

## IMPACTO DE AEROSSÓIS ESTRATOSFÉRICOS NAS PROJEÇÕES DA CLIMATOLOGIA DO ANTICICLONE SUBTROPICAL DO ATLÂNTICO SUL

Thales Chile Baldoni (IC), Michelle Simões Reboita (PQ)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Itajubá.

**Palavras-chave:** Geoengenharia. Mudanças climáticas. Pressão ao nível médio do mar.

### Introdução

A maioria das alterações observadas no clima da Terra, desde o início da revolução industrial, está associada às atividades humanas (IPCC 2021), principalmente devido às emissões de gases de efeito estufa (GEEs), que aumentam a temperatura do planeta (KUNDZEWICZ, 2008). Dessa forma, a geoengenharia surgiu com a finalidade de encontrar soluções para enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas, buscando corrigir o desequilíbrio radiativo do sistema climático através de técnicas, como a redução da radiação solar incidente através da injeção de aerossóis na estratosfera (LENTON, 2011).

Existe uma escassez de estudos nessa área para compreender o impacto dos aerossóis estratosféricos nos sistemas atmosféricos como, por exemplo, no Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS). Esse sistema desempenha um papel importante no clima do setor leste do Brasil, pois interfere diretamente na temperatura da superfície do mar, precipitação e nas regiões de convergência atmosférica no sudeste da América do Sul (CHERCHI et al., 2018).

Por isso, o presente estudo tem como objetivo analisar o impacto do aumento da concentração de aerossóis na estratosfera em projeções da climatologia do ASAS.

### Metodologia

A área de estudo compreende o Oceano Atlântico Sul (OAS). Foram obtidos dados de pressão ao nível médio do mar (PNMM) de três projetos de mudanças climáticas, que inclui uma simulação controle e um experimento. O experimento considera a injeção de aerossóis na atmosfera. O nome dos projetos é: *Stratospheric Aerosol Geoengineering Large Ensemble* (GLENS; TILMES et al., 2018), utilizando o modelo *Community Earth System Model* (CESM1). No experimento controle, o GLENS utiliza um cenário de alta emissão antropogênica, o RCP8.5 (TILMES et al., 2018); *The Assessing Responses and Impacts of Solar climate intervention on the Earth system with*

*stratospheric aerosol injection* (ARISE-SAI; RICHTER et al., 2022), o modelo utilizado é o *Community Earth System Model version 2* (CESM2). No experimento controle, o ARISE-SAI utiliza as simulações considerando o SSP2-4.5 como cenário intermediário de emissão de GEEs. Por fim, o último conjunto de dados utilizados é o *Geoengineering Model Intercomparison Project* (GeoMIP; KRAVITZ et al., 2011) acoplado com a sexta fase do *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP6). Para a projeção controle do GeoMIP, foram realizadas simulações do cenário intermediário SSP2-4.5. As localizações das injeções de aerossóis dos modelos são mostradas na Figura 1. Para mais detalhes dos dados e das simulações realizadas podem ser encontrados nas referências correspondentes (KRAVITZ et al., 2011; TILMES et al., 2018; RICHTER et al., 2022;).

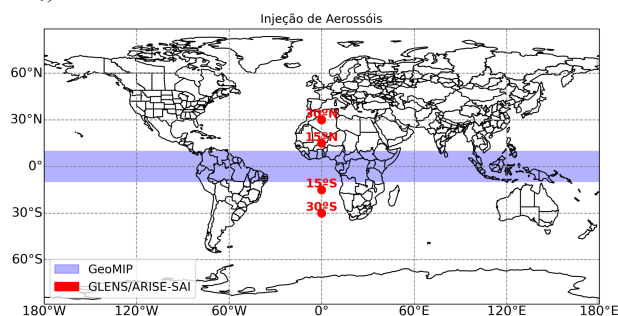


Figura 1: Localização no globo das áreas em que ocorreram injeção de aerossol atmosférico do GeoMIP, GLENS e ARISE-SAI.

Foi realizada a localização do ponto central de maior pressão (hPa) do ASAS, seguindo o método proposto por Reboita et al. (2019). Inicialmente, realizou-se uma varredura na região compreendida entre as coordenadas geográficas 40° S - 20° S e 42° O - 12° L. Nessa varredura, identificaram-se os pontos de grade que apresentavam os maiores valores de PNMM. O método do vizinho mais próximo foi aplicado, o que implicou a seleção de um ponto de grade e a comparação desse ponto com 48 pontos vizinhos. O ponto de grade foi considerado o centro do ASAS se sua PNMM fosse maior ou igual à dos primeiros 8 pontos vizinhos e maior do que os outros 40 pontos ao redor.

Em situações em que vários pontos de grade apresentavam o mesmo valor máximo da PNMM, o ponto de grade com a latitude mais baixa foi escolhido como centro do ASAS. Essa metodologia resultou na identificação da localização do ASAS em diferentes pentadas ao longo do tempo, fornecendo informações sobre latitude, longitude e ponto central de maior pressão. Posteriormente, foram calculadas as médias climatológicas sazonais e mensais com base nesses dados.

Com o objetivo de avaliar as mudanças no ASAS em cenários de inserção de aerossóis, procedeu-se à análise da distribuição espacial da PNMM por estação do ano durante os períodos de 2020-2039, 2040-2059, 2060-2079 e 2080-2099. No caso do modelo ARISE-SAI, a análise se concentrou exclusivamente no período de 2040-2059, devido à disponibilidade limitada de dados. Por isso, foi calculada a diferença entre os resultados dos experimentos e das simulações de controle somente para o período de 2040-2059. Para obter uma visão mais detalhada, foram gerados mapas sazonais que destacaram a localização da isóbara de 1020 hPa, permitindo a determinação da área, em quilômetros quadrados (km<sup>2</sup>), dentro dessa isóbara. Além disso, foram realizadas análises da posição climatológica mensal e do valor máximo da PNMM no ASAS em cada projeção. Para verificar a significância estatística das diferenças entre os experimentos e as simulações de controle, foram aplicados testes T emparelhados.

## Resultados e discussão

Na Figura 2 é mostrada a variação do maior valor de PNMM do ASAS ao longo do ano. Durante os meses mais frios, o ASAS recua em direção ao continente sul-americano. Os modelos utilizados exibem diferentes padrões de recuo, com o GeoMIP mostrando uma distribuição anual quase constante de PNMM devido à sua estratégia única de injeção de SO<sub>2</sub>. Em contraste, os modelos que injetam SO<sub>2</sub> em pontos específicos destacam variações significativas na posição do ASAS. O GLENS apresenta a maior diferença entre os cenários de controle e experimento, seguido pelo ARISE-SAI. O GeoMIP mostra variações mínimas entre os cenários.

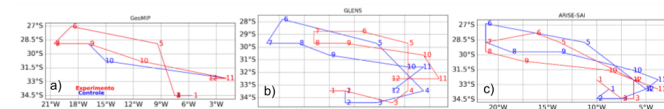


Figura 2: Climatologia mensal do ponto de grade de maior valor de PNMM e sua posição geográfica do (a)

GeoMIP (controle e experimento); (b) GLENS (controle e experimento) e (c) ARISE-SAI (controle e experimento).

Na Figura 3 é mostrada a climatologia mensal do ponto com a maior PNMM do ASAS. Os resultados dos modelos seguem o padrão descrito na literatura por Reboita et al. (2017). A pressão central do ASAS é menor durante os meses de dezembro a abril, atingindo cerca de 1021 hPa, e maior nos meses mais frios do ano, com o pico máximo em agosto, atingindo valores em torno de 1027 hPa. Uma exceção ocorre no caso do ARISE-SAI com injeção de aerossol, que simula a maior intensidade em setembro, atingindo 1028 hPa. Comparando os conjuntos de modelos, o GeoMIP apresenta os valores mais baixos quando o ASAS está mais intenso (1026,5 hPa no controle e 1026 hPa no experimento). Por outro lado, o ARISE-SAI mostra os valores mais elevados de pressão (1027,5 hPa no controle e 1028 hPa no experimento). O GLENS exibe a maior diferença entre os cenários, com 1027,5 hPa no controle e 1026 hPa no experimento.

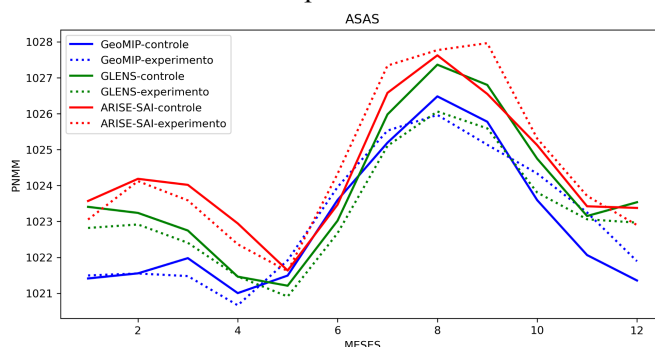


Figura 3: Climatologia mensal do ponto de maior pressão (hPa) do ASAS, no período de 2040 a 2059.

Com base nos dados obtidos da Figura 3, foi realizado o teste t emparelhado. Nos casos do GeoMIP e do ARISE-SAI, os resultados indicam que as diferenças observadas não são estatisticamente significativas. Isso é evidenciado pelos valores de p maiores que 0,05, especificamente 0,409 no GeoMIP e 0,483 no ARISE-SAI. Esses valores sugerem que as diferenças entre os cenários de controle e experimento não são muito acentuadas. No entanto, no caso do GLENS, o valor de p é baixo, especificamente 0,001, indicando que a diferença entre o controle e o experimento é estatisticamente significativa. Isso sugere que a injeção de aerossóis teve um impacto significativo nas condições atmosféricas, levando a diferenças estatisticamente relevantes entre os dois cenários.

Na Figura 4 é apresentada a distribuição espacial sazonal do ASAS no GeoMIP. Com a injeção de aerossol, houve um aumento significativo da PNMM nos subtropicais do oceano Pacífico e Atlântico durante o

verão, indicando um fortalecimento desses sistemas. No outono, o ASAS experimentou uma queda de pressão de 0,5 hPa, enquanto a Alta Subtropical do Pacífico Sul (ASPS) registrou PNMM mais elevada. Durante o inverno, a PNMM na região central do ASAS diminuiu, enquanto na ASPS, os padrões foram semelhantes aos do outono. Na primavera austral, houve um aumento significativo na PNMM sobre ambos os sistemas de alta, especialmente em latitudes mais altas no Oceano Atlântico Sul, com valores superiores a 2 hPa. Essas mudanças podem afetar os padrões atmosféricos e as correntes de jatos de altos níveis (CHEN et al., 2008).

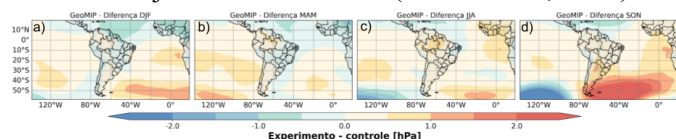


Figura 4: Diferença da PNMM (hPa) entre o experimento menos controle, considerando o GeoMIP, no período 2040 a 2059.

Na Figura 5, é apresentada a distribuição espacial sazonal do ASAS no GLENS. Exceto na primavera, as regiões dos anticiclones (ASPS e ASAS) e o continente sul-americano mostram diminuições nos valores da PNMM no experimento em comparação com o controle. Na primavera, ocorre uma diminuição ainda mais acentuada da PNMM sobre o ASPS (-3 hPa) e no ASAS (-1 hPa). Essas mudanças na pressão podem indicar padrões instáveis na atmosfera (CHEN et al., 2008). Além disso, na primavera, há um aumento na PNMM em latitudes mais elevadas sobre a área continental.

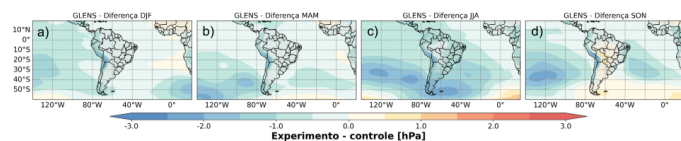


Figura 5: Diferença da PNMM (hPa) entre o experimento menos controle, considerando o GLENS, no período 2040 a 2059.

Na Figura 6 é apresentada a distribuição espacial sazonal do ASAS no ARISE-SAI. As diferenças na PNMM são semelhantes aos padrões observados no GeoMIP. No entanto, existem diferenças significativas entre o oceano Atlântico e Pacífico. No inverno e primavera, o ASAS apresenta valores de PNMM mais altos no cenário de injeção de aerossol (cerca de 1 hPa no inverno e 2 hPa na primavera) e mais baixos nas outras duas estações (cerca de 0,5 hPa), com uma diminuição mais acentuada no outono. Além disso, observa-se um aumento relativo na pressão em latitudes mais altas no Oceano Atlântico durante o inverno e primavera, atingindo aproximadamente 2 hPa.

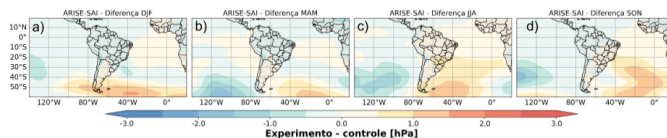


Figura 6: Diferença da PNMM (hPa) entre o experimento menos controle, considerando o ARISE-SAI, no período 2040 a 2059.

Na Figura 7 são apresentados as áreas isóbaras, de intensidade de 1020 hPa, e sua variabilidade sazonal dos conjuntos com e sem inserção de aerossol. A diferença da área foi calculada considerando o cenário do experimento menos o controle. O ciclo sazonal das áreas do ASAS nos três modelos é semelhante, atingindo os maiores valores no inverno (cerca de  $1,6 \times 10^7 \text{ km}^2$  no GeoMIP e  $\sim 2 \times 10^7 \text{ km}^2$  no GLENS e ARISE-SAI). No GeoMIP, o experimento com injeção de aerossol simulou uma área maior do ASAS do que o grupo controle, com a maior diferença na primavera ( $2,13 \times 10^6 \text{ km}^2$ ) e a menor no verão ( $3,92 \times 10^5 \text{ km}^2$ ). No GLENS, as áreas do ASAS no grupo controle foram maiores, com a maior diferença no inverno ( $-3,64 \times 10^6 \text{ km}^2$ ) e a menor no verão ( $-7,55 \times 10^5 \text{ km}^2$ ). No ARISE-SAI, o grupo controle apresentou áreas do ASAS maiores no verão e outono em comparação com o inverno e a primavera, com a maior diferença na primavera ( $2,23 \times 10^6 \text{ km}^2$ ) e a menor no verão ( $-2,52 \times 10^5 \text{ km}^2$ ).

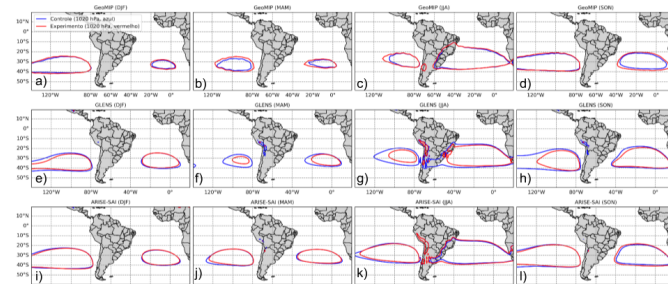


Figura 7: Climatologia sazonal da isóbara de 1020 hPa nos períodos de 2040 a 2059., na cor azul o grupo controle e vermelho o grupo do experimento.

## Conclusões

Com base nos três conjuntos de dados analisados (GeoMIP, GLENS e ARISE-SAI) para o período futuro (2040-2059), observou-se diferenças significativas entre os cenários de controle e experimento. O GeoMIP mostrou uma ligeira expansão do ASAS com a injeção de aerossóis, principalmente na primavera, enquanto o GLENS e o ARISE-SAI apresentaram uma diminuição na área do ASAS com a injeção de aerossóis nas estações do ano. Além disso, o

ponto de maior pressão do ASAS teve variações sazonais notáveis, especialmente no GLENS, com diferenças estatisticamente significativas. Esses resultados destacam a sensibilidade do ASAS à presença de aerossóis estratosféricos e a importância de considerar esses efeitos na modelagem climática para projeções futuras. Isso enfatiza a necessidade contínua de aprimorar os modelos climáticos para tomar decisões relacionadas às mudanças climáticas e implementar estratégias de mitigação e adaptação mais eficazes.

**the American Meteorological Society**, v. 99, n. 11, p. 2361-2371, 2018.

### Agradecimentos

Os autores agradecem aos centros meteorológicos que disponibilizaram os dados/modelos utilizados neste estudo e ao CNPq, CAPES e PROEX-UNIFEI pelo auxílio financeiro.

### Referências

- CHEN, Z. H. et al. Relationship between atmospheric pollution processes and synoptic pressure patterns in northern China. **Atmospheric Environment**, v. 42, n. 24, p. 6078-6087, 2008.
- CHERCHI, Annalisa et al. The response of subtropical highs to climate change. **Current Climate Change Reports**, v. 4, p. 371-382, 2018.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 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, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu e B. Zhou. Cambridge University Press. Em Preparação.
- KRAVITZ, Ben et al. The geoengineering model intercomparison project (GeoMIP). **Atmospheric Science Letters**, v. 12, n. 2, p. 162-167, 2011.
- KUNDZEWICZ, Zbigniew W. Climate change impacts on the hydrological cycle. **Ecohydrology & Hydrobiology**, v. 8, n. 2-4, p. 195-203, 2008.
- LENTON, Tim M.; VAUGHAN, Nem E. The radiative forcing potential of different climate geoengineering options. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 9, n. 15, p. 5539-5561, 2009.
- REBOITA, Michelle Simões et al. The South Atlantic subtropical anticyclone: present and future climate. **Frontiers in Earth Science**, v. 7, p. 8, 2019.
- RICHTER, Jadwiga H. et al. Assessing Responses and Impacts of Solar climate intervention on the Earth system with stratospheric aerosol injection (ARISE-SAI): Protocol and initial results from the first simulations. **Geoscientific Model Development**, v. 15, n. 22, p. 8221-8243, 2022.
- TILMES, Simone et al. CESM1 (WACCM) stratospheric aerosol geoengineering large ensemble project. **Bulletin of**