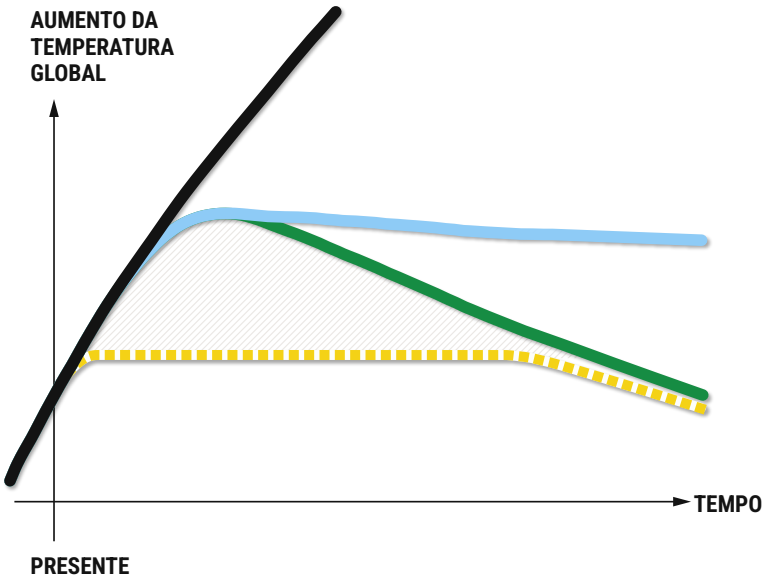
Como a modificação da radiação solar pode afetar o Brasil?

O mundo está se aproximando de um aquecimento médio de 1,5 °C e o Brasil já está enfrentando impactos crescentes da mudança do clima, incluindo, entre outros, o aumento dos eventos climáticos extremos, a degradação florestal na Amazônia e a redução da produtividade agrícola de várias culturas agrícolas.

Com o aumento dos riscos climáticos, tem havido interesse crescente em um conjunto de tecnologias para resfriar o planeta, conhecido como modificação da radiação solar (SRM, em inglês) – também chamadas de geoengenharia solar. O que são essas tecnologias e o que podem significar para o Brasil e o planeta?

A reflexão da luz solar pode "comprar tempo" para a descarbonização?

O diagrama ilustrativo explora a potencial contribuição de diferentes estratégias climáticas.



SEM REDUÇÃO DE EMISSÕES
As temperaturas continuariam a subir.

ALCANÇAR EMISSÕES LÍQUIDAS ZERO
Isso pararia um maior aquecimento global, mas não o reverteria.

REMOVER CARBONO
A remoção de dióxido de carbono poderia então reduzir lentamente as temperaturas.

REFLETIR A LUZ SOLAR?
Será que o SRM poderia compensar o aquecimento global enquanto as emissões caem e o carbono é removido?

É importante salientar que a principal estratégia para limitar um maior aquecimento global é acabar com a dependência de combustíveis fósseis e reduzir todas as outras fontes de emissões de gases de efeito estufa.

É necessário alcançar emissões líquidas zero de CO_2 para deter um maior aquecimento, mas isso não será suficiente para revertê-lo.[1] Para reverter a temperatura a níveis mais seguros, será necessário também remover bilhões de toneladas de CO_2 da atmosfera.[2] Isto terá um custo altíssimo e poderá levar mais de um século.

As políticas atuais de emissões colocam o mundo em uma trajetória de aquecimento médio global em torno de 2,5 °C a 3 °C, resultando em impactos devastadores nos ecossistemas e em nossa sociedade.[3]

Será que reduzir o fluxo da radiação solar com SRM poderia oferecer um alívio temporário enquanto cortes de emissões e aumento de remoções são implementados?

Quais são as tecnologias de SRM?

SRM refere-se a um conjunto de tecnologias potenciais para tentar resfriar o planeta ao aumentar a quantidade de luz solar que a Terra reflete de volta ao espaço. Isso poderia reduzir significativamente o aquecimento global e os impactos climáticos.

Entretanto, por não tratar da raíz do problema, que é o aumento das emissões de gases de efeito estufa, a SRM não substitui a necessidade de cortes substantivos dessas emissões para limitar o aquecimento. Além disso, acarreta novos riscos e desafios geograficamente diferenciados que precisam ser mais estudados. Entretanto, duas tecnologias têm merecido especial atenção.



Injeção de aerossóis na estratosfera (SAI)

Uma intervenção global

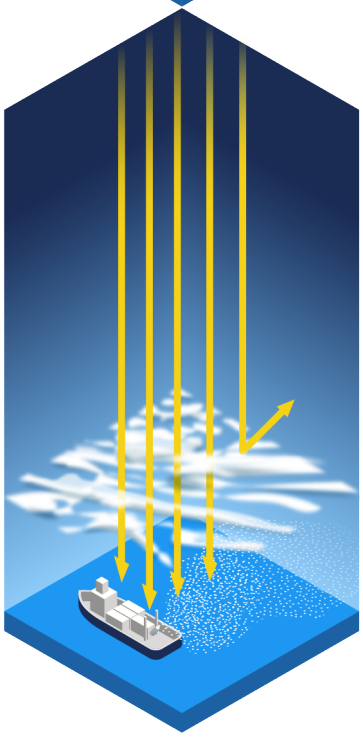
SAI (do inglês Stratospheric Aerosol Injection) é a medida de SRM que mais atenção e pesquisa atraiu até agora.[4] Grandes erupções vulcânicas demonstram que pequenas partículas na alta atmosfera podem resfriar substancialmente o planeta. Ao imitar esse efeito, a SAI tem potencial de resfriar rapidamente o planeta e com um custo relativamente baixo em termos de aplicação.[5]

COMO PODE FUNCIONAR?

Através do uso de aviões de alta altitude, SAI poderia criar uma camada global de pequenas partículas na atmosfera e que refletiriam uma pequena fração da luz solar de volta ao espaço, com consequente redução da temperatura do planeta.

RESULTADOS POSSÍVEIS

SAI poderia produzir um efeito de resfriamento global, reduzindo alguns dos efeitos da mudança do clima. No entanto, apenas mascararia os efeitos de aquecimento dos gases de efeito estufa e não resolveria muitas questões importantes, como a acidificação dos oceanos.[6] SAI também teria efeitos colaterais importantes e alteraria padrões de precipitação.[7] Como não é possível assegurar um efeito homogêneo da SRM em todo o planeta, projeta-se que os riscos e impactos da medida afete diferentemente as regiões do Planeta.



Branqueamento de nuvens marinhas (MCB)

Uma intervenção regional

A ideia deste método é injetar pequenos aerossóis na base de nuvens marinhas, aumentando assim o seu albedo e a fração da radiação solar que é refletida para o espaço, esfriando a parte mais baixa da atmosfera.

COMO PODE FUNCIONAR?

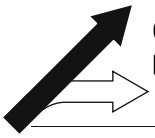
Ao pulverizar sal marinho nas nuvens, a partir de navios, o MCB poderia tornar as nuvens do oceano mais refletivas, proporcionando um resfriamento regional que poderia ser potencialmente ampliado para um nível global, se grandes áreas puderem ser utilizadas.

RESULTADOS POSSÍVEIS

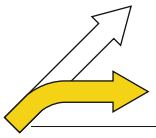
Não é ainda claro se esta ideia é factível.[4] O seu efeito regional desigual de resfriamento poderia alterar substancialmente os padrões de chuva.[8]

Como a SAI pode afetar o Brasil?

O Brasil é um dos países mais vulneráveis à mudança do clima e enfrenta muitos desafios. Citamos no quadro abaixo quatro riscos possíveis. A pergunta que se faz é: a SAI poderia reduzir ou aumentar os riscos para o Brasil?



Como a mudança do clima pode afetar o Brasil?



Como SAI pode afetar o Brasil?

Amazônia

A Floresta amazônica é vital para a biodiversidade global, regulação do clima e a subsistência de milhões de pessoas. Seu estoque de carbono é crítico para o futuro climático do planeta.

Como a mudança do clima pode afetar o Brasil?	Como SAI pode afetar o Brasil?
Temperaturas crescentes e secas mais intensas ameaçam a Amazônia.[9]	Alguns estresses tais como extremos de calor seriam muito reduzidos, mas o impacto no ciclo hidrológico é incerto.[7]
Incêndios generalizados de grande porte são uma ameaça.[9]	Um estudo indicou que a SAI teria pouco efeito nos incêndios florestais na parte oeste da Amazônia.[10]
Esses e outros fatores, como desmatamento, poderiam impulsionar a Amazônia para um potencial colapso.[9]	O impacto da SAI no potencial colapso da Amazônia é muito incerto.[11]

Produção agropecuária

Por ser uma das atividades econômicas mais significativas do Brasil, a agropecuária é crucial tanto para a economia do país como para o suprimento mundial de alimentos.

Como a mudança do clima pode afetar o Brasil?	Como SAI pode afetar o Brasil?
Temperaturas crescentes ameaçam a produção agropecuária e aumentam a incidência de pestes.[12]	O efeito de resfriamento beneficiaria a produção agropecuária.[13]
Chuvas e secas mais intensas já estão impactando a produtividade.[12]	Seus impactos na chuva podem ter um pequeno efeito na produtividade agrícola.[13]
Níveis crescentes de CO_2 poderiam aumentar a produtividade agropecuária, mas estudos divergem sobre os efeitos totais.[12]	De maneira geral, é esperado que a produtividade agrícola possa ser beneficiada.[13]

Escassez de água

Um suprimento confiável de água é essencial para a agricultura brasileira, hidroelétricas, e bem-estar das pessoas.

Como a mudança do clima pode afetar o Brasil?	Como SAI pode afetar o Brasil?
Projeta-se que a mudança do clima reduzirá a segurança hídrica no Brasil.[14]	Evidência limitada sugere que a SAI não seria capaz de reverter essa tendência.[15]
Secas e inundações se tornariam mais frequentes e mais intensas, prejudicando o suprimento de água e alterando o perfil temporal das chuvas.[16]	Os potenciais impactos de secas no Brasil são incertos.[7]

Ondas de calor

Calor extremo ameaça a saúde dos brasileiros, especialmente os grupos mais vulneráveis, tais como idosos e os com saúde debilitada.

Como a mudança do clima pode afetar o Brasil?	Como SAI pode afetar o Brasil?
Ondas de calor tornam-se mais frequentes e mais intensas.[17]	A severidade e frequência das ondas de calor seriam bastante reduzidas.[18]
As ondas de calor estão matando anualmente centenas de brasileiros e a tendência é de aumento.[19]	A maior parte do aumento das mortes provocadas pelas ondas de calor poderia ser evitada.[20]

Questões e desafios

Apesar da SAI ou MCB poder reduzir significativamente algumas das ameaças climáticas, gera várias preocupações críticas – incluindo efeitos colaterais e desafios de governança global.

- A SAI global poderia reduzir as mudanças esperadas de precipitação causadas pela mudança do clima, mas também poderia agravá-las em alguns locais.[21] Implementada de forma regionalmente desigual, SAI ou MCB poderia produzir grandes mudanças nos padrões temporais e geográficos de precipitação.
- SAI poderia atrasar a recuperação da perda de ozônio estratosférico e piorar um pouco a poluição do ar, embora esses riscos possam ser pequenos quando comparados aos benefícios da redução do calor.[20]
- SAI precisaria ser mantida por décadas ou séculos, pois somente mascara o efeito do aquecimento dos gases de efeito estufa. Caso seja encerrada abruptamente, poderia causar um choque de término (termination shock), com um aumento rápido da temperatura, com efeitos devastadores para o planeta.[22]
- Os benefícios e riscos da SAI e MCB seriam desiguais, o que pode gerar tensões entre as nações.[23] A atribuição do impacto da SRM também pode ser contestada, trazendo riscos para sua continuidade.[24]
- Há preocupação de alguns de que SRM é uma justificativa para postergar o corte essencial de emissões. Esta preocupação é conhecida como ameaça moral.[25]

Mensagens chave

Não é um substituto

SRM somente mascararia o efeito do aquecimento provocado pelos gases de efeito estufa e não pode substituir os cortes dessas emissões. Entretanto, aplicada em conjunto, talvez possa ser útil.

Ponderando risco x risco

SRM provavelmente reduziria alguns riscos, mas também introduziria novos. Estes devem ser cuidadosamente ponderados contra os impactos da mudança do clima sem SRM.

Decisões difíceis

Não existem opções isentas de riscos. O Brasil precisa lidar com essa questão para ajudar a moldar os resultados que afetarão as pessoas, os ecossistemas e os recursos críticos.

Leitura adicional

Caso tenha interesse em conhecer mais sobre SRM, acesse o guia introdutório do SRM360: **SRM360.org/guide/why-consider-srm/** (em inglês).

Para uma versão online do material apresentado neste workshop, incluindo referências, acesse: → **SRM360.org/brazil-primer-pt**

Referências

1. Palazzo Corner S, Siegert M, Ceppi P, et al. (2023). The zero emissions commitment and climate stabilization. Frontiers in Science. 1:1170744. https://doi.org/10.3389/fsci.2023.1170744
2. Dinneen J. (2025). Climate could warm another 0.5°C if we fail to capture far more CO2. New Scientist. https://www.newscientist.com/article/2487738-climate-could-warm-another-0-5c-if-we-fail-to-capture-far-more-co2/
3. UNEP. (2024). Emissions Gap Report 2024. https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2024
4. Parson EA, Keith DW. (2024). Solar geoengineering: History, methods, governance, prospects. Annual Review of Environment and Resources. 49. https://doi.org/10.1146/annurev-environ-112321-081911
5. Smith W. (2020). The cost of stratospheric aerosol injection through 2100. Environmental Research Letters. 15(11):114004. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aba7e7
6. Samuels-Crow K. (2024). SRM Cannot Address Ocean Acidification. SRM360.org. https://srm360.org/article/srm-cannot-address-ocean-acidification/
7. Ricke K, Wan JS, Saenger M, Lutsko NJ. (2023). Hydrological consequences of solar geoengineering. Annual review of earth and planetary sciences. 51(1):447-70. https://doi.org/10.1146/annurev-earth-031920-083456
8. Haywood JM, Jones A, Jones AC, et al. (2023). Climate intervention using marine cloud brightening (MCB) compared with stratospheric aerosol injection (SAI) in the UKESM1 climate model. Atmospheric Chemistry and Physics. 23(24):15305-24. https://doi.org/10.5194/acp-23-15305-2023
9. Dyke JG, Fuller E, Jackson L, et al. (2023). Amazon dieback, The Global Tipping Points Report 2023. University of Exeter. https://report-2023.global-tipping-points.org/2-2-3-1/
10. Touma D, Hurrell JW, Tye MR, Dagon K. (2023). The impact of stratospheric aerosol injection on extreme fire weather risk. Earth's Future. 11(6):e2023EF003626. https://doi.org/10.1029/2023EF003626
11. Futerman G, Adhikari M, Duffey A, et al. (2025). The interaction of solar radiation modification with Earth system tipping elements. Earth System Dynamics. 16(4):939-78. https://doi.org/10.5194/esd-16-939-2025
12. Fiorini AC, Angelkorte G, Bakman T, et al. (2024). How climate change is impacting the Brazilian agricultural sector: evidence from a systematic literature review. Environmental Research Letters. 19(8):083001. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad5f42
13. Fan Y, Tjiputra J, Muri H, et al. (2021). Solar geoengineering can alleviate climate change pressures on crop yields. Nature Food. 2(5):373-81. https://doi.org/10.1038/s43016-021-00278-w
14. Ballarin AS, Sousa Mota Uchoa JG, dos Santos MS, et al. (2023). Brazilian water security threatened by climate change and human behavior. Water Resources Research. 59(7):e2023WR034914. https://doi.org/10.1029/2023WR034914
15. Jones AC, Hawcroft MK, Haywood JM, et al. (2018). Regional climate impacts of stabilizing global warming at 1.5 K using solar geoengineering. Earth's Future. 6(2):230-51. https://doi.org/10.1002/2017EF000720
16. G20 Climate Risk Atlas. (n.d.). Brazil. https://www.g20climaterisks.org/brazil/
17. Fischer EM, Sippel S, Knutti R. (2021). Increasing probability of record-shattering climate extremes. Nature Climate Change. 11(8):689-95. https://doi.org/10.1038/s41558-021-01092-9
18. Dagon K, Schrag DP. (2017). Regional climate variability under model simulations of solar geoengineering. Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 122(22):12-06. https://doi.org/10.1002/2017JD027110
19. Monteiro Dos Santos D, Libonati R, Garcia BN, et al. (2024). Twenty-first-century demographic and social inequalities of heat-related deaths in Brazilian urban areas. PLoS one. 19(1):e0295766. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295766
20. Harding A, Vecchi GA, Yang W, Keith DW. (2024). Impact of solar geoengineering on temperature-attributable mortality. Proceedings of the National Academy of Sciences. 121(52):e2401801121. https://doi.org/10.1073/pnas.2401801121
21. Irvine PJ, Keith DW. (2020). Halving warming with stratospheric aerosol geoengineering moderates policy-relevant climate hazards. Environmental Research Letters. 15(4):044011. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab76de
22. Parker A, Irvine PJ. (2018). The risk of termination shock from solar geoengineering. Earth's Future. 6(3):456-67. https://doi.org/10.1002/2017EF000735
23. Morrissey W. (2024). Avoiding atmospheric anarchy: Geoengineering as a source of interstate tension. Environment and Security. 2(2):291-315. https://doi.org/10.1177/27538796231221597
24. Samuels-Crow K, Irvine P. (2024). Will Scientists Know if SRM Caused Extreme Weather? SRM360.org. https://srm360.org/article/will-scientists-know-if-srm-caused-extreme-weather/
25. McLaren D. (2016). Mitigation deterrence and the "moral hazard" of solar radiation management. Earth's Future. 4(12):596-602. https://doi.org/10.1002/2016EF000445