráveis [54].

Por um lado, a circulação de conteúdos divulgados pode aumentar o engajamento e o volume de dados, gerando valor para as empresas. Por outro, uma fiscalização mais rigorosa sobre violações das suas políticas internas demandaria um maior investimento, pois os sistemas atuais não dão conta da escala de conteúdos veiculados [15, 16, 47]. No entanto, a ética tecnocrática dos sistemas que automatizam cada vez mais etapas de trabalho material e intelectual na indústria da informação e comunicação é enraizada na privacidade dos dados sociais digitais em domínio das *big techs*, que constituem um mercado altamente concentrado [39, 55]. É preciso compreender que a restrição do acesso e análise dos dados produzidos por usuários on-line é a base do modelo de negócio das plataformas digitais [16, 56]. Esses “novos mercadores da atenção” [57] se caracterizam por venderem serviços exclusivos de personalização e direcionamento de mensagens para públicos altamente segmentados [15], buscando se justificar com base em padrões éticos do campo do marketing [45], apesar de serem profundamente utilizadas pelos usuários para os mais diversos fins, inclusive como fonte de informação sobre ciência.

“Um dos mais lucrativos modelos de negócio do mundo digital, responsável pela imensa maioria dos rendimentos da Alphabet (proprietária dos serviços Google, do YouTube e do sistema operacional Android), da Meta (proprietária das redes sociais Facebook, Instagram e Whatsapp) e da X Corp (dona do Twitter, agora chamado de X), é o das plataformas de publicidade programática (targeted advertising). Trata-se de um tipo de anúncio ou propaganda individualmente direcionada, uma mercadoria digital que é produzida com base nos dados extraí-

dos da navegação de cada pessoa que acessa as plataformas, abarcando desde hábitos de consumo e preferências políticas até as mais imperceptíveis rotinas e formas de comportamento.” [13, p. 54].

O modelo de negócio das plataformas de publicidade digital depende da capacidade de transformar os rastros digitais dos usuários em dados úteis ao treinamento de algoritmos de microsegmentação [15], a fim de alcançar os “usuários certos” de acordo com os objetivos persuasivos de cada anunciante [58]. Nenhuma outra organização privada ou pública possui o mesmo acesso a dados pessoais, interesses, histórico de navegação, localização, redes de seguidores, curtidas e tempo de visualização de tantas pessoas na maior parte dos países onde as *big techs* atuam. Em prol do lucro, as plataformas têm restringido em diversos contextos a autonomia dos usuários e instituições públicas sobre os dados produzidos, como o direito de acessá-los, deletá-los ou questionar seu uso [15, 59]. Há, portanto, uma relação de poder assimétrica entre as plataformas e seus grupos de usuários, na qual a vigilância é um imperativo de mão única [13, 56].

Além disso, a análise do comportamento dos usuários pode ser empregada de maneira manipulativa, explorando suas fragilidades, moldando suas opiniões e atitudes, e podendo induzir ao erro [60]. Esses efeitos podem impactar tanto as interações sociais quanto às decisões individuais: os usuários podem ser incentivados a adotar comportamentos prejudiciais à saúde, cair em fraudes financeiras e até rejeitar recomendações de políticas públicas, entre outras ações prejudiciais [15]. Um exemplo disso ocorreu com um vazamento de dados do Facebook, que revelou como a plataforma era capaz de prever o estado emocional de adolescentes, permitindo que anunciantes direcionassem conteúdos especificamente para aqueles em estados emocionais mais vulneráveis, com base na ideia de que consumidores emocionalmente suscetíveis seriam mais facilmente persuadidos [15].

Essas são algumas das complexidades que atravessam a ética da informação nas plataformas digitais, orientando a maneira como os valores materiais, políticos e econômicos influenciam uma série de processos de decisão, humanos e algorítmicos, que acarretam prejuízos coletivos incalculáveis.

Incluso, incluindo ao papel social da ciência. Embora afirmem combater a desinformação e proteger a privacidade, essas empresas frequentemente falham em cumprir esse objetivo, criando uma dinâmica de poder desigual. O modelo de negócios das *big techs*, que depende da coleta e venda de dados para publicidade personalizada, fomenta uma vigilância unilateral que, diante de tensões entre empresas e governos, ameaça a própria soberania de países como o Brasil. Diante desse panorama sobre as contradições e disputas éticas no regime de informação das plataformas digitais, a falta de uma regulação que freie as práticas nocivas de propaganda desinformativa dá a elas grande influência sobre a percepção pública de temas sensíveis, como a emergência climática [16].

4 Emergência climática e propaganda desinformativa

Há 33 anos, durante o Earth Summit do Rio de Janeiro em 1992, o conhecimento científico sobre as raízes antrópicas do aquecimento global já embasava compromissos da UN Framework Convention on Climate Change. No entanto, o então presidente George H. W. Bush deixou claro que o “American way of life” seria inegociável [2]. Desde então, diversos acordos intergovernamentais por ação climática foram frustrados por uma intensificação de práticas nocivas como a emissão de gases e o desmatamento, mesmo diante de eventos extremos que agravam desigualdades sociais e tornam essa pauta cada vez mais urgente [61]. Nessas últimas décadas, a produção ativa de ignorância sobre a emergência climática recebeu grandes investimentos de tempo e recursos políticos e econômicos [10], a fim de inundar o debate público com perspectivas contrárias às da comunidade científica nesse tema, ganhando tempo para que as indústrias poluidoras ofereçam supostas alternativas sobre como agir diante dessa ameaça global.

Em 2023 e 2024, a Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP) foi sediada em “petro-estados”, os Emirados Árabes Unidos e o Azerbaijão, e as discussões sobre o futuro da política de ação climática internacional foram centradas no financiamento dos processos de adaptação e preparação contra os efeitos da

mudança do clima [62]. Sob essa lógica, eventos como a COP ou a reunião da cúpula do G20 têm funcionado como oportunidades de negócios e *greenwashing* para as indústrias mais predatórias e poluidoras [63]. A ideia de *greenwashing* diz respeito ao investimento em infoproductos para associar uma imagem de sustentabilidade a empresas com grande impacto ambiental [50]. Analisando a veiculação de 158 anúncios da Frente Parlamentar Agropecuária na rede Meta, Medeiros et al. revelaram uma estratégia de negar o impacto do setor sobre o desmatamento e a mudança climática, atribuindo a culpa sobre problemas no campo a movimentos sociais por reforma agrária e grupos indígenas [50]. Além disso, representantes do agronegócio e petroleiras têm investido em publicidade com influenciadores voltados à divulgação científica, produzindo com eles conteúdos que pintam esses setores como a solução e não o problema para a transição a uma economia sustentável [50, 64].

Mapeando diferentes pesquisas sobre a difusão de discursos contrários às políticas ambientais de mitigação e combate à mudança climática, Coan et al. propõem uma taxonomia com os cinco principais tipos de enunciados desinformativos sobre este tema: (i) “não estamos vivendo um aquecimento global”; (ii) “as emissões de gases geradas pela humanidade não são uma causa”; (iii) “os eventuais impactos da mudança climática não são ruins”; (iv) “as soluções propostas para esse problema não funcionarão”; e (v) os ativistas e cientistas ambientalistas não são confiáveis [65]. Nessa divisão, observamos que os três primeiros tipos de enunciados contestam fatos específicos: estamos de fato vivendo em um planeta mais quente a cada ano devido ao uso insustentável de recursos fundamentais ao equilíbrio climático [61, 66].

O objetivo central das campanhas de desinformação sobre a mudança climática é retardar a inevitável comprovação dos alertas da ciência e direcionar o debate político para caminhos que evitem a todo custo prejudicar as indústrias estabelecidas [4, 21]. Portanto, à medida que o tempo passa, os discursos negacionistas precisam se desmembrar e se atualizar a fim de manter sua capacidade de convencimento. A emergência da mudança climática é cada vez mais evidente, e seus impactos já devastam vidas em todos os conti-

nentes. Mas o aumento preocupante da frequência e intensidade de eventos extremos também parece associado a campanhas de desinformação cada vez mais massivas e sofisticadas [67, 68].

Um ponto específico do problema é que conhecimentos de natureza probabilística são especialmente questionados, tanto por falsos especialistas quanto por qualquer pessoa convencida de que o planeta não está esquentando porque em alguns lugares faz muito frio. Ainda que a mudança climática seja um acontecimento complexo de difícil previsibilidade, devido ao grande número de variáveis envolvidas, o impacto da indústria do petróleo sobre o aquecimento global já é bastante evidente, assim como o impacto negativo do fumo sobre o sistema respiratório ou o impacto da circulação de pessoas em uma situação de risco epidemiológico. Mas, na tentativa de mitigar estímulos à ação, é estratégico produzir um clima de dúvida e desconfiança sobre os aspectos menos intuitivos do conhecimento científico, e também desmembrar os fatos para oferecer a cada público uma estratégia desinformativa específica que seja mais conveniente ao seu contexto [9].

Além dos três primeiros tipos de enunciados mapeados por Coan et al., direcionados à produção de dúvida sobre fatos específicos, os dois últimos tipos apelam para a produção de uma desconfiança generalizada sobre os atores engajados no tema e suas propostas. Na falta de representantes e projetos coletivos que sejam percebidos como confiáveis para combater a mudança climática, a dúvida e a ignorância sobre caminhos viáveis diminuem a chance de grandes acordos e investimentos em políticas mais profundas [65]. O apelo a respostas emocionais, como apatia e ansiedade para dissuadir a ação climática, por exemplo, foi uma estratégia importante de campanhas negacionistas em diferentes contextos de atores privados e governamentais [9]. Além disso, quando grupos organizados difundem a ideia de que a ciência ainda não sabe suficientemente o que está ocorrendo com o clima nem por que, alimentam especulações sobre uma série de justificativas conspiratórias mais apelativas do que os argumentos científicos.

Quando as lógicas do negacionismo climático encontram a indústria da informação e propaganda digital, observamos a assimilação de uma série de novas técnicas e estratégias. Pesquisado-

res consideram que a própria estrutura das plataformas digitais [69] e a curadoria dos algoritmos de recomendação [70] podem contribuir para situações de infodemia – uma sobrecarga informacional em que diversos agentes, com ou sem formação científica especializada, competem pelo espaço na disseminação de narrativas científicas [8]. Assim, os mercadores da dúvida encontram um terreno propício para ser semeado com teorias conspiratórias e versões distorcidas de notícias que oferecem ao público respostas mais fáceis – e erradas – sobre os problemas enfrentados pela ciência.

Monitoramentos do NetLab UFRJ, no contexto das chuvas de maio de 2024, no Rio Grande do Sul, mostraram que a internet brasileira foi inundada de supostas justificativas sobre o que causou a tragédia [68]. Algumas publicações tentaram convencer os cristãos de que as enchentes foram um castigo divino devido aos terreiros de matriz africana na região – outras, mais fantasiosas, argumentaram que a apresentação de Madonna no Rio de Janeiro, na mesma época, teria sido um ritual satânico, tendo as vítimas das chuvas como sacrifício [68]. Para públicos mais afeitos ao debate político, os fenômenos naturais teriam sido causados por ondas HAARP e recursos de geoenGENHARIA utilizados por outros países contra o Brasil. Mesmo entre aqueles que aceitam a realidade do aquecimento global, houve quem defendesse que relacionar isso com as chuvas era apenas uma manobra política [68]. Esses e outros discursos frequentemente se repetem, com pequenos ajustes, a cada nova notícia de impactos ambientais ou eventos climáticos extremos [67].

Em relação ao avanço do desmatamento, da mineração e das queimadas na Amazônia, Cerrado e Pantanal, o Brasil já se acostumou com retóricas que buscam culpar ONGs, povos indígenas ou atores estrangeiros para não admitir os impactos do extrativismo e da expansão da fronteira agrícola sobre a depredação do meio ambiente. Durante o governo Bolsonaro, alguns membros da comunidade científica que ocuparam cargos em instituições de peso produziram dados manipulados para sustentar a narrativa de que o agro-negócio não contribuiu com o aumento dos focos de incêndio e desmatamento [25, 71]. Oreskes & Conway identificaram que os principais responsáveis por conduzir a “estratégia do tabaco”

nos EUA foram quatro cientistas com carreiras já consolidadas no campo da física [21]. Documentos das próprias organizações envolvidas revelam que eles deliberadamente alimentaram falsas controvérsias sobre o consenso científico em torno dos malefícios do fumo para a saúde, atrasando em duas décadas os esforços de regulamentação deste mercado. A mesma estratégia foi adotada, logo em seguida, pela indústria dos combustíveis fósseis para combater as demandas por ação climática [2], e algo similar vem acontecendo no lobby anti-regulatório das plataformas digitais [12, 16].

Com a atuação organizada de grandes empresas, grupos políticos e governos, mobilizando veículos de mídia, influenciadores e até mesmo membros de instituições científicas respeitadas, fica evidente que a desinformação sobre mudança climática não é apenas fruto de uma ignorância fortuita. Ainda que muitas pessoas de fato acreditam nos enunciados negacionistas e nas teorias conspiratórias, essa desordem informacional é nutrida por um investimento robusto e constante de partes interessadas em desacreditar a ciência. Portanto, vemos os dois tipos de “mentira” mencionados por Bezerra, Schneider & Capurro: a mentira consciente e organizada por grandes forças político-econômicas que alimenta a mentira ingênua de pessoas comuns, convencidas a se engajar com o negacionismo da ciência e disseminá-lo [24].

Postagens e vídeos visualmente simplificados, frequentemente manipulados para atrair mais atenção, distorcem conceitos científicos e comprometem a qualidade da informação [72]. Porém, publicações desse tipo costumam performar melhor nas métricas das plataformas, criando um ambiente de desvantagem para os enunciados complexos da ciência que estimulam a precariedade da informação [25]. O baixo custo de produção e de propaganda on-line oferece uma escala inédita para os mercadores da dúvida. Além disso, a possibilidade de microssegmentação de anúncios também facilita que conteúdos com diferentes enunciados negacionistas sejam direcionados aos públicos específicos que são mais suscetíveis a cada um deles, com base nas suas interações recentes on-line. Nesse cenário, a falta de regulação e a carência de transparência nas plataformas dificultam o controle da desinformação, permitindo que narrativas negacionistas se espalhem.

lhem sem restrições [15, 47].

5 Conclusões

Embora o valor estratégico da ciência para a sociedade e os benefícios materiais que o desenvolvimento de pesquisas e tecnologias traz à indústria, à cultura e às relações de poder sejam amplamente reconhecidos, há um debate crucial sobre a influência de fatores externos, como interesses políticos e econômicos, sobre o conhecimento científico. A partir da perspectiva da agnotologia, observamos como campanhas de propaganda exploram brechas e características divisórias da ética da informação nas plataformas digitais para disseminar dúvida e promover a ignorância em relação ao conhecimento científico e àqueles que o produzem.

Desse modo, a presente revisão de literatura se soma ao trabalho de cientistas de diferentes áreas que alertam sobre os problemas da noção de uma “ciência neutra” e as implicações históricas e contemporâneas dessa perspectiva no sentido de enfraquecer a comunidade científica e contribuir para a propaganda negacionista. As estratégias e narrativas de desinformação sobre ciência apresentadas demonstram que “os mercadores da dúvida” na indústria da influência digital não buscam apenas rebaixar o lugar da ciência na sociedade, mas sim usá-la em nome de interesses privados na contramão do bem coletivo. A literatura acadêmica produzida em diferentes países evidencia como as indústrias do petróleo, do agro-negócio e das plataformas digitais têm investido e lucrado com a desinformação sobre ciência, e alerta para a importância de superar esse cenário para abrir os caminhos da ação climática frente a desafios cada vez mais urgentes.

Sobre o autor

Carlos Eduardo Barros (carlos.barros@netlab.eco.ufrj.br) é especialista no estudo da indústria da desinformação e propaganda digital no Brasil, e seus impactos na ciência, política e sociedade. É pesquisador bolsista e coordenador de projetos no NetLab UFRJ – Laboratório de Estudos de Internet e Redes

Sociais, além de mestre e doutorando em Ciência da Informação (UFRJ-PPGCI), realizando estágio-docência na Escola de Comunicação da UFRJ.

Referências

- [1] P. Bourdieu, *Homo Academicus* (Polity, 1988).
- [2] N. Oreskes, *Why Trust Science?* (Princeton University Press, 2019).
- [3] N. G. Tyson e A. Lang, *Accessory to War: The Unspoken Alliance between Astrophysics and the Military* (WW Norton & Company, 2018).
- [4] R. Proctor e L. Schiebinger, *Agnotology: The Making and Unmaking of Ignorance* (Princeton University Press, 2008).
- [5] D. M. Berry, *The Computational Turn: Thinking About the Digital Humanities*, Culture Machine **12** (2011).
- [6] T. Saracevic, *Ciência da Informação: Origem, Evolução e Relações*, Perspectivas em Ciência da Informação **1**(1) (1996).
- [7] E. Nik-Khah, *The Marketplace of Ideas and the Centrality of Science to Neoliberalism*, in *The Routledge Handbook of the Political Economy of Science* (Routledge, 2017), 32–42.
- [8] T. M. Oliveira, *Como Enfrentar a Desinformação Científica? Desafios Sociais, Políticos e Jurídicos Intensificados no Contexto da Pandemia*, Liinc em Revista **16**(2), e5374 (2020).
- [9] R. M. Santini e C. E. Barros, *Negacionismo Climático e Desinformação Online: Uma Revisão de Escopo*, Liinc em Revista **18**(1), e5948 (2022).
- [10] S. Lewandowsky, *Liberty and the Pursuit of Science Denial*, Current Opinion in Behavioral Sciences **42**, 65 (2021).
- [11] B. Benton et al., *A Preview of Post Amnesty Twitter: Analysis of “Groomer” on Twitter After the Colorado Springs Shooting*, School

- of Communication and Media, Montclair State University 35 (2022). Disponível em <https://digitalcommons.montclair.edu/scom-facpubs/35>, acesso em fev. 2025.
- [12] P. M. Napoli, *Agnostology, Free Speech, and the Precarious Politics of Media Research*, SSRN 4695907 (2024).
- [13] A. C. Bezerra, *Miséria da Informação* (Garamond, Rio de Janeiro, 2024).
- [14] C. Wardle e H. Derakhshan, *Information Disorder: Toward an Interdisciplinary Framework for Research and Policymaking*, Council of Europe report, DGI09 (2017).
- [15] R. M. Santini et al., *Índice de Transparência da Publicidade nas Plataformas de Redes Sociais*, NetLab – Laboratório de Estudos de Internet e Redes Sociais, UFRJ (2024). Disponível em https://netlab.eco.ufrj.br/_files/ugd/20ab91_5e41074acb6649e2944828dd3c2e15b3.pdf, acesso em dez. 2024.
- [16] R. M. Santini et al., *The Economic and Social Impact of Platform Transparency: Ad Regulation for the Construction of Inclusive Digital Markets*, G20 Brasil (2024), T20 Policy Brief, Task Force 05 – Inclusive Digital Transformation. Disponível em <https://netlab.eco.ufrj.br/post/the-economic-and-social-impact-of-platform-transparency-ad-regulation>, acesso em dez. 2024.
- [17] D. Salles et al., *The Far-Right Smokescreen: Environmental Conspiracy and Culture Wars on Brazilian YouTube*, *Social Media + Society* 9(3), 20563051231196876 (2023).
- [18] L. Scofield, *Meta se Alinha a Trump, Mira Justiça Latina e Facilita Fake News sob Bandeira Anticensura*, Agência Pública (2025). Disponível em <https://apublica.org/nota/meta-se-alinha-a-trump-mira-justica-latina-e-facilita-fake-news-sob-bandeira-anticensura/>, acesso em jan. 2025.
- [19] I. Rupp, *Os Ataques Contra Centros que Estudam Desinformação*, Nexo Jornal (2024). Disponível em <https://www.nexojornal.com.br/expresso/2024/07/05/ataques-centros-desinformacao>, acesso em jan. 2025.
- [20] P. M. Napoli, *In pursuit of ignorance: The institutional assault on disinformation and hate speech research*, *The Information Society* 41(1), 1 (2024).
- [21] N. Oreskes e E. M. Conway, *Defeating the merchants of doubt*, *Nature* 465(7299), 686 (2010).
- [22] J. L. Croissant, *Agnostology: Ignorance and Absence or Towards a Sociology of Things That Aren't There*, *Social Epistemology* 28(1), 4 (2014).
- [23] M. Smithson, *Toward a Social Theory of Ignorance*, *Journal for the Theory of Social Behaviour* 15(2), 151 (1985).
- [24] A. C. Bezerra, M. Schneider e R. Capurro, *O arco teleológico da ética da desinformação: dos pomadistas de Machado de Assis aos negacionistas da pandemia*, *Revista Eletrônica de Comunicação, Informação e Inovação em Saúde* 16(2) (2022).
- [25] C. E. Barros et al., *Negacionismo Climático no YouTube: como argumentos de falsos especialistas repercutem nos comentários da audiência*, in *Anais do 33º Encontro Anual da COMPÓS* (Niterói / Campinas: Galoá, 2024). Disponível em <https://proceedings.science/compos/compos-2024/trabalhos/negacionismo-climatico-no-youtube-como-argumentos-de-falsos-especialistas-reperc?lang=pt-br>, acesso em dez. 2024.
- [26] Z. Baber, *The Science of Empire: Scientific Knowledge, Civilization, and Colonial Rule in India* (SUNY Press, 1996).
- [27] L. Whitt, *Science, Colonialism, and Indigenous Peoples: The Cultural Politics of Law and Knowledge* (Cambridge University Press, 2009).
- [28] M. Schneider, *A Era da Desinformação: Pós-Verdade, Fake News e Outras Armas* (Garamond, Rio de Janeiro, 2022).

- [29] H. Longino, *The Social Dimensions of Scientific Knowledge*, in *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, editado por E. N. Zalta e U. Nodelman (Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2019). Disponível em <https://plato.stanford.edu/archives/sum2019/entries/scientific-knowledge-social/>, acesso em dez. 2024.
- [30] A. Alves-Brito, *Raça, gênero e classe social nas ciências físicas: o silêncio dos homens*, *Cadernos de Astronomia* 5(Especial), 17 (2024).
- [31] E. T. S. Aires, *Mulheres revolucionárias*, *Cadernos de Astronomia* 5(Especial), 124 (2024).
- [32] R. Capurro, *Digital ethics*, in *2009 Global Forum on Civilization and Peace* (The Academy of Korean Studies, 2010), 203–214. Disponível em <https://www.capurro.de/korea.html>, acesso em jan. 2025.
- [33] D. Resnik, *The Ethics of Science: An Introduction* (Routledge, 2005).
- [34] B. E. Rollin, *Science and Ethics* (Cambridge University Press, 2006).
- [35] A. d. C. Costa, *Negacionistas são os outros? Verdade, engano e interesse na era da pós-verdade*, *Principia: An International Journal of Epistemology* 25(2), 305 (2021).
- [36] B. Latour, *Onde Aterrar? Como Se Orientar Politicamente no Antropoceno* (Bazar do Tempo, 2020).
- [37] K. Kahn-Harris, *Denial: The Unspeakable Truth* (Notting Hill Editions, 2018).
- [38] S. Lewandowsky, K. Oberauer e G. E. Gignac, *NASA Faked the Moon Landing—Therefore, (Climate) Science Is a Hoax: An Anatomy of the Motivated Rejection of Science*, *Psychological Science* 24(5), 622 (2013).
- [39] K. S. Seto, *Platform sub-imperialism, Big Data & Society* 11(2) (2024).
- [40] T. Venturini e B. Latour, *The Social Fabric: Digital Footprints and Quali-quantitative Methods*, in *Proceedings of Future en Seine* (2009), 87–103.
- [41] R. Capurro, *Intercultural Information Ethics*, in *Localizing the Internet* (Brill | Fink, 2018), 19–38.
- [42] E. L. Briant e V. Bakir, *Routledge Handbook of the Influence Industry* (Routledge, Abingdon, 2024).
- [43] E. Klein, *The Latest Online Culture War Is Humans vs. Algorithms*, *Wired* (2024). Disponível em <https://www.wired.com/story/latest-online-culture-war-is-humans-vs-algorithms/?s=08>, acesso em jan. 2025.
- [44] A. C. Bezerra, *Regime de informação e lutas de classes: reconstrução de um conceito à luz da crítica da economia política*, *Ciência da Informação em Revista* 10(1/3), 1 (2023).
- [45] N. Hajli, *Ethical Environment in the Online Communities by Information Credibility: A Social Media Perspective*, *Journal of Business Ethics* 149(4), 799 (2018).
- [46] P. Abramo, *Significado Político da Manipulação na Grande Imprensa* (Fundação Persseu Abramo, São Paulo, 1998), p. 12.
- [47] R. M. Santini et al., *Índice de Transparência de Dados das Plataformas de Redes Sociais*, NetLab – Laboratório de Estudos de Internet e Redes Sociais, UFRJ (2024). Disponível em https://netlab.eco.ufrj.br/_files/ugd/20ab91_21a5619439c1411db61c2c56dcaed8a8.pdf, acesso em dez. 2024.
- [48] A. Urgência de Transparência Sobre a Governança de Plataformas Digitais como o “X” (antigo Twitter) no Brasil, NetLab – Laboratório de Estudos de Internet e Redes Sociais, UFRJ (2024). Disponível em <https://netlab.eco.ufrj.br/post/nota-t%C3%A9cnica-a-urg%C3%A1ncia-de-transpar%C3%A1ncia-sobre-a-governan%C3%A7a-de-plataformas-digitais-como-o-x-ant>, acesso em dez. 2024.

- [49] C. O’Neil, *Weapons of Math Destruction: How Big Data Increases Inequality and Threatens Democracy* (Crown Books, 2016).
- [50] P. Medeiros et al., *Greenwashing e Desinformação: A Publicidade Tóxica do Agronegócio Brasileiro nas Redes, Comunicação E Sociedade* **45**, e024008 (2024).
- [51] E. A. van Reijmersdal e E. Rozendaal, *Transparency of digital native and embedded advertising: Opportunities and challenges for regulation and education*, *Communications* **45**(3), 378 (2020).
- [52] A. Ben-David, *Counter-archiving Facebook*, *European Journal of Communication* **35**(3), 249 (2020).
- [53] P. Leerssen et al., *Platform ad archives: promises and pitfalls*, *Internet Policy Review* **8**(4) (2019).
- [54] C. Bouko, P. Van Ostaeyen e P. Voué, *Facebook’s policies against extremism: Ten years of struggle for more transparency*, *First Monday* (2021).
- [55] C. Fuchs, *The Google and Facebook Online Advertising Duopoly*, in *The Online Advertising Tax as the Foundation of a Public Service Internet: A CAMRI Extended Policy Report* (University of Westminster Press, London, 2018).
- [56] S. Zuboff, *A Era do Capitalismo de Vigilância* (Editora Intrínseca, 2021).
- [57] T. Wu, *The Attention Merchants: The Epic Scramble to Get Inside Our Heads* (Knopf, New York, 2016).
- [58] O. Papakyriakopoulos et al., *Social media and microtargeting: Political data processing and the consequences for Germany*, *Big Data & Society* **5**(2), 205395171881184 (2018).
- [59] C. Armitage et al., *Study on the Impact of Recent Developments in Digital Advertising on Privacy, Publishers and Advertisers*, Relatório técnico-científico, European Commission (2023). Disponível em <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/8b950a-43-a141-11ed-b508-01aa75ed71a1/language-en>, acesso em ago. 2024.
- [60] Z. Tufekci, *Engineering the Public: Big Data, Surveillance and Computational Politics*, *First Monday* **19**(7) (2014).
- [61] S. Díaz et al., *Pervasive Human-driven Decline of Life on Earth Points to the Need for Transformative Change*, *Science* **366**(6471), eaax3100 (2019).
- [62] J. Rowlatt, *COP29 Chief Exec Filmed Promoting Fossil Fuel Deals*, BBC (2024). Disponível em <https://www.bbc.com/news/articles/crmzvdn9e18o>, acesso em jan. 2025.
- [63] C. Harlan, *Countries Promised to Ditch Fossil Fuels. Instead They’re Booming*, The Washington Post (2024). Disponível em https://www.washingtonpost.com/climate-environment/2024/11/10/cop29-climate-conference-fossil-fuels-pledge/?utm_campaign=wp_main&utm_medium=social&utm_source=bluesky, acesso em jan. 2025.
- [64] P. Nakamura e A. Orrico, *Petroleiras Empurram “Negacionismo Soft” com Patrocínio de Influencers de Ciência*, Núcleo Jornalismo (2024). Disponível em <https://nucleo.jor.br/reportagem/2024-10-30-influencers-ciencia-negacionismo-light-petroleiras/?ref=prensadao-newsletter>, acesso em jan. 2025.
- [65] T. Coan et al., *Computer-assisted Detection and Classification of Misinformation about Climate Change*, *SocArXiv Preprints* (2021).
- [66] D. Bedford e J. Cook, *Agnotology, Scientific Consensus, and the Teaching and Learning of Climate Change: A Response to Legates, Soon and Briggs*, *Science & Education* **22**(8), 2019 (2013).
- [67] *Extreme Weather, Extreme Content: How Big Tech Enables Climate Disinformation in a World on the*

- Brink, Climate Action Against Disinformation (2024). Disponível em <https://caad.info/analysis/reports/extreme-weather-extreme-content/>, acesso em dez. 2024.
- [68] D. G. Salles et al., *Enchentes no Rio Grande do Sul: Uma Análise da Desinformação Multiplataforma sobre o Desastre Climático*, NetLab – Laboratório de Estudos de Internet e Redes Sociais, UFRJ (2024). Disponível em <https://netlab.eco.ufrj.br/post/enchentes-norio-grande-do-sul-uma-an%C3%A1lise-da-desinforma%C3%A7%C3%A7%C3%A3o-multiplataforma-sobre-o-desastre-clim%C3%A1ti>, acesso em dez. 2024.
- [69] P. M. Krafft e J. Donovan, *Disinformation by Design: The Use of Evidence Collages and Platform Filtering in a Media Manipulation Campaign*, *Political Communication* **37**(2), 194 (2020).
- [70] E. Pariser, *The filter bubble: What the Internet is hiding from you* (Penguin Press, 2011).
- [71] R. Rajão et al., *The Risk of Fake Controversies for Brazilian Environmental Policies*, *Biological Conservation* **266**, 109447 (2022).
- [72] S. Vosoughi, D. Roy e S. Aral, *The spread of true and false news online*, *Science* **359**(6380), 1146 (2018).

O renascimento da relatividade geral: teses e perspectivas historiográficas

Juliana Correia Ferreira, Juliana Youssef e Thiago Hartz

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Resumo

Neste artigo, discutimos a tese, corrente entre físicos e historiadores, de que teria havido, após três décadas de estagnação, um “renascimento” do interesse na relatividade geral nas décadas de 1950 e 1960. Apresentamos duas versões dessa tese, uma que situa a mudança como tendo ocorrido nos anos 1950, a partir da realização das primeiras conferências dedicadas à relatividade geral, e outra que identifica a mudança como tendo ocorrido nos anos 1960, com os avanços da astrofísica. Revisamos as principais defesas dessa tese por físicos e historiadores, recordamos algumas críticas que ela recebeu e analisamos as principais evidências históricas que aparecem nesse debate historiográfico. Por fim, refletimos sobre a validade dessa tese e sobre os desafios atuais na pesquisa sobre a história da relatividade geral.

Abstract

In this article, we discuss the thesis, common among physicists and historians, that, after three decades of stagnation, there was a “renaissance” of interest in general relativity in the 1950s and 1960s. We present two versions of this thesis: one places the shift in the 1950s, following the first conferences dedicated to general relativity, and the other identifies the shift in the 1960s, due to advancements in astrophysics. We review the main arguments supporting this thesis by physicists and historians, recall some of the criticisms it has received, and analyze the key historical evidence that emerges in this historiographical debate. Finally, we reflect on the validity of this thesis and on the current challenges in research on the history of general relativity.

Palavras-chave: história da física, relatividade geral, Albert Einstein, historiografia.

Keywords: history of physics, general relativity, Albert Einstein, historiography.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v6n1.46016](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v6n1.46016)

1 Introdução

A relatividade geral ocupa hoje um papel de destaque entre as teorias físicas. Considerada por uns como a chave para os enigmas do cosmos, por outros como a última interação que resiste à quantização, muitas vezes ela é vista como “a mais pura [das teorias físicas], separada da confusão do resto da física” [1, p. 273]. Trata-se de uma teoria peculiar com uma história igualmente peculiar.

Enquanto a mecânica quântica surgiu na mesma época, o início do século XX, como fruto do esforço coletivo de dezenas de cientistas, a relatividade geral foi, em um primeiro momento, expressão do projeto teórico de um único cientista, Albert Einstein, em contato com alguns poucos amigos e colaboradores, como Marcel Grossmann. Aos poucos, outros cientistas, sobretudo astrônomo-

mos e matemáticos (por exemplo, Arthur Eddington, Georges Lemaître, David Hilbert, Hermann Weyl, Alexander Friedmann e Élie Cartan), foram se interessando pela teoria, porém sem que com isso se formasse uma comunidade de pesquisadores em relatividade geral. A maioria dos desenvolvimentos dessa teoria nos anos 1930 ocorreu ainda em interação com Einstein, por colegas, alunos e colaboradores, como Nathan Rosen, Peter Bergmann, Leopold Infeld e Banesh Hoffmann.

Depois da guerra, a situação começou a mudar, a tal ponto que físicos e historiadores propuseram a tese de que a relatividade geral teria passado por um processo de renascimento nos anos 1950 e 1960. Neste artigo, discutiremos em detalhes a validade dessa tese, revisando os principais argumentos apresentados por físicos e por historiador-

res no sentido de defendê-la ou de criticá-la. Faremos essa discussão por meio do levantamento de alguns trabalhos sobre a história da relatividade geral que foram publicados nos últimos cinquenta anos, sem pretendermos, de forma alguma, sermos exaustivos nesse levantamento. Defenderemos, ao final do artigo, que é necessário manter um certo ceticismo sobre a tese do renascimento, em particular se entendida em um sentido que englobe tanto aspectos sociológicos quanto aspectos do desenvolvimento da teoria.

A estrutura do artigo é a seguinte. Na seção 2, veremos como a história da relatividade geral se consolidou como uma área de pesquisa dentro da comunidade de história da física. Nas seções 3, 4 e 5, veremos as diversas propostas de como periodizar a história da relatividade geral, questão que é central na caracterização do eventual renascimento dos anos 1950 e 1960. Por fim, na seção 6, apresentaremos alguns dos desafios atuais da pesquisa sobre a história da relatividade geral.

2 A escrita da história da relatividade geral

Todas as comunidades de cientistas escrevem a história das suas respectivas áreas de pesquisa. Com a relatividade geral não foi diferente. Os primeiros livros didáticos de relatividade geral – como o livro de Max Born de 1920 [2]; o artigo escrito pelo jovem Wolfgang Pauli para o volume da *Encyklopädie der Mathematischen Wissenschaften* (Enciclopédia de Ciências Matemáticas) editado por Arnold Sommerfeld e publicado em 1921 [3]; o livro do matemático brasileiro Alceu Amoroso Costa de 1922 [4,5]; e até mesmo o tratamento mais matemático de Hermann Weyl de 1918 [6] – são fortemente marcados por uma perspectiva histórica, que busca explicar as limitações da mecânica clássica e as soluções encontradas por Einstein e outros entre 1905 e 1915.

Em 1949, o filósofo Paul Arthur Schilpp editou, para a coleção de livros *Living Philosophers*, um volume em homenagem a Einstein intitulado *Albert Einstein: Philosopher-Scientist* [7]. Quase todos os capítulos são baseados em reminiscências e em narrativas históricas. Alguns deles, escritos por autores como o filósofo Hans Reichenbach e o físico Leopold Infeld, refletiam especificamente

sobre as contribuições de Einstein para a compreensão da gravitação e do aspecto geométrico do espaço-tempo (para mais informações sobre os autores desse livro, ver [8]).

Foi somente na década de 1980 que historiadores da física começaram a escrever sistematicamente sobre a história da relatividade geral. Isso aconteceu por diversos fatores, mas sobretudo devido ao *Einstein Papers Project*, concebido após o falecimento de Einstein, em 1955, e iniciado por John Stachel no final dos anos 1970 [9].

Tinha havido, na década anterior, um influente projeto de história da física quântica, o *Archive for the History of Quantum Physics*. Conduzido por Thomas Kuhn entre 1962 e 1967, esse projeto coletou, catalogou e microfilmou as correspondências de todos os fundadores da física quântica, iniciando com isso, no final dos anos sessenta, a pesquisa profissional em história da física quântica [10]. O *Einstein Papers Project* teve objetivo similar. Stachel e colaboradores organizaram, traduziram e comentaram as correspondências e os manuscritos de Einstein. O projeto, muito bem-sucedido, deu origem, a partir de 1987, à coleção de livros *The Collected Papers of Albert Einstein*, editada pela *Princeton University Press*.

A disponibilização dessas fontes primárias levou a uma série de pesquisas históricas e, ainda mais, fomentou o surgimento de uma comunidade de especialistas na obra de Einstein e, em particular, na história da teoria da relatividade. Participaram do projeto historiadores e filósofos da física hoje renomados, tais como Martin Klein, Robert Schulmann, Anne J. Cox, Michel Janssen, Don Howard, Jürgen Renn, Tilman Sauer, Daniel Kennefick, John Norton, Joren van Dongen, entre outros. A produção dessa comunidade pode ser encontrada, em particular, na coleção de livros *Einstein Studies*, editados pela *Birkhäuser* inicialmente em colaboração com o *Center for Einstein Studies* da Universidade de Boston.

Para mencionar apenas um desses trabalhos, Norton publicou, em 1984, uma detalhada análise do caminho de Einstein até as equações de campo da relatividade geral – posteriormente denominadas “equações de Einstein” –, divulgadas publicamente em novembro de 1915 [11]. Norton não foi o primeiro a estudar esse problema histórico. Dois anos antes, o físico e historiador Abraham

Pais publicara uma detalhada biografia científica de Einstein – vencedora do *U.S. National Book Award in Science* de 1983 –, na qual analisara o mesmo problema [12]. Entretanto, Pais se baseara somente nas correspondências e nos artigos publicados, o que fornecia uma visão incompleta do caminho de Einstein. Norton, por sua vez, se debruçou sobre o caderno pessoal de Einstein do início do período em que este esteve em Zurique, o chamado “caderno de Zurique” (*Zurich notebook*). O caderno, escrito em 1912 e 1913, tem 84 páginas, das quais 57 são sobre relatividade geral [13, p. 88]. Trata-se de uma fonte particularmente intrigante, uma vez que nela Einstein já tinha obtido, por um caminho tortuoso, as equações de campo corretas da relatividade geral, ainda que elas só tenham vindo a público em novembro de 1915. O que é ainda mais intrigante é que em 1913, depois de escrever o caderno de Zurique, Einstein publicou em colaboração com o matemático Marcel Grossmann um esboço (em alemão, *Entwurf*) propondo certas equações de campo da teoria que estão erradas. O caminho percorrido por Einstein entre 1913 e 1915 passou por reconhecer o erro e retornar às equações obtidas no caderno de Zurique. Conforme Norton observa, “a história por trás das reviravoltas aparentemente erráticas de Einstein neste último mês [antes de chegar às equações de campo corretas da teoria da relatividade geral, em novembro de 1915,] permaneceu sem ser contada e seria, talvez, incontável sem as pistas dadas pelo caderno de Zurique” [11, p. 257].

No início dos anos 1990, foi desenvolvido no Instituto Max Planck para o Desenvolvimento Humano, com apoio do Senado de Berlim, um influente grupo de trabalho intitulado *Arbeitsstelle Albert Einstein* (que, em uma tradução livre, significa Grupo de Pesquisa Albert Einstein), sob a direção de Peter Damerow e Jürgen Renn [14]. Esse projeto foi uma das iniciativas que levaram à criação, em 1994, do Instituto Max Planck para a História das Ciências, em Berlim. Uma das ênfases do projeto foi a análise do caderno de Zurique, conforme explica Renn ao descrever as pesquisas desenvolvidas no âmbito do projeto (ver também [15]):

Grande parte do nosso trabalho enfocou a questão de como Einstein, no período entre 1913 e 1915, foi capaz de superar os obstá-

culos que a princípio o impediram de perceber que o *Ansatz* correto era aquele obtido em seu caderno [de Zurique] e não a teoria que ele publicou em 1913. A resposta que encontramos para essa questão levou à percepção surpreendente de que, ao contrário do que era comumente aceito [pelos historiadores até os anos 1990], o longo intervalo entre a publicação da equação de campo errônea [em 1913] e o retorno à equação correta no final de 1915 não foi simplesmente um período de estagnação. Foi, antes, um período durante o qual Einstein chegou a uma série de percepções que criaram as pré-condições cruciais que tornaram possíveis os eventos dramáticos de novembro de 1915. Esse resultado tornou evidente que o estabelecimento e a estabilização dos novos conceitos físicos que surgiram com a relatividade geral exigiram primeiro uma integração de conhecimentos físicos adicionais e um grau de elaboração do formalismo matemático que foi muito além de [meramente] encontrar a equação de campo correta. [14, vol. 1, p. 4]

Esse estudo do caderno de Zurique pelo grupo liderado por Renn levou à publicação, em 2007, desse caderno com extensos comentários de diversos historiadores [14] (ver também [13, 16]).

Paralelamente a esses esforços ocorridos nos Estados Unidos e na Alemanha, ocorria na França uma renovação dos interesses sobre a história da relatividade geral, cujos maiores expoentes foram o físico e historiador Jean Eisenstaedt [17, 18], cuja obra discutiremos nas próximas seções, e o físico e filósofo Michel Paty [19, 20].

Essa comunidade de historiadores e filósofos da física dedicados à história da relatividade geral, cujos trabalhos foram publicados entre a década de 1980 e os primeiros anos do século XXI, estabeleceu os problemas, as questões e os referenciais teóricos a partir dos quais pensamos hoje a história da relatividade geral.

Essa renovação do interesse pela relatividade geral sofreu também a influência de outros fatores. Em 1993, Russell Hulse e Joseph Taylor Jr. receberam o prêmio Nobel de física pela descoberta dos pulsares binários em 1974. Essa foi a primeira vez que esse prêmio foi dado a uma pesquisa sobre gravitação. Cinco anos depois, ocorreu a surpreendente descoberta da expansão ace-

lerada do universo, que também levou a uma premiação pelo comitê Nobel de física, desta vez em 2011 aos físicos Saul Perlmutter, Brian Schmidt e Adam Riess. A primeira detecção de ondas gravitacionais, realizada em setembro de 2015 e anunciada publicamente em fevereiro de 2016, voltou a colocar a teoria da relatividade geral nas primeiras páginas dos jornais, como havia ocorrido após a observação do eclipse de 1919 [12]. Essa detecção levou a duas premiações pelo comitê Nobel de física: em 2017, para Rainer Weiss, Barry Barish e Kip Thorne, pelas suas contribuições para a detecção de ondas gravitacionais; e, em 2020, para Roger Penrose, pela demonstração de que a formação de buracos negros pode ser vista como uma predição robusta da teoria da relatividade geral (o prêmio desse ano foi dividido com Reinhard Genzel e Andrea Ghez, pela descoberta de um objeto compacto supermassivo no centro de nossa galáxia).

Além dessas premiações, houve duas efemérides que colocaram a teoria da relatividade na pauta do dia. Em 2005, comemorou-se internacionalmente o centenário do *annus mirabilis* de Einstein, ano em que ele publicou, entre outros trabalhos, seus dois primeiros artigos sobre a relatividade especial. Dez anos depois, em 2015, comemorou-se o centenário da relatividade geral, cuja importância foi amplificada enormemente pelo anúncio, no início do ano seguinte, da primeira detecção de ondas gravitacionais, que mencionamos acima.

Essa valorização da teoria da relatividade geral e da sua história nos últimos cinquenta anos fez com que se consolidasse uma vasta literatura sobre o tema, escrita tanto por físicos quanto por historiadores. Um dos problemas com que esses autores se depararam foi o de periodizar a história dessa teoria, assunto que discutiremos a seguir.

3 O problema da periodização da história da relatividade geral

Escrever a história passa necessariamente por periodizar, ou seja, dividir um intervalo de tempo em subintervalos que guardam uma certa unidade de sentido e cujas passagens, de um a outro, trazem alguma mudança ou ruptura significativa. A periodização não é arbitrária, ela reflete uma es-

colha de enfoque por parte de quem a faz [21]. Assim, do ponto de vista experimental, a história de uma determinada área da física se dividirá em certos períodos. Do ponto de vista da teoria ou da instrumentação, as divisões serão diferentes [22]. Tendo isso em vista, é compreensível que diferentes autores tenham proposto diferentes periodizações para a história da relatividade geral. O importante é que cada periodização seja consistente com o enfoque adotado pelo respectivo autor.

O mais influente trabalho de periodização da história da relatividade geral foi publicado por Jean Eisenstaedt em 1986 [17]. Intitulado, em francês, “A relatividade geral em maré baixa: 1925–1955”, o artigo propõe que a teoria da relatividade passou, nesse período, por um processo de marginalização na comunidade de física, somente retomando sua importância a partir de meados dos anos 1950.

Essa narrativa de Eisenstaedt ecoa as reminiscências de diversos físicos que viveram o período. Por exemplo, recordando das dificuldades que encontrara no início dos anos 1950 ao tentar consolidar uma carreira profissional sobre relatividade geral, o físico Bryce DeWitt afirmou “Vocês não fazem ideia de quão hostil a comunidade de física era, naquele tempo, com as pessoas que estudavam relatividade geral” [23, p. 414]. Em seguida, complementou:

Em meados da década de 1950, Sam [Samuel] Goudsmit, então editor-chefe do Physical Review, divulgou que um editorial em breve seria publicado avisando que [a revista] não mais [aceitaria] “artigos em gravitação ou em outra teoria fundamental”. Que esse editorial não tenha sido divulgado se deve ao trabalho de John Wheeler nos bastidores. [23, p. 414]

Assim, Eisenstaedt mostra, com base em reminiscências dos cientistas e em alguns documentos de época, que havia de 1925 a 1955 um sentimento de que a teoria da relatividade geral se encontrava posta no ostracismo, tanto pela sua pequena capacidade preeditiva – havia somente os famosos três testes clássicos da relatividade geral – quanto pela dificuldade em destronar a gravitação newtoniana, que continuava a ser utilizada no dia a dia da astronomia. Ou seja, apesar da

recepção inicial calorosa que a teoria da relatividade geral teve, das críticas técnicas e das respostas elegantes que foram dadas, e do entusiasmo por vezes passional que a teoria despertou em alguns físicos, “nos anos vinte, a teoria [da relatividade geral] entra em um período extremamente curioso de sua história: uma espécie de travessia do deserto” [17]. Refletindo sobre o que já era sabido, em 1986, sobre a história da relatividade, ele coloca a seguinte questão:

Conhecemos a opinião do comitê do Nobel, que ignorou todas os trabalhos de Einstein sobre a relatividade, a oposição francamente racista dos físicos nazistas, a incompreensão de alguns outros (os físicos franceses, por exemplo), mas também o apoio entusiastado, por vezes incondicional, de muitos [outros físicos]. Mas conhecemos menos sobre o pesado esquecimento, o profundo silêncio, em que a relatividade geral irá se afundar, em seguida, por um longo tempo. (...) Quais são os elementos, as razões, as consequências desse amplo descontentamento que cobre grande parte da história desta teoria decididamente singular e representa um factor obviamente essencial? [17, p. 115–116]

Em seguida, Eisenstaedt mostra que, com a conferência intitulada *Cinquenta Anos da Teoria da Relatividade*, organizada pelo físico André Mercier em Berna, na Suíça, em 1955, o quadro mudou, fazendo com que a teoria fosse, pouco a pouco, ganhando reconhecimento, congregando uma comunidade e definindo um conjunto de problemas em aberto. Voltaremos a essa conferência na seção 5.

No mesmo ano de publicação do artigo de Eisenstaedt, foi publicada a primeira edição do livro *Was Einstein Right?*, do físico Clifford M. Will. Por se tratar de um livro de divulgação científica, Will se permite pintar a situação com tintas mais coloridas. No primeiro capítulo, intitulado “O renascimento da relatividade geral”, ao mencionar a descoberta dos quasares pelos astrônomos Thomas Matthews e Allan Sandage, Will afirma:

Essa descoberta notável concluiu o ano acadêmico de 1959-60, pouco mais de um ano após as observações por radar de Vênus em conjunção inferior. Foi um ano notável para

a relatividade geral, porque continha todos os sinais de que um renascimento estava prestes a começar. [24, p. 7]

A expressão “renascimento da relatividade geral”, ainda que impactante, não se tornou imediatamente corrente entre físicos. Ela só veio a se popularizar quando George Ellis, Antonio Lanza e John Miller organizaram um evento, em 1992, e editaram um volume, em 1993, em homenagem aos 65 anos de Dennis Sciama que foram intitulados *The Renaissance of General Relativity and Cosmology* [25]. O título não veio do livro de Will, mas sim de um artigo, de 1968, e de um capítulo de livro, de 1971, ambos homônimos e escritos por Sciama e intitulados *The recent renaissance of observational cosmology* [26, 27].

Ainda que Eisenstaedt, Will, Elis, Landa e Miller indiquem uma mudança na atitude da comunidade de físicos com relação à relatividade geral ocorrida nos anos 1950 e 1960, o quadro que eles delineiam é bastante distinto. Will, Elis, Landa e Miller estão preocupados com os usos da relatividade geral na astrofísica nos anos 1960. Conforme observa Miller:

No renascimento da relatividade geral e da cosmologia, que é nosso assunto aqui, um dos temas centrais tem sido o estudo do colapso gravitacional relativístico, de buracos negros e de estrelas de nêutrons. No início do meu trabalho de pesquisa, Dennis [Sciama] enfatizou para mim o papel que seria desempenhado nisso pela computação numérica e ele sugeriu que eu fosse nessa direção, apesar de uma certa relutância inicial da minha parte. Aplicar a relatividade geral a problemas reais no mundo real é um negócio complicado, mas gradualmente entrou no *mainstream* da astrofísica a ponto de agora não parecer mais uma curiosidade exótica, mas atingiu a maioria como um membro igual da coleção de teorias físicas que são colocadas em serviço na tentativa de explicar como as coisas funcionam. [28, p. 73]

Eisenstaedt, por sua vez, mais versado em uma reflexão tipicamente histórica, transita com mais clareza entre as evidências documentais e apresenta um quadro mais rico sobre os rumos que a teoria da relatividade tomou no decorrer do século passado, recorrendo a uma compilação de

artigos científicos, relatos, cartas, matérias de jornal e reminiscências que dão apoio à sua tese. Seu artigo se firmou como o mais influente trabalho de periodização da história da relatividade geral e como a primeira sólida caracterização do renascimento pelo qual essa teoria teria passado na década de 1950, ainda que ele não utilize em momento algum a expressão “renascimento”. Desde então, todos que escrevem sobre a história da relatividade geral precisam se posicionar sobre a periodização proposta por Eisenstaedt, seja para concordar ou para discordar.

Em um primeiro momento, a reação dos historiadores foi de adesão unânime à periodização por ele proposta, buscando somente aprimorá-la e complementá-la. Assim, o físico e historiador David Kaiser, referindo-se aos anos 1960 como o período de “formação dos ‘relativistas do renascimento’” (no original, “*training of ‘renaissance relativists’*”), sugeriu uma possível periodização no ensino de relatividade geral a partir de uma análise dos livros didáticos da área. Ele apresenta sua perspectiva historiográfica nos seguintes termos:

A partir de um início muito modesto [até os anos 1940], uma comunidade de físicos dedicados ao estudo da relatividade geral foi formada [nos anos 1950, 1960 e 1970]. Ao longo desse período de crescimento explosivo no número de praticantes, no entanto, a teoria da relatividade geral não permaneceu uma teoria física fixa e estática. Em vez disso, ela foi retrabalhada, e seus métodos de cálculo reconsiderados. (...) No processo, diferenças na prática da física gravitacional surgiram em todos os níveis: conceitualmente, ontologicamente, computacionalmente, pedagogicamente e sociologicamente. [29, p. 323]

Dante desse quadro, ele propõe que os historiadores se voltem à análise dos modos como a relatividade geral foi ensinada:

Afinal, a teoria, [se pensada] como [uma] ‘prática’, é algo que deve ser praticado. O crescente número de participantes em associações e conferências de relatividade geral durante a década de 1970 exigiu esforços intensos para treinar os estudantes nas especificidades computacionais da física gravitacional. Uma atenção cuidadosa às palestras, aos livros didáticos e à sua reescrita durante esse

período, e aos problemas atribuídos aos alunos de pós-graduação como parte integrante de seu treinamento, fornece um meio para traçar a reconstituição da relatividade geral durante as décadas intermediárias deste século. [29, p. 324]

Partindo desses pressupostos, ele apresenta uma análise comparativa das formas como a relatividade geral foi ensinada, com particular atenção à *Stafford Little Lectures* lecionadas por Einstein na Universidade de Princeton em 1921 [30]; ao livro didático de Peter Bergmann, cuja primeira edição foi publicada em 1942 [31]; às notas de aula de um curso lecionado por Richard Feynman na Caltech em 1962–1963 e publicadas na forma de livro em 1995 [32]; e às notas de aula de um curso lecionado por Sidney Coleman na Universidade de Cornell a partir de 1967, publicadas recentemente [33]. Kaiser argumenta que, nos anos 1960, a concepção geométrica da relatividade geral, até então dominante, passou a ter que conviver com uma concepção dinâmica, baseada em métodos lagrangianos. Esse processo contribuiu para que a teoria da relatividade geral fosse esvaziada de seu conteúdo geométrico, valorizando a aproximação da relatividade geral com a teoria de campos. Conforme ele observa, “na década de 1960, defesas de ambas as abordagens da relatividade geral podem ser encontradas, embora com influência crescente dos teóricos de campo, que adotavam a abordagem lagrangiana” [29, p. 323].

Em 2007, o físico e historiador Daniel Kennefick, então um dos editores do *Einstein Papers Project*, publicou o livro *Traveling at the Speed of Thought: Einstein and the Quest for Gravitational Waves*, obra que contribuiu significativamente para a compreensão do período 1925–1955. Ele observa que

até o final dos anos cinquenta, a relatividade geral manteve uma posição marginal dentro da comunidade da física, com uma pequena comunidade de pesquisa espalhada por muitos países (...). O resultado foi que a comunicação entre relativistas era fraca ou inexistente e exacerbava os problemas decorrentes da falta de uma base institucional para o assunto. Não havia periódicos dedicados ao tema e nenhuma conferência ou reunião

voltada à relatividade geral que pudesse fornecer espaços para os pesquisadores tomarem conhecimento do trabalho uns dos outros. Por essa razão, grande parte do trabalho feito sobre ondas gravitacionais (e, de fato, sobre o problema do movimento, relevante para sistemas de estrelas binárias) no entreguerras foi simplesmente esquecida na época em que a relatividade começou a passar por seu renascimento após a conferência de Berna (...). [34, p. 107–108]

Kennefick analisa a história dos debates sobre ondas gravitacionais e sobre o problema da determinação do movimento de sistemas binários. Ele mostra que o período de “maré baixa” dos anos 1925–1955 foi marcado por uma significativa atividade na área, porém de modo quase que isolado, a tal ponto que algumas vezes resultados fundamentais foram descobertos por alguns cientistas e depois redescobertos independentemente por outros cientistas anos depois – como ocorreu, por exemplo, com a existência de ondas gravitacionais –, sem que uns conhecessem os trabalhos dos outros. Essa análise mostra claramente a inexistência de uma comunidade de relatividade geral nos anos 1920, 1930 e 1940.

A partir de 2015, devido às comemorações do centenário da relatividade geral, um número crescente de historiadores tem se dedicado ao tema. Parte considerável dessas pesquisas foi realizada ou fomentada pelo departamento dirigido por Jürgen Renn no Instituto Max Planck para a História das Ciências e ajudou a consolidar a tese de que houve um renascimento da relatividade geral na década de 1950. Alexander Blum, Roberto Lalli e Renn buscaram precisar melhor o significado desse renascimento [35, 36]. Também editaram duas coletâneas: um volume especial do periódico *European Physical Journal H* intitulado *The Renaissance of Einstein’s Theory of Gravitation*, em colaboração com Domenico Giulini [37]; e um livro da coleção *Einstein Studies* intitulado *The Renaissance of General Relativity in Context* [38]. Blum também editou, em colaboração com Dean Rickles, uma coletânea de artigos sobre a quantização da relatividade geral publicados no período 1916–1950 [39]. Rickles escreveu um livro analisando os diversos projetos da gravitação quântica até 1956 [40]. Por fim, Lalli escreveu um livro analisando a formação da comunidade

de relatividade geral nos anos 1950 e 1960 [41]. Voltaremos a esses trabalhos nas próximas seções.

4 Uma periodização da relatividade geral

A robustez dessa literatura consolidada sobre a área fez com que se firmasse na comunidade de história da relatividade geral, quase que unanimemente, a seguinte periodização.

De 1907 a 1915, Einstein desenvolveu as ideias que viriam a conformar a teoria da relatividade geral. Podemos fazer, esquematicamente, uma separação dos esforços de Einstein em três partes. Primeiro, ele buscou listar os princípios teóricos que ele esperava que poderiam guiá-lo até a teoria da relatividade geral e também conceber experimentos de pensamento que permitissem sondar a consistência da teoria [42, 43]. Segundo, ele buscou analisar as consequências observacionais e experimentais da nova teoria, tanto no sentido de dar conta de explicar observações já conhecidas – como a precessão anômala do periélio de Mercúrio – quanto no sentido de predizer novos fenômenos – em particular, o chamado *redshift* gravitacional e a deflexão da luz por um campo gravitacional, que seria, segundo a sua teoria, o dobro da prevista pela teoria newtoniana da gravitação. Por fim, com o auxílio de seu colega e amigo Marcel Grossmann, Einstein buscou se aprofundar no estudo do cálculo tensorial, ramo da matemática que se mostrou particularmente útil na formulação da nova teoria.

De 1915 a 1925, houve uma boa recepção da teoria de Einstein, sobretudo entre astrônomos – como Arthur Eddington e Georges Lemaître – e matemáticos – como David Hilbert, Hermann Weyl, Alexander Friedmann e Élie Cartan. A observação, no eclipse de 1919, da deflexão da luz prevista por Einstein transformou o físico em uma celebridade, com direito a manchetes de jornais e revistas [12, 44, 45]. A observação do *redshift* gravitacional foi menos espetacular, sendo objeto de inúmeras disputas no decorrer das décadas. A primeira medida foi feita pelo astrônomo Walter Adams em 1925.

De 1925 a 1955, as abordagens à relatividade geral se dividiram em quatro grandes grupos. Parte dos físicos e matemáticos, sob influência das agendas de pesquisa definidas por Einstein,

se voltaram às teorias unificadas de campo – para uma história pormenorizada das primeiras tentativas de unificação da gravitação com o eletromagnetismo por Weyl, em 1918, do interesse de Einstein pelo tema, a partir de 1925, e da consolidação de um projeto de pesquisa em torno desse problema, veja as cuidadosas análises de Vladimir Vizgin, Hubert Goenner, Jeroen van Dongen e, mais recentemente, Franco Cardin e Rossana Tazzioli [46–50]. Conforme Goenner mostra, esse projeto de pesquisa se beneficiou do prestígio de três dos seus participantes, então já laureados com o prêmio Nobel por outros trabalhos: Louis de Broglie, Erwin Schrödinger e o próprio Einstein. Um segundo grupo se voltou a tentativas de estudar possíveis aspectos quânticos do campo gravitacional, como Léon Rosenfeld, Matvei Bronstein, Jacques Solomon e, após a guerra, Bryce DeWitt [39,51–56]. Um terceiro grupo, formado sobretudo por astrônomos e matemáticos, voltou-se às aplicações da teoria da relatividade geral à cosmologia [36,57]. Um quarto grupo se interessou pelos aspectos matemáticos e conceituais da teoria, buscando extrair do formalismo matemático da relatividade geral as suas implicações e as suas formulações alternativas, tarefa essa que, devido à não linearidade das equações de Einstein, não era matematicamente trivial. Foi nesse contexto que ocorreram a predição e o questionamento da existência de ondas gravitacionais [34]. Foi também nesse contexto que Einstein, Infeld e Hoffmann mostraram que a dinâmica de um sistema de massas puntiformes está contida nas equações de Einstein, o que faz com que a relatividade geral difira conceitualmente do eletromagnetismo, no qual a expressão da força de Lorentz tem que ser adicionada às equações de Maxwell, sem ser destas deduzida [55]. Ainda no quarto grupo, Peter Bergmann e Paul Dirac desenvolveram, no final dos anos 1940, novas técnicas para lidar com sistemas vinculados, as quais permitiram, em 1958, a obtenção de um formalismo hamiltoniano para a relatividade geral por Dirac [58].

De 1955 a 1974, ocorreu o processo de consolidação de uma comunidade de pesquisa em relatividade geral. Alguns autores caracterizam esse período como um renascimento da relatividade geral, enquanto outros o interpretam como uma continuidade dos numerosos esforços de compre-

ensão da teoria iniciados nos períodos anteriores. Discutiremos esse período em mais detalhes nas próximas duas seções.

De 1974 em diante, houve a consolidação final de uma comunidade dedicada à relatividade geral e às suas aplicações à cosmologia e à astrofísica. Após a observação dos pulsares binários, houve a clareza de que a teoria da relatividade geral é imprescindível na compreensão dos fenômenos gravitacionais. Hoje, alguns dos grandes problemas em aberto da física dizem respeito à relatividade geral e, de modo mais amplo, à gravitação, tais como, por exemplo, o desafio de compreender a energia escura e a matéria escura, que juntas contribuem, segundo se supõe atualmente, para cerca de 95% da massa do universo. A relatividade geral se firmou, então, como uma das áreas centrais de pesquisa em física, posição que ocupa até hoje.

5 A caracterização do renascimento da relatividade geral

Conforme vimos, há duas teses sobre o renascimento da relatividade geral: uma que o situa nos anos 1950, a partir da realização das primeiras conferências dedicadas à relatividade geral, e outra que o situa nos anos 1960, como consequência da pesquisa em astrofísica. A primeira tem sido a preferida pelos historiadores da física, e é sobre ela que nos concentraremos nesta seção. Vejamos, então, em mais detalhes, a caracterização do renascimento da relatividade geral que tem sido adotada, explorada, desenvolvida e debatida por esses historiadores.

A relatividade geral passou, ao longo de sua história, por mudanças em diversas dimensões, tais como social, institucional, teórica, observational e experimental. Assim, cada historiador tem enfatizado mais ou menos cada uma dessas dimensões ao defender ou criticar a tese do renascimento, as quais analisaremos separadamente.

Até o ano de 1955, não tinha havido nenhuma conferência de relatividade geral. Isso é um forte indicativo de que não havia uma comunidade dessa trabalhando no tema. Essa hipótese se confirma ao constatarmos que ainda não havia nenhum periódico dedicado exclusivamente à relatividade geral. Ademais, os periódicos de amplo escopo, como o *Physical Review*, talvez tivessem

ressalvas a trabalhos nessa área, o que é evidenciado no relato de Bryce DeWitt, mencionado anteriormente, e em outros relatos similares daquele período. A primeira dimensão do renascimento foi, portanto, o estabelecimento de uma comunidade dedicada à relatividade geral – processo que foi estudado em detalhes pelo historiador Roberto Lalli [41].

O estabelecimento dessa comunidade ocorreu primeiramente com a realização de conferências regulares – em 1955, 1957, 1959, 1962 e 1965, para mencionar as cinco primeiras –, nas quais praticamente todos os físicos trabalhando sobre o tema puderam se encontrar. Como ocorre em toda comunidade que está se consolidando, a qualidade dos trabalhos variava muito. Alguns progressos notáveis foram relatados nesses eventos por físicos e matemáticos, porém nem todos os trabalhos apresentados eram suficientemente precisos ou mesmo corretos. O físico Richard Feynman compareceu às conferências de 1957 e 1962. Desta última, escreveu uma carta à sua esposa, em seu estilo inconfundível de escrita, dizendo:

Há muita “atividade no campo [da gravitação]” hoje em dia, mas essa “atividade” é principalmente para mostrar que a “atividade” anterior de outra pessoa resultou em um erro ou em nada útil ou em algo promissor. É como um monte de vermes tentando sair de uma garrafa rastejando uns sobre os outros. Não é que o assunto seja difícil; é que os homens bons estão ocupados em outro lugar. Lembre-me de não vir a mais nenhuma conferência sobre gravidade! [59, p. 88–93] (ver também [32, p. xxvii]).

Essa carta foi publicada no seu livro *What Do You Care What Other People Think?*, de 1988. Quando John Preskill e Kip Thorne mostraram-na para DeWitt, em 1994, este respondeu em uma carta:

Posso certamente simpatizar com a reação de Feynman à conferência de Varsóvia [de 1962], pois tive sentimentos semelhantes. (Tenho uma lembrança vívida dele desabafando suas frustrações lá, dando em Ivanenko uma das maiores broncas que já ouvi.) Mas aqueles que publicam sua carta particular sem dar o quadro completo prestam um desserviço à verdade histórica. Embora ele tenha

achado que parte da discussão na conferência de Chapel Hill [de 1957] era sem sentido (assim como eu), acho que ele se divertiu razoavelmente lá. Lembro-me que ele ficou muito interessado quando mostrei que sua integral de caminho para um espaço de configuração curvo leva a uma equação de Schrödinger com um termo escalar de Ricci. As pessoas naquela conferência (como Bondi, Hoyle, Sciama, Møller, Rosenfeld e Wheeler) não eram estúpidas e conversaram com ele de forma inteligente. [32, p. xxvii]

O quadro delineado por DeWitt é, sem qualquer dúvida, mais preciso do que aquele delineado por Feynman, que era afeito a exagerar nas tintas. Mas ambas as cartas indicam que a comunidade ainda não tinha encontrado, naquele momento, problemas e soluções que fossem coletivamente compartilhados – que é exatamente o que caracteriza uma comunidade científica [60].

O primeiro desses eventos, realizado em Berna, na Suíça, em julho de 1955, foi concebido pelo físico suíço André Mercier e organizado por ele em colaboração com Wolfgang Pauli. Observando o que estava acontecendo na física de partículas, que se juntava então em grandes projetos – por exemplo, o CERN – que foram denominados *big science*, Mercier concluiu que era necessário fazer algo nessa mesma direção para a pesquisa em gravitação e decidiu que um primeiro passo seria reunir um grupo de pessoas interessadas no tema [61, p. 112]. Os aniversários de cinquenta anos da teoria da relatividade especial e de quarenta anos da teoria da relatividade geral pareciam o pretexto ideal. A participação de Einstein era esperada, porém ele faleceu meses antes. A conferência reuniu oitenta e nove participantes durante seis dias. Ainda que houvesse jovens físicos, a maioria era da geração de Mercier, ou seja, estava trabalhando na área há muitos anos.

Na mesma época, diversos novos centros de pesquisa em física teórica estavam se estabelecendo. Um deles era o *Institute for Field Physics* na Carolina do Norte, criado por Bryce DeWitt e Cécile DeWitt-Morette em setembro de 1955 [40, 62–65]. Inspirados no evento de Berna, eles organizaram no novo instituto, em janeiro de 1957, a conferência *The Role of Gravitation in Physics*, cujo título já expressa o problema que estava em questão, a saber, compreender o novo

papel que a relatividade geral viria a ocupar na física. Conforme observa o filósofo e historiador Dean Rickles,

a conferência Berna foi dominada por físicos mais velhos e estabelecidos. Em seu próprio relatório sobre a conferência de Chapel Hill, [Agnew H.] Bahnson [o filantropo que custeou o projeto de Chapel Hill] observou que havia conversado com um físico (não identificado) que também havia participado da conferência de Berna, segundo o qual a conferência de Chapel Hill tinha “maior informalidade” e que “os participantes mais jovens contribuíram para mais discussão e troca de informações”. A conferência de Chapel Hill sobre o papel da gravitação na física, que aconteceu apenas dois anos depois [da conferência de Berna], fez pela relatividade geral e pela gravitação o que [a conferência de] Shelter Island fez pela eletrodinâmica quântica. A conferência de Chapel Hill foi uma ruptura genuína com a conferência de Berna, tanto em termos de organização quanto de conteúdo, mas ainda mais em termos de espirito. [63, p. 19–20]

De fato, a maioria dos participantes da conferência de 1957 havia terminado o doutorado após a guerra. Essa conferência foi sucedida por outra conferência em Royaumont, na França, em 1959, organizada por André Lichnerowicz e Marie-Antoinette Tonnellat. Ele era um matemático renomado e trabalhava sobre a relatividade há mais de trinta anos; ela era uma ex-orientanda de Louis de Broglie e havia se interessado pela relatividade geral durante a guerra, ou seja, trabalhava sobre o tema há quase vinte anos. Após um hiato de três anos, ocorreu em 1962, na cidade de Jabłonna, na Polônia, a terceira conferência, organizada por Leopold Infeld, que havia sido um colaborador de Einstein. Ainda que os organizadores dessas conferências não fossem novos na área, os participantes eram cada vez mais jovens, refletindo o grande número de pessoas que tinham feito ou estavam fazendo doutorado sobre relatividade geral no final dos anos 1950 e início dos anos 1960.

Além das conferências periódicas, uma outra iniciativa foi fundamental para a constituição de uma comunidade científica dedicada à relativi-

dade geral. Na conferência de 1959, foi criado o *Committee on General Relativity and Gravitation*, cujo objetivo era, nas palavras de Mercier,

coordenar a colaboração em trabalhos científicos no campo da relatividade geral, gravitação e assuntos relacionados, especialmente para ajudar na organização de conferências internacionais e outras reuniões de menor importância em todo o mundo, e promover informações mútuas úteis a todos os interessados no campo. [66, p. 1]

Assim, teve início o *Bulletin of General Relativity and Gravitation*, que teve vinte e um volumes publicados entre 1962 e 1969 sob a coordenação de Mercier. Mais tarde, em 1970, ele criou o periódico, hoje renomado, *General Relativity and Gravitation*. Em 1972, ele também desempenhou um papel central na criação da *International Society on General Relativity and Gravitation*, que sucedeu o *Committee on General Relativity and Gravitation* e existe até hoje [41].

Houve também tentativas de caracterizar o renascimento dos anos 1950 com uma análise quantitativa das publicações sobre relatividade geral, que cresceram exponencialmente no período. Entretanto, conforme mostrou Goenner, esse argumento é impreciso, uma vez que houve um aumento exponencial das publicações em todas as áreas da física, o qual foi na média maior, proporcionalmente, do que o crescimento do número de publicações especificamente sobre relatividade geral [67].

Independentemente do número de artigos, houve no período de 1949 a 1962 um aumento expressivo no número de abordagens à relatividade geral. Entre 1949 e 1958, Peter Bergmann e Paul Dirac desenvolveram novas técnicas para lidar com sistemas vinculados, as quais permitiram a obtenção, por Dirac, de um formalismo hamiltoniano para relatividade geral, conforme mencionamos na seção anterior [58]. Até então, somente a teoria na forma linearizada tinha sido escrita na forma hamiltoniana. Em 1952, Yvonne Choquet-Bruhat demonstrou pela primeira vez a existência e unicidade das soluções das equações de Einstein [68, 69]. Em 1959, Richard Arnowitt, Stanley Deser e Charles Misner elaboraram o chamado formalismo ADM, que veio posteriormente a se tornar central nas discussões sobre a quan-

tização canônica da gravitação [70]. Em 1962, Richard Feynman descobriu que a matriz S na teoria quântica da gravitação não era unitária. A fim de restaurar a unitariedade, ele sugeriu introduzir na teoria novos quanta fermiônicos fictícios, os quais viriam a ser plenamente compreendidos, de forma independente, por Bryce DeWitt e por Ludwig Faddeev e Victor Popov em 1967, sendo hoje denominados fantasmas de Faddeev-Popov [71].

Nos anos 1950, houve também o surgimento de uma área de pesquisa inteiramente nova, denominada relatividade geral experimental. Esses esforços se concentraram, em um primeiro momento, em torno do projeto de pesquisa proposto por Robert Dicke, que almejava testar experimentalmente o princípio de Mach, a hipótese de grandes números de Dirac, as teorias escalares da gravitação e os princípios da equivalência forte e fraco [72]. Houve também tentativas posteriores, empreendidas sobretudo por Joseph Weber, de construir antenas de ondas gravitacionais [73, 74]. Comentando, em 2017, sobre as expressões “renascimento da relatividade geral” e “reinvenção da relatividade geral”, Phillip Peebles, que viria a ganhar o prêmio Nobel de física em 2019 pela sua pesquisa em cosmologia teórica, observou que “no que se refere à pesquisa empírica, a conotação de renascimento é inapropriada, porque não havia acontecido muita coisa antes [dos anos 1950]” [72, p. 178].

A pesquisa em relatividade geral também recebeu, nos anos 1950 e 1960, um impulso significativo das suas possíveis aplicações tecnológicas. Havia, no início dos anos 1950, uma expectativa de que os avanços na relatividade geral levassem a mecanismos de anti-gravidade que permitissem o desenvolvimento de novos tipos de avião. Essa expectativa, hoje claramente sem sentido, levou à criação da *Gravity Research Foundation*, cujo concurso anual de ensaios ainda existe, sendo hoje bastante prestigiado e inteiramente desvinculado do objetivo inicial de desenvolver mecanismos de anti-gravidade [64, 65, 75]. Havia também a expectativa de que, como ocorreu com a física nuclear, a relatividade geral pudesse vir a se mostrar relevante no desenvolvimento de armamentos, o que levou a força aérea dos Estados Unidos da América a investir sistematicamente na pesquisa em gravitação por mais de uma década, conforme

veremos na próxima seção [1, 76].

Essas diversas dimensões do renascimento se entrelaçam e se influenciam mutuamente. Algumas são inquestionáveis, como o ineditismo das conferências, a formação de uma comunidade e o apoio militar à área. Outros aspectos, como o número de artigos e mesmo a efervescência de novas abordagens, são passíveis de críticas, como aquelas apresentadas de modo sistemático e convincente por Goenner [67]. Tendo em vista essa caracterização do renascimento da relatividade geral, na próxima seção apresentaremos uma reflexão sobre os rumos da pesquisa sobre a história da relatividade geral.

6 Os desafios atuais da pesquisa sobre a história da relatividade geral

Vamos partir de um aspecto sociológico das pesquisas mencionadas acima que parece incontestável: houve a consolidação de uma comunidade de pesquisa em relatividade geral nos anos 1950. Os trabalhos dos historiadores Roberto Lalli, Riaz Tony Howey e Dirk Wintergrün sobre as redes de colaboração em relatividade geral são as análises mais robustas que disponemos atualmente acerca dessa dimensão sociológica [41, 77–79]. Eles mostram que houve uma profunda mudança nas dinâmicas da comunidade de relatividade geral entre 1950 e 1970. Esse é o principal argumento que nos permite falar hoje de um renascimento da relatividade geral nesse período. Porém, conforme vimos na última seção e exploraremos em mais detalhes a seguir, devemos manter um certo ceticismo sobre a tese do renascimento, sobretudo se o renascimento for caracterizado de modo mais amplo, incluindo aspectos relativos ao desenvolvimento da teoria e ao aumento do número de artigos na área.

Há atualmente um bom número de estudos de caso sobre as trajetórias de físicos que trabalharam sobre a relatividade geral nos anos 1950 e 1960 – alguns dos quais podem ser encontrados em [38]. Entretanto, esses estudos ainda apresentam uma imagem bastante fragmentada do período. Os trabalhos de muitos físicos, matemáticos e grupos de pesquisa da época ainda não foram explorados. Ainda estamos longe de termos uma síntese da pesquisa em relatividade nos anos

1950. Quando olhamos para os anos 1960, a situação é ainda pior, pois sabemos pouco sobre a história da relatividade nesse período além das narrativas dos próprios protagonistas – os trabalhos de Kaiser são uma notável exceção [1, 29]; vale mencionar também o trabalho de Aaron Wright sobre os diagramas de Roger Penrose [80] e o trabalho recente de Donald Salisbury sobre a história do desenvolvimento do formalismo de Hamilton-Jacobi para a relatividade geral [81].

Também entendemos pouco sobre o “período de maré baixa”, de 1925 a 1955. A perguntaposta por Eisenstaedt em 1986 ainda se encontra longe de estar respondida: “[quais] são os elementos, as razões, as consequências deste amplo descontentamento que cobre grande parte da história desta teoria decididamente singular e representa um factor obviamente essencial?” [17]. Assim, ainda cabe a historiadores e físicos caracterizarem melhor esse suposto descontentamento, compreender melhor os projetos teóricos que estavam em jogo na relatividade geral de 1915 aos anos 1950, compreender melhor a ressalva de figuras como Samuel Goudsmit e J. Robert Oppenheimer à gravitação, compreender melhor a relação entre relatividade geral e astrofísica nos anos 1940, para listar apenas algumas das lacunas existentes na pesquisa sobre história da relatividade geral.

Conhecemos razoavelmente bem a história das observações dos três testes clássicos da relatividade geral, em particular sobre as expedições para observação do eclipse de 1919 [18, 45, 82, 83]. Porém, conhecemos ainda pouco sobre a história da pesquisa em relatividade geral experimental iniciada por Robert Dicke e Joseph Weber. Os dois principais estudos sobre o tema foram escritos por físicos que viveram os desenvolvimentos dos anos 1960 [72, 73]. Seria interessante termos análises históricas das práticas experimentais, dos cadernos de laboratório e do empréstimo de técnicas experimentais da física de partículas para os experimentos de relatividade geral – um primeiro passo foi dado por Harry Collins [74].

Também não sabemos ainda quase nada sobre a pesquisa mais matemática em gravitação, como os trabalhos de André Lichnerowicz e Yvonne Choquet-Bruhat. Esses autores abordaram a relatividade geral a partir da matemática – usando técnicas, em um primeiro momento, de geometria diferencial e, posteriormente, de equações diferen-

cias parciais. Os anos 1950 foram um momento de inúmeros avanços no estudo das equações diferenciais parciais, com o desenvolvimento da teoria das distribuições. Assim, há uma simbiose entre dois campos disciplinares que estão em pleno desenvolvimento, a saber, a relatividade geral e as equações diferenciais parciais. Em nossos trabalhos, temos buscado explorar esse ponto [69]. Temos buscando também investigar as trajetórias de mulheres na relatividade geral, tendo em vista o grande número de físicas e matemáticas trabalhando nessa teoria nos anos 1950 e 1960 [84].

Também estamos longe de compreender o papel da força aérea dos Estados Unidos da América no desenvolvimento da relatividade geral. Sabemos que o primeiro evento dedicado exclusivamente à gravitação quântica – um pequeno encontro de seis físicos ocorrido em Copenhague em meados de 1957 – recebeu o seu apoio [55, 85]. Sabemos que ela apoiou também diversas outras iniciativas a partir de 1957, como a conferência de Chapel Hill, sobretudo na forma de transporte de cientistas por meio do *Military Air Transport Service*. Curiosamente, ela chegou a apoiar as pesquisas sobre relatividade geral do grupo coordenado pelo físico alemão Pascual Jordan na Universidade de Hamburgo, na Alemanha [76].

Ainda entendemos pouco da pesquisa em relatividade no bloco soviético. Há alguns estudos sobre o período antes de 1950 [86], mas até recentemente não sabíamos quase nada sobre os anos 1950. Um esforço nesse sentido tem sido feito pelo historiador Jean-Philippe Martinez [87].

Uma outra área que ainda resta muito por fazer é a história dos livros didáticos de relatividade geral. O trabalho de Kaiser foi um primeiro passo nesse sentido, mas não teve continuidade, apesar do autor anunciar, em 1998, que

Este artigo é parte de um projeto maior sobre mudanças na prática da física gravitacional durante as décadas intermediárias deste século. O estudo mais completo visa relacionar essas mudanças pedagógicas (em livros didáticos, notas de aula, programas, conjuntos de problemas e exames gerais) a mudanças nos artigos de pesquisa publicados dentro da física gravitacional. [29, p. 323]

Tendo em vista esse quadro historiográfico, podemos concluir que é necessário mantermos um

certo ceticismo sobre a tese de que teria havido um renascimento da relatividade geral nos anos 1950 ou nos anos 1960. Ainda que interessante, essa tese carece de muito escrutínio, uma vez que ainda entendemos pouco da história da relatividade geral para afirmar com convicção que, para além da consolidação de uma comunidade, houve um genuíno renascimento dessa teoria física.

Parece que boa parte da caracterização do renascimento passa por desconsiderar os significativos desenvolvimentos da teoria nos anos 1930, conforme mostrou Goenner [67]. Nesse sentido, é curioso que as principais críticas à tese do renascimento tenham sido apresentadas por um físico e historiador que havia se dedicado anteriormente a escrever a história das teorias de campo unificadas [47, 49]. A imersão nos anos 1930 e 1940 pode ser um bom antídoto para a tese do renascimento. Poucos estudos sistemáticos foram feitos até o momento sobre esse período – além dos trabalhos de Goenner, vale mencionarmos novamente os livros de Kennefick e Rickles [34, 40].

Isso nos ensina uma lição que vale sempre na história das ciências: devemos evitar narrativas triunfalistas – ou seja, narrativas que afirmam que um grupo de cientistas resolveu os problemas ou se viu subitamente vitorioso, superando seus antecessores, que ficaram então ultrapassados –, pois quase sempre elas fazem espantalho dos cientistas do período anterior. Assim, da mesma maneira que, na história da teoria quântica de campos, os trabalhos de Shin'ichirō Tomonaga, Julian Schwinger e Richard Feynman do final dos anos 1940 ofuscaram os trabalhos extremamente criativos dos físicos dos anos 1930 que tentaram lidar com as quantidades infinitas da eletrodinâmica quântica, a narrativa do renascimento da relatividade geral frequentemente opta enfatizar os trabalhos dos anos 1950, sem dar o devido valor aos esforços das décadas anteriores. Ou seja, é possível que haja um viés nas narrativas.

Há diversas possíveis explicações para esse viés. Uma delas é o fato de que o momento em que a pesquisa em história da relatividade geral se firmou, nos anos 1980, coincidiu com o momento no qual os físicos que tinham começado a carreira nos anos 1950 e 1960 estavam à frente da comunidade de relatividade geral – como Sciama, Deser, DeWitt, Penrose, Hawking e outros. Além disso, uma vez que o modo como entendemos hoje

a relatividade geral é profundamente tributário dos desenvolvimentos dos anos 1950 e 1960 – seja com o formalismo ADM, a equação de Wheeler-DeWitt, os fantasmas de Faddeev-Popov, etc. –, é normal que reconheçamos como nos sendo familiar a profunda atividade intelectual dessas duas décadas. É mais difícil, entretanto, reconhecer as atividades dos anos 1930 e 1940, que acabaram levando os físicos e matemáticos a becos sem saída e a formalismos que, por acaso da história, depois vieram a ser abandonados ou drasticamente alterados. Assim, as obras de Infeld, Bergmann, Lichnerowicz, Tonnelat e outros acabaram sendo em parte esquecidas.

Somente com mais pesquisas sobre história da relatividade geral poderemos compreender se realmente faz sentido defender a tese do renascimento. Essas pesquisas devem explorar tanto as abordagem à relatividade geral que tiveram continuidade quanto as que foram abandonadas. A história da relatividade geral é repleta de becos sem saída. Olhá-los sem anacronismo é um desafio com o qual ainda estamos aprendendo a lidar.¹

Agradecimentos

Agradecemos a Reinaldo de Melo e Souza, Ivã Gurgel e um parecerista anônimo pelos comentários e sugestões sobre uma versão anterior deste artigo. Agradecemos a Antonio Augusto Passos Videira, Carla Rodrigues Almeida, Cibelle Celestino Silva e Gérard Grimberg pelas sugestões e conselhos sobre esta pesquisa. Agradecemos também a Theo Adour, Laura Stolze e Thales Azevedo pelas discussões sobre história da relatividade geral. Juliana Youssef agradece à CAPES

¹Vale mencionarmos aqui o seguinte trecho do historiador da filosofia Alexandre Koyré sobre o anacronismo: “É bastante normal que para quem, a partir do presente, e até mesmo do futuro para onde dirige seu trabalho, lança um olhar na direção do passado – um passado já há muito tempo ultrapassado – as teorias antigas apareçam como monstros incompreensíveis, ridículas e disformes. De fato, remontando a corrente do tempo, ele as reencontra no momento de sua morte, velhas, ressequidas, esclerosadas. (...) Só o historiador é que as encontra em sua primeira e gloriosa juventude, em todo o esplendor de sua beleza. Só o historiador é que, re-fazendo e re-correndo a evolução da ciência, apreende as teorias do passado em seu nascimento e vive, com elas, o *elan* criador do pensamento. Olhemos então para a história.” [88, p. 205]

pelo apoio financeiro por meio de bolsa de mestrado.

Sobre os autores

Juliana Correia Ferreira (julianacorreia@poli.ufrj.br) é graduada em Licenciatura em Matemática pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), graduada em Engenharia Civil pela UFRJ e mestre em Ensino de Matemática também pela UFRJ. Atualmente, é Professora Substituta no Departamento de Matemática da UFRJ.

Juliana Youssef (juyoussef@gmail.com) é graduada em Licenciatura em Matemática pela UFRJ e mestre em Ensino de Matemática também pela UFRJ.

Thiago Hartz (hartz@im.ufrj.br) é graduado em Bacharelado em Física pela UFRJ, Mestre em Física pelo Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas e Doutor em Ensino, Filosofia e História das Ciências pela Universidade Federal da Bahia, com estágio sanduíche no Laboratoire SPHERE da Université Paris Diderot, França. Realizou pós-doutorado no Niels Bohr Archive, Dinamarca. Atualmente, é Professor Adjunto no Departamento de Matemática da UFRJ, onde também atua como docente e vice-coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Matemática.

Referências

- [1] B. Wilson e D. Kaiser, *Calculating Times: Radar, Ballistic Missiles, and Einstein's Relativity*, in *Science and Technology in the Global Cold War*, editado por N. Oreskes e J. Krige (The MIT Press, Cambridge, 2014), 273–316.
- [2] M. Born, *Die Relativitätstheorie Einsteins* (Springer, Berlin, 1920). Segunda edição, em inglês: M. Born *Einstein's Theory of Relativity* (Dover, New York, 1962).
- [3] W. Pauli, *Relativitätstheorie*, in *Encyklopädie der Mathematischen Wissenschaften, Fünfter Band, Zweiter Teil*, editado por A. Sommerfeld (Teubner, Leipzig, 1921), 539–775. Publicado separadamente: W. Pauli, *Relativitätstheorie* (Springer, Berlin, 1921). Tradução para o inglês: W. Pauli, *Theory of Relativity* (Dover, New York, 1981).
- [4] M. A. Costa, *Introdução a teoria da relatividade* (Sussekind de Mendonça & Cia., Rio de Janeiro, 1922.). Segunda edição: M. A. Costa, *Introdução à teoria da relatividade* (Editora da UFRJ, Rio de Janeiro, 1995).
- [5] J. Eisenstaedt e J. C. Fabris, *Amoroso Costa e o primeiro livro brasileiro sobre a Relatividade Geral*, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **26**(2), 185 (2004).
- [6] H. Weyl, *Raum, Zeit, Materie: Vorlesungen über allgemeine Relativitätstheorie* (Springer, Berlin, 1918). Tradução para inglês da quarta edição, de 1921: H. Weyl, *Space, Time, Matter* (Dover, New York, 1952).
- [7] P. A. Schilpp (ed.), *Albert Einstein: Philosopher-Scientist* (The Library of Living Philosophers, Evanston, 1949).
- [8] H. Guttmann e J. Renn, *Einstein on Einstein: Autobiographical and Scientific Reflections* (Princeton University Press, Princeton, 2020).
- [9] D. Kormos-Buchwald, *The Einstein Papers Project 1955–2005*, in *Albert Einstein, Chief Engineer of the Universe: One Hundred Authors for Einstein*, editado por J. Renn (Wiley-VCH, Weinheim, 2005), 448–452.
- [10] T. Hartz e O. Freire Jr., *A série de conferências History of Quantum Physics: Um breve panorama da consolidação da pesquisa em história da física quântica nos últimos dez anos*, Boletim Eletrônico da Sociedade Brasileira de História da Ciência **6** (2015).
- [11] J. Norton, *How Einstein Found His Field Equations: 1912–1915*, *Historical Studies in the Physical Sciences* **14**(2), 253 (1984). Reimpresso em: D. Howard e J. Stachel (eds.), *Einstein and the History of General Relativity*, Einstein Studies, vol. 1 (Birkhäuser, Boston, 1989), 101–159.

- [12] A. Pais, ‘*Subtle is the Lord...: The Science and the Life of Albert Einstein*’ (Oxford University Press, 1982). Tradução para o português: A. Pais, *Sutil é o Senhor: A Ciência e a Vida de Albert Einstein* (Nova Fronteira, Rio de Janeiro, 2005).
- [13] M. Janssen e J. Renn, *How Einstein Found His Field Equations: Sources and Interpretation* (Birkhäuser, Cham, 2022).
- [14] M. Janssen et al. (eds.), *The Genesis of General Relativity*, vol. 1–4 (Springer, Berlin, 2007).
- [15] J. Renn e T. Sauer, *Errors and Insights: Reconstructing the Genesis of General Relativity from Einstein’s Zurich Notebook*, in *Reworking the Bench: Research Notebooks in the History of Science*, editado por F. L. Holmes, J. Renn e H.-J. Rheinberger (Springer, Dordrecht, 2003), 253–268.
- [16] M. Janssen e J. Renn, *Arch and scaffold: How Einstein found his field equations*, *Physics Today* **68**(11), 30 (2015).
- [17] J. Eisenstaedt, *La relativité générale à l’étiage: 1925–1955*, *Archive for History of Exact Sciences* **35**(2), 115 (1986). Versão resumida em inglês: J. Eisenstaedt, *The Low Water Mark of General Relativity, 1925–1955*, in *Einstein and the History of General Relativity*, editado por D. Howard e J. Stachel (Birkhäuser, Boston, 1989), 277–292.
- [18] J. Eisenstaedt, *Einstein et la relativité générale: Les chemins de l'espace-temps* (CNRS Editions, Paris, 2002). Tradução para o inglês: J. Eisenstaedt, *The Curious History of Relativity: How Einstein’s Theory of Gravity Was Lost and Found Again* (Princeton University Press, Princeton, 2006).
- [19] M. Paty, *Einstein philosophe: La physique comme pratique philosophique* (Presses Universitaires de France, Paris, 1993).
- [20] M. Paty, *Einstein, ou A Criação Científica do Mundo* (Estação Liberdade, São Paulo, 2008).
- [21] D. Cantimori, *Storici e storia: metodo, caratteristiche e significato del lavoro storio-grafico* (Einaudi, Turim, 1971).
- [22] P. Galison, *Material Culture, Theoretical Culture, and Delocalization*, in *Collection, Laboratory, Theater*, editado por H. Schramm, L. Schwarte e J. Lazardzig (de Gruyter, Berlin, 2005), 490–506.
- [23] B. DeWitt, *Quantum gravity: yesterday and today*, *General Relativity and Gravitation* **41**(2), 413 (2009).
- [24] C. M. Will, *Was Einstein Right? Putting General Relativity to the Test* (Basic Books, New York, 1993), 2ª ed.
- [25] G. Ellis, A. Lanza e J. Miller (eds.), *The Renaissance of General Relativity and Cosmology: A Survey to Celebrate the 65th Birthday of Dennis Sciama* (Cambridge University Press, Cambridge, 1993).
- [26] D. W. Sciama, *The recent renaissance of observational cosmology*, *Physics Bulletin* **19**(10), 329 (1968).
- [27] D. W. Sciama, *The recent renaissance of observational cosmology*, in *Relativity and Gravitation*, editado por C. G. Kuper e A. Peres (Gordon and Breach, New York, 1971), 283–304.
- [28] J. C. Miller, *Relativistic gravitational collapse*, in *The Renaissance of General Relativity and Cosmology: A Survey to Celebrate the 65th Birthday of Dennis Sciama*, editado por G. Ellis, A. Lanza e J. Miller (Cambridge University Press, Cambridge, 1993), 73–85.
- [29] D. Kaiser, *A ψ is just a ψ ? Pedagogy, Practice, and the Reconstitution of General Relativity, 1942–1975*, *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics* **29**(3), 321 (1998).
- [30] A. Einstein, *The Meaning of Relativity: Four Lectures Delivered at Princeton University, May, 1921* (Princeton University Press, Princeton, 1922). Reproduzido com os apêndices em: H. Gutfreund e J. Renn, *The*

- Formative Years of Relativity: The History and Meaning of Einstein's Princeton Lectures* (Princeton University Press, Princeton, 2017), 159–359.
- [31] P. G. Bergmann, *Introduction to the theory of relativity* (Prentice-Hall, New York, 1942).
- [32] R. P. Feynman, *Lectures on Gravitation. Reading* (Addison-Wesley, Reading, 1995). Nova edição: R. P. Feynman, *Feynman Lectures on Gravitation* (CRC Press, Boca Raton, 2018). A citação foi feita a partir desta edição mais recente.
- [33] D. J. Griffiths, D. Derbes e R. B. Sohn (eds.), *Sidney Coleman's Lectures on Relativity* (Cambridge University Press, Cambridge, 2022).
- [34] D. Kennefick, *Traveling at the Speed of Thought: Einstein and the Quest for Gravitational Waves* (Princeton University Press, Princeton, 2007).
- [35] A. Blum, R. Lalli e J. Renn, *The Reinvention of General Relativity: A Historiographical Framework for Assessing One Hundred Years of Curved Space-time*, *Isis* **106**(3), 598 (2015).
- [36] A. S. Blum, R. Lalli e J. Renn, *The renaissance of General Relativity: How and why it happened*, *Annalen der Physik* **528**(5), 344 (2016).
- [37] A. Blum et al., *Editorial introduction to the special issue “The Renaissance of Einstein’s Theory of Gravitation”*, *The European Physical Journal H* **42**(2), 95 (2017).
- [38] A. Blum, R. Lalli e J. Renn (eds.), *The Renaissance of General Relativity in Context* (Birkhäuser, Cham, 2020).
- [39] A. S. Blum e D. Rickles, *Quantum Gravity in the First Half of the Twentieth Century: A Sourcebook* (Edition Open Access, Berlin, 2018).
- [40] D. Rickles, *Covered with Deep Mist: The Development of Quantum Gravity (1916-1956)* (Oxford University Press, Oxford, 2020).
- [41] R. Lalli, *Building the General Relativity and Gravitation Community During the Cold War* (Springer, Cham, 2017).
- [42] J. Norton, *Einstein's Pathway to General Relativity*, Einstein for Everyone (disciplina de graduação na Universidade de Pittsburgh). Disponível em https://sites.pitt.edu/~jdnorton/teaching/HPS_0410/chapters/general_relativity_pathway/index.html, acesso em mar. 2025.
- [43] D. Cardoso e I. Gurgel, *A complementariedade dos pensamentos narrativo e matemático na gestação da teoria da Relatividade Geral*, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **34**(3), 745 (2017).
- [44] M. Stanley, “*An Expedition to Heal the Wounds of War*”: *The 1919 Eclipse and Eddington as Quaker Adventurer*, *Isis* **94**(1), 57 (2003).
- [45] D. Kennefick, *No Shadow of a Doubt: The 1919 Eclipse That Confirmed Einstein’s Theory of Relativity* (Princeton University Press, Princeton, 2019).
- [46] V. P. Vizgin, *Unified Field Theories in the first third of the 20th century* (Birkhäuser, 1994).
- [47] H. F. M. Goenner, *On the History of Unified Field Theories*, *Living Reviews in Relativity* **7**(1), article number 2 (2004).
- [48] J. v. Dongen, *Einstein’s Unification* (Cambridge University Press, Cambridge, 2010).
- [49] H. F. M. Goenner, *On the History of Unified Field Theories. Part II. (ca. 1930–ca. 1965)*, *Living Reviews in Relativity* **17**(1), article number 5 (2014).
- [50] F. Cardin e R. Tazzioli, *Levi-Civita simplifies Einstein. The Ricci rotation coefficients and unified field theories*, *Archive for History of Exact Sciences* **78**(1), 87 (2024).
- [51] M. C. Bustamante, *Jacques Solomon (1908-1942): profil d'un physicien théoricien dans la France des années trente*, *Revue d'histoire des sciences* **50**(1), 49 (1997).

- [52] G. E. Gorelik, *Matvei Bronstein and quantum gravity: 70th anniversary of the unsolved problem*, *Physics-Uspekhi* **48**(10), 1039 (2005).
- [53] D. C. Salisbury, *Léon Rosenfeld's pioneering steps toward a quantum theory of gravity*, *Journal of Physics: Conference Series* **222**, 012052 (2010).
- [54] T. Hartz e O. Freire Jr., *Uses and appropriations of Niels Bohr's ideas about quantum field measurement, 1930–1965*, in *One Hundred Years of the Bohr Atom*, editado por F. Aaserud e H. Kragh (The Royal Danish Academy of Science and Letters, Copenhagen, 2015), 397–418.
- [55] A. Blum e T. Hartz, *The 1957 quantum gravity meeting in Copenhagen: An analysis of Bryce S. DeWitt's report*, *The European Physical Journal H* **42**(2), 107 (2017).
- [56] G. Gorelik, *The drama of ideas in the history of quantum gravity: Niels Bohr, Lev Landau, and Matvei Bronstein*, *The European Physical Journal H* **49**(1), article number 18 (2024).
- [57] H. Kragh, *Cosmology and Controversy: The Historical Development of Two Theories of the Universe* (Princeton University Press, Princeton, 1996).
- [58] D. Salisbury, *Rosenfeld, Bergmann, Dirac and the Invention of Constrained Hamiltonian Dynamics*, in *The Eleventh Marcel Grossmann Meeting: On Recent Developments in Theoretical and Experimental General Relativity*, editado por H. Kleinert, R. Jantzen e R. Ruffini (Word Scientific, Singapore, 2008), 2467–2469.
- [59] R. P. Feynman, “*What Do You Care What Other People Think?*”: *Further Adventures of a Curious Character* (Norton, New York, 1988).
- [60] T. Kuhn, *A estrutura das revoluções científicas* (Perspectiva, São Paulo, 1962).
- [61] A. Mercier, *General Relativity at the Turning Point of Its Renewal*, in *Studies in the History of General Relativity*, editado por J. Eisenstaedt e A. Kox (Birkhäuser, Boston, 1992), 109–121.
- [62] C. DeWitt-Morette, *The Pursuit of Quantum Gravity: Memoirs of Bryce DeWitt from 1946 to 2004* (Springer, Berlin, 2011).
- [63] D. Rickles, *The Chapel Hill Conference in Context*, in *The Role of Gravitation in Physics: Report from the 1957 Chapel Hill Conference*, editado por C. DeWitt-Morette e D. Rickles (Edition Open Access, Berlin, 2011), 7–21.
- [64] T. Hartz, *As heterodoxias quânticas e o olhar do historiador: Uma história dos usos dos argumentos de Niels Bohr acerca da medição de campos quânticos (1930–1970)*, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Ensino, Filosofia e História das Ciências, Universidade Federal da Bahia (2013).
- [65] D. Kaiser e D. Rickles, *The Price of Gravity: Private Patronage and the Transformation of Gravitational Physics after World War II*, *Historical Studies in the Natural Sciences* **48**(3), 338 (2018).
- [66] A. Mercier e J. Schaer, *General information*, *Bulletin of General Relativity and Gravitation* **1**(1), 1 (1962).
- [67] H. Goenner, *A golden age of general relativity? Some remarks on the history of general relativity*, *General Relativity and Gravitation* **49**(3), article number 42 (2017).
- [68] A. Lichnerowicz, *Mathematics and General Relativity: A Recollection*, in *Studies in the History of General Relativity*, editado por J. Eisenstaedt e A. Kox (Birkhäuser, Boston, 1992), 103–108.
- [69] J. C. Ferreira, *A trajetória de Yvonne Choquet-Bruhat na matemática, na física e na sociedade do século XX*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ensino de Matemática, Universidade Federal do Rio de Janeiro (2024).
- [70] S. Deser, *The ADM version of GR at Sixty: a brief account for historians*, *The European*

- Physical Journal H **46**(1), article number 14 (2021).
- [71] G. 't Hooft (ed.), *50 Years of Yang-Mills* (World Scientific, Singapore, 2005).
- [72] P. J. E. Peebles, *Robert Dicke and the naissance of experimental gravity physics, 1957–1967*, The European Physical Journal H **42**(2), 177 (2017).
- [73] V. Trimble, *Wired by Weber: The story of the first searcher and searches for gravitational waves*, The European Physical Journal H **42**(2), 261 (2017).
- [74] H. Collins, *Gravity's Kiss: The Detection of Gravitational Waves* (MIT Press, Cambridge, 2017).
- [75] R. Babson, *Gravity—Our enemy number one*, in H. Collins, *Gravity's Shadow: The Search for Gravitational Waves* (University of Chicago Press, Chicago, 2004), 828–831.
- [76] J. Goldberg, *US Air Force support of general relativity, 1956–1972*, in *Studies in the History of General Relativity*, editado por J. Eisenstaedt e A. Kox (Birkhäuser, Boston, 1992), 89–102.
- [77] R. Lalli, R. Howey e D. Wintergrün, *The dynamics of collaboration networks and the history of general relativity, 1925–1970*, Scientometrics **122**(2), 1129 (2020).
- [78] R. Lalli, R. Howey e D. Wintergrün, *The Socio-Epistemic Networks of General Relativity, 1925–1970*, in *The Renaissance of General Relativity in Context*, editado por A. Blum, R. Lalli e J. Renn (Birkhäuser, Cham, 2020), 15–84.
- [79] R. Lalli, *The Multiple Lives of the General Relativity Community, 1955–1974*, in *Biographies in the History of Physics*, editado por M. Forstner, Christian; Walker (Springer, Cham, 2020), 179–202.
- [80] A. S. Wright, *The Advantages of Bringing Infinity to a Finite Place*, Historical Studies in the Natural Sciences **44**(2), 99 (2014).
- [81] D. Salisbury, *A history of observables and Hamilton–Jacobi approaches to general relativity*, The European Physical Journal H **47**(1), article number 7 (2022).
- [82] I. d. C. Moreira, *O eclipse solar de 1919, Einstein e a mídia brasileira*, Ciência e Cultura **71**(3), 32 (2019).
- [83] R. N. d. Silva Júnior e C. H. d. M. Barboza, *História e memória de vidro: as fotografias brasileiras do eclipse de 1919 em Sobral*, História, Ciências, Saúde-Manguinhos **27**(3), 983 (2020).
- [84] J. Y. F. Silva, *Mulheres na relatividade geral, 1945–1968: Trajetórias, projetos e o renascimento da teoria*, Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ensino de Matemática, Universidade Federal do Rio de Janeiro (2024).
- [85] B. S. DeWitt, *Exploratory research session on the quantization of the gravitational field: At the Institute for Theoretical Physics, Copenhagen, Denmark, June–July 1957*, The European Physical Journal H **42**(2), 159 (2017).
- [86] V. P. Vizgin e G. E. Gorelik, *The Reception of the Theory of Relativity in Russia and the USSR*, in *The Comparative Reception of Relativity*, editado por T. F. Glick (Springer, Berlin, 1987), 265–326.
- [87] J.-P. Martinez, *The Fock-Infeld Dispute: An Illustration of the Renaissance of General Relativity in the Soviet Union*, in *The Renaissance of General Relativity in Context*, editado por A. Blum, R. Lalli e J. Renn (Springer, Cham, 2020), 113–139.
- [88] A. Koyné, *Estudos de história do pensamento filosófico* (Forense Universitária, Rio de Janeiro, 1991).

Algumas reflexões sobre a construção e legitimação do conhecimento científico

Jorge Ernesto Horvath

Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – USP

Resumo

A prática da atividade científica é um assunto pouco abordado e que tem um grande impacto nos aspirantes a pesquisador. Geralmente são apresentados aos estudantes uma série de postulados e crenças que distam bastante da realidade, muito mais complexa e menos idealista daquilo que se diz. Discutimos estes aspectos em algum detalhe, introduzindo a ideia de uma estrutura piramidal para a comunidade científica, e apontamos várias dificuldades para uma passagem bem-sucedida por ela, desfazendo de passagem esse quadro de utopia idealizada.

Abstract

The practice of a scientific activity is an issue not frequently addressed and that has a large impact on the future researchers. In general, a series of postulates and beliefs are presented to the students which are far from reality, much more complex and less ideal than the discourse. We discuss these aspects in some detail, introducing the idea of a pyramidal structure of the scientific community, and point out several difficulties for a successful passage to it, dismantling in passing that ideal utopic picture.

Palavras-chave: sociologia da ciência, conhecimento científico, prática científica.

Keywords: sociology of science, scientific knowledge, scientific practise.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v6n1.47466](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v6n1.47466)

O crédito vai para aquele que convence ao mundo, não para quem tem a ideia primeiro

Sir Francis Darwin (1848 – 1925)
Eugenics Review, April 1914.

1 Introdução

Este ensaio é o produto de alguns anos de convivência e prática ativa da pesquisa científica. Não tem uma estrutura convencional, nem pretende fundamentar-se rigorosamente, surge mais como uma série de opiniões expressas em forma coloquial e informal. Na maioria das vezes corre à normativa para descrever a dinâmica analisadas. Contudo, achamos necessário refletir a respeito da *forma* em que é desenvolvida a Ciência que ajudamos a construir, quais os valores que contam dentro dela, e o que é efetivamente transmitido de geração em geração. Para isto, começaremos por dar alguma precisão a respeito do corpo científico, aplicável à maioria das disci-

plinas das Ciências Exatas conhecidas.

A visão popular das Ciências e dos cientistas está fortemente impregnada de um racionalismo do tipo intuitivo. Desde que os dois critérios fundamentais do racionalismo são a universalidade dos critérios para julgar o que é verdadeiro ou falso, e seu caráter *não temporal* (ou seja, válidos para qualquer época), e que resulta evidente que se deve conceder um grande valor ao conhecimento desenvolvido de acordo com critério universal, a opinião pública em geral pode ser considerada racionalista. Isto é reforçado pela crença de que o processo de investigação científica conduz à verdade. A verdade, a racionalidade e a Ciência são assim consideradas intrinsecamente

boas. Mais ainda, a Ciência é considerada *objetiva*, desde que as opiniões e preferências pessoais não têm cabimento nela (vide [1]). O conhecimento científico é, portanto, confiável, já que está objetivamente provado. Este tipo de postura encontra-se amplamente difundido hoje nas sociedades mais evoluídas e/ou nas camadas mais abastadas das sociedades como a nossa, e vemos exemplos de sua exploração comercial (por exemplo, na publicidade, onde sisudos cientistas nos falam das vantagens comprovadas deste ou aquele creme dental) diariamente.

Um outro aspecto ligado àquele é o da forma que a opinião pública vê os cientistas. Deixando de lado a discussão dos estereótipos, os cientistas são vistos como pessoas com forte vocação, comprometidos com uma ética não muito bem definível, mas supostamente existente, e isentos de ambições pessoais, estrelismo, interesses econômicos e outras coisas bastante comuns ao resto da sociedade. A percepção de algum indivíduo que não encaixe em esta descrição é imediatamente associada a uma “falha de pureza” ou mercenarismo ou talvez desajuste aos nobres propósitos da Ciência. A hierarquia científica é imaginada, mas sem vivência direta de como funciona, já que em geral desconhece-se a totalidade da maquinaria científica real. Quase todos nós devemos haver presenciado exemplos concretos, quando perguntado se estamos em colaboração com a NASA (a qual, segundo a opinião pública, constitui a referência reitora da Astronomia no mundo todo, ao ponto de ditar o que é importante ou o que não é); ou se Hawking já descobriu o que fazer com tal ou qual problema para nós completarmos os detalhes e confirmarmos o assunto (o equivalente à NASA no campo teórico, até agora sem substituto no imaginário popular desde seu falecimento).

Uma contribuição importante para compreender o funcionamento científico se deve ao sociólogo norte-americano Robert Merton [2], quem analisou o problema e chegou à conclusão que a comunidade científica é um “ceticismo organizado”. Também formulou o conceito de “colégio invisível”, isto é, uma estrutura não-formal à qual aderem os cientistas e que vai bem além da mera “matriz disciplinar” que predica T. Kuhn [3], a qual é só um aspecto do colégio metroniano. Merton é muito ingênuo e idealiza os cientistas e suas práticas, e em especial o que chamaría-

mos de sociologia científica, de fato encontram-se afirmações na sua obra que contrastam de forma flagrante com o que é observado na realidade.

2 Uma estrutura piramidal de hierarquias científicas

Mas como é que funciona o corpo científico em geral? Como é que nós, os cientistas de carne e osso, enxergamos a construção do conhecimento? Como organizamos nosso “colégio invisível” (segundo a definição de Merton [2])? Esta é uma das chaves para saber como as coisas realmente funcionam além de aparências e preconceitos.

No que segue devemos argumentar pela definição do corpo científico como uma *pirâmide de hierarquias*, não necessariamente formais, mas antes de mais nada funcionais, no sentido do peso que cada camada tem na construção e transmissão do conhecimento. Na parte mais baixa da pirâmide, que comporta a maioria esmagadora dos cientistas, encontram-se a que chamaremos *massa científica*, que faz trabalho sério e profissional, mas cuja influência nos rumos e grandes ideias da Ciência é mínima. Mais precisamente, a massa intui que não é seu papel o de liderar a disciplina, e embora abriu mão deste rol, sua existência e trabalho resulta fundamental para legitimar todo o corpo do qual estamos falando. Um degrau acima na consideração podemos encontrar os *sublídères*, cientistas bem ativos e engajados geralmente em especialidades consideradas de importância, mas cuja principal diferença é a consciência de serem capazes de encostar e (por que não?) assumir um lugar na camada mais alta, ambição legítima mas bastante difícil de conseguir. A elite da Ciência são os *líderes*, especialistas renomados, geralmente de reconhecimento universal pelo corpo, com visão ampla e plena consciência do seu papel regulador e reitor, normalmente um número pequeno e que guarda estreitas relações (amistosas ou não) com seus pares, e que está atenta aos desenvolvimentos e ideias passados a eles pelos líderes e pelos sublídères.

Este tipo de divisão é móvel, mas muito estável, e ser capaz de avançar nesta mobilidade requer, além de talento, sorte e trabalho, considerável esforço e atitude direcionada ao ascenso por parte dos indivíduos. Podemos notar ainda

que, desde que a organização piramidal é a forma espontaneamente adotada pelo corpo científico, ela e o reflexo dos valores partilhados por (quase) todos os membros, onde há uma delegação de autoridade científica baseada nos méritos atribuídos. Assim, ela está longe de ser democrática no sentido corrente desta última ideia, sem que isto signifique algo pejorativo ou indesejável em absoluto. Mais precisamente, a organização científica poderia até ser comparada à democracia representativa mais do que a utópica democracia direta. Mas na verdade, e desde que a opinião dos líderes resulta tão importante e pauta o desenvolvimento das disciplinas, um pouco de reflexão serve para atribuir à organização descrita a denominação de *neo-escolástica*, a qual pode ser utilizada alternativamente.

Observa-se que tanto os cientistas da massa como os sublíderes têm a aspiração última, e dedicam esforços concretos, de serem reconhecidos pelos líderes. Este reconhecimento nem sempre é garantido, mesmo quando aqueles conhecem os trabalhos dos primeiros. Uma série de circunstâncias científicas, e outras puramente humanas, podem dificultar ou até impedir este reconhecimento. Como exemplo concreto, excelentes trabalhos em muitas áreas de pesquisadores de países da ex-União Soviética foram ignorados e/ou “redescobertos” no Ocidente durante várias décadas [4]. Curiosamente, aquele sistema científico funcionava como uma versão institucionalizada e exacerbada da nossa proposta, até às vezes substituindo os argumentos racionais pela autoridade pura dos líderes. Como resultado, inúmeras disputas a respeito de prioridades, reconhecimentos e créditos estão em aberto, mesmo que saibamos que as circunstâncias históricas não fazem deste tópico uma prioridade. Mas nem por isso o tema deixa de ter importância, já que paira na forma da construção e transmissão do conhecimento. Quando e como é que alguém tem seu trabalho reconhecido?

3 Prioridades, descobertas e créditos

O reconhecimento da contribuição de um autor precisa do cumprimento de uma série de fatos que podem ser agrupados em categorias (*bundles*) que classificam essa contribuição e a qualificam

para o reconhecimento da comunidade. Hierarquicamente podem ser definidas em vários níveis, crescentemente estruturados conforme:

- I. Formulação da ideia de forma dialética/especulativa (que pode depois mostrarse parcialmente incorreta). Não há neste estágio qualquer tipo de formalização matemática, nem demonstração palpável. Não há proposta de experimentos nem exemplos analisados a fundo. Mas propriamente, trata-se de uma conjectura.
- II. Formulação mais precisa, possivelmente de forma quantitativa, com a discussão do seu contexto (incluindo evidência), alguns exemplos e proposta de experimentos e evidências observacionais.
- III. Formulação rigorosa (de preferência sintética), cálculo e discussão sistemática das consequências (vários *artigos/apresentações*) e realização efetiva de “experimentos cruciais”.
- IV. Abstração, generalização e elevação à categoria de “lei da natureza” (reservadas às revoluções bem-sucedidas). Busca de contraxeemplos e ramificações, muitas vezes inesperadas.

Interessa-nos estabelecer quando é que a contribuição de um autor atinge uma magnitude tal que não pode ser ignorada, nem atribuída erroneamente a outro(s), nem “fagocitada” por algum dos líderes visíveis da disciplina. É claro que em qualquer um dos estágios o autor tem a aspiração de ser citado e reconhecido, mas o ponto importante é que isto acontece, e abre-se a oportunidade de avançar na ideia, quando por alguma razão (que não exclui o fair play, mas que também não o garante), alguns líderes incorporam o(s) trabalhos nas suas revisões orais e escritas. Frequentemente, outros líderes, muitos sublíderes e uma fração importante dos cientistas da massa passam a citar e até mesmo trabalhar em cima dele. Este comportamento é intrínseco à Ciência, e não decorre necessariamente de novas evidências científicas. Trabalhos que “somem” das revisões especializadas não demoram em ser esquecidos, com algumas poucas exceções. Observa-se que, em presença de evidências observacionais crescentemente fortes, só o estágio III. assegura o

reconhecimento amplo para o autor, já que muitas vezes trabalhos “inspirados” nos estágios I. e II. de autoria dos líderes são citados e reconhecidos até mais do que o original. De novo devemos notar que este último não indica necessariamente um juízo de valor a respeito do comportamento dos líderes, sendo mais provavelmente uma característica do corpo que muitos de nós mesmos praticamos. Controvérsias iradas são ainda possíveis [5], hoje encorajadas pela facilidade de veiculação eletrônica, como veremos a seguir.

4 A liderança, seu exercício e a transmissão dos fatos

Como pode ser comprovado facilmente nos livros de texto de qualquer nível, uma disciplina nunca deixa para o imaginário coletivo das gerações seguintes mais do que um conjunto pequeno de autores/pioneiros $\approx O(1)$ ¹ reconhecidos pela comunidade como *líderes*. Uma fração grande dos líderes contemporâneos às pesquisas e descobertas esmaece quase completamente depois de uma ou duas gerações, e sobram somente aqueles cujas contribuições são *fixadas* na disciplina, até muitas vezes atribuindo-lhes descobertas e ideias dos “esquecidos”. Os detalhes de como isso acontece são complexos e não muito estudados ainda, embora possamos dizer que pelo menos um mecanismo foi já apontado, por exemplo, por Whitemead e Khun [3]: trata-se de processo de reescrita dos textos que sintetizam o conhecimento (chamados genericamente de “manuais”) que segue os padrões orwellianos mais ortodoxos. Os líderes da última geração “apagam” completamente detalhes pouco convenientes das gerações anteriores (por exemplo, a forte atividade alquimista de Newton foi “apagada” por muitas décadas) e também minimizam divergências e inconsistências, as vezes muito sérias, entre os grandes líderes para colocá-los em um contexto (ou *gestalt*) unificado, para fazer parecer que os problemas e as perspectivas são únicas e independentes do tempo e a sociedade na qual viveram (o relativismo nega a universalidade e o caráter não-histórico dos feitos científicos, mas o que estamos afirmando têm um caráter mais normativo e factual próprios da sociologia científica racionalista imperante).

¹Primeira ordem.

Uma questão interessante é a do reconhecimento da liderança por parte dos pares. Além do que já foi apontado antes, é claro que somente os líderes já reconhecidos podem fazer com que um outro membro da comunidade alcance esse status. Às vezes, constata-se que não é tão simples conseguir isto, nem mesmo tendo o propósito explícito e declarado. Os caminhos usualmente adotados pelos líderes quando isso acontece são a) citá-los nos seus trabalhos e comentar ou ponderar seus resultados e ideias de forma explícita, b) promover o convite destes recém-chegados para conferências importantes, c) eventualmente, sair em defesa (ou “lembra”) para outros líderes e autores os trabalhos “esquecidos”.

Uma característica frequentemente atribuída aos grandes líderes (candidatos a permanecer nos manuais próximos) é a chamada *eminência*. Esta eminência, ou combinação de talento, criatividade, “faro” e poder de síntese é uma virtude do líder, mas na verdade, também uma propriedade atribuída a ele/ela pela comunidade, já que se trata de um critério interno ao colégio invisível de Merton, ou seja à instituição formada fisicamente pelos pares e instituições de pesquisa junto com todas as regras, *códigos*, critérios que constituem “a” Ciência (ou mais precisamente, a Ciência ocidental contemporânea). A eminência indica assim, além de qualidades apontadas, uma adaptação total do indivíduo ao sistema científico, e uma capacidade extraordinária para conseguir aproveitar suas oportunidades dentro dele para ser visível. Devido aos restritivos critérios de excelência, alguns dos quais operam a médio e longo prazo, a eminência pode até ser temporária nos autopromocionados, ou seja, aqueles cuja preocupação mediática está além do razoável (com requintes de *showbusiness* [6]), mas será aplicada seguramente aos mais consubstanciados com o meio científico e seus valores.

Além dos cientistas, existem outras dimensões cuja ação completa o colégio invisível. Estas são a própria especialidade disciplinar e o ambiente da informação onde a pesquisa é desenvolvida. A troca de informação geral é muito complexa para ser abordada aqui, mas um esquema básico é mostrado na Figura 1 para efeitos de completeza [7].

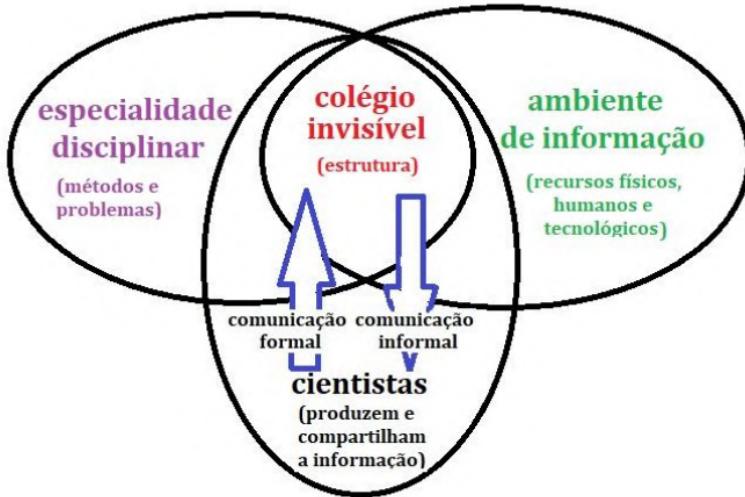


Figura 1: Um esquema mais completo do colégio invisível e suas dimensões disciplinar, ambiental e de recursos humanos (adaptado da Ref. [7]).

5 Efeitos da informática e a globalização

Há hoje um enorme número de publicações, analógicas e digitais, a respeito dos efeitos da informatização e globalização da sociedade, e como isto afeta as relações entre indivíduos e instituições. Frequentemente fala-se da democratização do acesso à informação e outros temas afins. É claro que nós cientistas estamos sofrendo estes processos, até de forma exacerbada, pela própria natureza das nossas atividades. Cabe-nos perguntar quais destes efeitos são observados e como afetam a construção do conhecimento científico. Depois de duas décadas onde quase toda a Astronomia passou a ser operada, discutida e veiculada de forma eletrônica, temos de reconhecer que os efeitos democratizantes (ou de horizontalização da pirâmide) são mínimos. Ao contrário, a disponibilidade imediata da informação provoca um reforço da opinião dos líderes em revisões e trabalhos de alcance global. Para muitos epistemólogos, estes mecanismos de validação através dos líderes é muito robusto e constitui a quintessência da Ciência ocidental. Como exemplo da importância desta validação, nos debates promovidos para discutir o futuro da publicação científica eletrônica, tem sido proposto seriamente o abandono total do anonimato pelos *referees* como forma de validação que leve em conta explicitamente os protagonistas e suas hierarquias (isto é muito similar ao que acontecia nos primórdios do século 20 entre o pequeno número de físicos

então existente, estendido agora à publicação eletrônica). Apontamos aqui que estas propostas direcionam para institucionalizar a pirâmide, já que ela é, por definição, “a” Ciência.

Alguns aspectos da informatização e globalização são, além de novos, positivos para a construção do conhecimento. Entre eles podemos mencionar as agora frequentes (e de seguimento rápido) polêmicas a respeito de interpretações erradas e prioridades nas ideias e resultados [3,4]. Há também a possibilidade de “retratações públicas” de perfil baixo, mas efetivas pelo seu alcance amplo, por parte dos pesquisadores. As mudanças de rumos e de lideranças são mais visíveis e mais rapidamente, embora na maioria dos casos haja que “deduzi-las” sem que ninguém as explice na literatura, e quando isto último acontece já é desnecessário e redundante porque a disseminação eletrônica já se encarregou de fazê-lo público antes.

Embora sejam retratados como objetivos e pouco convencionais, a maioria dos cientistas profissionais (especialmente físicos e astrônomos), nos mostramos profundamente hierárquicos, e quase nunca anárquicos. É claro que este senso de grupo tem a ver diretamente com a definição de quem faz Ciência e quem não. Renegar das regras e convenções e hierarquias estabelecidas põe o indivíduo automaticamente fora do “colégio invisível”, e de facto, ele/ela deixa de ser um(a) cientista. É evidente que há nuances a serem considerados, mas na sua versão mais radical a

afirmação resulta basicamente correta. Nenhum “herege” que negou esta via “canônica” de legitimação, dentro do sistema ao longo da história foi canonizado pela Ciência (quando mais consegui historicamente algum reconhecimento póstumo marginal, e pelos historiadores, mas não pelos cientistas), e todos os grandes pensadores e revolucionários reconhecidos amplamente se mantiveram estritamente dentro do “colégio invisível” para convencer ao resto das suas ideias, sem “correr por fora”, mesmo em situações pouco convencionais de isolamento geográfico, por exemplo.

Uma outra questão de interesse é como os membros do corpo científico enxergam o progresso das suas disciplinas e as contribuições a elas. Ideias do tipo “estamos todos no mesmo barco” etc. são minoritárias, mas ainda se estamos falando dos líderes, embora sejam dominantes em comunidades emergentes um pouco afastadas dos grandes centros dos países desenvolvidos. Embora nem sempre explicitamente, os pesquisadores em condição de liderança sabem que os fatores humanos (egos, escrúpulos, etc.) são muito mais importantes que posições universalistas idealistas. Assim, poderíamos dizer que, junto com a instrumentalização técnica, a principal tarefa da pós-graduação é precisamente o doutrinamento dos estudantes para que consigam atuar e sobreviver nesta realidade. É por isto que a pós-graduação é tão importante na vida do cientista, e vai muito além do que efetivamente tenha produzido cientificamente. De fato, é possível dizer que este processo define a condição inicial do graduado para ter uma atitude de sublíder ou de massa científica. Estas duas posturas são qualitativa e fundamentalmente diferentes, e se realimentam positivamente conforme os resultados obtidos pelo indivíduo.

Finalmente, existe um fenômeno coletivo que não tem sido suficientemente estudado na Ciência, e que contribui para realimentar a estrutura piramidal esboçada. Trata-se do *Groupthink*, expressão cunhada em 1972 pelo sociólogo Irving L. Janis [8]. O *Groupthink* consiste na supressão da dissidência dos indivíduos em favor da harmonia grupal, ou seja, em ir em favor da tendência geral. No caso específico das Ciências, isto quer dizer que a maior parte da massa científica e até muitos dos seus membros nos estratos superiores, tenderão a abraçar os problemas, métodos e di-

retrizes dos líderes; observando-se a supressão ou ocultação do pensamento crítico, a adesão rápida às tendências das disciplinas, um grau variável de autocensura e a rejeição sumária daquelas vozes dissonantes (heréticas) para reforçar o pertencimento ao grupo (isto é, ao corpo científico). As observações acima referidas à rejeição de “hereges” heterodoxos são parcialmente compreendidas em este contexto, mas esta relação é complexa e merece um aprofundamento que vai muito além deste ensaio.

6 Conclusões

Discutimos neste trabalho alguns aspectos da estrutura do corpo científico e suas consequências para os cientistas que atuam dentro dele. Uma fundamentação rigorosa destas ideias é muito difícil, embora existam trabalhos na literatura especializada que têm encarado esta tarefa. Acreditamos que o principal valor dele consiste em provocar alguma reflexão a respeito de temas que nem sempre são motivo de análise, mas que às vezes chegam até provocar um certo mal-estar, especialmente entre alunos de pós-graduação.

Expressamos aqui uma visão neo-escolástica do corpo científico, com estrutura piramidal, mecanismos de ascenso, submissão aos líderes (evidenciado pelo fato de que, perante uma rejeição forte e generalizada de um trabalho, até o próprio autor pode chegar a “desconvencer-se” para não se expor ao ridículo), e outras características que precisam de aprofundamento maior, tais como a divisão do trabalho e sigilo de informação (por exemplo, indisponibilidade pública de programas utilizados para analisar dados). Estas características são próprias da Ciência em geral, e da Astronomia em particular.

Afirmamos também que a tão discutida “democratização” pela globalização e informatização tem um efeito inverso ao esperado. Como esta descrição não se refere ao que gostaríamos que acontecesse, mas ao que realmente é observado, cabe a nós perguntar se é possível uma evolução deste modelo, onde estamos individual e coletivamente inseridos, assim como quais atitudes e decisões concretas combatem ou reforçam o estabelecido antes descrita.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer o apoio e as conversas com os Dres. L. C. Jafelice, R. Rosas Fenandes e T. Pires a respeito dos temas abordados.

Sobre o autor

Jorge Ernesto Horvath (foton@iag.usp.br), Professor Titular no IAG-USP, é graduado em Física (1985), Doutor em Ciências em 1989 na Universidad Nacional de La Plata (Argentina) e Livre-Docente pela USP em 1997. Autor de pesquisas em Astrofísica Relativística, Altas Energias e Cosmologia, além de vários livros no Brasil e no exterior para os diferentes níveis de Educação. Pesquisador Nível I do CNPq e visitante na University of Arizona (1998-1999). Fundador e Editor da *Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia* (RELEA) desde 2003. Coordenou de 2011 até 2021 o Núcleo de Pesquisas em Astrobiologia da USP, e atualmente é Coordenador do Grupo de Astrofísica Relativística e Desastres EsteLares (GARDEL) no IAG-USP.

Referências

- [1] K. Popper, *A lógica da pesquisa científica* (Cultrix/EDUSP, São Paulo, 1972).
- [2] R. K. Merton, *The Sociology of Science: Theoretical and Empirical Investigations* (University of Chicago Press, Chicago, 1973).
- [3] T. S. Kuhn, *A estrutura das revoluções científicas* (Perspectiva, São Paulo, 2020).
- [4] A. Polyakov, *A view from the island* (1992). [ArXiv:9211140v1](https://arxiv.org/abs/9211140v1).
- [5] A. de Rújula, *The new paradigm for Gamma-Ray Bursts: A case of unethical behaviour?* (2003). [ArXiv:0310134](https://arxiv.org/abs/0310134).
- [6] G. Taubes, *Nobel Dreams* (Random House, New York, 1987).
- [7] A. A. Zuccala, *Revisiting the Invisible College: A case study of the intellectual structure and social progress of singularity theory research in Mathematics*, Tese de Doutorado, Universidade de Toronto (2004). Disponível em http://individual.utoronto.ca/azuccala_web/Thesis-frontpages.pdf, acesso em fev. 2025.
- [8] I. L. Janis, *Victims of groupthink: A psychological study of foreign-policy decisions and fiascoes* (Houghton Mifflin, Boston, 1972).

A vida média do CO₂ na atmosfera terrestre e o aumento de temperatura no horizonte 2050

José Antônio de Freitas Pacheco

Observatoire de la Côte d'Azur

Resumo

Neste trabalho é apresentado um modelo simples da evolução do nível de CO₂ na atmosfera terrestre. Usando dados disponíveis das emissões de CO₂ devidas a atividade humana e considerando uma estocagem do carbono por mecanismos agindo na biosfera, o tempo médio de residência do CO₂ na atmosfera foi estimado em 120 anos. Supondo que a tendência observada nas emissões do CO₂ sejam mantidas, a extração dos resultados do modelo indicam no horizonte de 2050 uma concentração de CO₂ da ordem de 513 ppm e um aumento de +2,6°C na temperatura global, acima do limite estabelecido pelo acordo de Paris.

Abstract

In this work a toy model is presented describing the evolution of the CO₂ level in the Earth's atmosphere. Using present data on the CO₂ emission resulting from the human activity and carbon stockage by mechanisms acting in the biosphere, the average lifetime of CO₂ in the atmosphere was estimated to be 120 years. If the emission rate behavior observed in the last decades is maintained, our model predicts around 2050 a CO₂ concentration of 513 ppm and a temperature increase of +2,6°C above the limit fixed by the Paris agreement.

Palavras-chave: Ciclo do carbono, aquecimento global, dióxido de carbono

Keywords: carbon cycle, global warming, carbon dioxide

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v6n1.47716](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v6n1.47716)

1 Introdução

A concentração do dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera terrestre é um dos fatores determinantes na definição das condições climáticas do nosso planeta. Juntamente com o metano (CH₄) e o vapor de água (H₂O), eles constituem os principais gases responsáveis pelo efeito estufa, mecanismo sem o qual seria impossível manter a água no estado líquido na superfície da Terra [1].

Os eventos meteorológicos extremos ocorridos recentemente, inundações no sul do Brasil, sul da Espanha ou no norte da França, bem como episódios de seca prolongada na Amazônia e incêndios florestais incontroláveis na Grécia, na Califórnia ou no Pantanal, são evidências da evolução do clima terrestre em escala global. Tais mudanças representam um risco importante para a sobrevivência da espécie humana. Na conferência sobre mudanças climáticas organizada pela ONU em Paris em 2015, houve um acordo entre 196 países, visando uma redução nas emis-

sões de CO₂, o principal agente do efeito estufa, para limitar o aumento da temperatura média global em, no máximo, +1,5°C no horizonte de 2050. Tal meta dificilmente será atingida e, provavelmente será ultrapassada, pois se a emissão de CO₂ em escala mundial sofreu uma ligeira queda durante a pandemia do Covid-19 em 2019-2020, houve uma retomada econômica nos países motores da produção e do comércio mundial, caso da China e Estados Unidos, com um consequente aumento das emissões de CO₂. Por outro lado, o recém-empossado governo dos EUA retirou-se (pela segunda vez) do acordo de Paris, o que representa um obstáculo adicional para que a meta de +1,5°C não seja ultrapassada, sobretudo porque outros líderes populistas europeus pensam agora em renegociar o *green deal* estabelecido pela União Europeia. O ceticismo climático da nova administração dos EUA está afetando agora diretamente a NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), um dos principais institutos de pesquisas climáticas do

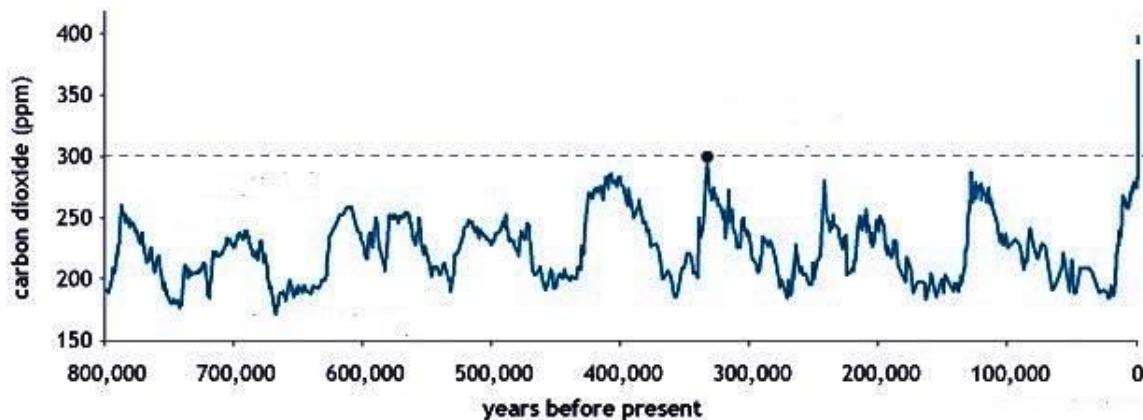


Figura 1: Variação do nível do CO₂ atmosférico nos últimos 800.000 anos medida na camada de gelo na Antártica. Figura produzida pela NOAA.

mundo, o que poderá prejudicar inúmeros projetos de observação da Terra e as colaborações internacionais.

Neste artigo, através de um modelo simples, será examinado o ciclo do carbono (CO₂), visando entender sua evolução, em particular após o início do século 20, quando fontes resultantes da ação humana passaram a contribuir de forma significativa em relação às fontes naturais. O tempo de residência do CO₂ na atmosfera pode ser estimado, bem como a concentração esperada deste gás em 2050 se as tendências atuais forem mantidas. O nível de CO₂ previsto pelo modelo implica em um aumento de +2,6°C da temperatura global, caso de um cenário catastrófico, segundo o GEIC.

2 O ciclo do carbono

Em escalas geológicas, a concentração do CO₂ atmosférico é controlada pelo ciclo geoquímico conhecido como silicato-carbonato, descrito pelas reações de Urey [2]. Na presença de água e de rochas contendo silicatos, o CO₂ através do intemperismo reage com os silicatos formando carbonatos, processo que reduz o nível de CO₂ na atmosfera. A eficiência de tal processo depende, entre outros fatores, da temperatura da superfície. Os carbonatos assim formados são reciclados no manto terrestre, via mecanismos de subducção entre placas tectônicas. Uma vez reciclado, parte do CO₂ retorna à atmosfera através do vul-

nismo e da desgaseificação de rochas magmáticas. A taxa atual estimada de emissão do CO₂ por estes processos é da ordem de 0,33 Gt/ano (Gt = giga tonelada), compensando praticamente o sequestro do CO₂ pelo intemperismo e mantendo um estado quase estacionário [3].

Durante a era pré-industrial, a concentração do CO₂ atmosférico manteve-se em um nível da ordem de 280 ppm (ppm = partes por milhão). A Figura 1 mostra a evolução da concentração do CO₂ atmosférico nos últimos 800.000 anos, obtida através da análise de bolhas de ar presentes na camada de gelo antártico.

Através de uma simples inspeção da Figura 1 verifica-se que a concentração do CO₂ oscila entre 180-280 ppm, provavelmente devido a variações seja no intemperismo, seja na atividade vulcânica, mas jamais ultrapassando o limite de 300 ppm, alcançado uma única vez cerca de 320.000 anos atrás. Deve-se notar, igualmente, o aumento brusco do nível do CO₂ na era atual devido a ação humana.

Atualmente, a emissão de CO₂ devido às atividades humanas é da ordem de 49 Gt/ano, ou seja, cerca de 150 vezes a emissão natural devido ao vulcanismo e desgaseificação de rochas. O intemperismo, como mecanismo de sequestro do CO₂, implica em escalas de tempo da ordem de 10⁴ – 10⁵ anos, por demais longas para controlar as taxas de emissão atuais.

Um mecanismo de destruição do CO₂ atmosférico frequentemente mencionado é a fotodissocia-

ção pela radiação UV solar. No entanto, a radiação UV é fortemente absorvida pela camada de ozônio, o que reduz consideravelmente a eficiência de tal mecanismo. Desta forma, a fotodissociação por si implica em escalas de sobrevida para o CO₂ da ordem de alguns séculos, muito maior do que a sobrevida resultante dos mecanismos de sequestro presentes na biosfera, que discutiremos em seguida.

Um dos principais mecanismos de captura e de armazenamento do CO₂ na biosfera é a fotossíntese realizada pelos vegetais. Nesse processo, o CO₂ interage com a água sob a ação da radiação solar, produzindo orgânicos como a glucose e liberando oxigênio. Durante a noite, na ausência de luz, o processo inverso (respiração) ocorre, quando moléculas orgânicas complexas se dissociam, liberando CO₂ e energia, utilizada geralmente para formar moléculas de ATP (trifosfato de adenosina). Em geral, no balanço entre fotossíntese e respiração, estima-se uma taxa de sequestro de CO₂ da ordem de 11 Gt/ano [4]. Além das florestas, os oceanos absorvem o CO₂, onde as algas e o plâncton realizam processos de fotossíntese e de respiração, correspondendo a um sequestro adicional do CO₂ da ordem de 9-11 Gt/ano [5]. Desta forma, o sequestro de CO₂ pela biosfera corresponde a uma taxa total da ordem de 20-22 Gt/ano. É evidente que a deforestação e a acidificação dos oceanos diminui a capacidade de sequestro e, portanto, de controle do nível de CO₂ na atmosfera, contribuindo para o reaquecimento do clima. Notar que a taxa atual de emissão (49 Gt/ano) é mais que o dobro da taxa de sequestro pela biosfera, o que explica o aumento contínuo da concentração do CO₂.

3 Modelo considerado

A evolução do nível atmosférico do CO₂ pode ser estimada através de um modelo simples, caracterizado pela equação diferencial abaixo:

$$\frac{dM_C}{dt} = P - \frac{M_C}{T} \quad (1)$$

Em outras palavras, a taxa de variação da massa total do CO₂ atmosférico M_C é igual a taxa de emissão pelos mecanismos devidos à ação humana, deduzida da taxa de sequestro pela biosfera, caracterizada pelo tempo de vida T .

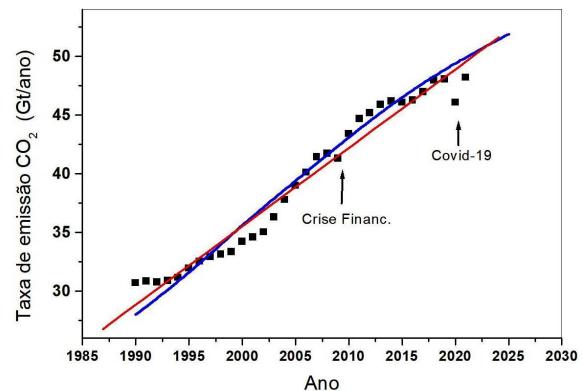


Figura 2: Taxa de emissão anual de CO₂ em giga toneladas por ano segundo o WRI (World Resources Institute). As curvas em azul e em vermelho indicam as representações usadas para extrapolar os dados até 2050.

Introduzindo-se a concentração do CO₂ como a razão entre o número destas moléculas e aquele definindo as moléculas da atmosfera, isto é:

$$X_C = \frac{M_C/\mu_C}{M_a/\mu_a} \quad (2)$$

onde $\mu_a = 28,97$ e $\mu_c = 46$ são respectivamente as massas moleculares das componentes atmosféricas (essencialmente nitrogênio e oxigênio) e do CO₂, enquanto $M_a = 5,14 \times 10^{18}$ kg é a massa da atmosfera. Substituindo (2) na (1) obtemos:

$$\frac{dX_C}{dt} = \frac{P\mu_a}{M_a\mu_C} - \frac{X_C}{T} \quad (3)$$

A solução numérica de (3) requer o conhecimento da taxa de emissão P do CO₂. Na Figura 2 mostra-se os dados anuais de emissão do CO₂ em Gt/ano entre 1990 e 2024, obtidos do World Resources Institute. Estão indicados na figura dois eventos importantes nos quais houve uma queda na atividade humana em escala mundial e uma consequente redução na taxa de emissão do CO₂. Tais eventos são respectivamente a crise financeira de 2008 e a pandemia do Covid-19 em 2019-2020. Além destes eventos excepcionais, nota-se que a evolução da taxa de emissão não aumenta no mesmo ritmo, mostrando frequentes inflexões ligadas a variações na atividade industrial e agropecuária.

Para poder extrapolar a solução numérica da (3) até 2050, dois métodos foram utilizados para representar a taxa de emissão além de 2024. No primeiro, uma simples extração linear foi con-

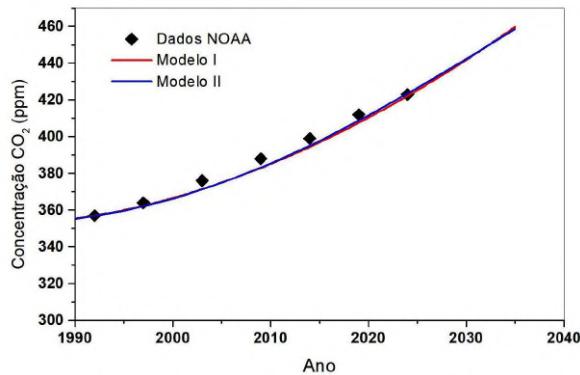


Figura 3: Variação da concentração do CO₂ em ppm (partes por milhão) obtidas a partir do site da NOAA, baseadas em observações obtidas no Observatório de Mauna-Kea (Havai). As curvas contínuas correspondem as duas representações matemáticas discutidas no texto. No período 1990-2024 coincidem, começando a diferir a partir de 2040.

siderada (curva em vermelho na Figura 2), enquanto no segundo (curva em azul), foi utilizado um método mais elaborado, que leva em conta as diferentes inflexões na curva de emissão. Na solução numérica da equação (3), entre os anos 1990 e 2024 os dados de emissão foram utilizados diretamente e interpolados. O valor de T foi modificado até que o melhor ajuste com as observações do nível de CO₂ atmosférico (ver Figura 3) fosse obtido. Nestas condições, o valor obtido foi $T = 120$ anos, ou seja, um pouco mais de um século.

A massa atual de CO₂ atmosférico é aproximadamente 3120 Gt e utilizando-se a vida média obtida, pode-se estimar a taxa atual de sequestro pela biosfera, que corresponde a 26 Gt/ano. Este valor é perfeitamente compatível com a taxa de captura inferida por outros métodos que, como vimos anteriormente, é da ordem de 20-22 Gt/ano.

Na Figura 3 é igualmente mostrada a variação do nível do CO₂ no período 1990-2024 usando-se as representações matemáticas da taxa de emissão mencionadas anteriormente. As soluções não se distinguem nesse intervalo, coincidindo com a solução obtida diretamente da interpolação dos dados existentes.

No horizonte de 2050, a solução obtida com $T = 120$ anos e uma extrapolação linear da taxa de emissão, indica que a concentração esperada de CO₂ seria da ordem de 521 ppm, enquanto a segunda solução indica um valor da ordem de 504

ppm, ou seja, diferindo de apenas 3,3% da solução linear. Usando tais resultados sobre o nível esperado do CO₂ atmosférico em 2050, o aumento esperado da temperatura pode ser estimado através da relação (ver, por exemplo, Ref. [6]):

$$\Delta T = \lambda \ln \left(\frac{X_C}{X_0} \right) \quad (4)$$

onde X_C é a concentração do CO₂ na época considerada e X_0 é um valor de referência, geralmente tomado na época pré-industrial, isto é, 280 ppm. O parâmetro λ pode ser interpretado da seguinte maneira – supondo-se que a concentração de CO₂ na atmosfera varie de forma exponencial, pode-se determinar através das observações a variação de temperatura ΔT_d quando a concentração de CO₂ dobra em relação ao valor de referência. Neste caso $\lambda = \Delta T_d / \ln 2$. Diferentes estimativas indicam $\Delta T_d \sim +2C$ a $+4C$. Adotando um valor intermediário, isto é, $\Delta T_d = +3C$, obtemos $\lambda = +4,3C$. Nestas condições, se em 2050 a concentração de CO₂ atingir o valor de 513 ppm, como sugere o presente modelo, então pela (4), devemos esperar um aumento de temperatura de $+2,6C$.

4 Conclusões

O modelo simples para a evolução do nível de CO₂ na atmosfera apresentado neste trabalho permite uma discussão sobre vários aspectos do aquecimento climático. Primeiramente, uma estimativa do tempo de vida do CO₂ na atmosfera, um dos principais contribuidores do efeito estufa. Os dados atuais indicam uma vida da ordem de 120 anos, que depende essencialmente dos mecanismos de sequestro presentes na biosfera. Um aumento contínuo da deflorestação e da acidez dos oceanos produzirá uma maior permanência do CO₂ na atmosfera e um consequente aumento da temperatura. Um tempo de vida de 120 anos implica em uma taxa atual de captura do CO₂ da ordem de 26 Gt/ano, comparável aos valores obtidos de forma independente através de outros procedimentos.

Mantido o aumento das emissões de CO₂ constatado nos últimos anos, bem como a taxa de sequestro pela biosfera, o modelo prevê uma concentração da ordem de 513 ppm no horizonte de

2050 e um aumento médio da temperatura global de +2,6 °C, acima da meta fixada pelo acordo de Paris.

Se a temperatura global aumentar de +2,6 °C, o Brasil deverá passar por inúmeros desafios, em particular na região amazônica. As secas prolongadas e as temperaturas elevadas são fatores que favorecem os incêndios florestais. Tal processo de deflorestação contribui para um aumento da concentração do CO₂, da temperatura e o mais grave, o balanceamento do ciclo biológico da vegetação pode ser alterado, com a emissão de CO₂ pela respiração ultrapassando a absorção pela fotossíntese. A perda de 30-40% da floresta amazônica representa um ponto crítico além do qual a região se transformará em uma savana, alterando o ciclo de chuvas regional.

As ondas de calor se tornarão mais frequentes, principalmente no nordeste e as temperaturas em cidades como Fortaleza ou Recife poderão alcançar valores limites para a vida humana (temperaturas de bulbo húmido superiores a 35°C). As secas serão prolongadas, causando fortes movimentos migratórios. No sul e sudeste, grandes capitais como São Paulo, Rio de Janeiro, Curitiba sofrerão com fortes tempestades e inundações, como recentemente ocorrido em Porto Alegre. Por outro lado, um aumento de +2,6 °C na temperatura global no horizonte de 2050 pode representar um aumento da ordem de 30-40 cm no nível do mar, podendo causar problemas para algumas cidades costeiras como Recife e Salvador.

A alteração do regime de chuvas causará sérios problemas para a economia nacional uma vez que cerca de 60% da energia produzida no país é de origem hidroelétrica e o agronegócio representa uma parte importante da riqueza brasileira. Não se pode excluir a necessidade de um rationamento de água em grandes centros urbanos como a crise no abastecimento ocorrida em São Paulo em 2014–2015.

Em outras palavras, com tal aumento de temperatura no horizonte de 2050, o Brasil poderá ser afetado por uma combinação de crises ligadas ao ambiente, a economia e de origem migratória. O país necessita desenvolver urgentemente uma política de adaptação climática, incluindo a proteção da Amazônia, investimentos em energias renováveis, planificação do uso e proteção das reservas de água potável, bem como na preparação

do processo migratório.

5 Nota aos leitores

Os parágrafos sobre consequências para o Brasil se a temperatura aumentar de +2,6 °C em 2050 teve assistência de IA. Após introduzir informações quanto a variação de temperatura, concentração do CO₂ atmosférico na data em questão e cenários alternativos face a tais parâmetros desenvolvidos pelo IPCC 2000, a IA, especificamente para o Brasil, indicou os principais problemas mencionados acima.

Sobre o autor

José Antônio de Freitas Pacheco (pacheco@oca.eu) é Professor Emérito do Observatoire de la Côte d'Azur (OCA), na França. Formado na Universidade de São Paulo (USP), foi diretor do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP, do Observatório Nacional, e do próprio OCA. Membro da Academia Brasileira de Ciências, foi agraciado com a medalha do Mérito Científico do Governo Brasileiro. Possui mais de 200 artigos científicos publicados, tendo sido orientador de mais de 20 doutorandos, tanto no Brasil quanto na Europa. Autor do livro *Vida no Universo*, publicado pela EDUSP.

Referências

- [1] T. R. Anderson, E. Hawkins e P. D. Jones, *CO₂, the greenhouse effect and global warming: from the pioneering work of Arrhenius and Callendar to today's Earth System Models*, *Endeavour* **40**(3), 178 (2016).
- [2] J. C. G. Walker, P. B. Hays e J. F. Kasting, *A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of Earth's surface temperature*, *Journal of Geophysical Research: Oceans* **86**(C10), 9776 (1981).
- [3] N. E. Batalha et al., *Climate cycling on early Mars caused by the carbonate–silicate cycle*, *Earth and Planetary Science Letters* **455**, 7 (2016).

- [4] P. Friedlingstein et al., *Global Carbon Budget 2022*, *Earth System Science Data* **14**(11), 4811 (2022).
- [5] IPCC, *Sixth Assessment Report* (2021-2023). Disponível em <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>, acesso em mar. 2025.
- [6] V. Ramanathan, *Trace-Gas Greenhouse Effect and Global Warming: Underlying Principles and Outstanding Issues Volvo Environmental Prize Lecture-1997*, *Ambio* **27**(3), 187 (1998). Disponível em <http://www.jstor.org/stable/4314715>, acesso em mar. 2025.

Arqueoastronomia de Supernovas

B.B. Martins¹, J.E. Horvath¹, F. S. M. Costa² e L. C. Jafelice³

¹Universidade de São Paulo

²Unidade Acadêmica de Física da Universidade Federal de Campina Grande

³Coletivo Educação Científica Decolonial

Resumo

As supernovas históricas, registradas por diferentes observadores ao redor do planeta por muitos séculos, também podem ter sido representadas como arte rupestre por povos originários das Américas. Existem propostas que associam petróglifos e pinturas rupestres no hemisfério norte com alguns desses eventos. O presente trabalho procura apresentar e discutir se alguns registros de petróglifos localizados nos estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte podem exibir essas supernovas históricas. Com o software Stellarium, foram simulados os padrões do céu no momento das explosões de cada uma das supernovas, e posteriormente comparadas com as figuras encontradas. Considerando ainda os hábitos culturais bem estabelecidos dos povos Tarairiú, identificamos correspondências sugestivas entre as figuras e as supernovas de 185, 1054 e 1572, embora o princípio da confirmação definitiva dependa de análises de datação ainda não disponíveis.

Abstract

The historical supernovae, recorded by different observers around the globe for many centuries, may have also been depicted as rock art by Indigenous peoples of the Americas. There are suggestions of the association of petroglyphs and rupestrian art in the northern hemisphere with some of these events. This work aims to present and discuss whether a set of petroglyphs located in the states of Paraíba and Rio Grande do Norte may represent these historical supernovae. Using Stellarium software, the sky patterns at the time of each supernova explosion were simulated and then compared to the figures found. Considering the well-established cultural practices of the Tarairiú peoples, we identified suggestive correspondences between the figures and the supernovae of 185, 1054, and 1572, although the start of a definitive confirmation depends on dating analysis not yet available.

Palavras-chave: supernova; arqueoastronomia; arte rupestre; povos indígenas; Tarairiú.

Keywords: supernova; archaeoastronomy; rock art; Indigenous peoples; Tarairiú.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v6n1.47464](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v6n1.47464)

1 Introdução

É comum hoje estarmos familiarizados com imagens muito detalhadas de satélites e telescópios que estimulam a imaginação dos estudantes e o público em geral. Porém, é também bem conhecido que os registros dos céus são feitos desde tempos muito antigos. Observações dos astros já eram feitas ao longo da pré-história, e as fases da Lua e o movimento aparente do Sol e das constelações marcados em rochas e cavernas e celebrados em monumentos de pedra. Estas observações foram fundamentais para a orientação e sobrevivência de povos nômades e para a compreensão de mudanças sazonais cíclicas, estações do ano e em outras várias mudanças correlatas [1, 2]. Depois

do começo dos assentamentos humanos, outros propósitos foram acrescentados a essas práticas, envolvendo rituais e crenças complexas que se desenvolveram por muitos séculos.

É certo que fenômenos astronômicos transitentes também foram registrados na forma de arte rupestre: eclipses, conjunções de planetas e astros que causaram um aumento de luminosidade temporária no céu, e nos casos extremos, o aparecimento e posterior sumiço de alguns astros. Entre estes, é possível que povos pré-históricos tenham registrado cometas, novas e explosões de supernovas, as quais constituem nosso objeto de interesse. O estudo da relação entre conhecimento astronômico e culturas pré-históricas ou povos antigos por meio de registros arqueológicos é conhe-

cido como Arqueoastronomia [1, 2]. Neste trabalho, apresentamos possíveis registros de supernovas por povos originários no Brasil e, portanto, a Arqueoastronomia de supernovas no Brasil, especificamente nos interessantes registros do Estado da Paraíba e pelo menos um exemplo no Estado do Rio Grande do Norte.

Supernovas são explosões extremamente energéticas que podem ocorrer no final do ciclo de vida das estrelas. A fenomenologia por trás da sua ocorrência, no entanto, ainda é deveras complexa, e contém na mesma classe eventos de supernovas termonucleares, aquelas decorrentes do colapso gravitacional, as produzidas pela captura eletrônica e as chamadas superluminosas, explicadas detalhadamente na Referência [3]. Com exceção das superluminosas, a escala de energia é similar, em torno de 10^{51} erg, e para um observador a olho nu é muito difícil ou impossível dizer que tipo de evento está observando. Essa é a situação *a priori* de todos os autores nativos americanos que descreveremos a seguir. A Astronomia moderna tem localizado e estudado os remanescentes associados e, em muitos casos, reconstruiu que tipo de eventos teriam sido eles, embora existam algumas controvérsias [4]. Mas isto não afeta os registros rupestres que procuramos.

Independentemente do tipo específico de supernova, umas 1.3 ± 0.9 supernovas devem ocorrer a cada século. A última registrada, chamada de SN 1987A, decorreu da explosão da supergigante azul Sanduleak-69 202 na Grande Nuvem de Magalhães em 1987. Apesar de oito registros adicionais deste tipo haviam sido descobertos e confirmados anteriormente. Essas outras supernovas históricas foram reconhecidas a partir de documentos escritos por diferentes povos de forma bastante heterogênea. Isto é, embora a escrita tenha preservado o testemunho original, existem dúvidas e imprecisões sobre a ocorrência das supernovas e suas características em geral. Veremos a seguir um breve resumo destes registros obtidos e analisados de forma moderna pela Astronomia.

2 As supernovas históricas nos últimos dois milênios

O primeiro registro histórico confirmado de uma supernova foi feito por astrônomos chineses

e data do ano 185 d.C., durante a dinastia Han. Esse evento é mencionado no *Hou Hanshu*, que descreve o surgimento de uma “estrela visitante” que permaneceu visível no céu por um período entre 8 e 20 meses. Além das incertezas quanto à duração exata da observação, também não se sabe a sua posição precisa no céu, que foi estimada próxima ao equador galáctico. O remanescente associado a essa supernova é assim incerto, pois existem diversos remanescentes de supernovas nessa região [4].

Durante as dinastias chinesas Song (Sul da China) e Jin (Norte da China), também foram registradas as supernovas SN 386 e SN 393. Em 386 d.C., uma nova estrela teria sido vista por 60 a 115 dias. Embora sua localização em torno do equador galáctico seja imprecisa, costuma-se atribuí-la ao remanescente de supernova G11.2-0.3. Porém, sua curta duração possibilita ainda que tenha sido uma nova (um fenômeno completamente diferente, de energia muitíssimo menor), e não de uma supernova. Já a SN 393, visível por cerca de 8 meses, é considerada uma supernova mais provável, embora não se conheça seu remanescente, e sua localização também foi estimada nas proximidades do equador galáctico [4].

Em 1006, o árabe Ali Ibn Ridwan registrou no *Kitab al-Shifa* o aparecimento de um objeto muito brilhante, próximo às constelações de Escorpião e Touro. O objeto teria, inicialmente, um brilho um pouco maior do que $\frac{1}{4}$ da Lua cheia e permanecido visível por cerca de três anos, até o seu desaparecimento [4]. Monges suíços também descreveram uma variabilidade no brilho do objeto, e chineses relataram que ele corresponderia a metade da Lua cheia, mas que teria aparecido na constelação de Lúpulo, distante angularmente cerca de 1 grau da constelação de Escorpião [4].

Embora as primeiras análises tenham considerado o objeto do ano 1006 como um cometa, o seu aparecimento súbito descrito em bastante detalhe por Ibn Ridwan e os registros adicionais em Marrocos, Japão, Iêmen e China levaram à identificação do evento como a SN 1006, considerada a supernova mais brilhante já registrada. O brilho de objetos astrofísicos é comumente descrito por uma escala de magnitude, em que, quanto menor o valor, mais brilhante o astro é. Estima-se que a SN 1006 tenha atingido uma magnitude máxima de -7.5, tornando-se visível inclusive du-

rante o dia [4] por bastante tempo. Para efeitos de comparação, Vênus possui uma magnitude visual máxima de -4.4.

Ademais destes casos, a supernova SN 1054 foi registrada pela primeira vez em 4 de julho de 1054 d.C. pelos chineses e japoneses [4, 5]. Conforme apresentado por Brandt e Williamson [6], na China, a aparição também foi nomeada de “estrela convidada” e surgiu na Dinastia Song, segundo os textos de Song Shi e Song Huiyao, na direção leste, sob a vigilância da estrela Tiānguān (Zeta Tauri). A supernova ficou visível no céu noturno durante 642 dias de acordo com Song Huiyao [7].

Conforme Fujiwara no Teika (Período Kamakura, séculos 12–13 D.C. [8]) no Japão, nos textos Meigetsuki e Ichidai Yoki também é mencionada uma “estrela convidada” que surgiu no quarto mês lunar (entre 30 de maio a 8 de junho de 1054 no calendário juliano), emergindo próximo à Zeta Tauri e com um brilho tão intenso quanto Júpiter (magnitude máxima \sim -3). Sabe-se que, na noite em que a explosão da SN 1054 foi observada, a magnitude aparente chegou a um valor de -6 (ou cerca de seis vezes mais brilhante que o planeta Vênus), o suficiente para chamar atenção daqueles que estavam habituados com a quietude e harmonia do Cosmos [9].

Na cultura árabe, o evento também foi testemunhado por astrônomos como o médico Ibn Butlan na obra *Uyun a-Anba*, uma enciclopédia biográfica de médicos. A ausência de relatos da supernova na literatura árabe pode ser explicada pelo fato de que os astrônomos árabes tradicionalmente eram interessados em fenômenos cíclicos, regulares e previsíveis, e eventos como supernovas e cometas eram ignorados. Isso poderia ser explicado em parte pela influência de Aristóteles, que defendia a imutabilidade dos céus [10], o que não impediu que alguns observadores realmente enxergassem o evento e o registrassem. Existe também a possibilidade real de haver mais registros desse e de outros fenômenos astronômicos transitentes que ficaram perdidos no tempo.

Segundo alguns autores [9, 11–14], a SN 1054 também foi vista pelos europeus, como provaria o relato escrito por Jacobus Malvecius, em uma crônica, no século 15: “E naqueles dias uma estrela de imenso brilho apareceu dentro do círculo da Lua alguns dias após sua separação do Sol”

(Ref. [11], pp. 10-17). Há outros documentos que sugerem relatos da supernova na Europa, como a Cronica Rampona [12], a Crônica da Igreja de Oudenburg [13], a História de Albertus, uma crônica armênia, bem como algumas menções vagas nos Anais Irlandeses [14]. A SN 1054 foi associada no século 18 à nebulosa do Caranguejo.

Há mais exemplos posteriores: segundo registros das dinastias Song e Jin, a supernova de 1181 foi observada a partir do dia 6 de agosto e permaneceu visível por 185 dias. O evento foi descrito na quinta estrela da constelação imperial chinesa de *Chuanshe*, conforme documentado no *Wenxian Tongkao* (“Estudo Compreensivo da Civilização”). Também foi registrada por japoneses em várias fontes. Atualmente, identifica-se o local de explosão da supernova como a fonte de rádio 3C58 (G130.7+3.1), onde foi identificado um remanescente de supernova contendo um pulsar [4].

Ao ser um evento bem mais moderno, há diversos registros da explosão da supernova de 1572, localizada na constelação da Cassiopeia. Os coreanos avistaram o evento em 6 de novembro com um brilho comparável ao de Vênus, seguido pelos chineses em 8 de novembro, que relataram sua visibilidade até mesmo durante o dia. A supernova permaneceu visível por cerca de 18 meses [4]. O astrônomo europeu Tycho Brahe observou o fenômeno em 11 de novembro, realizando medições precisas de sua localização, cor e tamanho aparente, razão pela qual o evento ficou conhecido como Supernova de Tycho (SN 1572). Em 1952, a supernova foi associada ao remanescente 3C10 (G120.1+2.1), uma intensa fonte de ondas de rádio e raios-X.

Por fim, a supernova de Kepler (SN 1604) foi observada na Europa em 9 de outubro de 1604, na China em 10 de outubro e na Coreia em 13 de outubro, próxima à conjunção de Marte e Júpiter. O astrônomo Johannes Kepler descreveu em seu livro *De Stella Nova in Pede Serpentarii* a posição da supernova e as mudanças em seu brilho ao longo de 12 meses. No entanto, as primeiras observações não coincidem com o momento de seu brilho máximo, que teria ocorrido por volta de 28 de outubro, data próxima ao dia em que a explosão já seria observável [4]. A SN 1604 está associada ao remanescente G4.5+6.8, uma fonte intensa de ondas de rádio e raios-X.

3 Os registros rupestres de supernovas no hemisfério norte

Em se tratando de eventos notáveis, podemos esperar que povos originários sem sistemas de escrita também podem ter observado as explosões e as registrado na forma de arte. Nos Estados Unidos, há bastante investigação sobre a associação entre petróglifos (gravuras registradas em rochas) encontrados nos estados do Novo México, Arizona, Nevada e Califórnia a essas supernovas históricas registradas nos demais continentes [5]. A análise da arte rupestre em Chaco Canyon, Novo México, propôs que o Pueblo Ancestral (popularmente chamado de Anasazi), conhecido por suas avançadas observações astronômicas, também pode ter registrado a supernova de 1054 (SN 1054) entre suas representações de estrelas e constelações.

O célebre petróglifo de Chaco Canyon foi descoberto em 1970. Está localizado no sítio Peñasco Blanco e data do século 11 d.C. No local, há três pinturas rupestres (Figura 1), na qual pode-se observar uma Lua crescente voltada para baixo ao lado de um objeto celestial brilhante à esquerda, o que seria a representação artística da supernova quando ela explodiu na manhã do dia 05 de julho de 1054. Este período corresponde ao auge dessa civilização. Logo acima da Lua crescente, há uma pintura de uma mão esquerda, indicando uma espécie de assinatura do artista ameríndio como sugerem Clottes e Lewis-Williams [15]:

“Estas mãos não são uma imagem inventada. Foram realizadas colocando a mão e por vezes o antebraço contra a parede rochosa e cobertas de tinta. Depois a mão era retirada deixando o seu contorno em negativo. Criavam “desenhos” das suas mãos, alguns com dedos incompletos ou mesmo ausentes, seriam “assinaturas individuais.”

Ao endosso implícito da Ref. [15] à hipótese da supernova, podemos contrapor o ceticismo antropológico de Kolber e Yoder [16], apontando que o registro não tem a ver com o resto da abundante arte presente na região. De fato Krupp [5] sugere que não é claro quem o fez, nem quando, já que o estilo parece com o Zuni que é encontrado vários séculos mais tarde.

Dezenas de outros petróglifos que também mostram uma possível conjunção astronômica fo-



Figura 1: Petróglifos em Chaco Canyon, Novo México.
Foto: Alex Marentes

ram descobertos espalhados em sítios próximos, em estados vizinhos, como as figuras rupestres descobertas pelo fotógrafo William C. Miller em 1955 [17] e por H. A. Abt e J.W. Fountain mais recentemente [18], ambas no nordeste do Arizona. Entretanto, embora defendia-se a existência de um terceiro petróglifo sugestivo dessa conjunção, descoberto em 2012 no parque Nacional Água Fria, com uma figura circular seguindo o mesmo padrão, com destaque para o que poderia ser a Lua e a SN 1054, há fortes indícios de que a imagem retrata, na verdade, um processo ceremonialístico de escalpelamento [5]. Este tipo de questionamento nos alerta em geral sobre os riscos de uma extração puramente visual, sem um contexto maior de caráter antropológico e cultural, além da necessidade imperativa de datação confiável.

Um segundo exemplo de confusão está no sítio de Tenabo no México, onde também foram encontrados petróglifos que, a princípio, poderiam representar a SN 1054. Porém, os astros têm posição relativa oposta ao que deveriam estar visíveis no céu, e existe ainda uma cauda representada junto ao astro brilhante [5], que deve ser assim uma representação da estrela vespertina Vênus, conforme levantado por P. Schaafsma [19–21] que estudou as representações de guerra desse astro no sudoeste americano. Esses exemplos demonstram o quanto a interpretação atual de artes rupestres pode ser complicada por diferenças socioculturais com os criadores da representação. Uma lista bastante extensa de registros tentativamente associados com supernovas foi publicada por Krupp [5] e as críticas pertinentes esmiuçadas



Figura 2: Simulação no *Stellarium* das supernovas históricas que podem ter sido vistas com a Lua (esquerda) e com o Sol (direita). Apenas as supernovas 185, 386, 1054, 1181, 1572 e 1604 podem ter sido observadas. Os tamanhos angulares da Lua e das supernovas são apenas ilustrativos. A não representação das demais supernovas não quer dizer que não tenham sido visíveis durante o dia, apenas estavam distantes demais do Sol.

caso a caso.

Concluímos que não há consenso científico para atribuir nenhuma das imagens a uma representação da explosão de uma supernova histórica. É possível que novas evidências venham mudar esta situação, mas todas as propostas devem ser consideradas como descartadas ou “a conferir”.

4 Visualizações das supernovas históricas desde o sul

As supernovas históricas mencionadas e suas principais características estão detalhadas nas Tabelas 1 e 2. Para investigarmos se esses eventos também foram observados pelos povos originários das Américas no sul, e se poderiam estar relacionados à arte rupestre, reconstruímos o padrão do céu nas datas aproximadas em que as supernovas ocorreram. A latitude escolhida foi João Pessoa (PB), devido à existência de várias possíveis representações de supernovas no estado brasileiro

da Paraíba. Utilizamos o software *Stellarium* [22] para determinar as coordenadas de cada supernova, além de analisar sua posição relativa ao Sol e à Lua e a fase lunar durante os eventos, a fim de avaliar suas condições de visibilidade.

Como resultado mais relevante, descobrimos que apenas as supernovas 185, 1054, 1181 e 1572 podem ter sido observadas simultaneamente com a Lua, tal como representado na Figura 2 (esquerda). Nos três primeiros casos, a Lua estava em fase minguante, e no último como crescente. Por outro lado, a posição da supernova pode ser observada próxima ao Sol para as supernovas 185, 386, 1054, 1181, 1572 e 1604, como mostra a Figura 2 (direita).

No Brasil, há evidências de que povos indígenas criaram sistemas de constelações e calendários próprios a partir de constelações sazonais como a constelação das Plêiades, a exemplo dos Tupinambá do Maranhão e dos Guarani [1, 2]. Na Bahia, em Santa Catarina e no Amapá, por exemplo, foram encontrados relógios solares e mo-

Tabela 1: Supernovas históricas, nomes, datas, duração, distâncias em kpc, magnitudes máximas, tipos e remanescentes compactos nos últimos dois milênios. Os eventos com o símbolo “*” são incertos e podem ter correspondido de fato a supernovas ou novas. Alguns dados também são debatidos, representados por “?”.

Supernova	Data	Duração	Distância (kpc)	Magnitude máxima	Tipo	Remanescente Compacto
SN 185	07/12/185	8 ou 20 meses	2.6	?	Ia	Nenhum
SN 386*	10/08/386	3 meses	4.5	+1.5	II?	G11-2-0-3?
SN 393*	28/03/393	8 meses	1?	0	II/Ib?	?
SN 1006	01/05/1006	3 anos	2.3	-7.5	Ia	SNR327.6+14.6
SN 1054	05/07/1054	21 meses	2	-6	II?	PSR B053+21
SN 1181*	06/08/1181	6 meses	2.6	0	?	3C58
SN 1572 (Tycho)	11/11/1572	18 meses	2.5-3	-4	Ia	G120-1+2-1
SN 1604 (Kepler)	08/10/1604	12 meses	6.3	-2.5	Ia	G4.5+6.8

Tabela 2: As supernovas históricas e prováveis localizações em coordenadas ascensão reta e declinação reconstruídas a partir dos relatos e evidências disponíveis.

Supernova	Ascensão Reta	Declinação
SN 185	14°43'00"	-62°30'00"
SN 386	18°11.5'	-19°25'
SN 393	17°14'	-39.8°
SN 1006	15°02'22.1"	-42°05'49"
SN 1054	5°34.5'	+22°01'
SN 1181	0°53'11.2"	+67°30' 02.4'
SN 1572 (Tycho)	0°25.3'	+64°09"
SN 1604 (Kepler)	17°30'35.98"	-21°28' 56.2"

numentos megalíticos (círculos de rochas) construídos para visualizar solstícios ou equinócios. Além disso, os astros também possuem significados culturais e ritualísticos para vários povos indígenas [1, 2]. Como os astros tinham grande importância para essas sociedades, é possível que explosões de supernovas visíveis a olho nu tivessem sido registradas por indígenas do Brasil. Isso pode ter resultados interessantes para eventos invisíveis desde o norte, já que não se conhecem registros de supernovas confirmados somente pelos povos do sul.

Entretanto, sem registros escritos e tendo em vista diferenças socioculturais que resultam do distanciamento temporal com os criadores já apontadas, existe um desafio maiúsculo em interpretar as artes rupestres encontradas, assim como vimos nos casos mostrados na Seção anterior. Por isso, optamos por uma análise criteriosa em que

registros rupestres com apenas uma figura isolada foram descartadas, e compararamos pares de figuras encontradas (possível supernova histórica com a Lua ou com o Sol) com a reconstrução do padrão do céu no dia da observação da explosão das supernovas como critério eliminatório. Caso a posição relativa dos astros e a fase da Lua sejam condizentes com o esperado, julgamos possível que o desenho seja de fato uma representação da supernova, a ser confirmada com a datação da arte rupestre, isto é, a determinação da sua idade e outros elementos quaisquer que possam ajudar na confirmação.

Pelas simulações, percebemos que, para os nativos no estado da Paraíba, a SN 185 teria surgido acima do horizonte entre 1h e 2h, tal que a Lua minguante apareceu em torno das 4h à esquerda da supernova. O Sol ficou visível também à esquerda da supernova a partir das 5h. A SN 185 ficou visível durante o dia até em torno das 14h, com a Lua e o Sol à sua direita e acima.

Por outro lado, em torno de 0h, a SN 386 já era visível, porém se pôs em torno das 2h. Reapareceu acima do horizonte entre 13h e 14h. Apesar de ser visível durante o dia, a supernova pode ser observada apenas por um curto período de tempo com o Sol em torno das 14h, mas com grande distância angular entre si. Não pode ter sido observada junto com a Lua.

A SN 393 esteve visível na madrugada e se pôs entre 9h e 10h. Não pode ser observada nem junto com a Lua nem com o Sol. Entretanto, Júpiter e Saturno podem ter sido observados próximos à SN 393.



Figura 3: Simulação no *Stellarium* da *SN1006* em quatro horários distintos (0h, 5h, 18h e 20h). Embora o Sol e a Lua não foram observados próximos à supernova, Marte pode ter sido observado em diferentes horários próximo dela.

Conforme a Figura 3, a SN 1006 esteve visível durante a madrugada, se pôs entre 5h e 6h e ressurgiu no horizonte a partir das 17h, mas não pôde ser observada nem com a Lua nem com o Sol, então não é possível distingui-la em petróglifos, apenas se Marte houver sido representado também.

A SN 1054 ficou visível à direita da Lua minigante durante a madrugada do dia 05/07/1054 e acompanhou o Sol das 06h até às 15h, posteriormente ficando abaixo da linha de horizonte.

A SN 1181 ficou visível à esquerda da Lua durante a madrugada e o início do dia. Pôde ser vista por um curto período de tempo com o Sol à direita em torno das 6h, entre 7h e 8h ficou abaixo da linha de horizonte, quando havia somente uma pequena distância angular entre a supernova, a Lua e o Sol.

A SN 1572 já era visível à 0h, mas se pôs entre 1h e 2h. Reapareceu acima da linha do horizonte a partir das 15h, estando a Lua crescente à sua direita. Pôde ser vista a uma grande distância angular do Sol, à sua esquerda, em torno das 16h. Às 22h, a Lua esteve à sua esquerda. Júpiter também era observado no campo.

A SN 1604 ficou visível em torno das 10h, com pouca diferença angular em relação ao Sol. Júpiter e Saturno puderam ter sido observados próximos angularmente à supernova, mas não a Lua, já que se pôs às 22h.

Esta descrição de cada um dos eventos pode agora ser contrastada com os registros disponí-



Figura 4: Petróglifos encontrados no Complexo Arqueológico das Areias. A primeira gravura apresenta 4 raios, enquanto a segunda detém 6 raios (Créditos: Dr. Juvandi de Souza Santos)

veis gravados, sendo essa presença simultânea da supernova e o Sol/Lua no céu um critério que reforça ou descarta a viabilidade de cada um desses registros corresponder ao respectivo fenômeno luminoso transitório em questão.

5 Petróglifos no Brasil e possíveis registros de supernovas

5.1 Sítios arqueológicos

No Complexo Arqueológico das Areias, em Catolé do Rocha (PB), há diversos petróglifos. Entre eles, é possível distinguir duas figuras com raios (Figura 4), podendo representar dois astros luminosos próximos. Como há uma diferença no número de retas de cada representação, é possível que sejam astros de mesma natureza, porém distintos. Entretanto, se forem representações de estrelas, não é claro se são apenas duas estrelas comuns ou se sugerem que o Sol esteve próximo a uma supernova, sem ainda excluir outras interpretações.

No sítio arqueológico Baião, em São José do Brejo do Cruz (PB), há diversos petróglifos parecidos com as figuras com retas do Complexo Arqueológico de Areias. Mas, além dos raios, também é visível um envoltório circular em cada representação, como nas duas imagens da Figura 5. O envoltório poderia representar o halo do objeto, que, então, deveria estar próximo. Dessa forma, é possível que sejam o Sol e uma supernova. Para isso, seria necessário se tratar de uma das supernovas visíveis próximas ao Sol. No entanto, várias



Figura 5: Petróglifos do sítio arqueológico Baião. As figuras raiadas apresentam uma espécie de envoltório circular (Créditos: Dr. Juvandi de Souza Santos).



Figura 6: Depressão rochosa com petróglifos no sítio arqueológico Tanque do Bravo (Créditos: Dr. Juvandi de Souza Santos).

outras interpretações são também possíveis.

No sítio arqueológico Tanque do Bravo, em Belém do Brejo da Cruz, também há figuras semelhantes. Nas margens de uma depressão rochosa natural, na Figura 6, são encontradas outras figuras com raios (Figura 7), mas algumas delas apresentam profundidade, como na Figura 8, e também há possíveis constelações. Na mesma cidade, no sítio arqueológico do Bom Jesus, também há outros registros de mapeamentos de constelações (Figura 9).

Por outro lado, no sítio arqueológico Lagoa do Escuro, na zona rural de Taperoá (PB), em um afloramento rochoso cuja face vertical está previamente polida e ligeiramente inclinada (Figura 10), há um possível registro de supernova com a Lua gravado [23]. O padrão dos desenhos na Fi-



Figura 7: Detalhe dos petróglifos no sítio arqueológico Tanque do Bravo (Créditos: Dr. Juvandi de Souza Santos).

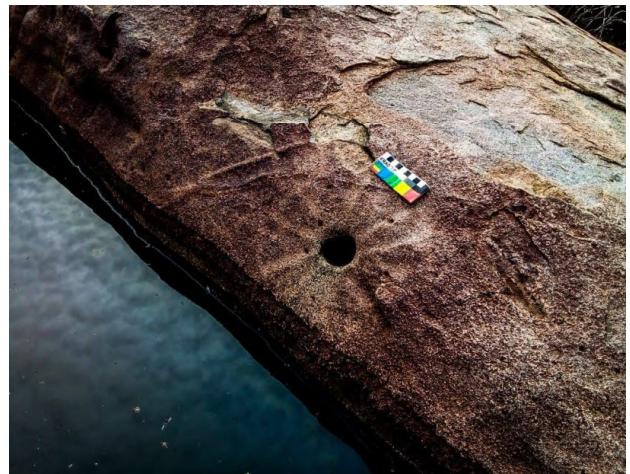


Figura 8: Petróglifo com um notório buraco central (conhecido como capsular ou cúpula) no sítio arqueológico Tanque do Bravo (Créditos: Dr. Juvandi de Souza Santos).

gura 11 parece evidenciar um astro brilhante e a Lua crescente. A posição relativa entre os dois e a fase da Lua são compatíveis com a visualização do céu para as supernovas SN 1054 em torno

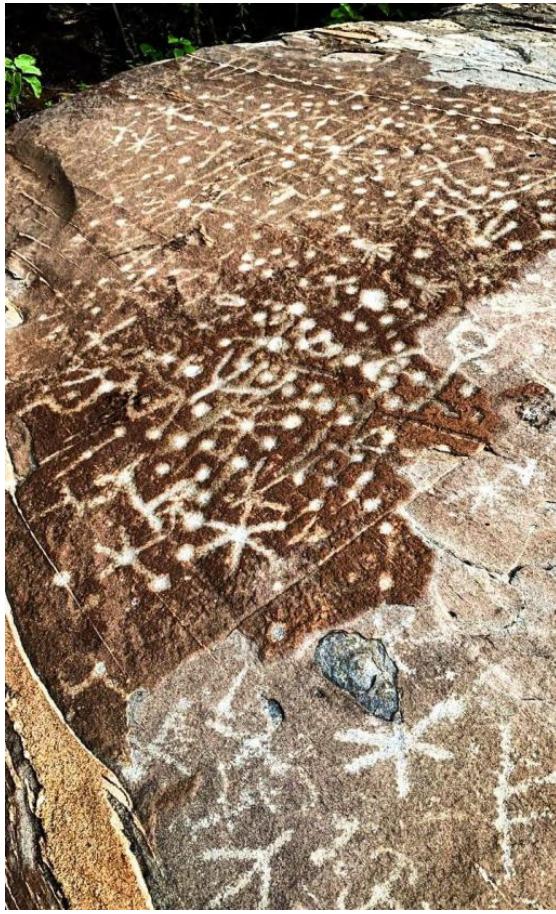


Figura 9: Petróglifos que, possivelmente, representam constelações no sítio arqueológico do Bom Jesus (Créditos: Dr. Juvandi de Souza Santos).

de 13h e SN 1181 entre 2h e 3h. Além disso, a repetição dos círculos concêntricos sugere uma interpretação comum do fenômeno da supernova.

No sítio arqueológico Lameirão I, em São José dos Espinharas (PB), é possível encontrar diversas artes rupestres dispostas horizontalmente em um extenso lajedo, muitas delas antropomórficas ou denotando astros. Entre as figuras, é possível notar uma Lua com concavidade oposta ao astro luminoso, à direita, configuração possível somente para a SN 1054 em torno das 5h (Figura 12).

Em Congo (PB), há diversas figuras rupestres no teto da Toca dos Astros (Figuras 13 e 14). Entre os desenhos, há uma possível Lua crescente com concavidade voltada para um objeto representado por um círculo avermelhado com um halo em volta, na Figura 15. A Lua e a possível supernova parecem estar paralelas. Além disso, na Figura 16 há a representação distinta de dois as-



Figura 10: Vista parcial do Sítio Arqueológico Lagoa do Escuro com o afloramento rochoso contendo gravuras em baixo relevo. À direita, a possível representação da conjunção supernova-Lua.



Figura 11: À esquerda, detalhe do petróglifo do sítio arqueológico lagoa do escuro que possivelmente representa a supernova 1054 ou a supernova 1181, ladeando a Lua crescente. À direita, desenho do Felipe S.M. Costa.

tos que também poderiam ser associados ao Sol e a uma supernova, logo, se for o caso, ela teria que ter sido vista durante o dia. Dificilmente haveria outro astro que possa ser identificado como candidato, a menos de um cometa. Porém, não há nenhum sinal de cauda visível.

Se ambas as representações se tratarem do mesmo evento, o padrão é compatível com as supernovas SN185 em torno das 10h, SN1054 em torno das 13h e SN1572 em torno das 16h. Note que, devido à pequena distância angular entre a Lua e a SN1054 e ao grande brilho da supernova, elas podem ter sido percebidas como paralelas. Como as três supernovas foram visíveis também durante o dia, caso os petróglifos com o Sol ou



Figura 12: Petróglifos no sítio arqueológico Lameirão I. Vários possíveis astros luminosos estão presentes. À direita, há uma Lua com concavidade oposta ao astro luminoso contíguo.



Figura 13: Visão da Toca dos Astros.

com a Lua se tratam de eventos distintos, o resultado é essencialmente o mesmo.

Finalmente apresentamos um caso do município de Patu, no estado brasileiro do Rio Grande do Norte (RN), ainda inédito em boa medida e que tem características identificáveis com o registro de uma supernova, resultante de um trabalho envolvendo levantamentos astrométricos e coleta de dados associados a atividades das populações que habitaram o sítio arqueológico estudado entre 7.000 e 4.000 anos atrás; dentre tais atividades, destacam-se petróglifos e pinturas rupestres indicativas de ações fundamentadas em possíveis registros de caráter astronômico [24].

A imagem mostra duas “rodas” e uma cena de caça, sugerindo atividade diurna. Assim, o mais



Figura 14: Petróglifos no teto do sítio arqueológico Toca dos Astros.



Figura 15: Detalhe da imagem anterior: Lua e possível supernova com halo entre os petróglifos no sítio arqueológico Toca dos Astros.

razoável seria a procura de eventos que tenham sido visíveis durante o dia e brilhantes o suficiente quando a supernova ficou visível. Na Figura 2 (direita) estão as visualizações dos eventos históricos que foram visíveis durante o dia não muito longe do Sol. Embora seja possível associar algum dos eventos com um pouco de otimismo, não há elementos objetivos para defender nenhuma associação em particular. Este petróglifo apresenta uma semelhança notável com a identificação da Ref. [25], uma cena idêntica na Índia que poderia se referir a uma supernova de mais de 5000 anos de idade. Também podemos apontar que este padrão de “rodas” aparece em outros sítios arqueológicos diferentes, por exemplo, no penhasco de Jiangjunya, que fica a cerca de 9 km a sudoeste da cidade de Lianyungang, na província de Ji-



Figura 16: Sol e possível supernova dentre os petróglifos no sítio arqueológico Toca dos Astros.

angsu, China (Figura 17, Ref. [26]). Embora já foram interpretadas como uma sequência temporal, com duas imagens do mesmo objeto em diferentes tempos, também cabe sugerir que são dois objetos diferentes de brilho semelhante (a assimetria das duas rodas é evidente), o qual viria a coincidir com a proposta especulativa de que as “rodas” de Patu, RN poderiam estar ligadas a um evento de supernova visível durante o dia, por exemplo, a SN 1604 na Figura 2 (direita). No caso do Brasil, não temos como aprofundar esta proposta sem novos dados (vide a seguir).

5.2 Datação do material

A datação de petróglifos e arte rupestre em geral é um problema complexo e que depende caso a caso das condições do material a ser datado. Isto é, embora em princípio haja técnicas disponíveis, nem sempre são aplicáveis para um caso específico. Lima de Oliveira e dos Santos Júnior discutem na Ref. [27] as datações relativas (ou seja, aquelas com as quais é possível definir uma sequência cronológica, mas não uma origem ou ponto confiável no tempo) e absolutas (ou semiabsolutas) que determinam datas máximas e mínimas. Os respectivos métodos (presença de fósseis-guia, decaimento do ^{14}C especialmente adequado para épocas relativamente recentes, Espectroscopia de Ressonância Paramagnética Eletrônica, também conhecida como Ressonância de Spin Eletrônico (ESR) e, naturalmente, análises



Figura 17: As rodas de Jiangjunya, Chuna. A interpretação de uma sequência temporal da passagem do Sol tem sido sugerida, mas nada descarta a possível simultaneidade das duas “rodas” ao mesmo tempo no céu, tal como os exemplos das Figuras 18.

estilísticas e iconográficas) apresentam vantagens e problemas. No caso do material apresentado acima, poderíamos dizer que estas análises são bastante inviáveis pelo desconhecimento substancial dos detalhes das ocupações humanas em relação a suas visões do céu e do entorno longínquo. A variação temporal por sucessivas oleadas e mudanças culturais várias é outro complicador importante. De fato, a compreensão das ocupações desde o período Holoceno estão sendo investigadas de forma fragmentada, e não é possível estabelecer marcos gerais com características específicas, tal como seria desejável para contextualizar as imagens candidatas das supernovas.

Seis dos sete sítios mencionados se localizam na região do Cariri paraibano. Nesse sentido, a idade dos registros deixados já pode indicar se mostram uma determinada supernova de fato. Conforme diversas evidências arqueológicas, incluindo ossadas humanas, a própria arte rupestre, cerâmica, e carvão oriundo de fogueiras, a ocupação humana no Nordeste iniciou há pelo menos 13.000 anos. Na Paraíba, estudos arqueológicos recentes [28] revelam a presença de povos indígenas na região muitos milênios antes da chegada dos portugueses, num intervalo temporal que abrange todas as supernovas das Tabelas 1 e 2.

Como exemplo desta abrangência, no Sítio Serra Branca I, situado no município de Serra Branca, no Cariri paraibano, os registros arqueológicos indicam ocupação humana datada de cerca de 6.921 ± 33 anos atrás. Assim, os registros poderiam ser de qualquer uma das respectivas supernovas mencionadas. Esses achados



Figura 18: Esquerda: o petróglifo das “rodas” em Patu, RN (Foto de um dos autores, L.C.J., Ref. [24]). Direita: a imagem do petróglifo indiano estudado na Ref. [25], surpreendentemente similar ao brasileiro até na disposição da cena de caça.

incluem restos de ocupações, ferramentas e outros indícios que sugerem a atividade de grupos caçadores-coletores na região.

No entanto, outro estudo arqueológico [29], realizado no Cariri Paraibano, confirmou duas datações em dois sítios arqueológicos distintos. No primeiro caso, no sítio arqueológico Barra, em Camalaú-PB, foram encontrados restos humanos datados em 1.220 ± 30 anos AP (antes do presente). Então, só teria sido possível para esses povos observar as supernovas SN 1006, SN 1054, SN 1181, SN1572 e SN1604 supondo que a data é próxima à primeira presença humana. Esses vestígios foram localizados em um abrigo rochoso com forte evidência de ocupação humana e atividades culturais. O segundo registro, datado com data tentativa de 1.880 ± 30 anos AP, é do sítio Serrote da Macambira, localizado em São João do Cariri-PB, ou seja, havia povos habitando a região na época de todas as supernovas desde a SN 185 ou até antes. Desta breve lista fica claro que há uma necessidade real de datação dos sítios com imagens candidatas em cada caso, o qual não foi tentado até hoje.

Segundo Borges [30], as microrregiões do Cariri foram ocupadas pelos povos Tarairiús (denominados de forma genérica como Tapuias). Os Tarairiú eram povos nômades que tinham hábitos diurnos e se recolhiam à noite em acampamentos, evitavam marchas noturnas, principalmente para evitar as serpentes, e realizavam práticas rituais noturnas. Seus hábitos também incluíam

a pesca de peixes à beira do rio, caça e também coletavam raízes, frutas e recolhiam mel silvestre. Os Tapuias integravam mitos e práticas espirituais à sua relação com o Cosmos, o que pode justificar a existência dos registros astronômicos encontrados. Mas embora fosse desejável, não é possível afirmar hoje nada muito conclusivo que auxilie na tarefa principal do nosso estudo.

6 Conclusões

Apresentamos neste trabalho uma tentativa preliminar de identificação de eventos transientes (supernovas) achados em solo brasileiro. Embora o material seja interessante desde um ponto de vista amplo, é evidente que a amostragem é parcial e que existem seguramente muitos sítios adicionais não devidamente identificados e explorados. A experiência com os registros do hemisfério norte nos alerta a respeito da quantidade de problemas e objeções que estão presentes nesta difícil tarefa. Contudo, acreditamos que estes registros do sul devem ser conhecidos e estudados a fundo, em particular, aqueles que são candidatos a representar supernovas.

Como expressado acima, o critério mínimo por nós estabelecido levou a considerar figuras junto com a Lua ou o Sol como candidatas, descartando outras figuras isoladas. Ainda assim, a interpretação da presença de uma supernova na imagem rupestre é sujeita a incertezas, e nenhuma pode

ser dada por confirmada. Ainda mais, não dispomos de nenhuma datação deste material, fator que consideramos imprescindível para qualquer avanço na identificação definitiva.

As três datações mencionadas acima são distintas e, como os povos indígenas estariam ocupando as regiões do Cariri antes e depois de cada uma das datações, ainda é incerto quais supernovas podem ter sido testemunhadas em cada sítio arqueológico. Devemos notar que essas datações não foram feitas nos sítios das imagens. Contudo, o hábito diurno dos Tarairiú pode ser uma evidência de que as supernovas observadas e registradas ocorreram apenas entre o nascer e o pôr do Sol. Por essa razão, descartamos tentativamente todas as supernovas que não apareceram durante o dia. Assim, o petróglifo da Lagoa do Escuro provavelmente representaria a SN 1054, não a SN 1181 que apareceu apenas brevemente com o Sol, o do Lameirão I mantém sua chance como representação da SN 1054 e o da Toca dos Astros continua podendo representar as supernovas SN 185, SN 1054 ou SN 1572. Considerando, também, a proximidade dos sítios arqueológicos, é possível que as gravuras rupestres estejam interligadas de alguma forma e todas sejam representações do mesmo evento: a supernova 1054, hipótese a conferir no futuro.

Um fato que acreditamos muito relevante é que não encontramos nenhum registro candidato para a SN 1006, a supernova mais brilhante da história, e definitivamente um objeto do hemisfério sul (declinação -42°, Tabela 1). As crônicas do norte coincidem no seu brilho extremo, comparado a 1/3 da Lua cheia [4]. A SN 1006 foi visível durante o dia por muitas semanas, mas os registros brasileiros não mostram nenhum caso que sugira sua observação no sul.

Todas estas considerações apontam para um conjunto pequeno de possíveis registros dos eventos mais espetaculares da Astronomia, as explosões de supernova. A candidata mais firme continua sendo a imagem da Lagoa do Escuro, PB (Figura 10), identificada por um dos autores (F.S.M.C., Ref. [23]). Contudo, e a exemplo dos casos similares do hemisfério norte, não podemos confirmar nem descartar os candidatos baseados na informação disponível ao presente. Sugerimos que um estudo aprofundado dos sítios visando a datação pelos métodos disponíveis [27] é impres-

cindível para avançar na questão. No entanto, a presença de um quadro de observação e registro do céu pelos povos nativos é fortemente sugerida, e este fato *per se* já resulta motivador para continuar dando atenção para este assunto em geral, de grande interesse científico e cultural.

Agradecimentos

J.E.H. gostaria de agradecer o CNPq, Governo Federal e à Fundação de Amparo à Pesquisa de São Paulo (Fapesp) pelo financiamento deste trabalho. L.C. Jafelice agradece ao Departamento de Física Teórica e Experimental e ao Museu Câmara Cascudo, ambos da Universidade Federal de Rio Grande do Norte (UFRN), e ao Conselho da cidade de Patu (RN) pelo apoio.

Sobre os autores

Bianca Bulhões Martins (martins.bianca@usp.br) é mestrandra em Astronomia no IAG-USP, onde atua na área de objetos compactos e supernovas. Bacharela em Física pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), participou de três projetos de iniciação científica em que foi bolsista pelo CNPq ou pelo SAE-Unicamp. Atuou também como monitora voluntária de Física Quântica I.

Jorge Ernesto Horvath (foton@iag.usp.br), Professor Titular no IAG-USP é graduado e Doutor em 1989 na *Universidad Nacional de La Plata* (Argentina), Livre Docente pela USP em 1997. Autor de pesquisas em Astrofísica Relativística, Altas Energias e Cosmologia, além de vários livros no Brasil e no exterior para os diferentes níveis de Educação. Pesquisador Nível I do CNPq e visitante na *University of Arizona* (1998-1999). Fundador e Co-Editor da *Revista Latino-Americanana de Educação em Astronomia* (RELEA) desde 2003. Coordenou de 2011 até 2021 o Núcleo de Pesquisas em Astrobiologia da USP representando o país junto à NASA Astrobiology Institute.

Felipe Sérvulo Maciel Costa (felipe.costal@professor.pb.gov.br) é Mestre em Física com ênfase em Cosmologia pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), possui especialização

em Ensino de Astronomia pela Universidade Cruzeiro do Sul e licenciatura em Física pela Universidade Estadual da Paraíba (UEPB). Atua como professor titular de Física pela Secretaria de Estado da Educação da Paraíba (SEE-PB) onde desenvolve projetos STEAM voltados ao ensino de Astronomia, Astrobiologia, Arqueoastronomia e ciências afins. É astrônomo membro da Associação Paraibana de Astronomia (APA) e Sociedade Astronômica Brasileira (SAB). É autor do livro *Das Cavernas ao Espaço: Uma Breve História da Astronomia*. Como cientista cidadão, contribuiu com a descoberta de 4 asteroides do cinturão principal e 15 transientes astronômicos (dentre eles, a SN 2021eqq). Atualmente, é pesquisador nas áreas de Arqueoastronomia, Astronomia Cultural, Etnoastronomia e Ensino de Astronomia.

Luiz Carlos Jafelice (jafelice@dfte.ufrn.br), Bacharel, Licenciado, Mestre em Física e Doutor em Astronomia pela Universidade de São Paulo e pós-doutor em Astrofísica junto à *University of Cambridge* (Inglaterra). Professor aposentado da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Autor de pesquisas e livros, coordenou eventos de pesquisa em Astrofísica, Plasmas e Ensino de Física e projetos junto ao CNPq sobre Educação intercultural e Etnoconhecimentos. Fundador e Co-Editor da *Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia* (RELEA) de 2003 até 2017. Membro da Divisão C (Educação, História e Patrimônio) da União Astronômica International. Cocriador do Coletivo Educação Científica Decolonial.

Referências

- [1] O. T. Matsuura (ed.), *História da Astronomia no Brasil*, vol. 1 (Cepé Editora, Recife, 2013). Disponível em <http://site.mast.br/HAB2013/>, acesso em mar. 2025.
- [2] G. B. Afonso e C. A. Nadal, *Arqueoastronomia*, in *História da Astronomia no Brasil*, editado por O. Matsuura (Cepé Editora, 2013), vol. 1, 50–85.
- [3] J. E. Horvath, *Supernovas*, Revista Brasileira de Astronomia **10**, 4 (2021). Disponível em <https://sab-astro.org.br/wp-content/uploads/2021/05/RAB-10.pdf>, acesso em mar. 2025.
- [4] D. A. Green e F. R. Stephenson, *Historical Supernovae*, in *Supernovae and Gamma-Ray Bursters*, editado por K. W. Weiler (Springer, 2003), vol. 598 de *Lecture Notes in Physics*, 7–19.
- [5] E. C. Krupp, *Crab Supernova Rock Art: A Comprehensive, Critical and Definitive Review*, *Journal of Skyscape Archaeology* **1**(2), 167 (2015).
- [6] J. C. Brandt e R. A. Williamson, *The 1054 Supernova and Native American Rock Art*, *Archaeoastronomy* **10**, S1 (1979). Disponível em <https://adsabs.harvard.edu/full/1979JHAS...10....1B>, acesso em mar. 2025.
- [7] E. Biot, *Des Etoiles extraordinaires observées en Chine depuis les temps anciens jusqu'à l'An 1203 de notre ère*, in *Connaissance des Temps ou des Mouvements Célestes... pour l'An 1846* (1843), 60–68.
- [8] Fujiwara no Teika, *Meigetsuki (Record of the Clear Moon)*, e-Museum, Japão (1180-1235). Disponível em <https://emuseum.nich.go.jp>.
- [9] G. W. Collins, W. P. Claspy e J. C. Martin, *A Reinterpretation of Historical References to the Supernova of A.D. 1054*, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **111**(761), 871 (1999).
- [10] K. Brecher, E. Lieber e A. E. Lieber, *A Near-Eastern Sighting of the Supernova Explosion of 1054*, *Nature* **273**(5661), 728 (1978).
- [11] U. Dall'Olmo, *Latin Terminology Relating to Aurorae, Comets, Meteors, and Novae*, *Journal for the History of Astronomy* **11**, 10 (1980).
- [12] L. P. Williams, *The Supernova of 1054: A Medieval Mystery*, in *The Analytic Spirit: Essays in the History of Science in Honor of Henry Guerlac*, editado por H. Woolf (Cornell University Press, Ithaca, 1981), 329–349.

- [13] E. Guidoboni, C. Marmo e V. F. Polcaro, *Do We Need to Redate the Birth of the Crab Nebula?*, Memorie della Società Astronomica Italiana **65**(2), 623 (1994). Disponível em <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1994MmSAI..65..623G>, acesso em mar. 2025.
- [14] D. McCarthy e A. Breen, *An evaluation of astronomical observations in the Irish annals*, *Vistas in Astronomy* **41**(1), 117 (1997).
- [15] J. Clottes e D. Lewis-Williams, *Los Chamanes de la Prehistoria* (Ariel, Barcelona, 2009).
- [16] J. Kolber e D. Yoder, *The Great Anasazi Rock Art of Chaco Canyon: Possible and Probable Implications*, in *American Indian Rock Art*, editado por A. Woody (American Rock Art Research Association, Tucson, AZ, 2002), vol. 28.
- [17] W. C. Miller, *Two Prehistoric Astronomical Drawings in Chaco Canyon, New Mexico*, Astronomical Society of the Pacific Leaflets **7**(314), 105 (1955). Disponível em <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1955ASPL....7..105M>, acesso em mar. 2025.
- [18] H. A. Abt e J. W. Fountain, *An earlier explosion date for the Crab Nebula supernova*, *Research in Astronomy and Astrophysics* **18**(4), 037 (2018).
- [19] P. Schaafsma, *Imagery and Magic: Petroglyphs at Comanche Gap, Galisteo Basin, New Mexico*, in *Archaeology, Art, and Anthropology: Papers in Honor of J. J. Brody*, editado por M. S. Duran e D. T. Kirkpatrick (Archaeological Society of New Mexico, Albuquerque, NM, 1992), 157–174.
- [20] P. Schaafsma, *Warrior, Shield, and Star: Imagery and Ideology of Pueblo Warfare* (Western Edge Press, Santa Fe, 2000).
- [21] P. Schaafsma, *Feathered Stars and Scalps in Pueblo IV*, in *Current Studies in Archaeoastronomy*, editado por J. W. Fountain e R. M. Sinclair (Carolina Academic Press, Durham, 2005), 191–204.
- [22] G. Zotti et al., *The Simulated Sky: Stellarium for Cultural Astronomy Research*, *Journal of Skyscape Archaeology* **6**(2), 221 (2021).
- [23] F. S. Maciel Costa, *Interpretações Arqueoastronômicas Da Supernova 1054 No Sítio Arqueológico Lagoa Do Escuro E Na Toca Dos Astros*, Revista Tarai-riú **1**(19), 44 (2022). Disponível em <https://revista.uepb.edu.br/REVELAP/article/view/593>, acesso em mar. 2025.
- [24] L. C. Jafelice et al., *Arqueoastronomia no Rio Grande do Norte e no Nordeste*, in *XXVII Reunião Anual da Sociedade Astronômica Brasileira* (2001). Apresentação oral.
- [25] H. Joglekar, M. N. Vahia e A. Sule, *Oldest sky-chart with Supernova record* (2011), vol. 41, 207–215.
- [26] C. Ronan, *Astronomy in China, Korea and Japan*, in *Astronomy Before the Telescope* (British Museum Press, London, 1996). Disponível em <https://archive.org/details/astronomy-before-the-telescope-c.-b.-f.-walker/page/251/mode/2up>.
- [27] D. L. d. Oliveira e V. d. Santos Júnior, *Das Gravuras Rupestres no Brasil: Pesquisa e Métodos Arqueológicos*, *Clio Arqueológica* **34**(1), 66 (2019).
- [28] C. X. d. Azevedo Netto, F. d. A. S. d. Matos e T. F. d. Souza, *Panorama pré-histórico sobre as pesquisas arqueológicas no estado da Paraíba*, *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas* **18**(3), e20220078 (2023).
- [29] C. X. d. Azevedo Netto, C. Rodrigues Rosa e T. Fonseca de Souza, *Situação geomorfológica dos sítios arqueológicos no município de Camalaú – Paraíba*, *Revista de Arqueologia* **34**(1), 177 (2021).
- [30] J. E. Borges, *Índios Paraibanos: Classificação Preliminar* (Edições GRAFSET, João Pessoa, Brazil, 1993).

Tradução comentada do artigo “On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground” de Svante Arrhenius (1896)

Matheus Barbosa Rasch¹, Maria Tereza Weitzel Dias Carneiro Lima¹ e Felipe T. Falciano (tradutor)²

¹Universidade Federal do Espírito Santo

²Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

Resumo

Publicado em 1896 na *Philosophical Magazine and Journal of Science*, o artigo científico de Arrhenius é pioneiro no estudo quantitativo do efeito estufa, tema central na discussão sobre aquecimento global. Além de ser um registro histórico importante, é interessante notar que este trabalho contém uma metodologia que abriu caminho para os modelos climáticos atuais.

Abstract

Published in 1896 in the *Philosophical Magazine and Journal of Science*, Arrhenius' scientific paper is a pioneer in the quantitative study of the greenhouse effect, a central theme in the discussion on global warming. As well as being an important historical record, it is interesting to note that this work contains a methodology that paved the way for today's climate models.

Palavras-chave: dióxido de carbono, aquecimento global, efeito estufa

Keywords: carbon dioxide, global warming, greenhouse effect

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v6n1.48125](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v6n1.48125)

1 Introdução

O artigo "On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground", publicado por Svante Arrhenius em 1896, ocupa um lugar de destaque no estudo sobre as mudanças climáticas, em particular, sobre o aquecimento global. Esse artigo foi pioneiro sobre o estudo quantitativo do efeito estufa, a partir do qual ele explorou a influência da concentração atmosférica de vapor d'água e, principalmente, dióxido de carbono ("carbonic acid", na terminologia da época) na temperatura da superfície terrestre. Svante Arrhenius (1859-1927) foi um cientista sueco cujas contribuições se estenderam por diversas áreas da ciência, incluindo a físico-química e a climatologia. Ele é amplamente reconhecido por seus estudos nas propriedades condutoras das soluções e estabeleceu a teoria da dissociação eletrolítica, que lhe rendeu o Prêmio Nobel de Química em

1903. Seus conhecimentos permitiram atuar em diversos segmentos da físico-química, incluindo aspectos sobre a velocidade das reações, descobrindo a relação do aumento da velocidade das reações químicas com a temperatura. Apesar do maior reconhecimento de Arrhenius ser em estudos ligados à eletroquímica, ele tem um papel de destaque em seus estudos pioneiros sobre o efeito estufa, que estabeleceram as bases da ciência climática moderna. Em um período em que o conhecimento sobre as variações climáticas estava fortemente vinculado a fatores geológicos e astronômicos, Arrhenius foi um dos primeiros a sugerir que a composição da atmosfera desempenhava um papel fundamental na regulação do clima. Sua pesquisa, realizada no final do século XIX, é considerada precursora do estudo moderno sobre o efeito estufa.

Em seu artigo, Arrhenius constrói, a partir

das visões apresentadas por outros autores, seu ponto de vista acerca da absorção da radiação proveniente do Sol pela atmosfera, apresentando inúmeros pontos que merecem destaque. Seus cálculos, realizados sem os recursos computacionais modernos, são impressionantes para a época e fornecem uma estimativa inicial do impacto do CO₂ na temperatura global. Ele baseou sua teoria em diferentes estudos anteriores, como o publicado por John Tyndall, que tinha demonstrado como certos gases tinham a capacidade de absorver calor. Porém, Arrhenius foi além e, pela primeira vez, quantificou o efeito do CO₂ sobre a temperatura da Terra.

Ao se basear no trabalho de Samuel Pierpont Langley sobre a temperatura da Lua, o ângulo de desvio que a radiação vinda da Lua sofre ao passar por um prisma de sal-gema (halita) foi utilizado por Arrhenius para classificar diferentes faixas do espectro. Estes dados foram, então, correlacionados à absorção desta radiação em função das concentrações tanto de CO₂ quanto de d'água, incluído em seus cálculos como outro gás importante na regulação da temperatura. Diante disto, o ápice de seu trabalho se dá em uma extensa (e meticulosamente elaborada) sequência de cálculos, em que conclusões puderam ser tiradas, como: a quantidade de CO₂ e d'água na atmosfera pode influenciar na temperatura global, bem como proporcionar diferentes períodos climáticos de nosso planeta.

Arrhenius considerou também em seus cálculos o caminho médio percorrido pela radiação através do ar, além da dependência da quantidade de CO₂ e vapor d'água presentes. Ele calculou como a temperatura da Terra mudaria se a concentração de CO₂ fosse reduzida ou aumentada e seus resultados indicaram que um aumento na concentração de CO₂ levaria a um aquecimento global, enquanto uma redução causaria um resfriamento. Nesse artigo, Arrhenius relacionou suas descobertas às eras glaciais e aos períodos interglaciais, sugerindo que variações na concentração de CO₂ poderiam explicar as mudanças climáticas observadas no registro geológico. Na visão de Arrhenius, durante os períodos glaciais, a concentração de CO₂ poderia ter sido significativamente menor, levando a

um resfriamento global, enquanto durante os períodos de temperaturas amenas (interglaciais), o aumento do CO₂ teria contribuído para o aquecimento. Essa visão, que à época era especulativa, revelou-se acertada dentro do contexto moderno da paleoclimatologia.

Nota-se ao longo do texto como a terminologia científica utilizada reflete o conhecimento da época. A referência ao CO₂ como "ácido carbônico" (nomenclatura aceita na época, porém imprecisa atualmente) e a linguagem utilizada por Langley - e parcialmente adotada por Arrhenius - de atmosfera como "massas de ar", podem ser citadas como exemplo. Além de seu conteúdo científico, a forma como Arrhenius escreve também se destaca em comparação com os padrões atuais. Seu artigo é escrito em primeira pessoa - algo incomum nos artigos científicos modernos da área de ciências exatas, que frequentemente adotam um tom mais impessoal. Ainda, sua argumentação, estruturada de forma bastante lógica, com a apresentação de premissas e conclusões ao longo do texto, aproxima-se do estilo de um raciocínio lógico-científico, no qual premissas são estabelecidas e seguidas até suas conclusões. Isso reflete o pensamento metódico que guiava a filosofia natural, evidenciando como seu trabalho ainda se insere em um período próximo à transição da filosofia natural para a ciência moderna.

Vale observar: ao contrário dos artigos científicos modernos, que frequentemente priorizam objetividade e concisão, o texto de Arrhenius é detalhado em sua argumentação, conduzindo o leitor desde a apresentação do tema até a conclusão - sem deixar lacunas. Apesar de algumas limitações, como a superestimação do impacto do CO₂ e a falta de uma abordagem mais detalhada sobre o papel das correntes oceânicas e da circulação atmosférica na distribuição global de calor, o trabalho de Arrhenius continua sendo incrivelmente relevante. Nesse trabalho, por exemplo, Arrhenius indica, pela primeira vez, uma possível conexão entre as atividades humanas e mudanças climáticas futuras, contribuindo para a conscientização sobre as consequências do aumento das emissões de gases de efeito estufa.

Ao revisitá-lo este artigo, temos não apenas um registro histórico valioso, mas também informações inovadoras que iniciaram o caminho para os modelos climáticos modernos, auxiliando a estabelecer questões que só seriam plenamente desenvolvidas no século XX e que hoje influenciam políticas ambientais globais e a luta contra as mudanças climáticas. Assim, o arquivo de Arrhenius permite compreender melhor como a investigação científica evolui, refinando conceitos e incorporando novas evidências ao longo do tempo.

Sobre os autores

Maria Tereza Weitzel Dias Carneiro Lima (maria.t.lima@ufes.br) é professora titular do Departamento de Química do Centro de Ciências Exatas da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Ela possui graduação em Química Industrial, com mestrado e doutorado em Química Analítica Inorgânica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Atualmente, é pesquisadora do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e professora permanente do Programa de Pós- Graduação em Química da UFES. É líder do grupo de pesquisa em Espectrometria Atômica, coordenando o Laboratório de Espectrometria Atômica (LEA). Sua linha de pesquisa

concentra-se na determinação de elementos-traço em diversas matrizes utilizando diferentes técnicas analíticas relacionadas com a espectrometria atômica.

Matheus Barbosa Rasch é professor independente e criador de conteúdos educacionais. Desenvolve cursos on-line e materiais didáticos, com foco em aprofundamento teórico para estudantes. É mestre em Química pela Universidade Federal do Espírito Santo, onde também se graduou. Em diferentes projetos ao longo da graduação, adquiriu experiência na área de preparo de amostras e determinação de elementos-traço por espectrometria atômica, como com o “Monitoramento de potenciais impactos do rejeito de minério de ferro na praia e antepraia adjacentes da desembocadura do rio doce”. Em seu projeto de mestrado propôs o uso de solventes eutéticos para o preparo de amostras poliméricas, com o projeto intitulado como “Utilização de solventes eutéticos profundos em resinas poliméricas quimicamente recicladas para determinação multielementar”.

Felipe T. Falciano (ftovar@cbpf.br) foi o tradutor. É Doutor em Física (2008) pelo Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF) e Mestre em Filosofia (2017) pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Desde 2009 é pesquisador do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, vinculado a coordenação COSMO, e pesquisador do CNPq, atuando nas áreas de cosmologia e gravitação.

Sobre a influência do ácido carbônico no ar na temperatura do solo¹

Svante Arrhenius

I. Introdução: Observações de Langley sobre absorção atmosférica

Muito já foi escrito sobre a influência da absorção da atmosfera no clima. Tyndail² em particular, apontou a enorme importância dessa questão. Para ele, foram principalmente as variações diurnas e anuais da temperatura que foram reduzidas por essa circunstância. Outro lado da questão, que há muito tempo atrai a atenção dos físicos, é o seguinte: A temperatura média do solo é de alguma forma influenciada pela presença de gases que absorvem calor na atmosfera? Fourier³ sustentou que a atmosfera age como o vidro de uma estufa, pois deixa passar os raios de luz do sol, mas retém os raios escuros do solo. Essa ideia foi elaborada por Pouillet⁴; e Langley foi levado a pensar, por algumas de suas pesquisas, que “a temperatura da Terra sob luz solar direta, mesmo que nossa atmosfera estivesse presente como agora, provavelmente cairia para -200°C , se essa atmosfera não possuísse a qualidade de absorção seletiva”⁵. Esse ponto de vista, que se baseava em um uso muito amplo da lei de resfriamento de Newton, deve ser abandonado, pois o próprio Langley, em um livro de memórias posterior, mostrou que a lua cheia, que certamente não possui nenhuma atmosfera sensível que absorva calor, tem uma “temperatura média efetiva” de cerca de 45°C ⁶.

¹Título original: *On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground.* Publicado em: *Philosophical Magazine and Journal of Science*, Series 5, Volume 41, April 1896, pages 237-276, e foi extraído de um artigo apresentado para a Academia de Ciências Real Suéca em 11 de Dezembro de 1895. Traduzido por Felipe Tovar Falciano.

²'Heat a Mode of Motion,' 2nd ed. p. 405 (Lond., 1865).

³Mém. de l'Ac. R. d. Sci. de l'Inst. de France, t. vii. 1827.

⁴Comptes rendus, t. vii. p. 41 (1838)

⁵Langley, 'Professional Papers of the Signal Service,' No. 15. "Researches on Solar Heat," p. 123 (Washington, 1884).

⁶Langley, "The Temperature of the Moon." Mem. of the National Academy of Sciences, vol. iv. 9th mem. p. 193 (1890).

O ar retém o calor (claro ou escuro) de duas maneiras diferentes. Por um lado, o calor sofre uma difusão seletiva em sua passagem pelo ar; por outro lado, alguns dos gases atmosféricos absorvem quantidades consideráveis de calor. Essas duas ações são muito diferentes. A difusão seletiva é extraordinariamente grande para os raios ultravioleta e diminui continuamente com o aumento do comprimento de onda da luz, de modo que é insensível para os raios que formam a parte principal da radiação de um corpo com a temperatura média da Terra.⁷

⁷Langley, 'Prof. Papers,' No. 15, p. 151. Tentei calcular uma fórmula para o valor da absorção devido à reflexão seletiva, conforme determinado por Langley. Entre as diferentes fórmulas examinadas, a seguinte é a que melhor concorda com os resultados experimentais:

$$\log a = b(1/\lambda) + c(1/\lambda)^3.$$

Determinei os coeficientes dessa fórmula com o auxílio do método dos mínimos quadrados e descobri que

$$b = -0.0463, \quad c = -0.008204$$

a representa a intensidade de um raio de comprimento de onda λ (expresso em μ) depois que ele entrou com a intensidade 1 e passou pela massa de ar 1. A estreita concordância com o experimento pode ser vista na tabela a seguir:

λ	$a^{1/7.6}$ (obs.)	$a^{1/7.6}$ (calc.)	Prob. error
0.358 μ	0.904	0.911	
0.383	0.920	0.923	0.0047
0.416	0.935	0.934	
0.440	0.942	0.941	
0.468	0.950	0.947	0.0028
0.550	0.960	0.960	
0.615	0.968	0.967	
0.781	0.978	0.977	
0.870	0.982	0.980	0.0017
1.01	0.985	0.984	
1.20	0.987	0.937	
1.50	0.989	0.990	0.0011
2.59	0.990	0.993	0.0018

Para os raios ultravioleta, a absorção torna-se extremamente grande, de acordo com os fatos. Como se pode ver pelos erros prováveis que coloquei ao lado dos valores menos concordantes e também de um valor (1.50μ), em que o erro provável é extremamente pequeno, as diferenças são apenas da magnitude que se poderia esperar em uma fórmula de ajuste exato. As curvas para a fórmula e para os valores experimentais se cortam em quatro pontos ($1/\lambda = 2.43, 1.88, 1.28$ e 0.82 , respectivamente). A partir da fórmula, podemos estimar o valor da reflexão seletiva para as partes do espectro que prevalecem no calor da Lua e da Terra ($\text{ângulo de desvio} = 38 - 36^{\circ}, \lambda = 104 - 24.4\mu$). Descobrimos que a absorção por essa causa varia entre

A absorção seletiva da atmosfera é, de acordo com as pesquisas de Tyndall, Lecher e Pernter, Röntgen, Heine, Langley, Ångström, Paschen e outros⁸, de um tipo totalmente diferente. Ela não é exercida pela massa principal do ar, mas em alto grau pelo vapor aquoso e ácido carbônico, que estão presentes no ar em pequenas quantidades. Além disso, essa absorção não é contínua em todo o espectro, mas quase insensível na parte clara dele, e principalmente limitada à parte de ondas longas, onde se manifesta em bandas de absorção muito bem definidas, que caem rapidamente em ambos os lados⁹. A influência dessa absorção é comparativamente pequena no calor do sol, mas deve ser de grande importância na transmissão de raios da Terra. Tyndall sustentou a opinião de que o vapor de água tem a maior influência, enquanto outros autores, como Lecher e Pernter, estão inclinados a pensar que o ácido carbônico desempenha o papel mais importante. As pesquisas de Paschen mostram que esses dois gases são muito eficazes, de modo que, provavelmente, às vezes um, às vezes o outro, pode ter o maior efeito, de acordo com as circunstâncias.

Para se ter uma ideia da intensidade com que a radiação da Terra (ou de qualquer outro corpo com temperatura de $+15^{\circ}\text{C}$) é absorvida por quantidades de vapor d'água ou ácido carbônico nas proporções em que esses gases estão presentes em nossa atmosfera, deveríamos, a rigor, organizar experimentos sobre a absorção de calor de um corpo a 15° por meio de quantidades apropriadas de ambos os gases. Mas esses experimentos ainda não foram feitos e, como exigiriam um aparato muito caro além do que tenho à disposição, não tive condições de realizá-los. Felizmente, há outras pesquisas feitas por Langley em seu trabalho sobre “A Temperatura da Lua”, com a ajuda das quais parece não ser impossível determinar a absorção de calor pelo vapor aquoso e pelo ácido carbônico exatamente nas condições que ocorrem em nossa atmosfera. Ele mediou a radiação da lua cheia (se a Lua não estivesse cheia, a correção necessária relativa a esse ponto era aplicada)

0,5 e 1 p. c. para a massa de ar 1. Essa ação insensível, que é totalmente coberta pelos erros experimentais, foi negligenciada nos cálculos a seguir.

⁸Vide Winkelmann, Handbuch der Physik.

⁹Cf., e. g., Trabert, Meteorologische Zeitschrift, Bd. ii, p. 238 (1894).

em diferentes alturas e estações do ano. Além disso, essa radiação foi dispersa em um espectro, de modo que em seu livro de memórias encontramos os números do calor radiante da Lua para 21 grupos diferentes de raios, que são definidos pelo ângulo de desvio com um prisma de rocha de sal com um ângulo de refração de 60° graus. Os grupos estão entre os ângulos 40° e 35° , e cada grupo está separado de seus vizinhos por um intervalo de 15 minutos. Agora, a temperatura da Lua é quase a mesma da Terra, e os raios lunares, ao chegarem aos instrumentos de medição, passaram por camadas de ácido carbônico e de vapor aquoso de diferentes espessuras, de acordo com a altura da Lua e a umidade do ar. Se, então, essas observações fossem totalmente comparáveis entre si, três delas seriam suficientes para calcular o coeficiente de absorção em relação ao vapor aquoso e ao ácido carbônico para qualquer um dos 21 grupos diferentes de raios. Mas, como uma inspeção das 24 séries diferentes de observações mostrará prontamente, esse não é o caso. A intensidade da radiação para qualquer grupo de raios deve sempre diminuir com o aumento da quantidade de vapor aquoso ou ácido carbônico atravessado. Agora, a quantidade de ácido carbônico é proporcional ao caminho do raio através da atmosfera, ou seja, à quantidade chamada “massa de ar” nas figuras de Langley. Portanto, como unidade para o ácido carbônico, tomamos a massa de ar = 1, ou seja, a quantidade de ácido carbônico que é atravessada no ar por um raio vertical. A quantidade de vapor aquoso atravessada é proporcional, em parte, à “massa de ar” e, em parte, à umidade, expressa em gramas de água por metro cúbico. Como unidade para o vapor aquoso, tomei a quantidade de vapor aquoso que é atravessada por um raio vertical, se o ar contiver 10 gramas por metro cúbico na superfície da Terra¹⁰. Se tabularmos as 24 séries de observações publicadas por Langley na obra citada com relação às quantidades de ácido carbônico e vapor aquoso, percebemos imediatamente que seus números são muito irregulares, de modo que muitas exceções à regra são encontradas de que o calor transmitido deve diminuir continuamente quando essas duas quantidades aumentam.

E parece que ocorreram alterações periódicas

¹⁰Essa unidade corresponde quase à umidade média do ar (consulte a Tabela 6 pág. 18)

com o tempo de observação em sua série. Só podemos fazer vagas conjecturas sobre as circunstâncias dessas alterações com o tempo: provavelmente a claridade do céu pode ter se alterado em um longo período de observação, embora isso não pudesse ser detectado pelo olho. Para eliminar essa variação irregular, dividi as observações em quatro grupos, para os quais as quantidades médias de ácido carbônico (K) e de vapor d'água (W) foram 1.21 e 0.36, 2.21 e 0.86, 1.33 e 1.18, e 2.22 e 2.34 respectivamente. Com a ajuda dos valores médios da radiação de calor para cada grupo de raios nesses quatro grupos de observações, calculei aproximadamente os coeficientes de absorção (x e y) para ambos os gases e, por meio deles, reduzi o valor de cada observação para o valor que ela teria se K e W fossem 1.5 e 0.88, respectivamente. Os 21 valores para os diferentes raios foram então somados, de modo que obtive a radiação total de calor para cada série de observações, reduzida para $K = 1.5$ e $W = 0.88$. Se os materiais de observação fossem muito regulares, os valores para essa radiação total não deveriam diferir muito uns dos outros. De fato, observa-se que as observações feitas quase ao mesmo tempo também fornecem valores quase iguais, mas se as observações foram feitas em momentos muito diferentes, os valores geralmente também diferem muito. Para os períodos a seguir, encontrei os valores médios correspondentes da radiação total:

Período	Valor Médio	Fator de Redução
1885. Fev.21 - Jun.24.....	4850	1.3
1885. Jul.29 - 1886. Fev.16	6344	1.00
1886. Set.13 - Set.18 ...	2748	2.31
1886. Out.11 - Nov.8 ...	5535	1.15
1887. Jan.8 - Fev.9	3725	1.70

A fim de reduzir os números de Langley para que sejam comparáveis entre si, apliquei os fatores de redução tabulados acima às observações feitas nos respectivos períodos. Estou convencido de que, com esse modo de trabalho, nenhum erro sistemático é introduzido nos cálculos a seguir.

Depois que isso foi feito, reorganizei os números dos grupos de Langley de acordo com os valores de K e W na tabela 1. (Para obter mais detalhes, consulte meu livro de memórias original).

Na tabela 1, o ângulo de desvio é considerado como título. Depois de K e W estão as quantidades de ácido carbônico e vapor de água atravessadas pelo raio nas unidades mencionadas acima.

Abaixo disso, vem depois de i obs. a intensidade da radiação (reduzida) observada por Langley no bolômetro e, depois disso, o valor correspondente i calc., calculado por meio dos coeficientes de absorção fornecidos na Tabela 2 abaixo. G é o “peso” dado ao correspondente i obs. no cálculo, usando o método dos mínimos quadrados.

Para os coeficientes de absorção, calculados dessa maneira, apresento a tabela a seguir (Tabela 2). (Os logaritmos comuns dos coeficientes de absorção estão tabulados).

O significado desses números pode ser ilustrado por um exemplo. Se um raio de calor, correspondente ao ângulo de desvio $39^{\circ}45'$, passa pela unidade de ácido carbônico, ele diminui de intensidade na proporção $1 : 0.934(\log = -0.0296)$, o valor correspondente para a unidade de vapor de água é $1 : 0.775(\log = -0.1105)$. Esses números são, obviamente, válidos apenas para as circunstâncias em que as observações foram feitas, ou seja, que o raio deveria ter atravessado uma quantidade de ácido carbônico $K = 1.1$ e uma quantidade de vapor d'água $W = 0.3$ antes que a absorção nas próximas quantidades de ácido carbônico e vapor d'água fosse observada. E essas segundas quantidades não devem exceder $K = 1.1$ e $W = 1.8$, pois as observações não se estendem por um intervalo maior do que entre $K = 1.1$ e $K = 2.2$, e $W = 0.3$ e $W = 2.1$ (os números de K e W são um pouco diferentes para raios de tipos diferentes). Abaixo de A está escrito o valor relativo da intensidade da radiação para um determinado tipo de raio na luz da Lua depois de ter atravessado $K = 1$ e $W = 0.3$. Em alguns casos, o cálculo fornece valores positivos para $\log x$ ou $\log y$. Como isso é um absurdo físico (significaria que o raio deveria ser fortalecido por sua passagem através do gás absorvente), nesses casos, que devem depender de erros de observação, assumi a absorção igual a zero para o gás correspondente e, por meio desse valor, calculei o coeficiente de absorção do outro gás e, a partir daí, também de A .

Como será visto em uma inspeção da Tabela 1, os valores de i obs. concordam, na maioria dos casos, muito bem com os valores calculados i calc. Mas, em alguns casos, a concordância não é tão boa quanto se poderia desejar. Esses casos são caracterizados principalmente por um pequeno “peso” G , ou seja, em outras palavras, o material

Tabela 1: Radiação (i) da Lua Cheia para diferentes valores de K e W .

	40°	39°45	39°30	39°15	39°	38°45	38°30	38°15	38°	37°45	37°30
K	1.16	1.12	1.16	1.13	1.16	1.13	1.16	1.13	1.16	1.13	1.16
W	0.32	0.269	0.32	0.271	0.32	0.271	0.32	0.271	0.32	0.271	0.32
i obs.	28.7	26.6	27.0	26.4	24.8	24.8	12.6	20.1	43.8	65.9	74.4
i calc.	27.0	34.5	29.0	25.7	24.4	23.5	12.5	19.4	40.8	58.0	68.8
G	79	27	75	56	69	53	35	43	121	140	206
K	1.28	1.27	1.29	1.29	1.29	1.27	1.26	1.29	1.27	1.27	1.27
W	0.81	1.07	0.86	1.04	0.86	1.04	0.90	0.96	0.86	1.07	1.00
i obs.	22.9	31.2	26.7	21.3	18.2	11.0	5.8	3.7	14.0	32.0	52.3
i calc.	23.1	27.9	25.4	21.2	21.8	12.5	8.6	12.8	26.1	42.1	52.7
G	76	135	109	73	74	38	24	13	57	139	261
K	1.46	1.40	1.39	1.49	1.49	1.49	1.50	1.49	1.50	1.49	1.50
W	0.75	0.823	0.78	0.87	0.89	0.89	0.82	0.89	0.82	0.87	0.84
i obs.	11.9	28.2	23.0	18.9	18.0	9.2	9.9	14.4	24.6	34.8	46.6
i calc.	23.6	29.4	25.4	20.9	18.6	12.7	7.8	10.8	24.4	43.2	55.2
G	28	28	25	38	37	17	33	28	81	70	151
K	1.48	1.52	1.48	1.51	1.48	1.51	1.48	1.51	1.48	1.52	1.48
W	1.80	2.03	1.78	1.64	1.78	1.95	1.80	1.95	1.80	2.03	1.67
i obs.	25.2	27.6	24.6	18.3	27.6	4.8	3.7	3.6	17.6	45.5	43.9
i calc.	16.9	21.4	20.2	17.9	18.5	5.9	4.7	6.6	12.0	28.2	40.2
G	30	22	51	31	37	5	4	3	21	37	119
K	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26	2.27	2.26	2.27	2.27
W	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.06	1.08	1.06
i obs.	21.3	23.4	20.8	16.4	11.1	8.2	4.5	3.5	17.3	36.1	47.1
i calc.	21.2	25.9	21.3	16.6	10.1	7.7	4.5	5.1	14.7	33.9	48.3
G	44	49	43	34	23	17	9	7	37	75	112
K	2.05	1.92	1.92	1.93	1.92	1.92	1.92	2.45	2.37	1.92	2.05
W	1.93	2.30	2.24	2.16	2.24	2.30	2.24	2.25	2.20	2.30	1.93
i obs.	13.4	12.8	14.8	15.1	10.3	6.6	3.4	3.4	7.9	20.8	31.5
i calc.	16.2	19.4	17.3	14.5	13.0	3.8	2.9	2.6	6.1	23.4	35.1
G	55	29	35	47	25	15	8	10	26	47	129

Continua...

de observação é, nesses casos, relativamente insuficiente. Esses casos também ocorrem principalmente para os raios que são fortemente absorvidos pelo vapor de água. Esse efeito provavelmente se deve à circunstância de que o vapor aquoso na atmosfera, que se supõe ter variado proporcionalmente à umidade na superfície da Terra, nem sempre teve a distribuição ideal e uniforme presumida com a altura. A partir de observações feitas durante viagens de balão, sabemos também que a distribuição do vapor aquoso pode ser muito irregular e diferente da distribuição ideal média. Também é uma característica marcante o fato de que em alguns grupos, por exemplo, o terceiro, quase todos os números observados são menores do que os calculados, enquanto em outros gru-

pos, por exemplo, o quarto, ocorre o contrário. Essa circunstância mostra que a divisão do material estatístico foi levada um pouco longe demais; e uma combinação desses dois grupos teria mostrado uma concordância próxima entre os números calculados e os observados. Como, no entanto, essa combinação não influencia a exatidão dos coeficientes de absorção calculados, omiti a reorganização dos números em grupos maiores, com o consequente recálculo.

Uma circunstância que argumenta muito a favor da opinião de que o coeficiente de absorção dado na Tabela 2 não pode conter grandes erros é o fato de que pouquíssimos logaritmos têm um valor positivo. Se as observações de Langley tivessem sido totalmente insuficientes, seria de se

Tabela 1 (continuação): Radiação (i) da Lua Cheia para diferentes valores de K e W .

	37°15	37°	36°45	36°30	36°15	36°	35°45	35°30	35°15	35°
K	1.16	1.16	1.18	1.18	1.27	1.16	1.27	1.27	1.27	1.16
W	0.32	0.32	0.34	0.34	0.48	0.32	0.48	0.48	0.48	0.32
i obs.	68.6	59	56.2	48.3	43.4	40.7	39.0	32.6	31.5	19.7
i calc.	73.7	57.1	50.9	46.0	34.9	36.4	31.3	27.7	27.3	19.3
G	190	163	118	102	28	112	25	21	20	54
K	1.27	127	1.31	1.32	1.32	1.28	1.33	1.33	1.33	1.25
W	1.00	1.00	1.05	1.00	1.00	0.81	0.51	0.51	1.07	0.60
i obs.	58.9	50.3	47.9	41.2	31.7	29.7	25.7	18.8	27.5	16.6
i calc.	53.0	51.2	47.1	39.2	34.2	31.1	30.3	26.8	21.3	17.2
G	294	251	205	140	108	98	16	12	39	22
K	1.49	1.48	1.48	1.48	1.41	1.45	1.41	1.41	1.41	1.41
W	0.87	0.85	0.85	0.85	0.97	0.89	0.97	0.98	0.98	0.98
i obs.	43.1	36.4	35.4	31.2	28.3	24.9	16.6	15.4	10.3	9.2
i calc.	55.2	47.1	42.5	36.3	33.0	29.3	27.3	22.3	22.0	14.7
G	87	149	146	127	54	78	32	29	19	17
K	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48
W	1.66	1.58	1.66	1.66	1.83	1.66	1.83	1.58	1.83	1.66
i obs.	47.5	48.7	45.8	34.5	35.0	27.5	28.7	21.4	17.4	15.4
i calc.	38.2	43.4	42.5	33.0	32.0	23.6	23.4	17.8	15.4	11.6
G	136	176	131	99	82	79	67	81	41	43
K	2.26	2.12	1.91	1.90	1.91	2.09	1.91	1.90	1.90	2.12
W	1.08	1.15	1.10	1.11	1.10	1.18	1.10	1.11	1.11	1.15
i obs.	44.6	32.0	27.8	24.7	26.6	24.5	19.0	16.0	13.9	10.1
i calc.	47.1	33.5	32.8	27.4	26.8	23.6	21.3	17.5	20.4	12.2
G	93	98	66	58	63	72	45	37	32	31
K	1.92	2.05	2.45	2.37	2.45	2.37	1.97	1.97	1.97	1.97
W	2.30	1.93	2.25	2.20	2.25	2.20	2.33	2.33	2.33	2.33
i obs.	24.7	33.2	26.7	19.4	22.6	18.8	16.4	10.9	12.1	7.9
i calc.	27.1	31.8	23.7	18.4	21.4	16.8	17.4	11.5	12.2	8.4
G	56	137	77	63	65	61	32	22	24	16

esperar encontrar quase tantos logaritmos positivos quanto negativos. Agora, há apenas três desses casos, a saber, para o ácido carbônico em um ângulo de 40° e para o vapor de água nos ângulos 36°.45 e 36°.15. As observações para 40° não são muito precisas, porque eram de pouco interesse para Langley, pois os raios correspondentes não pertencem ao espectro da Lua, mas apenas à luz solar difusa da Lua. Como esses raios também não ocorrem em nenhum grau sensível no calor de um corpo de 15°C, essa não concordância não tem importância para o nosso problema. Os dois valores positivos para os logaritmos pertencentes

ao vapor aquoso são bastante insignificantes. Eles correspondem apenas a erros de 0.2 e 1.5 porcento para a absorção da quantidade $W = 1$ e estão totalmente dentro da faixa de erros experimentais.

Certamente não é desprovido de interesse comparar esses coeficientes de absorção com os resultados das observações diretas de Paschen e Ångström¹¹. Ao fazer essa comparação, deve-

¹¹Paschen, Wied. Ann. 1, p. 409, 1893; li. p. 1, lii. p. 2C9, e liii. p. 334, 1894, especialmente vol. 1.otab. ix. fig. 5, curva 1 para ácido carbônico, curva 2 para vapor aquoso. Ångström, Bihang till K. Vet.-Ak. Handlingar, Bd. xv. Afd. 1, No. 9, p. 15, 1889; Öfversigt of K. Vet.-Ak, Förhandl. 1889, No. 9, p. 553.

Tabela 2: Coeficientes de absorção de ácido carbônico (x) e vapor aquoso (y).

Ângulo de Desvio.	$\log x.$	$\log y.$	A.
40°	{ +0.0286 0.0000 -0.1455 }	-0.1506	27.2
39°45	-0.0296	-0.1105	34.5
39°30	-0.0559	-0.0952	29.6
39°15	-0.1070	-0.0862	26.4
39°	-0.3412	-0.0068	27.5
38°45	-0.2035	-0.3114	24.5
38°30	-0.2438	-0.3362	13.5
38°15	-0.3760	-0.1933	21.4
38°	-0.1877	-0.3198	44.4
37°45	-0.0931	-0.1576	59.0
37°30	-0.0280	-0.1661	70.0
37°15	-0.0416	-0.2036	75.5
37°	-0.2067	-0.0484	62.9
36°45	{ -0.2465 -0.2466 }	{ +0.0008 -0.0000 }	56.4
36°30	-0.2571	-0.0507	51.4
36.15	{ -0.1708 -0.1652 }	{ +0.0065 -0.0000 }	39.1
36°	-0.0940	-0.1184	37.9
35°45	-0.1992	-0.0628	36.3
35°30	-0.1742	-0.1408	32.7
35°15	-0.0188	-0.1817	29.8
35°	-0.0891	-0.1444	21.9

mos ter em mente que não se pode esperar uma concordância exata, pois o significado dos coeficientes acima é bastante diferente daquele dos coeficientes que são ou podem ser calculados a partir das observações desses dois autores. Os coeficientes acima fornecem a taxa de absorção de um raio que atravessou quantidades de ácido carbônico ($K = 1.1$) e vapor d'água ($W = 0.3$); enquanto os coeficientes de Paschen e Ångström representam a absorção experimentada por um raio na passagem pelas primeiras camadas desses gases. Em alguns casos, podemos esperar uma grande diferença entre essas duas quantidades, de modo que apenas uma concordância geral pode ser almejada.

De acordo com os números de Paschen, parece não haver emissão ou absorção sensível pelo vapor aquoso em comprimentos de onda entre 0.9μ e 1.2μ (correspondente ao ângulo de desvio 40°). Por outro lado, a representação do espectro do Sol feita por Langley mostra um número muito maior de bandas de absorção nesse intervalo, entre as

quais as marcadas com ρ , σ , τ e ϕ são as mais proeminentes¹², e essas bandas de absorção pertencem muito provavelmente ao vapor aquoso. O fato de Paschen não ter observado nenhuma emissão de vapor d'água nesse intervalo pode muito bem ser explicado pelo fato de que seu espectro de calor tinha uma intensidade muito pequena para esses raios de ondas curtas. Mas pode-se admitir que o coeficiente de absorção para vapor aquoso nesse ângulo na Tabela 2 não é muito preciso (provavelmente muito grande), em consequência da pouca importância que Langley atribuiu às observações correspondentes. Depois disso, ocorre no espectro de Langley a grande banda de absorção ψ no ângulo 39.45 ($\lambda = 1.4 \mu$), onde na curva de Paschen a emissão se torna sensível pela primeira vez ($\log y = -0.1105$ na Tabela 2). Em comprimentos de onda de maior valor, encontramos, de acordo com Paschen, fortes bandas de absorção em $\lambda = 1.83 \mu$ (Ω no espectro de Langley), ou seja, na vizinhança de $39^\circ.30$ e a $\lambda = 2.64 \mu$ (X de Langley) um pouco acima do ângulo $39^\circ.15$. De acordo com isso, encontrei coeficientes de absorção bastante grandes para vapor aquoso nesses ângulos ($\log y = -0.0952$ e -0.0862 respectivamente). De $\lambda = 3.0\mu$ a $\lambda = 4.7 \mu$ depois disso, de acordo com Paschen, a absorção é muito pequena, concordando com meu cálculo ($\log y = -0.0068$ em 39° , correspondente a $\lambda = 4.3 \mu$). A partir desse ponto, a absorção aumenta novamente e apresenta novos máximos em $\lambda = 5.5 \mu$, $\lambda = 6.6 \mu$ e $\lambda = 7.7 \mu$, ou seja, nas proximidades dos ângulos $38^\circ.45$ ($\lambda = 5.6 \mu$) e $38^\circ.30$ ($\lambda = 7.1 \mu$). Nessa região, a absorção do vapor de água é contínua ao longo de todo o intervalo, o que torna inteligível o grande coeficiente de absorção nessa parte ($\log y = -0.3114$ e -0.2362). Em decorrência da intensidade decrescente do espectro de emissão do vapor aquoso na curva de Paschen, não podemos examinar os detalhes de perto, mas parece que a emissão do vapor de água também seria considerável em $\lambda = 8.7 \mu$ ($39^\circ.15$), o que corresponde ao grande coeficiente de absorção ($\log y = -0.1933$) nesse local. As observações de Paschen não se estendem mais, terminando em $\lambda = 9.5 \mu$, o que

¹²Langley, Ann. Ch. et Phys. sér. 6, t. xvii. pp. 323 e 326, 1889, Prof. Papers, No. 15, placa 12. Lamansky atribuiu suas bandas de absorção, que provavelmente ocupavam esse lugar, ao poder de absorção do vapor aquoso (Pogg. Ann. cxlv. p. 200, 1872)

corresponde a um ângulo de $39^\circ.08$.

Para o ácido carbônico, encontramos inicialmente o valor zero em 40° , de acordo com os valores de Paschen e Ångström¹³. A absorção de ácido carbônico primeiro assume um valor sensível em $\lambda = 1.5 \mu$, depois aumenta rapidamente para um máximo em $\lambda = 2.6 \mu$ e atinge um novo máximo extraordinariamente forte em $\lambda = 4.6$ (Langley's Y). De acordo com Ångström, a absorção de ácido carbônico é zero em $\lambda = 0.9 \mu$ e muito fraca em $\lambda = 1.69 \mu$, após o que aumenta continuamente para $\lambda = 4.6\mu$ e diminui novamente para $\lambda = 6.0 \mu$. Esse comportamento está totalmente de acordo com os valores de $\log x$ na Tabela 2. A partir do valor zero em 40° ($\lambda = 1.0 \mu$), ele atinge um valor sensível (-0.0296) em $39^\circ.45$ ($\lambda = 1.4 \mu$) e, depois disso, valores cada vez maiores (-0.0559 em $39^\circ.30$, e -0.1070 em $39^\circ.15$) até atingir um máximo considerável (-0.3412 a 39° , $\lambda = 4.3 \mu$). Depois desse ponto, a absorção diminui (em $38^\circ.45 = 5.6 \mu$, $\log x = -0.2035$). De acordo com a Tabela 2, a absorção de ácido carbônico a $38^\circ.30$ e $38^\circ.15$ ($\lambda = 7.1 \mu$ e 8.7μ) tem valores muito grandes ($\log x = -0.2438$ e -0.3730), enquanto, de acordo com Ångström, deveria ser insensível. Esse comportamento pode estar relacionado ao fato de que o espectro de Ångström tinha uma intensidade muito pequena para os comprimentos de onda maiores. Na curva de Paschen, há traços de uma absorção contínua pelo ácido carbônico em toda essa região com máximos fracos em $\lambda = 5.2\mu$, $\lambda = 5.9\mu$, $\lambda = 6.6\mu$ (possivelmente devido a traços de vapor de água), $\lambda = 8.4\mu$ e $\lambda = 8.9\mu$. Em consequência da forte absorção de vapor de água nessa região do espectro, a intensidade da radiação foi muito pequena nas observações de Langley, de modo que os coeficientes de absorção calculados não são muito exatos (*cf.* acima, págs. 6-7). Possivelmente, a absorção calculada do ácido carbônico pode ter sido muito grande e a do vapor de água muito pequena nessa parte (entre $38^\circ.30$ e $38^\circ.0$). Isso pode acontecer mais facilmente, como na Tabela 1. K e W em geral aumentam juntos porque ambos são proporcionais à “massa de ar”. É importante ressaltar que isso também ocorre nos problemas que serão

tratados a seguir, de modo que o erro causado não é tão importante quanto se poderia pensar à primeira vista.

Para ângulos maiores que 38° ($\lambda > 9.5\mu$) não temos nenhuma observação direta da emissão ou absorção destes dois gases. O espectro do Sol, de acordo com Langley, tem grandes bandas de absorção em torno de $37^\circ.50$, $37^\circ.25$, 37° , e $36^\circ.40^\circ$. De acordo com meus cálculos, o vapor aquoso tem seu poder máximo de absorção no espectro de 38° a 35° em ângulos entre $37^\circ.15$ e $37^\circ.45$ (os valores de $35^\circ.45$, $35^\circ.30$, e $35^\circ.15$ são muito incertos, uma vez que eles dependem de um número muito pequeno de medições), e o ácido carbônico entre $36^\circ.30$ e $37^\circ.0$. Isto parece indicar que as duas primeiras bandas de absorção são devido à ação do vapor-de-água, as duas últimas ao ácido carbônico. Deve ser enfatizado que Langley usou de todo cuidado nas medidas de intensidade da radiação lunar nos ângulos entre 36° e 38° , onde esta radiação tem seu máximo de intensidade. Deve-se, desta forma, assumir que os coeficientes de absorção calculados para esta parte do espectro são os mais exatos. Isto é de grande importância para os cálculos seguintes, dado que a radiação da Terra¹⁴ tem de longe a maior intensidade (em torno de dois terços, *cf.* pág. 10) nesta parte do espectro.

II. A Absorção Total por Atmosferas de Composições variadas

Como agora determinamos, da maneira descrita, os valores dos coeficientes de absorção para todos os tipos de raios, com a ajuda dos números de Langley¹⁵ será possível calcular a fração do calor de um corpo a 15°C (a Terra) que é absorvida por uma atmosfera que contém quantidades específicas de ácido carbônico e vapor de água. Para começar, faremos esse cálculo com os valores $K = 1$ e $W = 0.3$. Tomamos aquele tipo de raio para o qual as melhores determinações foram feitas por Langley, e que se encontra no meio da parte mais importante da radiação (37°). Para esse feixe de raios, encontramos a intensidade da radiação em $K = 1$ e $W = 0.3$ igual a 62.9; e

¹³Deve-se lembrar que, nesse ponto, o espectro de Paschen era muito fraco, de modo que a coincidência com seu valor pode ser accidental,

¹⁴Depois de ter sido espalhada por uma atmosfera de $K = 1.1$ e $W = 0.3$.

¹⁵‘Temperature of the Moon’, placa 5.

com a ajuda dos coeficientes de absorção, calculamos a intensidade para $K = 0$ e $W = 0$, e a encontramos igual a 105. Em seguida, usamos os experimentos de Langley sobre a distribuição espectral da radiação de um corpo de 15°C e calculamos a intensidade para todos os outros ângulos de desvio. Essas intensidades são fornecidas sob o título M. Depois disso, temos de calcular os valores para $K = 1$ e $W = 0.3$. Para o ângulo 37° , sabemos que ele é 62.9. Para qualquer outro ângulo, poderíamos usar os valores A da Tabela 2 se a Lua fosse um corpo de 15°C . Mas um cálculo

dos números de Very¹⁶ mostra que a lua cheia tem uma temperatura mais alta, cerca de 100°C . Agora, a distribuição espectral é quase, mas não exatamente, a mesma para o calor de um corpo de 15°C e para o de um corpo de 100°C . Com a ajuda dos números de Langley, no entanto, é fácil reduzir as intensidades do corpo quente a 100° (a Lua) para que sejam válidas para um corpo a 15° (a Terra). Os valores de A reduzidos dessa maneira estão tabulados abaixo sob o título N.

Ângulo	40°	$39^{\circ}45'$	$39^{\circ}30'$	$39^{\circ}15'$	39°	$38^{\circ}45'$	$38^{\circ}30'$	$38^{\circ}15'$	38°	$37^{\circ}45'$	$37^{\circ}30'$
M ...	3.4	11.6	24.8	45.9	84.0	121.7	161	189	210	210	188
N ...	3.1	10.1	11.3	13.7	18.0	18.1	11.2	19.6	44.4	59	70
Ângulo	$37^{\circ}15'$	37°	$36^{\circ}45'$	$36^{\circ}30'$	$36^{\circ}15'$	36°	$35^{\circ}45'$	$35^{\circ}30'$	$35^{\circ}15'$	35°	
M ...	147	105	103	99	60	51	65	62	43	39	2023
N ...	75.5	62.9	56.4	51.4	39.1	37.9	39.2	37.6	36.0	28.7	743.2
										Sum.	P.c.
											100

Para ângulos menores que 37° , encontramos, da maneira descrita acima, números que são um pouco inferiores aos tabulados, que são encontrados por meio dos coeficientes de absorção da Tabela 2 e dos valores de N. Dessa forma, a soma dos M's é um pouco maior (6.8 porcento) do que seria de acordo com o cálculo fornecido acima. Essa não concordância resulta provavelmente da circunstância de que o espectro nas observações não era totalmente puro.

O valor 37.2 pode possivelmente ser afetado por um erro relativamente grande em consequência da incerteza dos valores M. Nos cálculos a seguir, não é tanto o valor 37.2 que desempenha um papel importante, mas sim a diminuição do valor causada pelo aumento das quantidades K e W. Para fins de comparação, pode-se mencionar que Langley estimou que a quantidade de calor da Lua que passou pela atmosfera (de composição média) em suas pesquisas foi de 38%.¹⁷ Como a atmosfera média nas observações de Langley correspondia a valores mais altos de K e W do que $K = 1$

e $W = 0.3$, veremos que ele atribuiu à atmosfera uma maior transparência para raios opacos do que eu fiz. De acordo com a estimativa de Langley, deveríamos esperar para $K = 1$ e $W = 0.3$ um valor de aproximadamente 44 em vez de 37.2. A influência que essa diferença pode exercer será investigada a seguir.

Os coeficientes de absorção citados na Tabela 2 são válidos para um intervalo de K entre aproximadamente 1.1 e 2.25, e para W entre 0.3 e 2.22. Nesse intervalo, pode-se, com a ajuda desses coeficientes e dos valores de N fornecidos acima, calcular o valor de N para outro valor de K e W e, dessa forma, obter, por meio de soma, o calor total que passa por uma atmosfera de determinada condição. Para cálculos adicionais, também computei valores de N para atmosferas que contêm maiores quantidades de ácido carbônico e vapor aquoso. Esses valores devem ser considerados como extrapolados. Na tabela 3, forneci esses valores de N. Os números impressos em itálico são encontrados diretamente da maneira descrita; os números em tipo comum são interpolados a partir deles com a ajuda da fórmula exponencial de Pouillet. A tabela tem dois cabeçalhos, um que corre horizontalmente e representa a quantidade

¹⁶“The Distribution of the Moon’s Heat”, Utrecht Society of Arts and Sc. The Hague, 1891.

¹⁷Langley, ‘Temperature of the Moon’, p. 197.

de vapor aquoso (W), e outro que corre verticalmente e representa a quantidade de ácido carbônico (K) na atmosfera.

Tabela 3: A transparência de uma dada Atmosfera para o calor de um corpo de 15°C.

$\frac{\text{H}_2\text{O}}{\downarrow \text{CO}_2}$	0.3	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	6.9	10.0
1	37.2	35.0	30.7	26.9	23.9	19.3	16.0	10.7	8.9
1.2	34.7	32.7	28.6	25.1	22.2	17.8	14.7	9.7	8.0
1.5	31.5	29.6	25.9	23.6	19.9	15.9	13.0	8.4	6.9
2	27.0	25.3	21.9	19.1	16.7	13.1	10.5	6.6	5.3
2.5	23.5	22.0	19.0	16.6	14.4	11.0	8.7	5.3	4.2
3	20.1	18.8	16.3	14.2	12.3	9.3	7.4	4.2	3.3
4	15.8	14.7	12.7	10.8	9.3	7.1	5.6	3.1	2.0
6	10.9	10.2	8.7	7.3	6.3	4.8	3.7	1.9	0.93
10	6.6	6.1	5.2	4.3	3.5	2.4	1.8	1.0	0.26
20	2.9	2.5	2.2	1.8	1.5	1.0	0.75	0.39	0.07
40	0.88	0.81	0.67	0.56	0.46	0.32	0.24	0.12	0.02

Bem diferente desse calor escuro é o comportamento do calor do Sol ao passar por novas partes da atmosfera da Terra. As primeiras partes da atmosfera exercem, sem dúvida, uma absorção seletiva de alguns raios ultravioleta, mas assim que esses são extintos, o calor parece

não diminuir ao atravessar novas quantidades dos gases em discussão. Isso pode ser facilmente demonstrado para o vapor aquoso com a ajuda das observações actinométricas de Langley em Mountain Camp e Lone Pine no Colorado¹⁸. Essas observações foram realizadas em Lone Pine, de 18 de agosto a 6 de setembro de 1882, em 7h15m e 7h45m da manhã, em 11h45m da manhã e 12h15m da tarde., e em 4h15m e 4h45m da tarde. No Mountain Camp, as observações foram realizadas de 22 a 25 de agosto nos mesmos horários do dia, exceto pelo fato de que apenas uma observação foi realizada pela manhã (as 8h). Dividi essas observações em dois grupos para cada estação, de acordo com a umidade do ar. Na pequena tabela a seguir são citados, primeiro, o local de observação e, depois disso, em D, a data média das observações (agosto de 1882), em W, a quantidade de água, em I, a radiação observada por meio do actinômetro, em I_1 , a segunda observação da mesma quantidade.

	Manhã				Meio-dia				Noite			
	D.	W.	I.	I_1 .	D.	W.	J.	I_1 .	D.	W.	I.	I_1 .
Lone	29.3	0.61	1.424	1.554	23.6	0.46	1.692	1.715	26.6	0.51	1.417	1.351
Pine.	21.1	0.84	1.458	1.583	26.9	0.59	1.699	1.721	23.2	0.74	1.428	1.359
Mountain	23.5	0.088	1790		22.5	0.182	1.904	1.873	24.5	0.205	1.701	1.641
Camp.	23.5	0.153	1.749		24.5	0.245	1.890	1.917	22.5	0.32	1.601	1.527

Em uma umidade muito baixa (Mountain Camp), é evidente que o poder de absorção do vapor aquoso tem influência, pois os valores para maior umidade são (com uma exceção insignificante) inferiores aos de menor umidade. Mas para as observações de Lone Pine, o contrário parece ser verdadeiro. Não é permitido supor que a radiação possa ser reforçada por sua passagem através do vapor aquoso, mas o efeito observado deve ser causado por alguma circunstância secundária. Provavelmente o ar é, em geral, mais puro se houver mais vapor de água do que se houver

menos. A difusão seletiva diminui em consequência dessa maior pureza, e esse efeito secundário mais do que contrabalança a absorção insignificante que a radiação sofre com o aumento do vapor de água. É digno de nota que Elster e Geitel provaram que os raios actínicos invisíveis de refrangibilidade muito alta atravessam o ar muito mais facilmente se ele estiver úmido do que se estiver seco. Os números de Langley demonstram, entretanto, que a influência do vapor aquoso na radiação do Sol é insensível assim que ultrapassa um valor de cerca de 0.4.

Provavelmente o mesmo raciocínio será válido para o ácido carbônico, pois o espectro de absorção de ambos os gases tem o mesmo

¹⁸Langley, 'Researches on Solar Heat', pp. 94, 98 e 177.

caráter geral. Além disso, a absorção pelo ácido carbônico ocorre em comprimentos de onda consideravelmente maiores e, consequentemente, em partes muito menos importantes do espectro do Sol do que a absorção pelo vapor d'água¹⁹. Portanto, é justificável supor que a radiação do Sol não sofra uma diminuição significativa se K e W aumentarem de um valor bastante insignificante ($K = 1$, $W = 0.4$) para valores mais altos.

Antes de prosseguirmos, precisamos examinar outra questão. Deixe o ácido carbônico no ar ser, por exemplo, o mesmo que agora ($K = 1$ para raios verticais) e a quantidade de vapor de água ser de 10 gramas por metro cúbico ($W = 1$ para raios verticais). Então, os raios verticais da Terra atravessam as quantidades $K = 1$ e $W = 1$; os raios que escapam em um ângulo de 30° com o horizonte (massa de ar = 2) atravessam as quantidades $K = 2$, $W = 2$; e assim por diante. Os diferentes raios que emanam de um ponto da superfície da Terra sofrem, portanto, uma absorção diferente - quanto maior, mais o caminho do raio diminui em relação à linha vertical. Pode-se perguntar, então, qual é o caminho mais longo que a radiação total deve percorrer para que a fração absorvida dela seja a mesma que a fração absorvida da massa total de raios que emanam para o espaço em diferentes direções. Para os raios emitidos, suporemos que a lei do cosseno de Lambert seja válida. Com o auxílio da Tabela 3, podemos calcular a fração absorvida de qualquer raio e, em seguida, somar o calor total absorvido e determinar qual é a fração da radiação total. Dessa forma, encontramos para o nosso exemplo o caminho (massa de ar) 1.61. Em outras palavras, a parte total absorvida de toda a radiação é tão grande quanto se a radiação total atravessasse as quantidades 1.61 de vapor aquoso e de ácido carbônico. Esse número depende da composição da atmosfera, de modo que se torna menor quanto maior for a quantidade de vapor aquoso e ácido carbônico no ar. Na tabela 4 a seguir, encontramos esse número para diferentes quantidades de ambos os gases.

Tabela 4: Caminho médio dos raios da Terra

$\frac{\overrightarrow{H_2O}}{\downarrow CO_2}$	0.3	0.5	1.0	2.0	3.0
0.67	1.69	1.68	1.64	1.57	1.53
1.0	1.66	1.65	1.61	1.55	1.51
1.5	1.62	1.61	1.57	1.51	1.47
2.0	1.58	1.57	1.52	1.46	1.43
2.5	1.56	1.54	1.50	1.45	1.41
3.0	1.52	1.51	1.47	1.44	1.40
3.5	1.48	1.48	1.45	1.42	

Se a absorção da atmosfera se aproximar de zero, esse número se aproximará do valor 2.

III. Equilíbrio térmico na superfície e na atmosfera da Terra

Como agora temos um conhecimento suficiente da absorção de calor pela atmosfera, resta examinar como a temperatura do solo depende do poder de absorção do ar. Essa investigação já foi realizada por Pouillet²⁰, mas deve ser feita novamente, pois Pouillet usou hipóteses que não estão de acordo com nosso conhecimento atual.

Em nossas deduções, assumiremos que o calor que é conduzido do interior da Terra para sua superfície pode ser totalmente negligenciado. Se ocorrer uma mudança na temperatura da superfície da Terra, as camadas superiores da crosta terrestre evidentemente também mudarão de temperatura; mas esse processo posterior passará em um tempo muito curto em comparação com o tempo necessário para a alteração da temperatura da superfície, de modo que, a qualquer momento, o calor que é transportado do interior para a superfície (positivo no inverno, negativo no verão) deve permanecer independente das pequenas variações seculares da temperatura da superfície e, no decorrer de um ano, ser quase igual a zero.

Da mesma forma, suporemos que o calor que é conduzido a um determinado local na superfície da Terra ou na atmosfera em consequência de correntes atmosféricas ou oceânicas, horizontais ou verticais, permanece o mesmo no decorrer do tempo considerado, e também suporemos que a parte nublada do céu permanece inalterada. Examinaremos apenas a variação da temperatura com a transparência do ar.

¹⁹Cf. acima, pg. págs. 6-9, e a curva de Langley para o espectro solar, Ann. d., Ch. et d. Phys. sér. 6, t. xvii. pp. 323 e 326 (1889); 'Prof. Papers,' No. 15, placa 12.

²⁰Pouillet, Comptes rendus, t. vii. p. 41 (1888)

Todos os autores concordam com a opinião de que existe um equilíbrio na temperatura da Terra e de sua atmosfera. A atmosfera deve, portanto, irradiar para o espaço a mesma quantidade de calor que ganha, em parte pela absorção dos raios solares, em parte pela radiação da superfície mais quente da Terra e por meio de correntes ascendentes de ar aquecidas pelo contato com o solo. Por outro lado, a Terra perde tanto calor por radiação para o espaço e para a atmosfera quanto ganha por absorção dos raios solares. Se considerarmos um determinado local na atmosfera ou no solo, também devemos levar em consideração as quantidades de calor que são transportadas para esse local por meio de correntes oceânicas ou atmosféricas. Para a radiação, suporemos que a lei de Stefan da radiação, que agora é geralmente aceita, seja válida ou, em outras palavras, que a quantidade de calor (W) que irradia de um corpo com albedo ($1 - \nu$) e temperatura T (absoluta) para outro corpo com coeficiente de absorção β e temperatura absoluta θ seja

$$W = \nu\beta\gamma(T^4 - \theta^4)$$

onde γ é a chamada constante de radiação (1.21×10^{-12} por segundo e cm^2). O espaço vazio pode ser considerado como tendo a temperatura absoluta de 0.²¹

Provisoriamente, consideramos o ar como um envelope uniforme de temperatura θ e coeficiente de absorção α para o calor solar; de modo que, se A calorias chegam do Sol em uma coluna de 1 cm^2 de seção transversal, αA são absorvidas pela atmosfera e $(1 - \alpha)A$ chega à superfície da Terra. Nas calorias A , portanto, não está incluída a parte do calor do Sol que, por meio da reflexão seletiva na atmosfera, é lançada para o espaço. Além disso, seja β o coeficiente de absorção do ar para o calor que irradia da superfície da Terra; β também é o coeficiente de emissão do ar para a radiação de baixa temperatura - estritamente 15° ; mas como a distribuição espectral do calor varia muito lentamente com a temperatura, β pode ser considerado como o coeficiente de emissão também na temperatura do ar. Deixe que o albedo da crosta terrestre seja designado por $(1 - \nu)$ e que as quantidades de calor que são transportadas para

o ar e para a superfície da Terra no ponto considerado sejam M e N , respectivamente. Como unidade de tempo, podemos usar qualquer período: a melhor opção no cálculo a seguir talvez seja usar três meses para esse fim. Como unidade de superfície, podemos usar 1 cm^2 e, para o calor no ar, o calor contido em uma coluna de 1 cm^2 de seção transversal e a altura da atmosfera. O calor que é refletido do solo não é absorvido de forma significativa pelo ar (consulte a pág. 11), pois ele já atravessou grandes quantidades de vapor de água e ácido carbônico, mas uma parte dele pode ser devolvida ao solo por meio de reflexão difusa. Que essa parte não seja incluída no albedo $(1 - \nu)$. As quantidades γ , A , ν , M , N e α devem ser considerados como constantes, β como variáveis independentes e θ e T como variáveis dependentes.

Então, encontramos para a coluna de ar

$$\beta\gamma\theta^4 = \beta\gamma\nu(T^4 - \theta^4) + \alpha A + M \quad (1)$$

O primeiro membro dessa equação representa o calor irradiado do ar (coeficiente de emissão β , temperatura θ) para o espaço (temperatura 0). O segundo dá o calor irradiado do solo (1 cm^2 , temperatura T , albedo $1 - \nu$) para o ar; o terceiro e o quarto dão a quantidade de radiação solar absorvida pelo ar e a quantidade de calor obtida por condução (correntes de ar) de outras partes do ar ou do solo. Da mesma forma, encontramos para a superfície da Terra

$$\beta\gamma\nu(T^4 - \theta^4) + (1 - \beta)\gamma\nu T^4 = (1 - \alpha)\nu A + N \quad (2)$$

O primeiro e o segundo membros representam as quantidades irradiadas de calor que vão para o ar e para o espaço, respectivamente, $(1 - \alpha)\nu A$ é a parte da radiação solar absorvida e N o calor conduzido para o ponto considerado de outras partes do solo ou do ar por meio de correntes de água ou ar.

Combinando essas duas equações para a eliminação de θ , que não tem interesse considerável, encontramos para T^4

$$T^4 = \frac{\alpha A + M + (1 - \alpha)A(1 + \nu) + N(1 + 1/\nu)}{\gamma(1 + \nu - \beta\nu)} \\ = \frac{K}{1 + \nu(1 - \beta)} \quad (3)$$

²¹Langley, 'Prof. Papers,' No. 15, p. 122. "The Temperature of the Moon", p. 206.

Para a crosta sólida da Terra, podemos, sem erros sensíveis, colocar ν igual a 1, se exceptuarmos os campos de neve, para os quais assumimos $\nu = 0.5$. Para as partes da Terra cobertas de água, calculei o valor médio de ν como sendo 0.925 com a ajuda dos números de Zenker²². Temos, também, que usar o albedo das nuvens. Não sei se ele já foi medido, mas provavelmente não difere muito daquele da neve recém-caída, que Zöllner determinou como sendo 0.78, ou seja, $\nu = 0.22$. Para neve velha, o albedo é muito menor ou ν muito maior; portanto, assumimos 0.5 como valor médio.

A última fórmula mostra que a temperatura da Terra aumenta com β , e quanto mais rápido, maior for ν . Para um aumento de 1° se $\nu = 1$, encontramos os seguintes aumentos para os valores de $\nu = 0.925, 0.5$ e 0.22 , respectivamente:

β	$\nu = 0.925$	0.5	0.22
0.65	0.944	0.575	0.275
0.75	0.940	0.556	0.261
0.85	0.934	0.535	0.245
0.95	0.428	0.512	0.228
1.00	0.925	0.500	0.220

Esse raciocínio é válido se a parte da superfície da Terra considerada não alterar seu albedo como consequência da temperatura alterada. Nesse caso, as circunstâncias são totalmente diferentes. Se, por exemplo, um elemento da superfície que não está coberto de neve no momento, em consequência da queda da temperatura, ficar coberto de neve, devemos alterar na última fórmula não apenas β , mas também ν . Nesse caso, devemos nos lembrar de que α é muito pequeno em comparação com β . Para α , escolheremos o valor 0.40 de acordo com as estimativas de Langley²³. Certamente, grande parte desse valor depende da parte difusamente refletida do calor do sol, que é absorvida pela atmosfera da Terra e, portanto, não deve ser incluída em α , como definimos acima. Por outro lado, o Sol pode, em geral, estar um pouco mais baixo do que nas medições de Langley, que foram realizadas com um Sol relativamente alto, e, em consequência disso, α pode ser um pouco maior, de modo que essas circunstâncias podem se compensar mutuamente. Para β , escolheremos o valor 0.70, que corresponde,

²²Zenker, Die Vertheilung der Wärme auff der Erdoberfläche, p. 54 (Berlim, 1888)

²³Langley, “Temperature of the Moon”, p. 189. Na p. 197, ele estima que α seja apenas 0.33.

quando $K = 1$ e $W = 0.3$ (um pouco abaixo do ponto de congelamento), ao fator 1.66 (consulte a págs. 11-12). Nesse caso, encontramos a relação entre T (descoberta) e T_1 (superfície coberta de neve) como sendo

$$\begin{aligned} T^4 : T_1^4 &= \\ \frac{A(1 + 1 - 0 \cdot 40) + M}{\gamma(1 + 1 - 0 \cdot 70)} : \frac{A(1 + 0 \cdot 50 - 0 \cdot 20) + M}{\gamma(1 + 0 \cdot 50 - 0 \cdot 35)} \\ &= \frac{1 \cdot 60 + \phi}{1 \cdot 30} : \frac{1 \cdot 30 + \phi}{1 \cdot 15}, \end{aligned}$$

se $M = \phi A$. Devemos ter em mente que a média de M para toda a Terra é zero, para as regiões equatoriais é negativa e para as regiões polares é positiva. Para uma latitude média $M = 0$ e, nesse caso, T_1 , torna-se 267.3 se $T = 273$, ou seja, a temperatura diminui em consequência da cobertura de neve em $5^\circ C$.²⁴ A diminuição da temperatura por essa causa será válida até que $\phi = 1$, ou seja, até que o calor fornecido pela convecção ao ar exceda toda a radiação do sol. Isso só pode ocorrer no inverno e nas regiões polares.

Mas esse é um fenômeno secundário. O principal efeito que examinamos é a influência direta de uma alteração de β sobre a temperatura T da superfície da Terra. Se partirmos de um valor $T = 273$ e $\beta = 0.70$, descobriremos que a alteração (t) na temperatura causada pela variação de β para os seguintes valores é

$\beta = 0.60$	$t = -5^\circ C$
0.80	+5.6
0.90	+11.7
1.00	+18.6

Esses valores são calculados para $\nu = 1$, ou seja, para a crosta sólida da superfície da Terra, exceto os campos de neve. Para superfícies com outro valor de ν , como, por exemplo, o oceano ou os campos de neve, temos que multiplicar esse valor t por uma fração dada acima.

Agora, vamos considerar brevemente a influência das nuvens. Grande parte da superfície da Terra não recebe calor diretamente do sol, porque os raios solares são bloqueados pelas nuvens.

²⁴De acordo com a correção introduzida na sequência para as diferentes alturas das camadas de absorção e radiação da atmosfera, o número $5^\circ.7$ é reduzido para $4^\circ.0$. Mas como cerca de metade do céu é coberto por nuvens, o efeito será apenas a metade do que seria para um céu sem nuvens, ou seja, o efeito médio será uma redução de cerca de $2^\circ C$.

Quão grande é a parte da superfície da Terra coberta por nuvens, podemos descobrir pelo trabalho de Teisserenc de Bort²⁵ sobre nebulosidade. A partir da tabela 17 dessa publicação, determinei a nebulosidade média para diferentes latitudes e encontrei:

Latitude. .	60.	45.	30.	15.	0.
Nebulosidade	0.603	0.48	0.402	0.511	

Latitude. .	0.	- 15.	- 30.	- 45.	- 60.
Nebulosidade	0.581	0.463	0.53	0.701	

Para a parte da Terra entre 60°S. e 60°N. encontramos o valor médio de 0.525, i.e. 52.5 porcento do céu é encoberto por nuvens. O efeito do calor destas nuvens pode ser estimado da seguinte maneira. Suponha que a nuvem esteja numa parte da superfície da Terra e que não haja conexão entre esta parte sombreada e as partes vizinhas, então haverá um equilíbrio térmico entre a temperatura da nuvem e do solo abaixo dela. Eles irão irradiar de um para o outro e a nuvem também para o ar acima e para o espaço, e a radiação entre radiação entre a nuvem e a Terra pode, devido a pequena diferença de temperatura, ser tomada como proporcional a esta diferença. Outras trocas de calor por meio de correntes de ar são também, como uma primeira aproximação, proporcionais a esta diferença. Se nós então supusermos uma mudança da temperatura da nuvem (outras circunstâncias, como sua altura e composição, mantidas inalteradas), a temperatura do solo abaixo dela também deve se alterar da mesma maneira se houver disponível a mesma quantidade de calor para ambas - se não houver disponibilidade para o solo vindas das partes vizinhas, a nuvem e o solo irão finalmente adquirir a mesma temperatura média. Se, então, a temperatura das nuvens variar de uma determinada maneira (sem alteração das suas outras propriedades, como altura, compacticidade, etc.), o solo irá experimentar a mesma variação de temperatura. Agora, será mostrado a seguir que a variação do ácido carbônico da atmosfera na mesma proporção produz aproximadamente o mesmo efeito termal independente da sua magnitude absoluta (veja pág. 20). Assim, podemos calcular a varia-

ção de temperatura neste caso como se as nuvens cobrissem o solo com um filme fino de albedo 0.78 ($\nu = 0.22$, veja pág. 13). Como agora na média $K = 1$ e $W = 1$ aproximadamente, e neste caso β vale em torno de 0.79, o efeito das partes cobertas por nuvens será de apenas 0.25 do efeito nas partes que têm $\nu = 1$. Se um correção similar for introduzida para os oceanos ($\nu = 0.925$) sob a suposição que as partes sem nuvens cobrindo a Terra consistir de tanta água quanto de solo firme (o que é aproximadamente verdade, pois as nuvens são preferencialmente estocadas nos oceanos), encontraremos um efeito médio de, em números redondos, 60 p.c. daquele que existiria se toda a superfície da Terra tivesse $\nu = 1$. As partes cobertas por neve não são consideradas, pois, por um lado, estas partes são em geral cobertas por nuvens até 65 p.c.; ademais, elas constituem apenas uma parte pequena da Terra (para todo o ano na média apenas em torno de 4 p.c.), de forma que a correção para este caso não excederia 0.5 p. c. no último número 60. E ainda, nos países fronteiriços entre os campos de neve e o solo livre, efeitos secundários devem ser levados em conta (veja págs. 13-14) que compensam, e talvez superam, o efeito moderador da neve.

Acima, nós fizemos a hipótese de que o ar poderia ser tomado como um envelope com temperatura perfeitamente uniforme. Isto, é claro, não é verdade, e agora iremos examinar as possíveis correções que devem ser introduzidas para eliminar os erros advindos desta imprecisão. É evidente que as partes do ar que irradiam para o espaço são predominantemente as externas, e por outro lado, a camada de ar que absorve a maior parte da radiação da Terra não está em uma altura muito alta. Por esta razão tanto a radiação do ar para o espaço ($\beta\gamma\theta^4$ na eq.(1)) quanto a radiação da Terra para o ar ($\beta\gamma\nu(T^4 - \theta^4)$ na eq.(2)), são amplamente reduzidas, e o ar tem efeito muito maior para proteger contra a perda de calor para o espaço que o assumido nestas equações, e consequentemente também na eq.(3). Se nós soubermos a diferença de temperatura entre duas camadas do ar que irradiam para o espaço e absorbem a radiação da Terra, seria fácil introduzir a correção necessária nas (1), (2), e (3). Com esta finalidade, eu apresentei a seguinte consideração.

Como na composição média da atmosfera ($K = 1$, $W = 1$) cerca de 80 p.c. da radiação da Terra é

²⁵Teisserenc de Bort, “Distribution moyenve de la nébulosité”, Ann. du bureau central météorologique de France, Année 1884, t. iv. 2nd partie, p. 27.

absorvida pelo ar, podemos considerar como temperatura média da camada de absorção a temperatura na altura em que 40 p.c. do calor é absorvido. Como a emissão e a absorção seguem as mesmas leis quantitativas, podemos escolher, como temperatura média da camada emissora, a temperatura na altura em que a radiação que entra do espaço na direção oposta à emissão real é absorvida na extensão de 40 p.c.

Langley fez quatro medições do poder de absorção do vapor de água para a radiação de um cubo de Leslie quente de 100°C.²⁶ Esses valores fornecem praticamente o mesmo coeficiente de absorção se a fórmula de Pouillet for usada para o cálculo. A partir desses números, calculamos que, para a absorção de 40 p.c. da radiação, seria necessário intercalar tanto vapor de água entre o radiador e o bolômetro que, quando condensado, formaria uma camada de água de 3.05 milímetros de espessura. Se agora supusermos como média para toda a Terra $K = 1$ e $W = 1$ (consulte a Tabela 4), descobriremos que os raios verticais da Terra, se ela estivesse a 100°, deveriam atravessar 305 metros de ar para perder 40 p.c. Agora, a Terra está a apenas 15°C, mas isso não pode fazer nenhuma grande diferença. Como a radiação emana em todas as direções, temos que dividir 305 por 1.61 e obter, dessa forma, 209 metros. Em consequência da diminuição da quantidade de vapor de água com a altura²⁷, devemos aplicar uma pequena correção, de modo que o resultado final seja 233 metros. É claro que esse número é um valor médio, e valores mais altos serão válidos para partes mais frias e mais baixas para partes mais quentes da Terra. Em uma distância tão pequena da Terra, então, 40 p.c. da radiação da Terra deve ser bloqueada. Agora, não é totalmente correto calcular com a fórmula de Pouillet (é bastante curioso que os números de Langley concordem tão bem com ela), que fornece valores necessariamente muito baixos. Mas, por outro lado, não consideramos de forma alguma a absorção pelo ácido carbônico nessa parte, e isso pode compensar o erro mencionado. Nas camadas mais altas da atmosfera há muito pouco vapor d'água, de modo que devemos calcular com o ácido carbônico como o principal absorvente. A

partir de uma medição por Ångström²⁸, aprendemos que os coeficientes de absorção do vapor de água e do ácido carbônico em quantidades iguais (número igual de moléculas) estão na proporção de 81 : 62. Essa proporção é válida para o radiador menos quente que Ångström usou, e não há dúvida de que a radiação da Terra é muito menos refrangível. Mas, na ausência de uma determinação mais apropriada, podemos usá-la para nosso propósito; é provável que, para um radiador menos quente, o poder de absorção do ácido carbônico seja um pouco maior em comparação com o do vapor de água, pois as bandas de absorção de CO₂ são, em geral, menos refrangíveis do que as de H₂O (consulte as págs. 8-9). Usando o número 0.03 vol. p.c. para a quantidade de ácido carbônico na atmosfera, descobrimos que os raios que emanam da parte superior do ar são derivados até a extensão de 40 p. c. de uma camada que constitui 0.145 parte da atmosfera. Isso corresponde a uma altura de cerca de 15.000 metros. Com relação a esse valor, podemos fazer a mesma observação que fizemos sobre o valor anterior. Nesse caso, negligenciamos a absorção pelas pequenas quantidades de vapor de água na atmosfera superior. A diferença de temperatura dessas duas camadas - uma absorvendo e a outra irradiando - é, de acordo com as medições de Glaisher²⁹ (com uma pequena extrapolação), cerca de 42°C.

Para as nuvens, obtemos naturalmente números ligeiramente modificados. Devemos considerar a altura média das nuvens que são iluminadas pelo sol. Como tais nuvens, escolhi os cumes dos cúmulos que se encontram a uma altura média de 1.855 metros, com uma altura máxima de 3.611 metros e uma mínima de 900 metros.³⁰ Fiz cálculos para valores médios de 2000 e 4000 metros (correspondentes a diferenças de temperatura de 30°C e 20°C em vez de 42°C para a superfície da Terra).

Se quisermos agora ajustar nossa fórmula (1) a (3), teremos que introduzir em (1) e (2) θ como a temperatura média da camada radiante e $(\theta + 42)$, $(\theta + 30)$ ou $(\theta + 20)$ respectivamente para

²⁸ Ångström, Bihang till K. Vet-Ak. Handl. Bd. xv. Afd. 1, No. 9, pp. 11 and 18 (1889).

²⁹ Joh. Müller's Lehrbuch d. kosmischen Physik, 5^{5*} Aufl. p. 589 (Braunschweig, 1894)

³⁰ De acordo com as medições de Ekholm e Hagström, Biheng. till K. So. Vet-Ak. Handlengar, Bd. xii. Afd. 1, No. 10, p. 11 (1686)

²⁶ Langley, "Temperature of the Moon", p. 186.

²⁷ Hann, Meteorologische Zeitschrift, xi. p. 196 (1894)

a temperatura média da camada absorvente. No primeiro caso, devemos usar $\nu = 1$ e $\nu = 0.925$, respectivamente; no segundo e no terceiro casos, $\nu = 0.22$.

Encontramos então ao invés da fórmula (3)

$$T^4 = \frac{K}{1 + \nu(1 - \beta)}$$

outra fórmula bem similar

$$T^4 = \frac{K}{1 + c\nu(1 - \beta)}, \quad (4)$$

onde c é uma constante com valores 1.88, 1.58, e 1.37 respectivamente para os três casos.³¹ Desta forma, nós encontramos os seguintes valores corrigidos que representam a variação da temperatura, se o solo firme mudar sua temperatura de 1°C em consequência da variação de β como calculado pela fórmula (3).

Tabela 5: Fator de Correção para a Radiação.

β	Solo firme $\nu = 1$	Água $\nu =$ 0.925	Neve $\nu =$ 0.5	Nuvens ($\nu = 0.22$) a uma altura de (m.)		
				0	2000	4000
0.65	1.53	1.46	0.95	0.49	0.42	0.37
0.75	1.60	1.52	0.95	0.47	0.40	0.35
0.85	1.69	1.59	0.95	0.46	0.38	0.33
0.95	1.81	1.68	0.94	0.43	0.36	0.31
1.60	1.88	1.74	0.94	0.41	0.35	0.30

Se agora nós assumirmos como média para a Terra como um todo $K = 1$ e $W = 1$, temos $\beta = 0.785$, e tomado a parte encoberta sendo de 52.5 p.c. e as nuvens tendo uma altura de 2000 metros, assumindo ainda a parte da Terra remanescente sem nuvem consistindo igualmente de terra e água, encontramos como variação média da temperatura

$$1.63 \times 0.2385 + 1.54 \times 0.2385 + 0.39 \times 0.525 = 0.979$$

ou muito próximo do mesmo efeito como podemos calcular diretamente pela fórmula (3). Nestas bases, eu usei a fórmula mais simples.

No que foi dito anteriormente, observei que, de acordo com minha estimativa, o ar é menos transparente para o calor escuro do que na estimativa de Langley e quase na proporção de 37.2 : 44. O quão grande influência essa diferença pode exercer é facilmente calculada com a ajuda das fórmulas (3) ou (4). De acordo com a avaliação de

³¹ $1.88 = \left(\frac{288}{246}\right)^4$, $1.58 = \left(\frac{276}{246}\right)^4$, e $1.37 = \left(\frac{266}{246}\right)^4$. 246° é a temperatura absoluta média da camada irradiante mais alta de ar.

Langley, o efeito deve ser quase 15 p.c. maior do que de acordo com a minha. Acho que minha estimativa está mais de acordo com a grande absorção que Langley encontrou para o calor de corpos radiantes terrestres (consulte a pág. 15) e, em todas as circunstâncias, preferi subestimar um pouco do que superestimar o efeito em questão.

IV. Cálculo da Variação da Temperatura que resultaria como consequência de uma dada Variação do Ácido Carbônico no Ar.

Agora temos todos os dados necessários para estimar o efeito sobre a temperatura da Terra que seria o resultado de uma determinada variação do ácido carbônico atmosférico. Só precisamos determinar o coeficiente de absorção para um determinado local com a ajuda da Tabela 3, se soubermos a quantidade de ácido carbônico ($K = 1$ agora) e vapor de água (W) desse local. Com o auxílio da Tabela 4, primeiro determinamos o fator ρ que fornece o caminho médio da radiação da Terra através do ar e multiplicamos os valores de K e W fornecidos por esse fator. Em seguida, determinamos o valor de β que corresponde a ρK e ρW . Suponha agora que o ácido carbônico tenha outra concentração K_1 (e.g. $K_1 = 1.5$). Então, a princípio, supomos W inalterado e buscamos o novo valor de ρ , digamos ρ_1 , que é válido com essa suposição. Em seguida, temos que buscar β , que corresponde a $\rho_1 K_1 (1.5\rho_1)$ e $\rho_1 W$. A partir da fórmula (3), podemos calcular facilmente a alteração (t) (aqui, aumento) na temperatura em um determinado local que acompanhará a variação de β de β para β_1 . Em consequência da variação (t) na temperatura, W também deve sofrer uma variação. Como a umidade relativa não varia muito, a menos que a distribuição de terra e água mude (consulte a tabela 8 do meu livro de memórias original), supus que essa quantidade permanecesse constante e, assim, determinei o novo valor W_1 de W . Uma aproximação nova fornece, na maioria dos casos, valores de W_1 e β_1 que podem ser considerados definitivos. Dessa forma, portanto, obtemos a variação de temperatura assim que conhecemos a temperatura e a umidade reais em um determinado local.

A fim de obter valores para a temperatura de toda a Terra, calculei, a partir dos gráficos do

Tabela 6: Temperatura Média, Umidade Relativa e Absoluta (a partir dos valores de temperatura e umidade relativa eu calculei a umidade absoluta em gramas por metros cúbicos.).

Latitude	Temperatura Média					Umidade Relativa Média					Umidade Absoluta Média				
	Dez.-Fev.	Mar.-Maio	Jun.-Ago.	Set.-Nov.	Média do Ano	Dez.-Fev.	Mar.-Maio	Jun.-Ago.	Set.-Nov.	Média do Ano	Dez.-Fev.	Mar.-Maio	Jun.-Ago.	Set.-Nov.	Média do Ano
70	-21.1	-8.3	+7.5	-6.0	-7.0	86	81	77	84	82	1.15	2.14	6.22	2.84	3.09
60	-11.2	+0.2	+13.5	+2.2	+1.2	83	74	76	80	78.2	2.22	3.82	8.82	4.7	4.9
50	-1.4	+7.8	+18.7	+9.7	+8.7	78	73	69	76	74	3.86	5.98	10.8	7.16	6.95
40	+8.4	+14.5	+21.8	+16.6	+15.3	73	68	67	71	69.7	6.53	8.63	13.4	10.13	9.7
30	+17.0	+21.5	+26.0	+23.0	+21.9	71	68	70	73	70.5	10.36	12.63	17.1	15.0	13.8
20	+23.2	+25.5	+26.8	+25.9	+25.4	74	73	78	77	75.5	15.3	17.0	19.6	16.8	17.2
10	+25.5	+25.8	+25.4	+25.5	+25.5	77	78	82	81	79.5	17.7	18.9	19.9	19.3	18.9
0	+25.7	+25.5	+24.0	+25.0	+25.1	81	81	82	80	81	19.4	19.0	17.9	18.3	18.7
-10	+24.9	+24.0	+20.8	+23.1	+23.2	79	78	80	77	78.5	18.0	17.1	14.6	16.0	16.4
-20	+22.4	+20.5	+16.4	+19.3	+19.7	75	79	80	75	77.2	14.8	14.0	11.1	13.0	13.2
-30	+17.5	+15.2	+11.3	+14.2	+14.5	75	80	80	79	78.5	11.1	10.4	8.1	9.6	9.8
-40	+11.6	+9.5	+5.9	+8.2	+8.7	81	81	83	79	81	8.34	7.08	5.94	6.63	6.99
-50	+5.3	+2.0	-0.4	+1.6	+2.1	83	79	-	-	-	5.74	4.46	-	-	-
-60															

Dr. Buchan, a temperatura média em diferentes locais de cada mês³² a temperatura média em cada distrito contido entre dois paralelos com diferença de 10 e dois meridianos com diferença de 20 graus (por exemplo, entre 0° e 10°N. e 160° e 180°W). A umidade ainda não foi suficientemente examinada em toda a Terra; portanto, coletei muitas medições da umidade relativa em diferentes locais (cerca de 780) da Terra e as marquei em mapas do mundo e, depois disso, estimei os valores médios para cada distrito. Essas quantidades foram tabuladas para as quatro estações, dezembro-fevereiro, março-maio, junho-agosto e setembro-novembro. A tabela detalhada e as observações usadas podem ser encontradas em meu livro de memórias original: aqui reproduzo apenas os valores médios para cada décimo paralelo (Tabela 6).

Por meio desses valores, calculei a alteração média de temperatura que ocorreria se a quan-

tidade de ácido carbônico variasse de seu valor médio atual ($K = 1$) para outro, ou seja, para $K = 0.67, 1.5, 2, 2.5$ e 3 , respectivamente. Esse cálculo é feito para cada décimo paralelo e separadamente para as quatro estações do ano. A variação é apresentada na Tabela 7.

Uma olhada nessa tabela mostra que a influência é praticamente a mesma em toda a Terra. A influência tem um mínimo próximo ao equador e, a partir daí, aumenta até um máximo plano que se situa tanto mais longe do equador quanto maior for a quantidade de ácido carbônico no ar. Para $K= 0.67$, o efeito máximo está próximo ao paralelo 40, para $K= 1.5$ no 50, para $K= 2$ no 60 e para valores mais altos de K acima do paralelo 70. Em geral, a influência é maior no inverno do que no verão, exceto no caso das partes que ficam entre o máximo e o polo. A influência também será maior quanto mais alto for o valor de ν , que, em geral, é um pouco maior para a terra do que para o oceano. Devido à nebulosidade do hemisfério sul, o efeito será menor do que no hemisfério norte. Um aumento na quantidade de

³²Buchan: Report on the Scientific Results of the Voyage of H.M.S. 'Challenger', Physics and Chemistry, vol. ii., 1889.

ácido carbônico diminuirá, é claro, a diferença de temperatura entre o dia e a noite. Uma elevação secundária muito importante do efeito será produzida nos locais que alteram seu albedo pela extensão ou regressão da cobertura de neve (consulte a págs. 13-14), e esse efeito secundário provavelmente removerá o efeito máximo dos paralelos inferiores até a vizinhança dos polos.³³

Deve-se lembrar que os cálculos acima são encontrados por interpolação dos números de Langley para os valores $K= 0.67$ e $K= 1.5$, e que os outros números devem ser considerados como extrapolados. O uso da fórmula de Pouillet torna os valores de $K= 0.67$ provavelmente um pouco pequenos demais, e os de $K= 1.5$ um pouco grandes demais. Sem dúvida, esse também é o caso dos valores extrapolados, que correspondem a valores mais altos de K .

Podemos agora perguntar quão grande deve ser a variação do ácido carbônico na atmosfera para causar uma determinada mudança de temperatura. A resposta pode ser encontrada por interpolação na Tabela 7. Para facilitar essa investigação, podemos fazer uma observação simples. Se a quantidade de ácido carbônico diminuir de 1 para 0.67, a queda de temperatura será quase a mesma que o aumento de temperatura se essa quantidade aumentar para 1.5. E para obter um novo aumento dessa ordem de grandeza ($3^{\circ} \cdot 4$), será necessário alterar a quantidade de ácido carbônico até que ela atinja um valor quase intermediário entre 2 e 2.5.

Assim, se a quantidade de ácido carbônico aumentar em progressão geométrica, o aumento da temperatura aumentará quase em progressão aritmética. Essa regra - que naturalmente é válida apenas na parte investigada - será útil para as seguintes estimativas resumidas.

V. Consequências Geológicas.

Eu certamente não teria feito esses cálculos tediosos se não houvesse um interesse extraordinário ligado a eles. Na Sociedade de Física de Estocolmo, houve ocasionalmente discussões muito animadas sobre as prováveis causas da Era Glacial; e essas discussões, na minha opinião, levaram

à conclusão de que ainda não existe uma hipótese satisfatória que possa explicar como as condições climáticas para uma era glacial poderiam ser alcançadas em um período de tempo tão curto como o que se passou desde os dias da época glacial. A visão comum até agora tem sido a de que a Terra esfriou com o passar do tempo; e se não soubéssemos que o inverso tem acontecido, certamente afirmaríamos que esse resfriamento deve se manter continuamente. As conversas com meu amigo e colega Professor Högbom, juntamente com as discussões mencionadas acima, levaram-me a fazer uma estimativa preliminar do provável efeito de uma variação do ácido carbônico atmosférico sobre a temperatura da Terra. Como essa estimativa levou à crença de que se poderia, dessa forma, provavelmente encontrar uma explicação para variações de temperatura de $5^{\circ} - 10^{\circ}\text{C}$, elaborei o cálculo com mais detalhes e o apresento agora ao público e aos críticos.

A partir de pesquisas geológicas, está bem estabelecido o fato de que, em tempos terciários, havia vegetação e vida animal nas zonas temperadas e árticas que devem ter sido condicionadas por uma temperatura muito mais alta do que a atual nas mesmas regiões.³⁴ A temperatura nas zonas árticas parece ter excedido a temperatura atual em cerca de 8 ou 9 graus. A esse período agradável sucedeu-se a era glacial, que foi interrompida uma ou mais vezes por períodos interglaciais com um clima mais ou menos do mesmo tipo que o atual, às vezes até mais ameno. Quando a era glacial teve sua maior extensão, os países que hoje desfrutam da mais alta civilização estavam cobertos de gelo. Esse foi o caso da Irlanda, Grã-Bretanha (exceto uma pequena parte no sul), Holanda, Dinamarca, Suécia e Noruega, Rússia (até Kiev, Orel e Nijni Novgorod), Alemanha e Áustria (até Harz, Erz-Gebirge, Dresden e Cracóvia). Ao mesmo tempo, um manto de gelo dos Alpes cobriu a Suíça, partes da França, a Baviera ao sul do Danúbio, o Tirol, a Estíria e outros países austriacos, e desceu até a parte norte da Itália. Simultaneamente, a América do Norte também foi coberta de gelo na costa oeste até o paralelo 47, na costa leste até o paralelo 40 e na parte central até o paralelo 37 (confluência dos rios

³³Ver Adendo, pág. 25.

³⁴Para obter detalhes de. Neumayr, Erdgeschichte, B1. Londres, 1894; Nathorst, Jordens historia, p. 989, Estocolmo, 1894.

Tabela 7: Variação da Temperatura causada por uma dada Variação de Ácido Carbônico.

Latitude	Ácido Carbônico = 0.67			Ácido Carbônico = 1.5			Ácido Carbônico = 2.0			Ácido Carbônico = 2.5			Ácido Carbônico = 3.0						
	Dez.-Fev.	Mar.-Maio	Jun.-Ago.	Set.-Nov.	Dez.-Fev.	Mar.-Maio	Jun.-Ago.	Set.-Nov.	Dez.-Fev.	Mar.-Maio	Jun.-Ago.	Set.-Nov.	Dez.-Fev.	Mar.-Maio	Jun.-Ago.	Set.-Nov.			
70	-2.9	-3.0	-3.4	-3.1	-3.1	3.3	3.4	3.8	3.6	3.52	6.0	6.1	6.05	7.9	8.0	7.9	9.1	9.3	
60	-3.0	-3.2	-3.4	-3.3	-3.22	3.4	3.7	3.6	3.8	3.62	6.1	6.1	6.02	8.0	8.0	7.6	7.9	9.3	
50	-3.2	-3.3	-3.4	-3.3	-3.3	3.7	3.8	3.4	3.7	3.65	6.1	6.1	5.5	6.0	5.92	8.0	7.9	9.3	
40	-3.4	-3.2	-3.3	-3.3	-3.32	3.7	3.6	3.3	3.5	3.52	6.0	5.8	5.4	5.6	5.7	7.9	7.7	9.3	
30	-3.3	-3.2	-3.1	-3.17	-3.17	3.5	3.3	3.2	3.5	3.47	5.6	5.4	5.0	5.2	5.3	7.2	7.0	9.3	
20	-3.1	-3.1	-3.0	-3.07	-3.07	3.5	3.2	3.1	3.2	3.25	5.2	5.0	4.9	5.0	5.02	6.7	6.6	9.3	
10	-3.1	-3.0	-3.0	-3.02	-3.02	3.2	3.2	3.1	3.15	5.0	5.0	4.9	4.9	4.95	6.6	6.4	6.42	9.3	
0	-3.0	-3.0	-3.1	-3.02	-3.02	3.1	3.1	3.2	3.15	4.9	4.9	5.0	5.0	4.95	6.4	6.3	6.4	9.3	
-10	-3.1	-3.0	-3.1	-3.02	-3.02	3.1	3.1	3.2	3.15	4.9	4.9	5.0	5.0	4.95	6.4	6.4	6.4	9.3	
-20	-3.1	-3.2	-3.1	-3.12	-3.12	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	5.0	5.0	5.2	5.1	5.07	6.6	6.6	6.7	9.3
-30	-3.1	-3.2	-3.3	-3.2	-3.2	3.2	3.2	3.4	3.3	3.27	5.2	5.3	5.5	5.4	5.35	6.7	6.8	7.0	9.3
-40	-3.3	-3.4	-3.4	-3.35	-3.35	3.4	3.5	3.7	3.5	3.52	5.5	5.6	5.8	5.6	5.62	7.0	7.2	7.7	9.3
-50	-3.4	-3.4	-3.3	-3.37	-3.37	3.6	3.7	3.8	3.7	3.7	5.8	6.0	6.0	6.0	5.95	7.7	7.9	7.9	9.3
-60	-3.2	-3.3	-	-	-	3.8	3.7	-	-	6.1	-	-	6.1	-	-	7.9	8.0	-	-

Mississípi e Ohio). Nas mais diferentes partes do mundo, também encontramos vestígios de uma grande era glacial, como no Cáucaso, Ásia Menor, Síria, Himalaia, Índia, Thian Shan, Altai, Atlas, no Monte Kênia e Kilimandjaro (ambos muito próximos ao equador), na África do Sul, Austrália, Nova Zelândia, Kerguelen, Ilhas Falkland, Patagônia e outras partes da América do Sul. Os geólogos em geral estão inclinados a pensar que essas glaciações foram simultâneas em toda a Terra;³⁵ e essa visão mais natural provavelmente teria sido aceita de modo geral, se a teoria de Croll, que exige uma era agradável no hemisfério sul ao mesmo tempo em que uma era glacial no norte e vice-versa, não tivesse influenciado a opinião. Por meio de medições do deslocamento da linha de neve, chegamos ao resultado - e isso é muito concordante em diferentes lugares - de que a temperatura naquela época deve ter sido de 4° – 5°C. menor do que a atual. A última glaciação deve ter ocorrido em tempos bastante recentes, geologicamente falando, de modo que a raça humana certamente surgiu naquele período. Alguns geólogos americanos acreditam que, desde o fim da era glacial, transcorreram apenas de 7.000 a 10.000 anos, mas isso provavelmente está muito subestimado.

Pode-se perguntar agora: Quanto deve variar o ácido carbônico de acordo com nossos números para que a temperatura atinja os mesmos valores das eras terciária e glacial, respectivamente? Um cálculo simples mostra que a temperatura nas regiões árticas aumentaria cerca de 8° a 9°C, se o ácido carbônico aumentasse para 2.5 ou 3 vezes o seu valor atual. Para que a temperatura da era glacial ficasse entre os paralelos 40 e 50, o ácido carbônico no ar deveria cair para 0.62 – 0.55 de seu valor atual (redução de temperatura de 4° – 5°C). As exigências dos geólogos, de que nas épocas amenas o clima deveria ser mais uniforme do que agora, estão muito bem de acordo com nossa teoria. As variações geográficas anuais e diárias de temperatura seriam parcialmente suavizadas se a quantidade de ácido carbônico fosse aumentada. O inverso seria o caso (pelo menos até uma latitude de 50° do equador), se o ácido carbônico diminuisse em quantidade. Mas, em ambos os casos, inclino-me a pensar que a

ação secundária (consulte a pág. 14) devido à regressão ou ao progresso da cobertura de neve desempenharia o papel mais importante. A teoria também exige que, a grosso modo, toda a Terra tenha sofrido aproximadamente as mesmas variações de temperatura, de modo que, de acordo com ela, épocas agradáveis ou glaciais devem ter ocorrido simultaneamente em toda a Terra. Devido à maior nebulosidade do hemisfério sul, as variações devem ter sido um pouco menores (cerca de 15%) do que no hemisfério norte. As correntes oceânicas também devem ter apagado as diferenças de temperatura em diferentes latitudes, como no momento atual, em uma extensão maior do que no hemisfério norte. Esse efeito também resulta da maior nebulosidade nas zonas árticas do que na vizinhança do equador.

Há agora uma pergunta importante que deve ser respondida, a saber: “É provável que variações tão grandes na quantidade de ácido carbônico, como exige nossa teoria, tenham ocorrido em tempos geológicos relativamente curtos? A resposta a essa pergunta é dada pelo Prof. Högbom. Como seu livro de memórias sobre essa questão podem não ser acessíveis à maioria dos leitores destas páginas, resumi e traduzi suas declarações, que são da maior importância para o nosso assunto³⁶:

"Embora não seja possível obter expressões quantitativas exatas para as reações na natureza por meio das quais o ácido carbônico é desenvolvido ou consumido, existem alguns fatores dos quais se pode obter uma estimativa aproximadamente verdadeira e a partir dos quais certas conclusões que lançam luz sobre a questão podem ser tiradas. Em primeiro lugar, parece ser importante comparar a quantidade de ácido carbônico atualmente presente no ar com as quantidades que estão sendo transformadas. Se a primeira for insignificante em comparação com a segunda, então a probabilidade de variações é totalmente diferente do que no caso oposto."

"Supondo que a quantidade média de ácido carbônico no ar atinja 0.03 vol.

³⁵Neumayr, Erdgeschichte, p. 648; Nathorst, l.c. p. 992.

³⁶Högbom, Svensk kemisk Tidskrift, Bd. vi. p. 169 (1894). Phil. Mag. S. 5. Vol. 41. No. 251. April 1896.

porcento, esse número representa 0.045 porcento em peso, ou 0.342 milímetros de pressão parcial, ou 0.466 gramas de ácido carbônico para cada cm² da superfície da Terra. Reduzida a carbono, essa quantidade daria uma camada de aproximadamente 1 milímetro de espessura sobre a superfície da Terra. A quantidade de carbono fixada no mundo orgânico vivo certamente não pode ser estimada com o mesmo grau de exatidão; mas é evidente que os números que podem expressar essa quantidade devem ser da mesma ordem de grandeza, de modo que o carbono no ar não pode ser considerado nem muito grande nem muito pequeno em comparação com a quantidade de carbono que ocorre nos organismos. Com relação à grande rapidez com que a transformação na natureza orgânica prossegue, a quantidade disponível de ácido carbônico não é tão excessiva que as mudanças causadas por razões climatológicas ou outras na velocidade e no valor dessa transformação não sejam capazes de causar deslocamentos do equilíbrio.

"O seguinte cálculo é também muito instrutivo para a apreciação da relação entre a quantidade de Ácido Carbônico no ar e as quantidades que são transformadas. A atual produção mundial de Carvão atingiu em números redondos 500 milhões de toneladas por ano, ou 1 tonelada por km² da superfície da Terra. Transformada em ácido carbônico, esta quantidade corresponderia a algo em torno da milésima parte do ácido carbônico na atmosfera. Isto representa uma camada de pedra calcária de 0.003 milímetros de espessura para todo o globo, ou 1.5 km³ em medidas cúbicas. Esta quantidade de ácido carbônico, que é fornecida à atmosfera predominantemente pelas indústrias modernas, pode ser vista como compensando integralmente a quantidade de ácido carbônico que é consumido na formação de pedras calcárias (ou outra mineral carbonato) pela ação do clima ou

decomposição de silicato. Pela determinação da quantidade de substâncias dissolvidas, especialmente carbonatos, em certo número de rios em diferentes países e climas, e da quantidade de água fluindo nestes rios e suas superfícies de escoamento comparada com a superfície de terra do globo, é estimado que as quantidades de carbonatos dissolvidos que são fornecidos ao oceano no período de um ano alcançam no máximo o volume de 3 km³. Como também é provado que os rios cujas regiões de escoamento que consistem de silicatos transportam quantidades pouco importantes de carbonato se comparada com aquelas que fluem através de regiões de pedras calcárias, é admissível concluir, o que é também reforçado por outros argumentos, que apenas uma parte insignificante destes 3 km³ de carbonatos é formado diretamente pela decomposição de silicatos. Em outras palavras, apenas uma parte irrelevante desta quantidade de carbonato de cálcio pode ser derivado de um processo climático num ano. Apesar do número fornecido baseado em hipóteses inexatas ou incertas e erradas no alcance de 50 porcento ou mais, a comparação estabelecida é de um interesse enorme, dado que prova que o processo mais importante de todos pelos quais ácido carbônico tem sido removido da atmosfera em todos os tempos, a saber pela química climática de minerais silícicos, é da mesma ordem de magnitude de um processo de efeito contrário, que é causado pelo desenvolvimento industrial do nosso tempo, e que deve ser considerado como sendo de natureza temporária.

"Em comparação com a quantidade de ácido carbônico que é fixada em pedras calcárias (e outros carbonatos), o ácido carbônico do ar desaparece. Com relação à espessura da formação sedimentar e a maior parte deles que é formada por pedras calcárias e outros carbonatos, não parece improvável que a quantidade total de carbonatos possa cobrir

toda a superfície da Terra a uma altura de centenas de metros. Se assumirmos 100 metros, -um número que pode ser inexato em alto grau, mas provavelmente é subestimado,- encontramos que em torno de 25 000 vezes mais ácido carbônico é fixado em cal nas formações sedimentares do que existente livre no ar. Cada molécula de ácido carbônico nessa massa de pedra calcária tem, no entanto, existido e passado pela atmosfera no curso do tempo. Embora tenhamos ignorado todos os outros fatores que podem ter influenciado a quantidade de ácido carbônico no ar, este número permite mas com probabilidade muito baixa a hipótese que esta quantidade deva em períodos geológicos anteriores ter mudado dentro dos limites que não difere muito das quantidades atuais. Enquanto o processo climático tenha consumido quantidades de ácido carbônico muitos milhares de vezes maior que a quantidade agora disponível no ar, e como este processo geográfico, climático e outras causas diferentes tem com toda verosimilhança prosseguido com intensidade diferentes em épocas diferentes, a probabilidade de variações importantes na quantidade de ácido carbônico parece ter sido muito alta, apesar se levarmos em conta o processo compensatório que, como veremos a seguir, são suscitados logo que, por um motivo ou outro, a produção ou consumo de ácido carbônico começa a deslocar o equilíbrio em qualquer grau considerável. Ouve-se a opinião que a quantidade de ácido carbônico no ar deve ter sido muito maior anteriormente que agora, e que a diminuição deve advir da circunstância que o ácido carbônico tenha sido retirado do ar e estocado na crosta terrestre na forma de carvão e carbonatos. Em muitos casos esta diminuição hipotética é atribuída apenas a formação do carvão, enquanto que a muito mais importante formação de carbonatos é totalmente negligenciada. Este método todo de raciocínio na diminuição continuada

de ácido carbônico no ar perde toda base em fatos, não obstante que quantidades enormes de ácido carbônico ao longo do tempo tenha se fixado em carbonatos, se nós considerarmos mais de perto o processo pelos quais o ácido carbônico tem sido em qualquer época fornecido a atmosfera. Assim podemos concluir que ocorreu uma enorme variação, mas não que a variação tenha sempre acontecido no mesmo sentido.

"O ácido carbônico é fornecido para a atmosfera pelos seguintes processos: - (1) erupções vulcânicas e fenômenos geológicos associados; (2) combustão de meteoritos carbônicos nas regiões mais altas da atmosfera; (3) combustão e decaimento de corpos orgânicos; (4) decomposição de carbonetos; (5) liberação de ácido carbônico mecanicamente apresionados em minerais na sua ruptura ou decomposição. O ácido carbônico no ar é consumido primariamente pelos seguintes processos: (6) formação de carbonetos de silicatos pelo clima; e (7) o consumo do ácido carbônico por processos vegetativos. O oceano, também, tem papel importante como regulador da quantidade de ácido carbônico no ar por meio do poder absorutivo da água, o qual libera ácido carbônico quando sua temperatura aumenta e o absorve quando se resfria. Os processos indicados em (4) e (5) são de pouca importância, de modo que podemos omiti-los. Também o são, os processos (3) e (7), já que a circulação da água no mundo orgânico ocorre tão rápido que suas variações não podem ter nenhuma influência sensível. Disto temos que excluir os períodos em que grandes quantidades de organismos foram armazenados nas formações sedimentares e assim retirados da circulação, ou quando tais produtos destes armazenamentos foram, como agora, introduzidos novamente em circulação. A fonte de ácido carbônico apontado em (2) é inteiramente incalculável.

"Assim os processos (1), (2), e (6) pre-

dominantemente se balanceiam entre si. Como as enormes quantidades de ácido carbônico (representando a pressão de várias atmosferas) que são agora fixadas nas pedras calcárias da crosta terrestre não podem ser consideradas de ter existido no ar mas como uma fração insignificante do total em qualquer tempo desde que a vida orgânica surgiu no globo, e já que desta forma o consumo através do clima e formação de carbonetos tem que ser compensados por meio de fornecimento contínuo, precisamos considerar as erupções vulcânicas com as fontes primárias de ácido carbônico na atmosfera.

"Porém esta fonte não flui de maneira regular e uniforme. Como vulcões individuais têm seus períodos de variação com alternância relativa de descanso e atividade intensa, da mesma maneira o globo como um todo parece ter em certas épocas geológicas apresentou uma atividade vulcânica mais violentas e maior em geral, enquanto outros períodos foram marcados por uma calmaria relativa de força vulcânica. Parece assim provável que a quantidade de ácido carbônico no ar teve variações quase simultâneas, ou pelo menos que este fator tenha uma influência importante.

"Se revermos os processos mencionados acima de consumo e produção de ácido carbônico, iremos ver que eles evidentemente não estão numa relação ou dependência entre si que existe qualquer probabilidade para a manutenção de um equilíbrio do ácido carbônico na atmosfera. Um acréscimo ou decréscimo do fornecimento contínuo durante períodos geológicos deva, entretanto possa não ser importante, levar a alterações expressivas da quantidade de ácido carbônico no ar, e não há obstáculo concebível para imaginar que isto possa num certo período geológico ter sido várias vezes maior, ou por outro lado consideravelmente menor, que agora."

Quanto a questão da probabilidade da varia-

ção quantitativa do ácido carbônico na atmosfera é da forma mais definitiva respondida pelo Prof. Högbom, resta apenas um único ponto o qual eu gostaria de chamar atenção em poucas palavras, a saber: Ninguém propôs até agora uma explicação aceitável para a ocorrência dos períodos amenos e glaciais? Felizmente, durante o progresso dos cálculos precedentes, uma memória foi publicada pelo respeitado meteorologista italiano L. De Marchi que me livra de responder esta última questão.³⁷ Ele examina em detalhes as diferentes teorias até aqui propostas - astronômicas, físicas, ou geológicas, e delas eu aqui dou um breve resumo. Estas teorias afirmam que a ocorrência dos períodos amenos ou glaciais devem depender em uma ou mais mudanças das seguintes circunstâncias:

1. A temperatura do lugar da Terra no espaço.
2. A radiação do Sol a Terra (constante solar).
3. A inclinação do eixo da Terra com a eclíptica.
4. A posição dos polos na superfície da Terra.
5. A forma da rotação da Terra, especialmente sua excentricidade (Croll).
6. A forma e extensão dos continentes e oceanos.
7. A cobertura da superfície da Terra (vegetação).
8. A direção das correntes oceânicas areais.
9. A posição dos equinoses.

De Marchi chega a conclusão que todas estas hipóteses devem ser rejeitadas (p. 207). Por outro lado, ele é da opinião que a mudança na transparência da atmosfera pode possivelmente produzir o efeito desejado. De acordo com seus cálculos, *"uma diminuição desta transparência pode causar uma diminuição da temperatura da Terra como um todo, um pouco menos nas regiões equatoriais, e aumentando com a latitude em direção ao 70º paralelo, mais perto do polo novamente um pouco menos. Ademais, esta diminuição iria,*

³⁷Luigi De Marchi : Le cause dell' era glaciale, premiato dal R. Istituto Lombardo, Pavia, 1895.

em regiões não-tropicais, ser menos nos continentes que nos oceanos e iria diminuir a variação anual da temperatura. Esta diminuição da transparência do ar deve ser primariamente atribuída a uma maior quantidade de vapor de água no ar, que causaria não apenas o resfriamento direto mas também uma precipitação caudalosa de água e neve nos continentes. A origem desta grande quantidade de vapor de água não é fácil de explicar." De Marchi chegou a resultados totalmente diferentes dos meus, pois ele não considerou de maneira satisfatória a qualidade importante da absorção seletiva que é característica do vapor aquoso. E, além disso, ele esqueceu que se o vapor aquoso é fornecido a atmosfera, irá se condensar até que as condições precedentes sejam atingidas, se não houver nenhuma outra mudança. Como nós vimos, a umidade relativa média entre o 40^{ésimo} e 60^{ésimo} paralelo no hemisfério norte é 76 porcento. Se, então, a temperatura média cair do seu valor atual +5.3 de 4° – 5°C, i.e. para +1.3 ou +0.3, e o vapor aquoso permanecer no ar, a umidade relativa iria aumentar de 101 ou 105 porcento. Isto é certamente impossível, pois a umidade relativa não pode exceder 100 porcento no ar livre. Com forte razão, é impossível assumir que a umidade absoluta pode ter sido maior que agora na era glacial.

Como a hipótese de Croll ainda parece gozar de certa simpatia entre os geólogos ingleses, talvez seja interessante citar a declaração de De Marchi sobre essa teoria, que ele, de acordo com sua importância, examinou mais detalhadamente do que as outras. Ele afirma, e eu concordo inteiramente com ele nesse ponto: "Agora, acho que posso concluir que, do ponto de vista da climatologia ou meteorologia, no estado atual dessas ciências, a hipótese de Croll parece ser totalmente insustentável, tanto em seus princípios quanto em suas consequências".³⁸

Parece que a grande vantagem que a hipótese de Croll prometia aos geólogos, isto é, a de lhes dar uma cronologia natural, os predispunha a favor da sua aceitação. Mas esta circunstância, que a princípio parecia vantajosa, parece, com o avanço da investigação, militar contra a teoria, porque se torna cada vez mais impossível conciliar a cronologia exigida pela hipótese de Croll

com os fatos da observação.

Espero que, depois do que foi dito, a teoria proposta nas páginas anteriores se revele útil para explicar alguns pontos da climatologia geológica que até agora se revelaram muito difíceis de interpretar.

Adendo³⁹

Como a nebulosidade é muito diferente em diferentes latitudes, e também diferente sobre o mar e sobre os continentes, é evidente que a influência de uma variação no ácido carbônico do ar será um pouco diferente da calculada acima, onde se assume que a nebulosidade é a mesma em todo o globo. Assim, estimei a nebulosidade em diferentes latitudes com a ajuda da carta publicada por Teisserenc de Bort e calculei a tabela abaixo para o valor da variação da temperatura, se o ácido carbônico diminuir para 0.67 ou aumentar para 1.5 vezes a quantidade atual.

Na primeira coluna está impressa a latitude; na segunda e terceira a nebulosidade sobre o continente e sobre o oceano; na quarta a extensão do continente em centenas da área total. A seguir, na quinta e sexta colunas, o fator de redução com o qual os valores do quadro devem ser multiplicados para obter a verdadeira variação da temperatura sobre os continentes e sobre os oceanos e, na sétima coluna, a média destes dois factores de correção. Na oitava e nona colunas, são tabuladas as variações de temperatura para K = 0.67, e na décima e décima primeira, os valores correspondentes para K = 1.5.

O valor médio do fator de redução N do equador é para o continente (até 70°N. lat.) 1.098 e para o oceano 0.927, em média 0.996. Para o hemisfério sul (até 60°S. lat.) verifica-se que é para o continente 1.095, para o oceano 0.871, em média 0.907. A influência no hemisfério sul será, portanto, cerca de 9 porcento menor do que no norte. Em consequência do mínimo de nebulosidade entre 20° e 30° de latitude em ambos os hemisférios, o efeito máximo da variação do ácido carbônico é deslocado em direção ao equador, de modo que cai em cerca de 25° de latitude nos dois casos de K = 0.67 e K = 1.5.

³⁸De Marchi, l. c. p. 166.

³⁹Cf. p. 265

Latitude	Nebulosidade		Percentual Continente	Fator de Redução			$K = 0.67$		$K = 1.5$	
	Conti- nente	Oceano		Conti- nente	Oceano	Média	Conti- nente	Oceano	Conti- nente	Oceano
70	58.1	66.7	72.1	0.899	0.775	0.864	-2.8	-2.4	3.1	2.7
60	56.3	67.6	55.8	0.924	0.763	0.853	-3.0	-2.4	3.3	2.7
50	45.7	63.3	52.9	1.057	0.813	0.942	-3.5	-2.7	3.8	2.9
40	36.5	52.5	429	1.177	0.939	1.041	-3.9	-3.1	4.1	3.3
30	28.5	47.2	38.8	1-296	1.009	1.120	-4.1	-3.2	4.5	3.5
20	28.5	47.0	24.2	1.308	1.017	1.087	-4.1	-3.2	4.3	3.4
10	50.1	56.7	23.3	1.031	0.903	0.933	-3.1	-2.7	3.3	2.9
0	54.8	59.7	24.2	0.97	0.867	0.892	-2.9	-2.6	3.1	2.8
-10	47.8	54.0	22.5	1.056	0.932	0.96	-3.3	-2.9	3.4	3.0
-20	29.6	49.6	23.3	1.279	0.979	0.972	-4.1	-3.1	4.2	3.2
-30	38.9	51.0	12.5	1.152	0.958	0.982	-3.8	-3.2	4.0	3.4
-40	62.0	61.1	2.5	0.86	0.837	0.838	-2.9	-2.8	3.2	3.1
-50	71.0	71.5	0.9	0.749	0.719	0.719				
-60										