

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 galácticos (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 astrofísicas, 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); eletromagnética (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, múon (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.

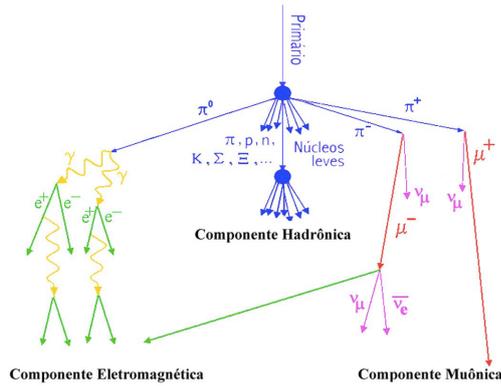


Figura 1: Representação do Chuveiro Atmosférico e seus três tipos de componentes.

seqüência 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 galácticos incidem na alta atmosfera desencadeiam uma seqüência 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 múons, 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-

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

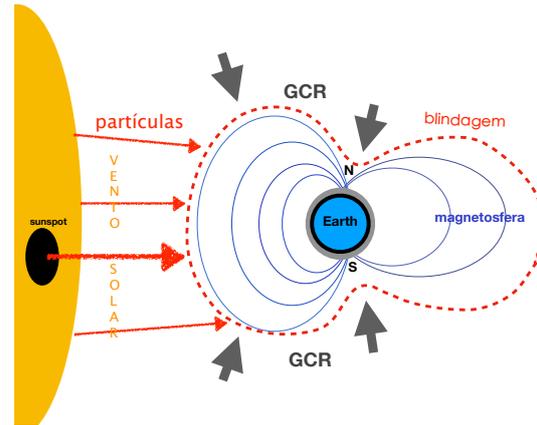


Figura 2: Representação do sistema Sol-Terra no que se refere a magnetosfera, vento solar e raios cósmicos galácticos (GCR).

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 potencial que age como 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

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 câmara 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 da 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.

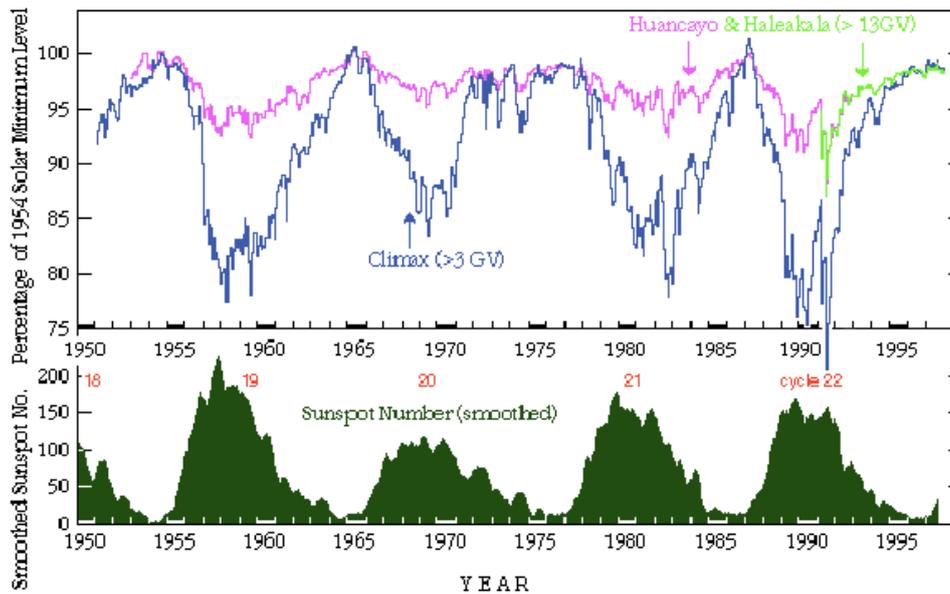


Figura 3: Séries temporais da incidência de raios cósmicos medidas com contadores de nêutrons na Universidade de Chicago, estação Climax, no Colorado (3400 m de altitude e *cutoff* de 3 GeV/c), Huancayo, Peru (3400 m e 13 GeV/c de *cutoff*) e Haleakala, Havai (3030 m de altitude e 13 GeV/c de *cutoff*), 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 amins, bem como compostos orgânicos voláteis altamente oxidados [12]

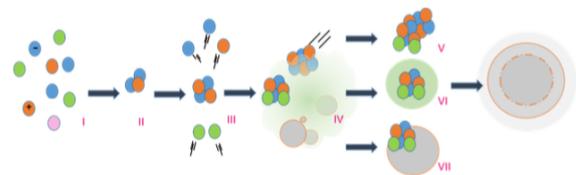


Figura 4: Representação da microfísica da formação de novas partículas. Retirada de [6].

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.

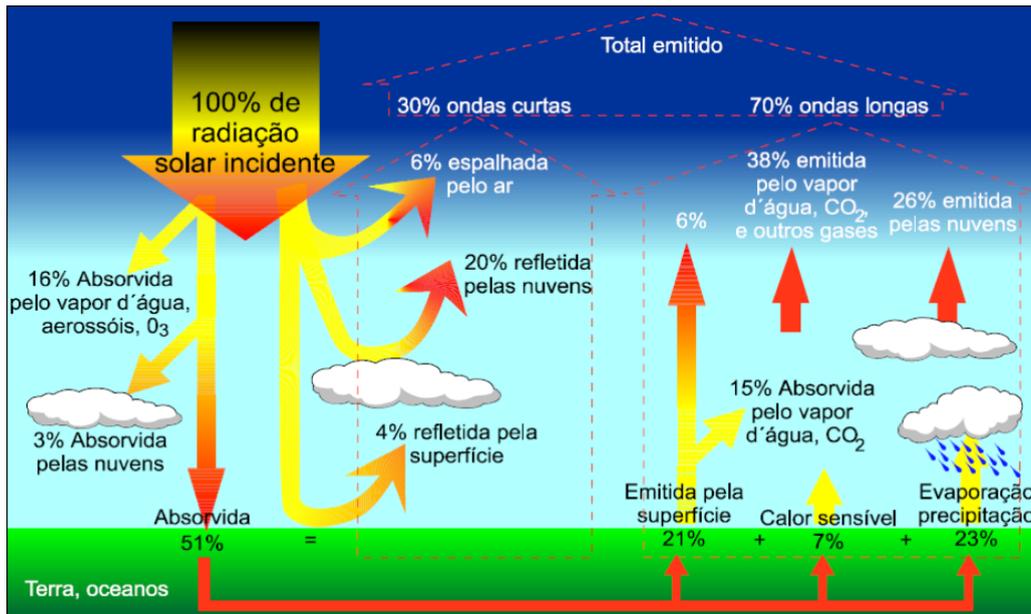


Figura 5: Balanço de energia do planeta em função da irradiação que chega na forma de ondas curtas diretamente do Sol. As contribuições que são refletidas e as que são absorvidas pela Terra e reenviadas na forma de ondas longas, principalmente na faixa do infra-vermelho, são mostradas. Destaque especial 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 aerossóis 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

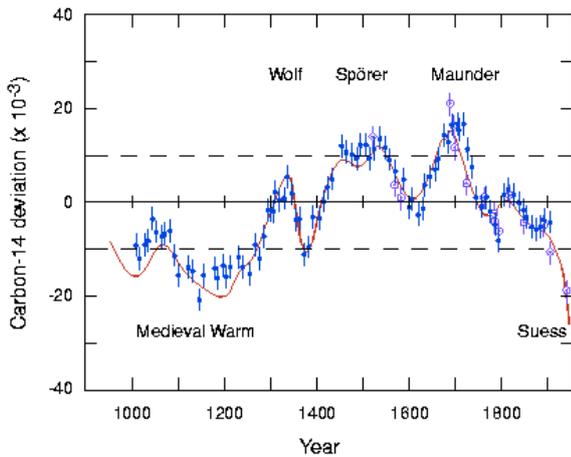
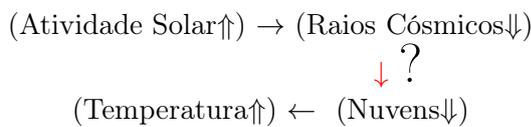


Figura 6: Série temporal de longo-prazo dos desvios da concentração relativa de ¹⁴C de análise de material orgânico de árvores do último milênio. Retirado de [4].

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.



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

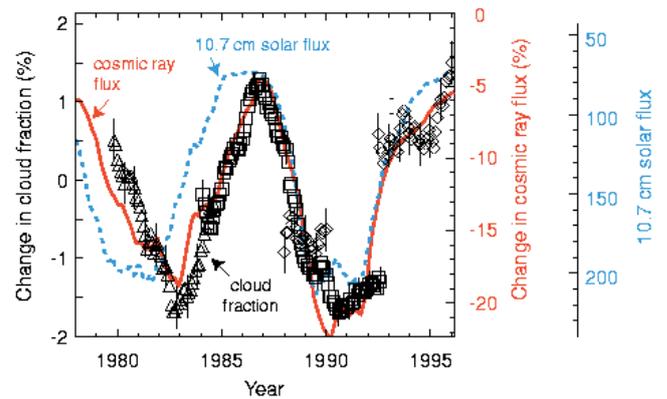


Figura 7: Taxa de variação percentual da cobertura de nuvens global na região dos oceanos observada por satélites (escala à esquerda) e variação relativa do fluxo de raios cósmicos (curva sólida normalizada em Maio de 1965) obtidos por medidas de nêutrons na estação Climax. Também é mostrado o fluxo do comprimento de onda de microondas 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 uma representação fiel do fluxo de partículas primárias, ou seja, na origem dos chuviscos 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 múons 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 chuviros 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-

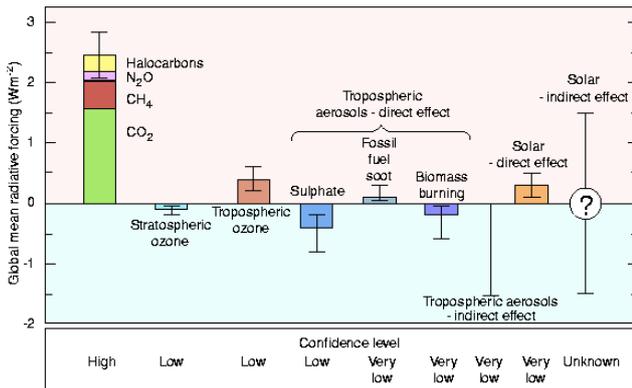


Figura 9: Contribuições das forçantes radiativas e suas incertezas na modelagem envolvidas no *Global Circulation Model*, de 2013.

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 CO_2 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 ([massaf-](mailto:massaf-ferri@cbpf.br)

ferri@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 Freiballonfahrten*, *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.faar.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.