

RESPOSTAS DO ANTICICLONE SUBTROPICAL DO ATLÂNTICO SUL À INJEÇÃO DE AEROSSÓIS ESTRATOSFÉRICOS

Thales Chile Baldoni¹ (IC), Michelle Simões Reboita (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá.

Palavras-chave: Anticiclone Subtropical. Aquecimento Global. Geoengenharia. Injeção de Aerossóis. Oceano Atlântico Sul.

Introdução

Devido à grande quantidade de gases de efeito estufa (GEEs) emitidos pelas atividades humanas, mesmo que as emissões fossem zeradas hoje, o aquecimento global iria continuar por várias décadas. Por isso, alternativas como as técnicas de geoengenharia, ou intervenções climáticas, estão sendo consideradas para mitigar esse problema (US National Research Council, 2015).

Uma das técnicas propostas é a redução da radiação solar (SRM) por meio da injeção de aerossóis estratosféricos (SAI), que pode resfriar o planeta temporariamente. No entanto, essa abordagem envolve riscos, como a alteração do ciclo hidrológico e o possível esgotamento da camada de ozônio (Vaughan & Lenton, 2011; Vioni et al., 2022).

Há uma escassez de estudos que busquem compreender o impacto do SAI em sistemas atmosféricos, como os anticiclones subtropicais semi-permanentes, especialmente no hemisfério sul. O Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) é um desses sistemas e desempenha um papel importante no clima do Brasil, influenciando as precipitações, as estações chuvosas, a temperatura da superfície do mar e as zonas de convergência (Sun et al., 2017; Reboita et al., 2019).

Portanto, o objetivo deste estudo é avaliar o impacto do SAI na climatologia do ASAS sob cenários de aquecimento global, utilizando projeções de três projetos internacionais.

Metodologia

A área de estudo abrange o Oceano Atlântico Sul (OAS) e foram analisados projeções climáticas com e sem SAI de três projetos internacionais: i) O *Geoengineering Large Ensemble* (GLENS), que utiliza o *Community Earth System Model version 1* (CESM1) acoplado ao *Whole Atmosphere Community Climate Model version 5* (WACCM5) como componente atmosférico (Tilmes et al., 2018). ii) O projeto

Assessing Responses and Impacts of Solar Climate Intervention on the Earth System with Stratospheric Aerosol Injection (ARISE-SAI), que utiliza o CESM2 acoplado ao WACCM6 (Richter et al., 2022) como componente atmosférico. iii) O GeoMIP, um subprojeto do CMIP6 que usa diferentes modelos climáticos globais, mas para este estudo o *Max Planck Institute Earth System Model* (MPI-ESM1-2-LR) foi escolhido. A injeção de aerossóis estratosféricos dos modelos é apresentada na Figura 1.

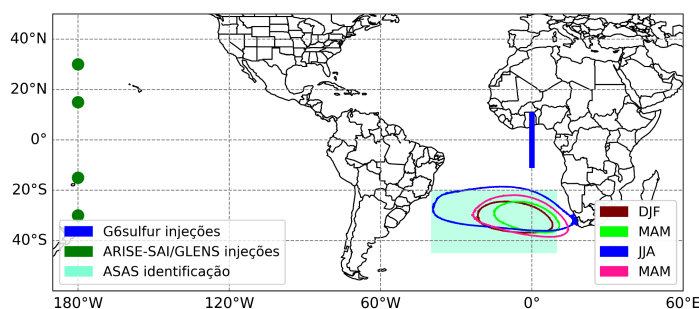


Figura 1: Localização da injeção de aerossóis estratosféricos (SAI) usada nos modelos para as projeções do GeoMIP/G6sulfur (retângulo vertical azul), e GLENS e ARISE-SAI (pontos verdes). O retângulo sombreado em azul claro indica a área usada para identificar a posição de maior intensidade do ASAS. As características climatológicas da isóbara de 1020 hPa do ASAS são apresentadas pelos contornos: DJF (marrom), MAM (verde), JJA (azul) e SON (rosa), com base na reanálise do ERA5 para o período de 1980-2022.

A pressão ao nível médio do mar (PNMM) a cada 6 horas (0000, 0600, 1200 e 1800 UTC) dos três projetos é utilizada, e cada conjunto de dados consiste em três membros com SAI e três membros sem SAI. Esses dados foram interpolados para uma grade de 1,5° X 1,5° utilizando método bilinear. Em seguida, um algoritmo de identificação foi aplicado para localizar o centro do ASAS, considerando os pontos de maior PNMM na região entre 40°S - 20°S e 42°O - 12°L (Reboita et al., 2019).

Antes de analisar as diferenças entre os cenários

com e sem SAI, foi realizada uma validação da capacidade dos modelos em reproduzir a climatologia mensal do ASAS. Os modelos capturam bem as principais características, apesar de algumas diferenças, como uma área maior no ARISE e GLENS. Focando nas diferenças entre os cenários, foram calculadas a área, intensidade (PNMM) e localização do ASAS para cada membro e período (2015-2024, 2040-2059 e 2080-2099), comparando os cenários com e sem SAI. O teste t independente foi utilizado para verificar a significância das diferenças observadas.

Resultados e discussão

Estudos anteriores mostraram que o aquecimento global pode intensificar a PNMM, resultando em uma expansão e intensificação do ASAS (Reboita et al., 2019; Fahad et al., 2020). Com base nisso, a hipótese é que o SAI pode mitigar esses efeitos. As figuras 2 e 3 mostram a diferença sazonal da PNMM entre os cenários com e sem SAI, indicando que a SAI pode reduzir a intensificação/expansão do ASAS causada pelo aquecimento global.

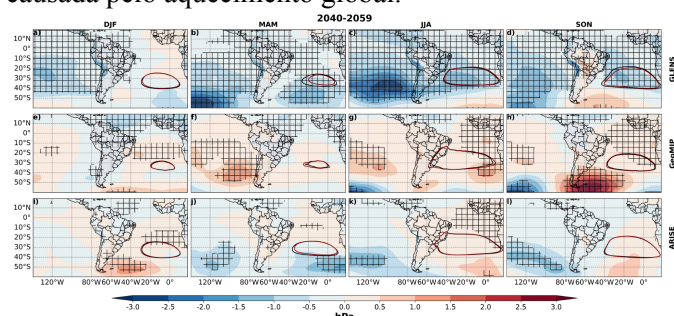


Figura 2: Diferença sazonal da PNMM (hPa) entre as projeções de SAI e sem SAI para GLENS (a, b, c, d), GeoMIP/G6sulfur (e, f, g, h) e ARISE (i, j, k, l) para o período de 2040-2059. A isóbara de 1020 hPa nos cenários sem SAI e com SAI são indicadas pelas linhas pretas e vermelhas, respectivamente. As regiões sombreadas representam diferenças estatisticamente significativas ao nível de 0,05.

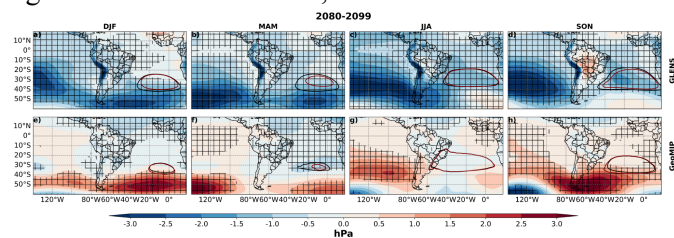


Figura 3: Similar a Figura 2, mas para o período de 2080-2099.

As diferenças da PNMM entre cenários com e

sem SAI variam entre os projetos. No GLENS, predominam diferenças negativas nos oceanos Pacífico e Atlântico Sul, sugerindo uma leve redução da área do ASAS, aproximando-o das condições climáticas históricas. No GeoMIP/G6sulfur, predominam diferenças positivas sobre o Atlântico Sul, indicando uma expansão do ASAS, enquanto no ARISE as diferenças são mínimas, refletindo sua menor forçante SAI. A maior forçante de SAI no GLENS e GeoMIP/G6sulfur ainda gera respostas distintas devido a variações entre os modelos e distribuições de aerossóis.

Na figura 4 são apresentadas as características médias do ASAS em termos de área e intensidade. O ASAS atinge sua maior área entre junho e outubro e sua menor área de novembro a maio, com um ciclo anual semelhante ao observado em estudos anteriores. No período de 2040-2059, o ARISE e o GeoMIP/G6sulfur não mostram diferenças significativas na área do ASAS entre cenários com ou sem SAI. No GLENS, porém, o ASAS é maior nos cenários sem SAI, enquanto com SAI, sua área se aproxima do período de referência. O ciclo anual da intensidade do ASAS segue um padrão consistente, com maior intensidade entre junho e setembro. No GLENS, a intensidade do ASAS se mantém semelhante ao período de referência com SAI, mas é maior nos cenários sem SAI. Esses resultados sugerem que o uso de SAI, especialmente no GLENS, pode mitigar os impactos do aquecimento global no ASAS, mantendo suas características mais próximas do clima histórico.

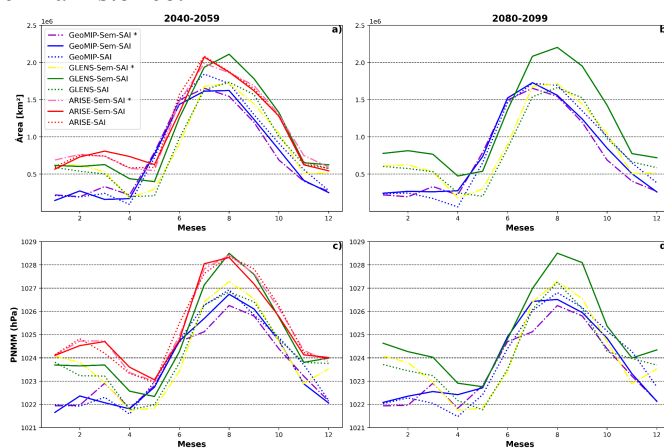


Figura 4: Climatologia mensal da (a-c) área (10^6 km^2) e (d-f) intensidade (hPa) do ASAS nos cenários com SAI (linhas pontilhadas) e sem SAI (linhas contínuas) do GeoMIP/G6sulfur (azul), GLENS (verde) e ARISE-SAI (vermelho), para os períodos de 2015-2024*, 2040-2059 e 2080-2099. *O período de referência é dos cenários sem SAI (linhas tracejadas/pontilhadas).

No clima histórico e futuro, o centro do ASAS está mais ao norte e oeste no inverno austral, e mais ao sul no verão e outono, com a posição mais a leste nas estações de transição. Essa variação sazonal é reproduzida pelos cenários com e sem SAI nos projetos ARISE, GLENS e GeoMIP/G6sulfur. Entre 2040-2059, não há diferença significativa na posição do ASAS entre os cenários. No entanto, para 2080-2099, o GLENS sem SAI projeta um deslocamento para o sul de novembro a abril. As tendências de latitude e longitude do centro do ASAS não mostraram significância estatística nem um padrão consistente entre os projetos, sugerindo que mudanças na localização do ponto de máxima pressão não necessariamente indicam deslocamento ou expansão do ASAS.

Desde 1970, dados observacionais confirmam a expansão da região tropical, incluindo o deslocamento dos anticiclones subtropicais, como o ASAS, em direção aos polos (Staten et al., 2018; Hu et al., 2018; Yang et al., 2020). Estudos mostram que essa expansão ocorre a uma taxa de cerca de 1° por década, enquanto simulações do CMIP5 sugerem um deslocamento menor, de 0,17° a 0,2° por década (Hu et al., 2018). A expansão do ASAS está relacionada ao fortalecimento da Corrente do Brasil e a mudanças nos padrões de vento (Franca et al., 2020). Para o futuro, a expansão da célula de Hadley pode aumentar para 0,27° por década, impulsionada por temperaturas mais altas na troposfera e pelo fortalecimento da circulação anticiclônica. Os modelos sugerem que, enquanto a área do ASAS nos cenários sem SAI para 2040-2059 não apresenta grandes mudanças, para 2080-2099, essas diferenças são mais evidentes. Esses resultados são consistentes com a literatura, e o GLENS ressalta o impacto do SAI na climatologia do ASAS.

Conclusões

O estudo do GLENS confirmou que o ASAS será menor e mais fraco em cenários com SAI em comparação aos sem SAI. Outros estudos, como de Reboita et al. (2024), obtiveram resultados semelhantes para ciclones extratropicais. Além disso, diferenças na distribuição de aerossóis entre o GLENS e o ARISE impactam a circulação atmosférica de forma distinta.

Este é o primeiro estudo a analisar o ASAS em cenários com SAI. Compreender o comportamento do ASAS é crucial, pois sua expansão pode alterar padrões de precipitação e vento na América do Sul e África do Sul, além de afetar a circulação oceânica e ecossistemas. Por exemplo, modelos climáticos sugerem que o ASAS pode aumentar o transporte de ar úmido para a Bacia do

Prata, aumentando a precipitação na região, enquanto áreas ao sul do continente podem enfrentar mais secas. Na África do Sul, projeta-se aumento de precipitação no nordeste no verão e diminuição no sudoeste no inverno, associado ao aumento da PNMM.

Os resultados indicam que cenários com SAI tendem a ser mais semelhantes ao período de referência, o que sugere que os impactos futuros podem ser menores. No entanto, é essencial lembrar que a SRM, como o SAI, não substitui as ações de mitigação e mais estudos sobre seus efeitos colaterais são necessários antes de sua aplicação prática.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer à UNIFEI e aos centros meteorológicos que forneceram as projeções, e especialmente ao Dr. Daniele Vioni (por processar alguns dados), à Degrees Initiative pelo apoio financeiro e ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) pela concessão da bolsa.

Referências

- Fahad, A. A., Burls, N. J., & Strasberg, Z. (2020). How will southern hemisphere subtropical anticyclones respond to global warming? Mechanisms and seasonality in CMIP5 and CMIP6 model projections. *Climate dynamics*, 55, 703-718. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05290-7>.
- Franca, R. R. (2009). Anticiclones e umidade relativa do ar: um estudo sobre o clima de Belo Horizonte. <http://hdl.handle.net/1843/MPBB-7VQH45>. Dissertation/master's thesis, Federal University of Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Hu, Y., Huang, H., & Zhou, C. (2018). Widening and weakening of the Hadley circulation under global warming. *Sci. Bull.*, 63, 640-644. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2018.04.020>.
- Reboita, M. S., Ambrizzi, T., Silva, B. A., Pinheiro, R. F., & Da Rocha, R. P. (2019). The South Atlantic subtropical anticyclone: present and future climate. *Frontiers in Earth Science*, 7, 8. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00008>.
- Reboita, M. S., Ribeiro, J. G. M., Crespo, N. M., da Rocha, R. P., Odoulami, R. C., Sawadogo, W., & Moore, J. C. (2024). Response of the Southern Hemisphere extratropical cyclone climatology to climate intervention with stratospheric aerosol injection. *Environmental Research: Climate*. <https://doi.org/10.1088/2752-5295/ad519e>.

Richter, J. H., Visioni, D., MacMartin, D. G., Bailey, D. A., Rosenbloom, N., Dobbins, B., ... & Lamarque, J. F. (2022). 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*, 15(22), 8221-8243. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-8221-2022>.

Staten, P. W., Lu, J., Grise, K. M., Davis, S. M., & Birner, T. (2018). Re-examining tropical expansion. *Nature Climate Change*, 8(9), 768-775. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0246-2>.

Sun, X., Cook, K. H. & Vizzy, E. K. (2017) The South Atlantic Subtropical High: Climatology and Interannual Variability. *J. Climate*, 30, 3279–3296. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0705.1>.

Tilmes, S., Richter, J. H., Kravitz, B., MacMartin, D. G., Mills, M. J., Simpson, I. R., ... & Ghosh, S. S. (2018). Cesm1(wacm) stratospheric aerosol geoengineering large ensemble project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(11), 2361-2371. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0267.1>.

US National Research Council. (2015). *Climate intervention: Reflecting sunlight to cool Earth* (p. 234). National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/18988>. Available at <https://nap.nationalacademies.org/catalog/18988/climate-intervention-reflecting-sunlight-to-cool-earth> (Acesso em 14 de maio de 2024).

Vaughan, N. E., & Lenton, T. M. (2011). A review of climate geoengineering proposals. *Climatic change*, 109(3-4), 745-790. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0027-7>.

Visioni, D., Kravitz, B., Robock, A., Tilmes, S., Haywood, J. M., Boucher, O., ... & Muri, H. (2022). Opinion: The scientific and community-building roles of the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP)-past, present, and future. *Atmospheric chemistry and physics Discussions*, 2022, 1-44. <https://doi.org/10.5194/acp-23-5149-2023>.

Yang, H., Lohmann, G., Krebs-Kanzow, U., Ionita, M., Shi, X., Sidorenko, D., ... & Gowan, E. J. (2020). Poleward shift of the major ocean gyres detected in a warming climate. *Geophysical Research Letters*, 47(5), e2019GL085868. <https://doi.org/10.1029/2019GL085868>.