

CAPA

CONTROLANDO O SOL

Estudos tentam entender se a injeção de partículas na atmosfera poderia reduzir temporariamente o aquecimento global ou causar ainda mais problemas climáticos

Marcos Pivetta

Depois de ter permanecido em silêncio por 600 anos, o monte Pinatubo, nas Filipinas, acordou em 1991. Uma série de pequenas explosões ao longo de dois meses culminou em uma grande erupção em meados de junho daquele ano, considerada a segunda maior do século passado. Cerca de 200 mil pessoas tiveram de deixar suas casas e mais de 700 morreram no arquipélago filipino como consequência da eclosão. A explosão produziu uma coluna de fumaça e cinzas vulcânicas que se elevou até 40 quilômetros (km) acima da superfície e invadiu a estratosfera, a segunda das cinco camadas da atmosfera que envolve a Terra. Esse manto de partículas em suspensão, geralmente com tamanhos micrométricos, atrapalhou o tráfego aéreo, queimou plantas e cultivos e produziu outros danos locais.

Apesar de ter causado grandes prejuízos materiais e a perda de vidas humanas nas Filipinas, a erupção do Pinatubo é lembrada hoje no meio científico por ter tido uma consequência surpreendente no clima global: a temperatura média da Terra reduziu-se cerca de 0,5 grau Celsius (°C) nos dois anos seguintes à sua atividade vulcânica.

A enorme quantidade de partículas em suspensão, os chamados aerossóis, lançada pelo vulcão entrou no sistema de circulação de ar da estratosfera, espalhou-se pelo planeta e atuou por meses como uma espécie de filtro solar: parte dos raios do Sol que chegariam normalmente à superfície terrestre foi refletida ao incidir sobre essa quantidade extra de partículas de aerossóis injetados no sistema. Essa ação produziu um resfriamento temporário do planeta.

Os aerossóis também resfriam a Terra quando estão na troposfera, a camada mais baixa da atmosfera, mas sua ação é mais intensa na estratosfera. O efeito Pinatubo serve de inspiração para uma linha de pesquisa polêmica, cercada de incertezas científicas e riscos ambientais e geopolíticos: a geoengenharia solar ou modificação da radiação solar (SRM, na sigla derivada do inglês). Ela começou a tomar corpo lentamente nos últimos 20 anos em algumas universidades dos Estados Unidos e da Europa à medida que o aquecimento global se tornou mais pronunciado. A ideia central dessa abordagem é aumentar deliberadamente o albedo da Terra, sobretudo na estratosfera, para que ela passe a refletir mais radiação de volta ao espaço e, assim, torne-se um pouco menos quente.

Aumentar a quantidade de aerossóis na atmosfera poderia barrar a chegada à Terra de uma pequena fração da luz solar e resfriar provisoriamente o planeta



O albedo é a fração da luz refletida em relação à absorvida por um corpo ou superfície. Quanto maior o albedo, como em superfícies claras ou brancas, menor a quantidade de calor absorvida. Injetar aerossóis na atmosfera é uma das formas de tentar aumentar o albedo terrestre. Alguns cálculos indicam que uma redução de 1% a 2% da quantidade de radiação solar que normalmente chega à Terra seria suficiente para diminuir sua temperatura média em um 1 °C.

A possibilidade de reduzir a quantidade de radiação solar sobre a Terra começou a ser aventada ainda na década de 1960. Mas sempre foi vista como uma excentricidade perigosa, quase um devaneio. A ideia só ganhou alguma relevância científica depois da erupção do Pinatubo e, mais recentemente, com a emergência da crise climática, causada pelo aumento significativo da temperatura global decorrente da emissão de gases de efeito estufa. Ainda assim, a pesquisa experimental – que envolveria a soltura de alguns quilos de aerossóis na estratosfera para observar seus eventuais efeitos em âmbito local (não global, como ocorreu na gigantesca erupção do vulcão nas Filipinas) – pouco progrediu até hoje em razão da oposição de parte da comunidade científica e de grupos ambientalistas.

“Até agora, existem poucos trabalhos de modelagem climática envolvendo as técnicas de geoengenharia solar”, comenta o físico Paulo Artaxo, do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IF-USP), especialista no estudo

de aerossóis atmosféricos. “Nenhum experimento mais significativo foi feito em campo.” Duas abordagens que visam à modificação da radiação solar dominam as discussões (*ver quadros nas páginas 14 e 16*). A principal delas é a injeção de aerossóis na estratosfera, a 15 ou 20 km de altitude, conhecida pela sigla SAI, que tenta reproduzir de forma artificial o que as grandes erupções fazem de maneira natural.

A outra, vista como de impacto mais localizado, é o clareamento de nuvens marítimas (marine cloud brightening ou MCB). Ela também envolve a liberação de aerossóis (nesse caso, partículas de sal marinho), que funcionam como núcleos de condensação das nuvens. Mas a soltura dessas partículas ocorre em altitudes bem mais baixas, de no máximo 2 km, ainda na troposfera. Com mais aerossóis, as gotas de nuvens ficam menores, refletem mais radiação solar de volta ao espaço e resfriam a superfície. Há outras técnicas cogitadas, como aumentar o albedo em grandes superfícies brancas do planeta, como o Ártico, mas as duas primeiras propostas dominam o debate.

Artaxo colabora com um grupo da Universidade de Harvard, dos Estados Unidos, em estudos de modelagem computacional para tentar entender se o comportamento dos aerossóis na estratosfera é realmente similar à sua ação na troposfera. “Precisamos de mais pesquisas sobre esse tema antes de sequer pensarmos em implementar alguma intervenção desse tipo”, comenta o físico da USP, um dos coordenadores do Programa FAPESP de Pesquisa sobre Mudanças Climáticas Globais. “Não temos condições de garantir que a injeção de mais aerossóis não vá, por exemplo,

INJEÇÃO DE AEROSSÓIS NA ESTRATOSFERA

Inspirado no efeito do Pinatubo, método é o mais pesquisado atualmente



FONTE ONE ATMOSPHERE (ONU)

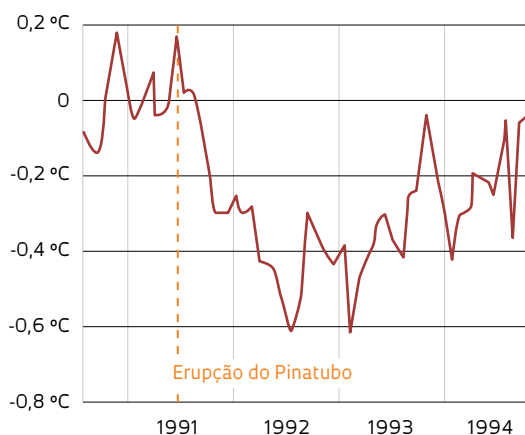


Erupção do vulcão Pinatubo, em 1991, é considerada a segunda maior do século passado

O FRIO QUE VEIO DO VULCÃO

Aerossóis liberados pelo Pinatubo em 1991 reduziram em 0,5 °C a temperatura média do planeta nos dois anos seguintes

FONTE: NASA



diminuir as chuvas de monções no Sudeste Asiático e colocar em risco uma população de bilhões de pessoas. Se isso ocorrer, quem decide se essa injeção de aerossóis para ou continua? Esse tipo de decisão não pode ficar na mão de um pequeno grupo de países ou de um bilionário que financie um experimento desse tipo.”

Também há indícios de que uma dose extra de aerossóis na estratosfera poderia afetar a camada de ozônio, que protege a vida terrestre da ação nociva da radiação ultravioleta vinda do Sol. Isso sem falar que essas partículas em suspensão são uma forma de poluição do ar. Elas naturalmente se depositam, descem da estratosfera para a troposfera, onde podem causar ou agravar problemas de saúde, sobretudo os respiratórios. Por ora, essas e outras questões não têm respostas satisfatórias.

A posição do físico da USP é partilhada por muitos colegas. “A modificação da radiação solar é um tema sensível e o IPCC [Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, da ONU] reconhece que ainda há muitas incertezas sobre seus potenciais efeitos”, comenta a matemática Thelma Krug, que foi vice-presidente do painel entre 2015 e 2023 e representou o Brasil em negociações internacionais sobre o clima por uma década. “Pessoalmente, sou a favor da pesquisa na área. Mas é preciso ir passo a passo com os experimentos, ter transparência e estabelecer uma governança para esse processo.”

O tema é tão controverso que alguns pesquisadores são contra até que se faça pesquisa sobre as técnicas de geoengenharia solar. Isso porque elas não têm impacto na redução das emissões de gases de efeito estufa, que causam o aumento da temperatura da Terra. Ainda que se mostrem relativamente seguras e eficientes em esfriar temporariamente a Terra, objetivo que hoje é apenas uma hipótese, técnicas como a SAI seriam, no máximo, paliativas. No fundo, dizem os críticos dessa abordagem, os trabalhos nessa área desviariam recursos e tomariam um tempo que poderia ser mais bem empregado na busca por ações que reduzissem a emissão de gases como dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄). “Os estudos sobre geoengenharia solar também poderiam ser usados como a desculpa perfeita para que os grandes produtores de gases de efeito estufa não reduzissem suas emissões”, pondera o climatologista Carlos Nobre, do Instituto de Estudos Avançados (IEA) da USP.

Além de ser encarada como um diversionismo em relação à meta central de zerar as emissões de gases de efeito estufa nas próximas décadas, a adoção das técnicas de SRM poderia tornar o planeta refém desse tipo de intervenção climática por um prazo muito longo e indefinido, de décadas ou séculos. Isso criaria um problema extra: o risco de promover o chamado *termination shock*. Quando o planeta abandonasse o emprego das técnicas de SRM, a temperatura subiria novamente – só que dessa vez de forma muito mais rápida do que no cenário atual de aquecimento global. Isso tornaria quase impossível a adaptação a essa brusca elevação de temperatura. Qualquer oscilação significativa da temperatura, para cima ou para baixo, em um curto período, representa um desafio adaptativo.

Alguns estudos de modelagem climática têm sugerido cenários preocupantes em simulações de possíveis impactos do emprego de técnicas de geoengenharia solar. Esses trabalhos costumam averiguar que outros efeitos (colaterais) essas técnicas de intervenção no clima poderiam induzir, além da redução temporária da temperatura terrestre. Um dos problemas é que a maioria desses estudos se concentra em possíveis consequências no hemisfério Norte, onde ficam os países mais ricos e vive e trabalha a maior parte dos pesquisadores do clima.

Começam, no entanto, a surgir pesquisas com foco em outras partes do planeta. Trabalho publicado em junho deste ano na revista *Environ-*

mental Research Climate sugere que a adoção da SAI ao longo deste século alteraria os prováveis impactos do aquecimento global sobre a formação de ciclones extratropicais no hemisfério Sul, como aqueles que se formam com certa regularidade na região Sul do Brasil. A previsão é de que, até o fim deste século, o aumento da temperatura global reduza o número de ciclones gerados nessa parte do globo terrestre, mas aumente a intensidade dos fenômenos produzidos. Ou seja, menos ciclones, mas mais fortes.

Quando diferentes regimes de injeção de aerossóis na estratosfera são simulados em três modelos climáticos internacionais até 2100, os resultados sinalizam um aumento na frequência de ciclones, mas uma redução em sua força em relação aos prognósticos obtidos em cenários de aquecimento global sem a adoção de qualquer protocolo da SAI. “Não somos contra nem a favor da geoengenharia solar”, diz a pesquisadora Michelle Reboita, da Universidade Federal de Itajubá (Unifei), de Minas Gerais, coordenadora do estudo. “Precisamos é estudá-la. Ela pode produzir resultados positivos em uma parte do mundo e negativos em outra.”

Há também estudos de simulação que tentam prever os possíveis impactos da SAI sobre a biodiversidade. “Nosso objetivo é entender como a SAI pode afetar as espécies de vertebrados terrestres no cenário das mudanças climáticas”, conta o biólogo brasileiro Andreas Schwarz Meyer, que faz estágio de pós-doutorado na Universidade da Cidade do Cabo, na África do Sul, e coordena um projeto de pesquisa sobre o tema. “Em outras palavras, queremos saber quais seriam as espécies

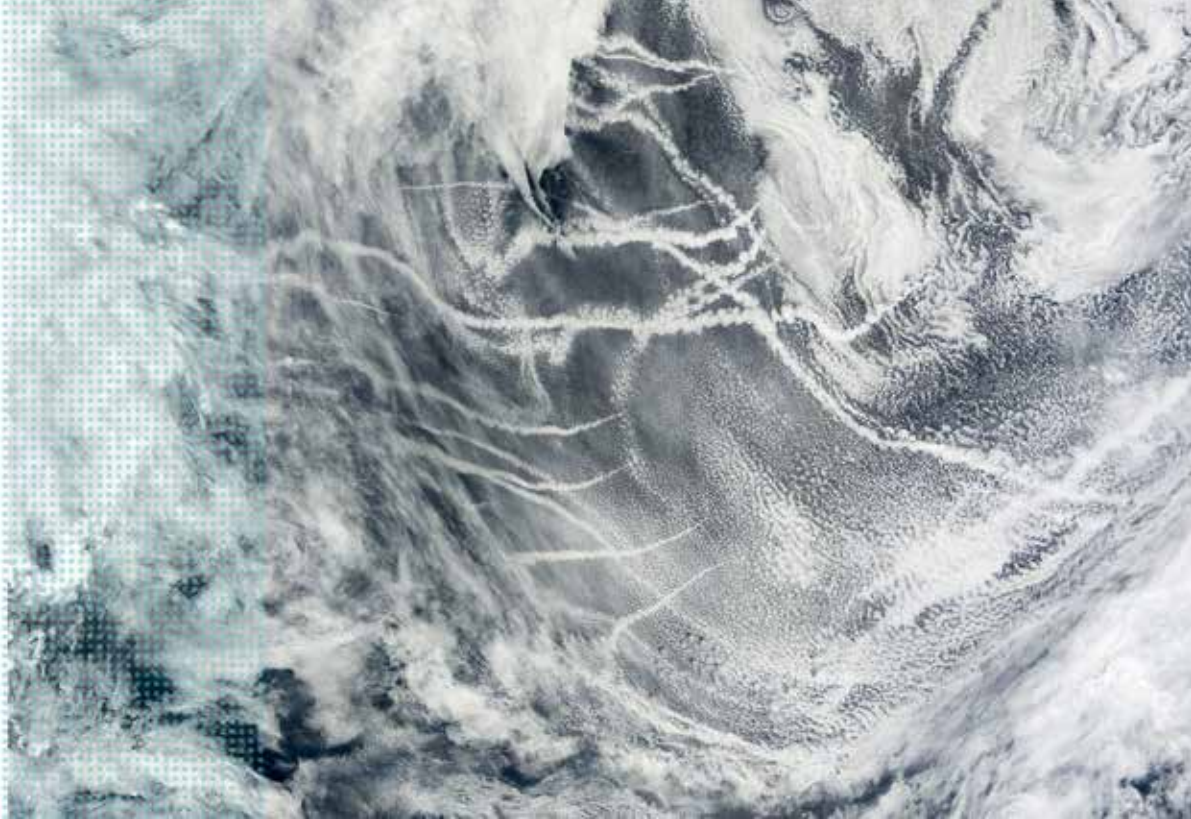
CLAREAMENTO DE NUVEM MARINHA

A técnica se baseia no efeito resfriador decorrente da poluição liberada por navios ao longo de seu percurso

Um barco solta aerossóis compostos de sal marinho para aumentar a capacidade de reflexão da luz solar das nuvens marinhas do tipo *Stratocumulus*, que costumam se formar a menos de 2 km de altitude



Trilhas de nuvens criadas no mar pela emissão de partículas de poeira por navios



‘vencedoras’ e ‘perdedoras’ no globo caso o emprego dessas técnicas para diminuir a temperatura do planeta venha a se tornar uma realidade.”

No projeto, que ainda está em andamento, Meyer adota uma abordagem chamada perfis horizontais de biodiversidade, que usa dados climáticos históricos para estimar o intervalo térmico (a temperatura máxima e a mínima) e o grau de umidade em que as espécies ocorrem. A técnica é normalmente usada para estimar o impacto sobre as espécies de diferentes cenários de aquecimento global previstos pelo IPCC ao longo deste século.

“Assim, temos uma ideia de quantas espécies serão expostas a essas mudanças, quando e o quão rapidamente isso poderá ocorrer”, comenta o biólogo. Em 2022, o brasileiro publicou um artigo no periódico científico *Philosophical Transactions of the Royal Society B* em que simulou os efeitos sobre mais de 30 mil espécies de vertebrados marinhos e terrestres de um cenário particular ao longo deste século: primeiro haveria um aquecimento global superior a 2 °C e, em seguida, ocorreria uma redução de temperatura da Terra de forma artificial, por meio da remoção direta de dióxido de carbono da atmosfera. A retirada do principal gás de efeito estufa é hoje ensaiada por um conjunto de técnicas que, por ora, são muito caras e ineficientes em perseguir esse objetivo.

A conclusão geral do estudo é que a subida e a posterior queda artificial da temperatura terrestre poderiam inviabilizar a sobrevivência de muitas espécies e produziriam danos a essas comunidades décadas após se ter atingido uma hipotética estabilização da temperatura do planeta. Meyer

está fazendo um estudo semelhante agora, mas com o emprego da SAI no lugar da remoção direta de carbono.

Os trabalhos de Reboita e Meyer se dão no âmbito de uma iniciativa internacional, a Developing country governance research and evaluation for SRM, ou simplesmente Degrees. Seu objetivo é estimular estudos e formar recursos humanos especializados nas técnicas de modificação da radiação solar em países da África, América

Latina e sul da Ásia. A Degrees nasceu na década passada dentro da Academia Mundial de Ciências (TWAS) e posteriormente foi assumida por uma organização não governamental britânica, a homônima Degrees. Ela financia quase 40 projetos. No Brasil, além das pesquisas da meteorologista da Unifei, duas linhas de estudo de professores da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) passaram a ser apoiadas em julho passado.

Com parceiros no exterior, a equipe do engenheiro Mauricio Uriona, do Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas da UFSC, pretende estudar como é a percepção do setor produtivo, do governo e da comunidade científica de três países (Brasil, Índia e África do Sul) sobre os potenciais riscos das técnicas de SRM. “Trabalhamos no passado com o tema da transição energética com uma abordagem de cunho socioeconômico e vimos agora uma boa oportunidade de fazer um estudo semelhante sobre geoengenharia solar”, afirma Uriona.

A socióloga ambiental Julia S. Guivant, do Instituto de Pesquisa em Riscos e Sustentabilidade (Iris), da UFSC, vai estudar como diversos atores-chave do país, como a comunidade científica, reguladores políticos, agricultores e representantes de organizações não governamentais, posicionam-se diante dos desafios de governança da geoengenharia solar. “Não temos uma posição sobre se a SRM deve ser usada ou como seu eventual emprego deve ser governado. Somos a favor das pesquisas e do debate democrático sobre o tema, diante dos problemas para atingir as metas de mitigação e adaptação às mudanças climáticas”, diz a socióloga. Colegas da USP e da Universidade Federal de São Paulo (Unifesp) vão colaborar na pesquisa coordenada por Guivant.

As técnicas de SRM são tão polêmicas e sem qualquer tipo de regulação em acordos internacionais que mesmo grupos de pesquisas de instituições renomadas enfrentam dificuldades extremas de realizar pequenos experimentos de campo. Esses trabalhos não têm o potencial de influenciar o clima global, no máximo produzir ciência para se entender os processos envolvidos, com alguma alteração localmente. Ainda assim, os obstáculos práticos à sua realização são quase intransponíveis.

Em março deste ano, foi abandonado o Stratospheric Controlled Perturbation Experiment

(SCoPEX), experimento concebido na década passada pelo grupo do físico-químico Frank Keutsch, da Universidade Harvard. A ideia da iniciativa era usar um balão de alta altitude para injetar 2 quilos de aerossóis (no caso, carbonato de cálcio) cerca de 20 km acima da superfície. “Essa quantidade de partículas é ínfima. Equivale à poluição expelida por um jato comercial durante apenas 1 minuto de voo”, disse Keutsch em entrevista dada em 2021 (ver Pesquisa FAPESP nº 303). O balão do SCoPEX era para ter ganho inicialmente os ares dos Estados Unidos em 2018. Mas isso não ocorreu. Em seguida, sua soltura foi prevista para a Suécia, também sem sucesso. Devido a protestos de ambientalistas e de grupos indígenas, o projeto nunca decolou de fato.

Alguns testes de campo com a técnica de clareamento de nuvens marinhas, uma abordagem menos ambiciosa do que a SAI, têm sido feitos, quase sempre a duras penas e diante de críticas de vários setores da sociedade. Em abril deste ano, um grupo da Universidade de Washington, dos Estados Unidos, usou um tipo de ventilador para espalhar partículas de sal marinho na pista de um navio porta-aviões aposentado que estava estacionado no litoral da cidade de Alameda, na Califórnia. A ideia da iniciativa era apenas ver se as partículas poderiam causar algum mal à saúde. Dois meses mais tarde, o município californiano proibiu esse tipo de experimento em seu território.

Na Austrália, pesquisadores da Southern Cross University e organizações locais tocam desde

Há preocupação de que a geoengenharia solar possa afetar o regime das chuvas de monções na Índia





2

Alterar a capacidade de o Ártico refletir a luz do Sol poderia, em tese, minorar o aquecimento global

2020 um projeto-piloto em que tentam aferir se a técnica de MCB pode ser útil para diminuir o branqueamento de corais na região de Townsville. O objetivo do experimento é averiguar se o método diminuiria localmente a temperatura do oceano no centro da Grande Barreira de Corais. O aquecimento das águas marinhas é a principal causa do branqueamento.

A desconfiança dos experimentos de campo deriva, em parte, do surgimento periódico de iniciativas pouco transparentes, geridas às vezes por empresas privadas obscuras. Em 2022, a Make Sunsets, uma startup norte-americana, soltou sem autorização no norte do México dois balões com aerossóis destinados à estratosfera. Pouco depois, o governo mexicano proibiu esse tipo de iniciativa em seu território. Agora, a empresa anunciou que está fazendo esse tipo de experimento nos Estados Unidos, mas os resultados dessas iniciativas são desconhecidos.

Para o físico norte-americano David Keith, da Universidade de Chicago, nos Estados Unidos, o interesse em estimular as pesquisas sobre geoengenharia solar tem aumentado, a despeito das incertezas científicas que cercam o emprego dessas técnicas. “Isso é visível nos principais relatórios internacionais, como os do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, do Programa Mundial de Pesquisa do Clima, também da ONU, e de grandes grupos ambientalistas, como Environmental Defense”, comenta Keith,

em entrevista por e-mail a *Pesquisa FAPESP*. “Não há dúvida de que a oposição à investigação enfraqueceu, mas é difícil dizer por quê. Talvez seja por causa do aumento das temperaturas ou porque [acredito que] o mundo esteja fazendo agora esforços substanciais para reduzir as emissões de gases de efeito estufa.”

Keith foi membro do programa de geoengenharia solar de Harvard por 12 anos. Hoje ele é a favor da adoção de uma moratória internacional em experimentos de campo até que a ciência sobre o tema esteja mais bem estabelecida e haja alguma forma de governança internacional. Se esse cenário se materializar algum dia, ele diz que a humanidade deveria considerar a realização de um teste no qual se injetaria por uma década na estratosfera cerca de 10% da quantidade necessária de aerossóis para baixar em 1 °C a temperatura global. Dessa forma, seria possível conferir claramente os efeitos dessa abordagem sem correr muitos riscos.

A operação envolveria transportar cerca de 100 mil toneladas de enxofre por ano para a estratosfera – equivalente a 0,3% da quantidade de poluição por enxofre que chega anualmente à atmosfera – por uma frota de 15 jatinhos capazes de voar em altas altitudes. A operação custaria aproximadamente US\$ 500 milhões ao ano. É mais uma ideia polêmica. Para alguns, é possível que a única parte boa da sugestão seja a adoção de uma moratória para esse tipo de experimento. ■

Os artigos científicos consultados para esta reportagem estão listados na versão on-line.