

# Trabalho de Conclusão de Curso

## Raios cósmicos, produção de íons e propriedades elétricas da atmosfera da Terra

Lucas Minga Orfei<sup>1</sup> and Marcelo Augusto Leigui de Oliveira<sup>a,1</sup>

<sup>1</sup>*Centro de Ciências Naturais e Humanas,  
Universidade Federal do ABC, Santo André-SP, Brasil*

A influência dos raios cósmicos no clima da Terra é indagado desde a sua descoberta. Estudos recentes apresentam duas principais hipóteses: a formação de núcleos de condensação por indução de íons produzidos por raios cósmicos e a variação de parâmetros do circuito elétrico global que influencia na microfísica de nuvens. No entanto, nenhuma medida de campo e experimental foi determinante para comprovar tais hipóteses - sendo necessários mais estudos para investigar essa relação.

### 1. INTRODUÇÃO

O clima da Terra é um sistema muito complexo e dinâmico, a atmosfera é uma grande atuante desse sistema. Por ser tão complexo, inúmeras variáveis estão presentes a todo momento, o que torna a geração de modelos e predição de fenômenos muito difícil. Todo o sistema responde a radiação do Sol e alterações em variáveis pode resultar em mudanças no clima, localmente e globalmente. Dessa forma, é importante entender quais são os principais agentes que estão de fato gerando essas mudanças.

Com a descoberta dos raios cósmicos no último século, muitas questões surgiram sobre o impacto do seu fluxo na atmosfera. Muitos dados coletados apresentam uma correlação entre esse fluxo e a cobertura de nuvens. Além disso, a ionização dos raios cósmicos na atmosfera pode mudar propriedades elétricas das nuvens. Nesse trabalho, é discorrido as principais hipóteses que relacionam os raios cósmicos com mudanças no clima e resultados ao longo das últimas décadas.

### 2. RAIOS CÓSMICOS

Os raios cósmicos são partículas elementares e núcleos atômicos carregados com altas energias, com origem galáctica ou extragaláctica, que são aceleradas por fontes energéticas e assim, viajam

---

<sup>a</sup> Orientador do TCC

pelo espaço com velocidades próximas à da luz. Além disso, são divididos em dois grupos, primários e secundários. Sendo os primários os que são acelerados por fontes energéticas e os secundários são o resultado da interação de um primário com átomos e moléculas na atmosfera terrestre. Os raios cósmicos primários são compostos de 99% de núcleos atômicos, sendo 90% prótons, 9% partículas alfa e o restante são núcleos mais pesados seguidos de partículas elementares como os elétrons [1].

O Sistema Solar é bombardeado por raios cósmicos de altas energias constantemente e com métodos de detecção é possível construir o espectro de energia dos raios cósmicos que atingem a Terra, conforme a figura 1.

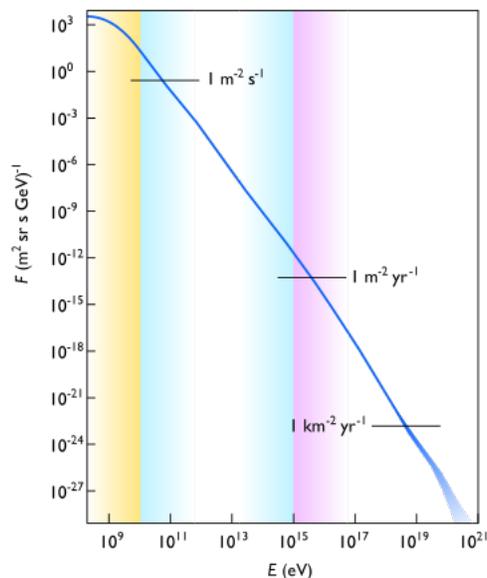


FIG. 1: Fluxo de raios cósmicos em função da energia [2].

Pode-se observar que o fluxo principal encontra-se na região de energia de poucos GeV,  $10^9 \leq E \leq 10^{15}$  eV, embora o espectro de energia se estenda por 11 ordens de grandeza, caindo por um fator de aproximadamente 500 a cada década. Observa-se ainda que as partículas mais energéticas ( $E \geq 10^{20}$  eV) possuem um fluxo de uma partícula por século por  $\text{km}^2$ . Atribui-se origem extragaláctica a estas partículas [1].

Por se tratarem de partículas carregadas, os raios cósmicos primários podem ter suas trajetórias desviadas por conta de campos magnéticos espalhadas pela galáxia produzidas por objetos astronômicos a depender da energia da partícula e da intensidade do campo magnético. Quanto maior for o momento da partícula maior será a resistência de ser defletida por um campo magnético e conseqüentemente mudar sua trajetória. Tanto a Terra como o Sol possuem campos magnéticos que podem desviar partículas carregadas, servindo também como um escudo contra a radiação.

Dessa forma, o fluxo de raios cósmicos galácticos (RCG) é modulado, principalmente, pela intensidade do campo magnético solar, tipicamente, em algumas dezenas de por cento, variando com a latitude e a altitude da observação. O ciclo solar, que dura por cerca de 11 anos, é acompanhado pela quantidade de manchas solares. Em períodos de alta atividade há uma maior quantidade de manchas, em que seu campo magnético é mais intenso, mais raios cósmicos galácticos são defletidos e deixam de chegar à Terra — e vice-versa, para os períodos de baixa atividade [3].

### 3. CHUVEIROS ATMOSFÉRICOS EXTENSOS

A interação de raios cósmicos primários com átomos e moléculas na alta atmosfera terrestre, cerca de 35 km de altitude, produz uma reação em cascata, que pode se estender até o solo, chamada de chuva atmosférica extensa. Há dois tipos de chuvas atmosféricas, o eletromagnético e o hadrônico. O chuva hadrônico é iniciado pelos próprios raios cósmicos primários, onde este é constituído de partículas hadrônicas como os píons, os káons, os nêutrons e os prótons. O decaimento dos hádrons pode produzir um chuva eletromagnético que é constituído por fótons, elétrons e pósitrons ou ainda, um raio gama primário muito energético consegue produzir esse tipo de chuva. Por fim, há uma componente penetrante constituída de partículas que conseguem penetrar o solo terrestre, os múons e os neutrinos. Todas as partículas produzidas durante o processo viajam em velocidades próximas a da luz na atmosfera. Um esquema resumido desse processo está presente na imagem da figura 2.

Ao longo da trajetória do chuva atmosférico é deixado alguns rastros produzidos por fenômenos que podem auxiliar na detecção e no estudo dos raios cósmicos, o efeito Cherenkov, a fluorescência no ar e as emissões de rádio.

As partículas carregadas produzidas pelos chuvas atmosféricas perdem energia por ionização ao interagirem com átomos e moléculas do ar atmosférico. E assim, criam pares de elétrons e íons. Por conta disso, elas são as principais responsáveis pela ionização da troposfera em condições de tempo bom [5].

### 4. ESTRUTURA DA ATMOSFERA

Para uma melhor compreensão da influência de parâmetros da atmosfera exercem nas ionizações, foi feito um estudo teórico acerca da estrutura da atmosfera. Além disso, foi desenvolvido um programa de leitura em linguagem Python para ler dados reais da pressão, densidade e temperatura

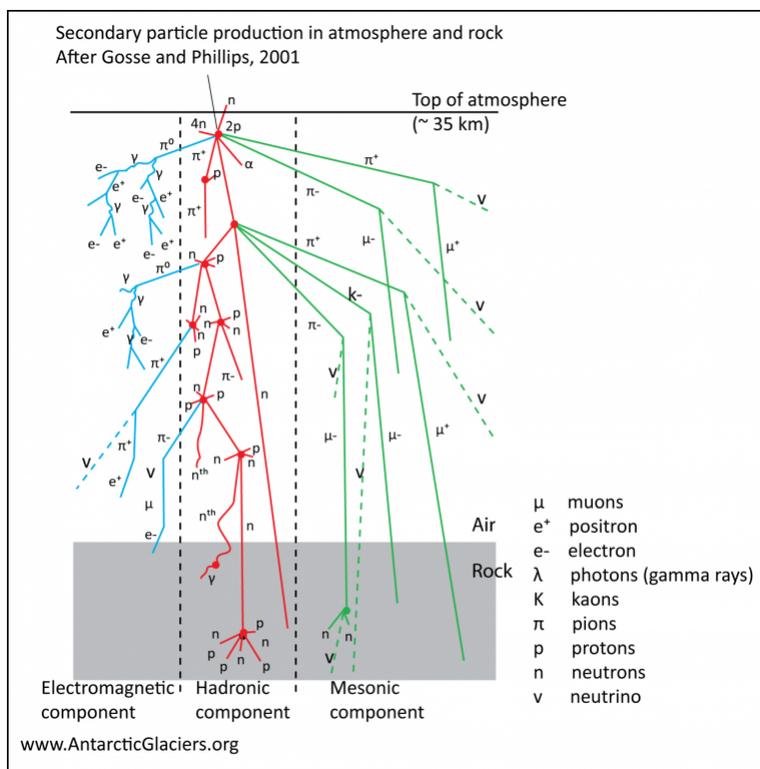


FIG. 2: Chuveiro hadrônico (vermelho), chuveiro eletromagnético (azul), chuveiro muônico (verde) [4].

em função da altitude da atmosfera. Os resultados estão presentes nas figuras 3, 4 e 5.

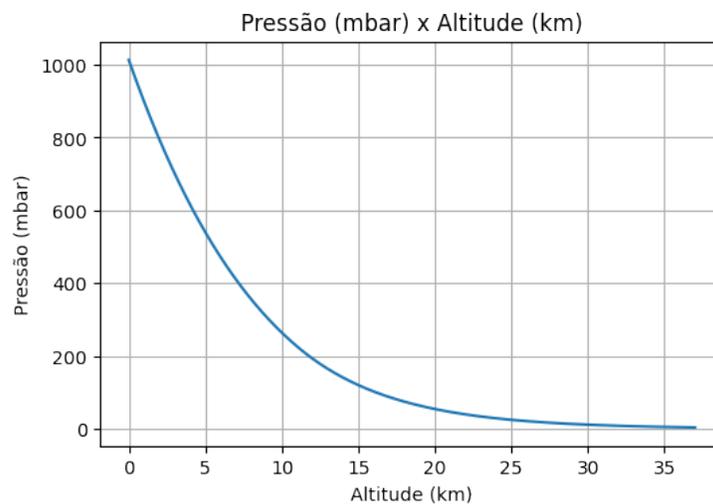


FIG. 3: Pressão em função da altitude.

A pressão e a densidade exibem um comportamento de acordo com uma função exponencial decrescente em função da altitude. A temperatura comporta-se linearmente, mas de quatro formas

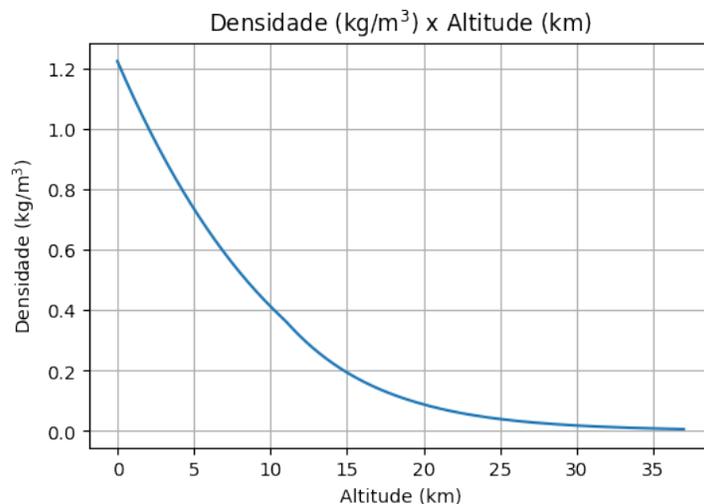


FIG. 4: Densidade em função da altitude

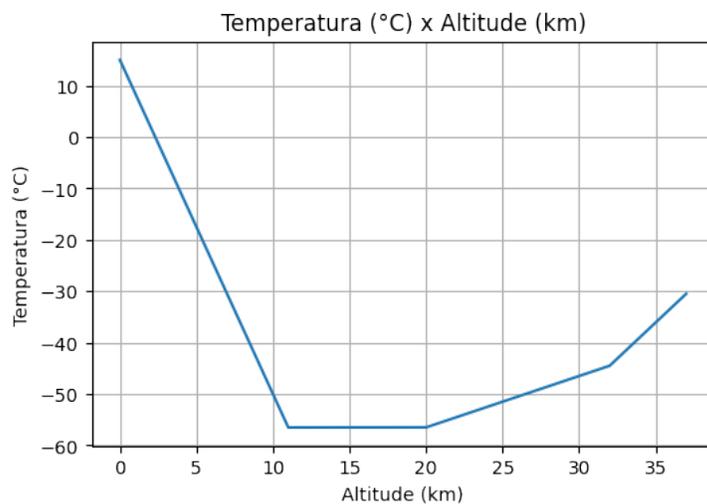


FIG. 5: Temperatura em função da altitude.

diferentes em quatro intervalos de altitude diferentes, em faixas que caracterizam sua estrutura: Troposfera, Estratosfera, Mesosfera e Termosfera (na figura 5 é apresentado o gráfico até meados da Estratosfera). A temperatura inicial, é de 15 °C, e no primeiro intervalo, a temperatura varia a -6,5 °C/km, de 0 km até 11 km de altitude. No segundo intervalo, a temperatura mantém-se constante em aproximadamente -56,5 °C até os 20 km. No terceiro intervalo, a temperatura inicial é de aproximadamente -56,5 °C e cresce a uma taxa de 1 °C/km, até os 32 km de altitude. No quarto intervalo, a temperatura inicial é de -44,5 °C e até os 37 km de altitude, a temperatura cresce a 2,8 °C/km, terminando a 30,5 °C abaixo de zero.

Os dados foram obtidos de ISO [6] e vão do nível do mar até 37 km, variando a cada 25 m, não é necessário o uso de dados de todo o espectro da atmosfera visto que 99,9% da massa se concentra nos 50 primeiros quilômetros [7].

## 5. INFLUÊNCIA NO CLIMA DA TERRA

Uma das discussões sobre o clima terrestre é se partículas com origem galáctica são capazes de influenciar significadamente o sistema climático, como a alteração da taxa de produção de gotículas de nuvens ou a modulação de correntes pela ionização na atmosfera. Dessa forma, o clima seria modulado para além da variabilidade da atividade solar, tendo outros fatores que podem ser importantes para uma análise mais profunda, como o impacto dos raios cósmicos na atmosfera.

Uma das possíveis ligações do clima da Terra com os raios cósmicos é a mudança na taxa de formação de nuvens. A influência na cobertura de nuvens impacta diretamente a quantidade de radiação solar recebida e enviada pela Terra e pela atmosfera, e portanto, o balanço térmico e energético pode ser alterado de forma significativa. A primeira hipótese dessa ligação foi apresentada formalmente por Dickinson, em 1975[8]. Sua investigação sugeria que o fluxo de RCG afeta a formação de aerossóis que participam do processo de formação de núcleos de condensação. A conclusão desse estudo foi de que a formação de aerossóis é favorecida com a ionização. Portanto, a taxa de ionização na atmosfera é capaz de afetar a quantidade de formação de gotículas que irão criar nuvens.

No momento, existem duas hipóteses envolvendo a ionização do ar pelos raios cósmicos e a formação e propriedades das nuvens [9]. A primeira é pela formação de núcleos de condensação pela indução de íons. Núcleos de condensação são um subconjunto de aerossóis atmosféricos. O vapor d'água do ar necessita de uma superfície para condensar, os núcleos de condensação fazem esse papel e, portanto, são responsáveis pela formação de gotas nas nuvens.

Os íons têm um papel fundamental no processo nucleação de gotículas, principalmente pela produção de aerossóis. Um esquema desse processo está representado na figura 6. Os íons agem, inicialmente, como pequenos núcleos que crescem pela condensação de moléculas de vapores. Acima de um tamanho crítico, é formado um núcleo de condensação que continua a crescer por condensação até formar um núcleo de condensação de nuvem. No entanto, abaixo do tamanho crítico, o núcleo é evaporado. Esse tamanho crítico é reduzido pela presença de carga e estabiliza o núcleo pela atração de Coulomb, por isso o íon se faz tão importante. Além disso, durante a formação de

núcleo de condensação de nuvem ainda é encontrado processos de coagulação [10].

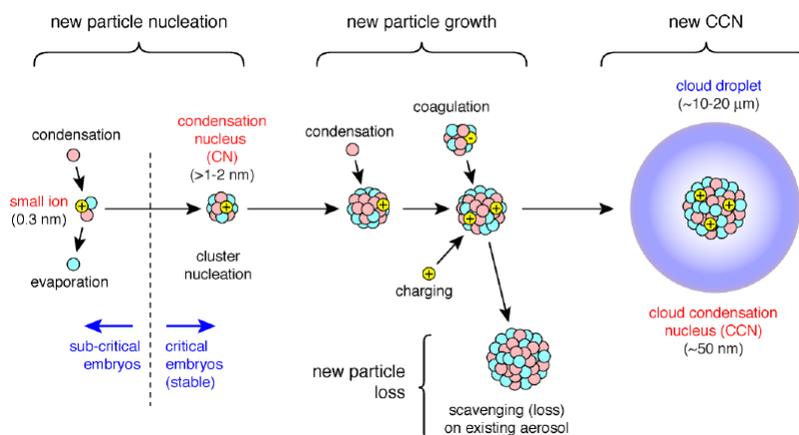


FIG. 6: Processo de formação de núcleos de condensação de nuvens [5].

A segunda hipótese é que o fluxo de RCG causa variações da condutividade atmosférica e do potencial ionosférico do circuito elétrico global que, por sua vez, influencia as propriedades eletrostáticas das nuvens através do congelamento das gotículas, entre outros processos microfísicos.

## 6. CIRCUITO ELÉTRICO GLOBAL

A ionização produzida pelos chuviscos atmosféricos também interfere no circuito elétrico global (CGE). O circuito elétrico global é um modelo que descreve a geração de corrente elétrica na baixa atmosfera e na ionosfera. A ionosfera e a Terra são condutores muito melhores que a baixa atmosfera, assim, podemos considerar que são regiões com potencial elétrico constante. Dessa forma, temos um sistema que se comporta como placas (ionosfera e o solo) de um capacitor esférico e a atmosfera como um dielétrico. Portanto, neste modelo, a nossa atmosfera atua como um grande capacitor esférico, ou seja, tem a capacidade de armazenar cargas elétricas e é carregado até uma diferença de potencial de  $250 \cdot 10^3$  V [11].

Para manter toda essa voltagem é necessário gerar corrente constantemente, quem gera essa corrente são as tempestades ao redor do planeta. Sabe-se que a cada segundo ocorrem 1000 relâmpagos e que cada um gera 1 ampère, onde estes levam cargas negativas para a Terra e cargas positivas para a ionosfera, criando uma corrente elétrica global.

A corrente elétrica encontra uma resistência de carregamento ao subir pela atmosfera na ordem de  $10^5$ - $10^6$   $\Omega$  e ao descer encontra uma resistência de descarregamento na ordem de  $10^2$   $\Omega$ , além disso há uma resistência criada pelas próprias nuvens. A corrente que flui da ionosfera para a

superfície é realizada pelo movimento vertical de íons pequenos, a densidade média dessa corrente é de  $2.7 \text{ pAm}^{-2}$  [11]. Íons pequenos são formados pela atração de gases moleculares e elétrons ou átomos ionizados que formam uma nova molécula ionizada, consistem de 2 a 30 moléculas [12] e são os íons mais abundantes na atmosfera terrestre. Ainda há os íons grandes que são íons pequenos absorvidos por poeira, névoa ou outra partícula minúscula. Além disso, possuem 1000 vezes mais massa que os íons pequenos.

Na figura 7 está presente um esquema simplificado do CGE.

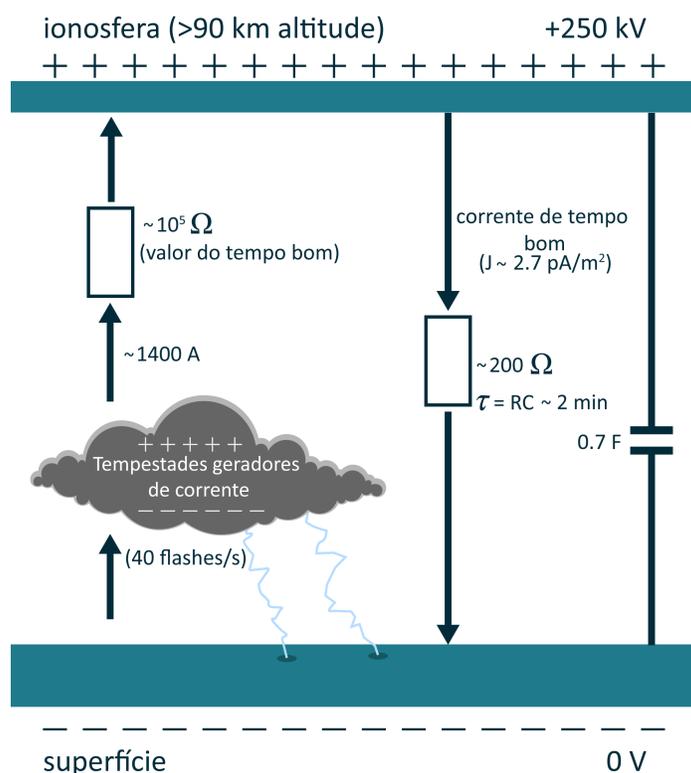


FIG. 7: Circuito elétrico global, as tempestades são geradoras de corrente. Sem um gerador de corrente no circuito, o capacitor esférico iria descarregar em menos de 2 minutos. A corrente de tempo bom varia entre  $1 \text{ pAm}^{-2}$  e  $4 \text{ pAm}^{-2}$  e depende da resistência colunar e do fluxo de raios cósmicos, adaptado de [5].

Por conta das correntes, campos elétricos são gerados acima de tempestades podendo gerar eventos luminosos transientes, como sprites e elfos que podem diminuir a voltagem do circuito [13]. O campo elétrico atmosférico de tempo bom varia entre 100 e 300 V/m a nível do mar decresce com a altitude, decaindo para zero perto ou acima de 50 Km, essa faixa de altitude é definida como a eletrosfera. Além disso, o campo elétrico é proporcional com o número de tempestades em

um dado instante. A condutividade do ar aumenta com a altitude, sendo seus valores máximos onde há uma menor densidade, ou seja, na alta atmosfera, conforme o gráfico 4. Isso ocorre pois o caminho médio livre dos íons aumenta com uma menor densidade, logo eles viajam mais tempo antes de colidir.

Como os raios cósmicos controlam a concentração de pares de íons pequenos na atmosfera, eles também controlam a condutividade e o potencial ionosférico. A mudança dessas grandezas podem significar alterações no clima. A corrente vertical produz uma separação de cargas nos extremos das nuvens ao subir na atmosfera, como na figura 8, transferindo cargas para gotículas de água e aerossóis e, assim, podendo influenciar em processos microfísicos dentro das nuvens.

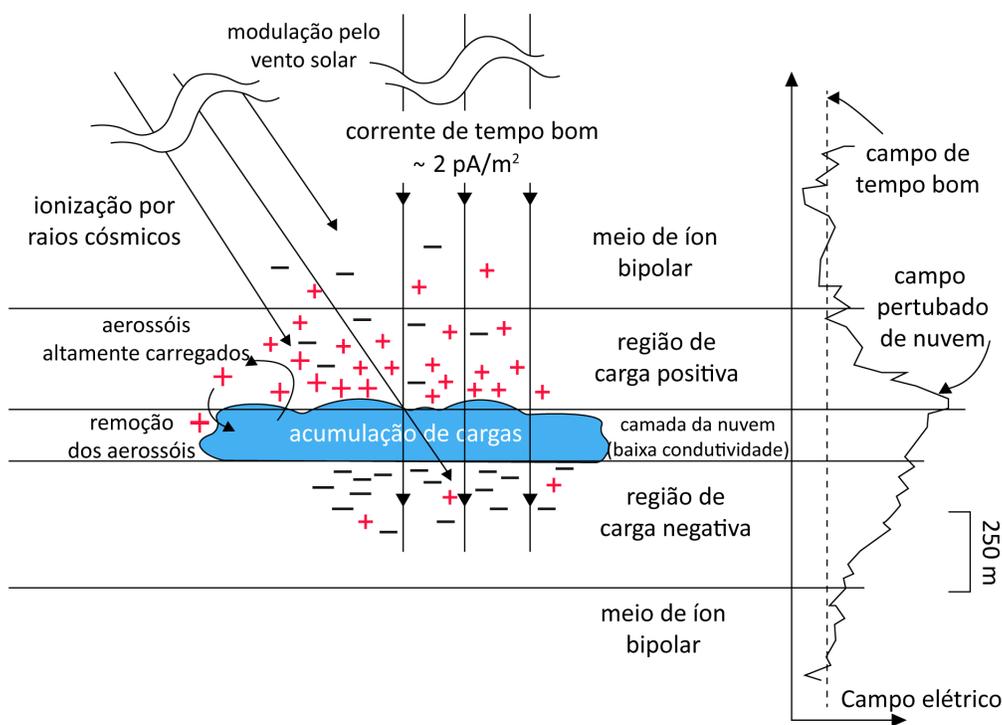


FIG. 8: Esquemática demonstrando a interação dos raios cósmicos com a atmosfera, adaptado de [5].

A eletrificação dessas partículas aumenta a taxa de colisão entre partículas carregadas e gotículas de água, processo conhecido como *electro-scavenging* [14]. Isso significa que os aerossóis são mais “coletados” pelas gotículas, aumentando a taxa de nucleação. Além disso, há um caso especial para gotículas de água superresfriadas. São gotículas líquidas que tendem a congelar mas por conta da quantidade de núcleos de condensação ser insuficiente, para que ocorra o congelamento, elas permanecem no estado líquido. Assim, para gotículas de água superresfriadas, o processo de

*electro-scavenging* ocasionaria um congelamento mais intenso dessas partículas. Isso implica um aumento da formação de partículas de gelo nas nuvens, a formação desses cristais de gelo influencia na precipitação das nuvens. Portanto, esse fenômeno influencia em processos microfísicos das nuvens e na dinâmica atmosférica.

As cargas presentes nas nuvens são quem geram os relâmpagos e tempestades, no entanto, pouco se sabe sobre como isso ocorre exatamente. Sendo a estrutura elétrica da nuvem algo muito complexo e passível de alterações em micro e macro escala. Dessa forma, é necessário um esforço para determinar a importância de cada escala e quais são os fenômenos envolvidos.

## 7. CARGA RESIDUAL NA ATMOSFERA

É possível descobrir a carga contida na atmosfera através de resultados encontrados na literatura. Utilizando a lei de Gauss, o campo elétrico pode ser escrito por:

$$E_z = \frac{\sigma}{\epsilon_0}, \quad (1)$$

onde  $\sigma$  é a densidade de carga superficial e  $\epsilon_0$  é a permissividade do vácuo. Além disso, como a análise se refere ao campo elétrico na atmosfera e comparando o tamanho da atmosfera com o da Terra, considera-se a Terra como plana e assim o campo elétrico terá apenas uma componente vertical ( $E_z$ ) em vez de ser radial.

Então, isolando-se  $\sigma$  e multiplicando-se pela área da superfície da Terra, obtém-se a carga residual na atmosfera:

$$Q = 4\pi E_z \epsilon_0 \cdot R_T^2, \quad (2)$$

onde  $R_T$  é o raio da Terra. Como o campo elétrico na atmosfera varia entre aproximadamente 100 e 300 V/m, a carga residual varia entre  $4,52 \cdot 10^5$  e  $1,36 \cdot 10^6$  C, com valor médio de  $\approx 9 \cdot 10^5$  C.

## 8. ENERGIA CRÍTICA DO ELÉTRON

Quando um elétron atravessa a atmosfera, ele pode perder energia por ionização ou por emissão de radiação. A energia crítica é a energia na qual as perdas por ionização são iguais às perdas por emissão de radiação. Pelo gráfico 9, vemos que para  $E > E_c$  as perdas por radiação são dominantes e para  $E < E_c$  as perdas por ionização são dominantes. Como estamos analisando a ionização da

atmosfera, estaremos interessados somente em partículas com uma energia menor que a energia crítica do meio. Para o ar, a energia crítica vale 84,4 MeV [15].

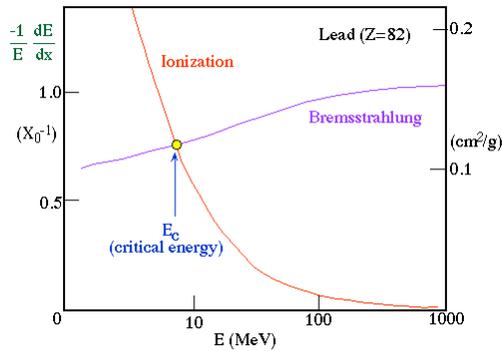


FIG. 9: Energia crítica do elétron no chumbo [16].

## 9. FLUXO DE ELÉTRONS

Utilizando dados do fluxo de elétrons e pósitrons produzidos pelos chuueiros atmosféricos, é possível estimar a corrente elétrica gerada na atmosfera por esse fluxo. O gráfico 10 apresenta o fluxo de elétrons em função da profundidade e energia, dessa forma a análise se voltou para energias abaixo da energia crítica do ar, 84,4 MeV, e para profundidades próximas a altitude em que se encontram as nuvens, próximo de 8 km. Convertendo-se este último valor para g/cm<sup>2</sup> chegou-se em 365 g/cm<sup>2</sup>.

Foi feita uma média ponderada com uma lei de potência para determinar o fluxo com esses parâmetros:

$$F = 2,5 \cdot 10^{-3} \left(\frac{E_1}{10}\right)^{-2,5} + 9 \cdot 10^{-4} \left(\frac{E_2}{10}\right)^{-2,5} + 1,8 \cdot 10^{-4} \left(\frac{E_3}{10}\right)^{-2,5} \quad (3)$$

e, multiplicando-se o fluxo pela área da circunferência da Terra e pelo ângulo sólido superior, temos o número de elétrons e pósitrons por segundo:

$$N = 2\pi AF \approx 8,20 \cdot 10^{16} \text{ s}^{-1}. \quad (4)$$

Por fim, multiplicando-se pela carga elementar, obtém-se a corrente média por toda a Terra:

$$I = eN \approx 13,12 \text{ mA}. \quad (5)$$

Logo, essa é a corrente que está presente na altitude onde as nuvens estão localizadas geradas pelos chuueiros atmosféricos.

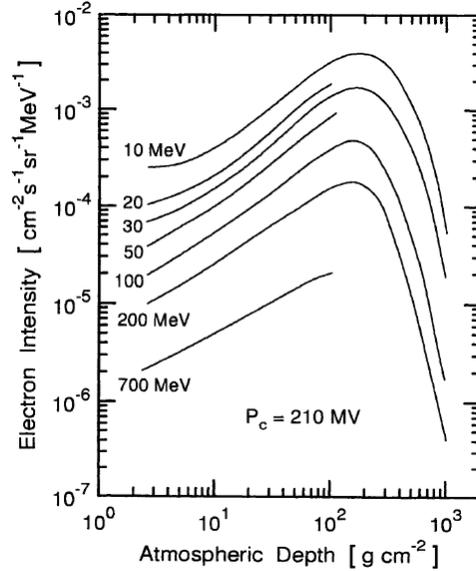


FIG. 10: Fluxo de elétrons em função da profundidade e energia da partícula [15].

## 10. TAXA DE PRODUÇÃO DE ÍONS

A taxa de produção de íons varia para cada faixa de altitude, ao nível do solo ( $\approx 100$  m) é igual a  $2 \text{ cm}^{-3}\text{s}^{-1}$ , para 5 km de altitude é igual a  $10 \text{ cm}^{-3}\text{s}^{-1}$  e para 10 km de altitude varia entre 20 e  $50 \text{ cm}^{-3}\text{s}^{-1}$ , uma média de  $35 \text{ cm}^{-3}\text{s}^{-1}$  [5]. Como há uma dependência com o  $\text{cm}^{-3}$  podemos multiplicar pelo volume total atmosfera para cada faixa de altitude. Assim, obtém-se a quantidade de íons produzida na atmosfera, conforme a tabela I.

TABLE I: Fluxo de íons na atmosfera

Altitude	Íons/s
Nível do solo (100 m)	$6,40 \cdot 10^{23}$
5 km	$1,60 \cdot 10^{26}$
10 km	$1,12 \cdot 10^{27}$

Portanto, a produção de íons diminui perto do nível do solo e aumenta com a altitude.

## 11. POSSÍVEIS EVIDÊNCIAS DOS RAIOS CÓSMICOS E O CLIMA

Para descobrir se de fato as hipóteses são verdadeiras apresentadas na seção 5, se faz necessário fazer medidas de campo que as comprovem. Foram feitos experimentos e coletados dados para comprovar tanto a favor da relação dos raios cósmicos e o clima da Terra quanto ao contrário.

O primeiro resultado da possível relação da influência dos RCG e a formação de nuvens, por Pudovkin e Veretenenko [17], detectando uma menor cobertura de nuvens e uma maior frequência de céu limpo com o decréscimo do fluxo de RCG, sofrido pela diminuição de Forbush. Essa diminuição é ocasionada por ejeções de massa coronal do Sol, onde o vento solar varre parte dos RCG - diminuindo seu fluxo. Além disso, outros autores analisaram dados do ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project) em escalas de décadas e os resultados foram os mesmos - a cobertura de nuvens está relacionada com o fluxo de RCG [9].

No entanto, estudos seguintes demonstraram que somente nuvens baixa atmosfera estão relacionadas com o fluxo de RCG e após anos de coleta de dados os coeficientes de correlação entre essa relação pararam de ser positivas. Assim, surgiram diversas dúvidas sobre o papel dos RCG na formação de nuvens.

Um dos experimentos criados para investigar a possível influência dos RCG na taxa de nucleação foi a CLOUD (Cosmics Leaving OUtdoor Droplets) do CERN, seus resultados demonstram que a presença de íons e para uma altitude de 5 km, no meio da troposfera, aumenta a taxa de nucleação por um fator de 10. Porém, em condições da baixa atmosfera, a taxa de formação de núcleos com tamanhos 1,4 nm foi bem menor do que o esperado para a atmosfera real [18].

Um dos problemas de se analisar os efeitos dos RCG na eletricidade atmosférica é que as observações se limitam somente a pequenas escalas, com duração de algumas horas ou dias. Isso se deve pois para escalas maiores, e para predizer com mais exatidão os fenômenos, os efeitos que se desenvolvem pela variação do fluxo dos RCG devem ser levados em consideração. A nucleação induzida por íons e mudanças na eletricidade atmosférica resulta na mudança no equilíbrio radiativo-térmico na baixa atmosfera o que pode alterar a dinâmica atmosférica e produzir outros fenômenos. Dessa forma, para analisar os dados corretamente é necessário além de incluir os efeitos microfísicos dos RCG, incluir também efeitos indiretos que são ocasionados por esses efeitos - o que torna a análise muito mais complexa.

Observações diretas de mudanças na atmosfera pelas mudanças da corrente do circuito elétrico global ainda não foram feitas e dificilmente serão feitas em um futuro próximo, já que a formação de gelo não é tão conhecida e é de muita importância para construir uma teoria sólida. Portanto, para comprovar as hipóteses tanto da nucleação quanto da eletricidade atmosférica são necessários mais estudos teóricos e de campo.

## 12. CONCLUSÃO

O estudo da influência dos raios cósmicos no clima evoluiu extremamente nas últimas décadas, com novas teorias que surgiram com os primeiros estudos dos raios cósmicos e a ionização da atmosfera até robustos equipamentos para simular a nucleação de núcleos de condensação e investigar sua relação com o fluxo de partículas galácticas. No entanto, apesar dos inúmeros esforços são necessários mais estudos teóricos e experimentais para avaliar o real impacto dos raios cósmicos na atmosfera terrestre.

- 
- [1] M. Spurio, *Particles and Astrophysics: A Multi-Messenger Approach*, Astronomy and Astrophysics Library (Springer International Publishing, Cham, 2015).
  - [2] S. Lafebre, Cosmic ray flux versus particle energy, , CC BY-SA 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>, via Wikimedia Commons.
  - [3] J. R. Herman, *Sun, Weather, and Climate* (2005).
  - [4] B. Davies, Air extensive shower, , <https://www.antarcticglaciers.org/wp-content/uploads/2014/11/cosmo-cascade.png>.
  - [5] J. Kirkby, *Surveys in Geophysics* **28**, 333 (2007), arXiv:0804.1938 [physics].
  - [6] S. A. International Organization for Standardization, *ISO 2533:1975*.
  - [7] J. M. Wallace and P. V. Hobbs, *Atmospheric science: an introductory survey*, 2nd ed., International geophysics series No. v. 92 (Elsevier Academic Press, Amsterdam ; Boston, 2006) oCLC: ocm62421169.
  - [8] R. E. Dickinson, *Solar variability and the lower atmosphere* (1975).
  - [9] S. Veretenenko, M. Ogurtsov, M. Lindholm, and R. Jalkanen, in *Cosmic Rays*, edited by Z. Szadkowski (InTech, 2018).
  - [10] J. Curtius, E. R. Lovejoy, and K. D. Froyd, *Space Science Reviews* **125**, 159 (2007).
  - [11] M. Rycroft, S. Israelsson, and C. Price, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **62**, 1563 (2000).
  - [12] I. Kusaka, Z. Wang, and J. H. Seinfeld, *The Journal of Chemical Physics* **102**, 913 (1995).
  - [13] B. A. Tinsley, *Reports on Progress in Physics* **71**, 066801 (2008).
  - [14] B. A. Tinsley, *Advances in Space Research* **50**, 791 (2012).
  - [15] P. K. F. Grieder, *Extensive Air Showers and High Energy Phenomena* (Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2010).
  - [16] D. Bailey, Critical energy in lead, , <https://faraday.physics.utoronto.ca/PVB/DBailey/SubAtomic/Lectures/LectF04/Electron.gif>.
  - [17] M. I. Pudovkin and S. V. Veretenenko, *Cloudiness decreases associated with Forbush-decreases of galactic cosmic rays* (1994).

- [18] E. M. Dunne and Gordon, [Science](#) **354**, 1119 (2016).