

# DANÇA DA CHUVA: REVISÃO DE LITERATURA SOBRE TECNOLOGIAS DE CONTROLE DE PRECIPITAÇÃO

## 1 INTRODUÇÃO

Desde as sociedades originárias, a humanidade busca intervir simbolicamente nos fenômenos climáticos, como ilustra José de Alencar em *Iracema* ao descrever o ritual em que o pajé invoca Tupã: “Seus pés bateram o chão; seu corpo oscilou; e ele girava em torno da fogueira. Os guerreiros acompanhavam o canto batendo palmas e golpeando a terra com os pés, com uma cadência selvagem” (ALENCAR, 1865, p. 43). Essa “dança da chuva” ancestral serve como metáfora para as atuais articulações tecnológicas em torno da modificação artificial do clima. Se outrora o ciclo hidrossocial fosse limitado a rituais festivos, no mundo contemporâneo, a disponibilidade de água tornou-se crucial para a segurança alimentar, a saúde pública e a resiliência socioeconômica, especialmente face à pressão crescente decorrente do aumento populacional, da expansão agrícola e da variabilidade climática levando corporações, Estados e universidades protagonizam uma nova “dança” tecnológica por meio da sementeira de nuvens e da geoengenharia, visando ao controle da precipitação e à gestão hídrica (TANIKA, L. et al.).

A sementeira de nuvens emergiu em meados do século XX como uma tentativa sistemática de manipular a precipitação, seja para aumentar chuva ou neve, reduzir granizo ou gerir recursos hídricos. Consiste na inserção deliberada de núcleos de condensação (como iodeto de prata, gelo seco ou materiais higroscópicos) em nuvens aptas, para induzir a formação de gotas ou cristais que precipitam (GOMES; REIS, 2021). A técnica “deixou de ser mera especulação para ser tratada no campo da ciência”, migrando do âmbito experimental para repertórios operacionais em diversos países. Suas aplicações são diversas: incremento de água em reservatórios, aumento de neve em bacias montanhosas, supressão de granizo em cultivos de alto valor e até redução de nevoeiros. Essa amplitude explica o interesse interdisciplinar hidrológico, agrônômico, econômico e regulatório, mas também impõe a necessidade de avaliação rigorosa de sua efetividade e efeitos colaterais (GOMES; REIS, 2021; HERMAN; SOVACOOOL, 2024).

A eficácia da técnica, contudo, permanece controversa. Embora relatos sugiram aumentos de precipitação da ordem de 23% em áreas-alvo, é difícil distinguir o sinal induzido do ruído da variabilidade natural. Problemas de escala, replicabilidade e robustez estatística persistem, exigindo cautela da comunidade científica (HERMAN; SOVACOOOL, 2024). Além dos desafios técnicos, é essencial enquadrar a sementeira em uma perspectiva crítica sobre as relações de poder que definem quem regula e quem se beneficia dessas intervenções. O controle majoritariamente governamental e a contratação de fornecedores privados colocam em evidência questões de justiça hídrica e riscos transfronteiriços. A literatura existente aborda aspectos técnicos e políticos da modificação do tempo, mas falha em integrar sistematicamente: (i) evidências empíricas recentes; (ii) modelagens numéricas de alta resolução; (iii) comparações entre agentes nucleantes; e (iv) dimensões socioambientais e regulatórias (CORY; KORNBECH, 2021; HERMAN; SOVACOOOL, 2024). Tais lacunas dificultam recomendações robustas para políticas públicas.

Diante desse cenário, este trabalho propõe uma revisão sistemática da literatura sobre sementeira de nuvens com os objetivos de: (a) sintetizar evidências empíricas e de modelagem dos últimos cinco anos; (b) avaliar criticamente metodologias estatísticas e desenhos experimentais; e (c) comparar resultados por tipo de agente nucleante e contexto climático. Espera-se assim oferecer uma base integrada para pesquisadores, gestores e formuladores de políticas interessados em uma avaliação responsável da técnica.

## 2 METODOLOGIA

Este estudo adotou o desenho de revisão sistemática conforme o protocolo metodológico de Costa, Fontanelle e Zoltowski, que estabelece um framework para garantir transparência, reprodutibilidade e minimização de vieses em revisões de literatura. O método compreendeu etapas padronizadas: elaboração do protocolo, estratégia de busca, seleção e triagem de estudos, extração de dados, avaliação da qualidade e síntese. Para assegurar transparência, utilizou-se checklist PRISMA e registro detalhado do protocolo. A busca foi realizada exclusivamente no Portal de Periódicos da CAPES, selecionado por sua abrangência em ciências atmosféricas, ambientais e sociais. Combinaram-se termos em inglês e português: "*cloud seeding*", "*cloud condensation*", "*seeding*", "semeadura de nuvens", "semeadura de modificação de nuvens", "*geoengineering*". – nos campos de título, resumo e palavras-chave. Foram incluídos apenas artigos revisados por pares, publicados em inglês, português ou espanhol, com foco em modificação artificial de nuvens para alteração de precipitação ou albedo. Excluíram-se livros, teses, relatórios técnicos e literatura cinzenta.

A busca inicial retornou 184 registros. Após remoção de duplicatas, triagem por título e resumo, e leitura integral, 119 estudos foram incluídos. O processo de seleção, documentado em fluxograma PRISMA (disponível como material suplementar), foi realizado de forma independente pelos autores, com discordâncias resolvidas por consenso. Os dados foram extraídos para uma planilha padronizada, contendo campos como: identificação bibliográfica, objetivos, metodologia, agentes nucleantes, contextos climáticos, eficácia declarada, implicações socioambientais e limitações com a planilha, disponível mediante solicitação, permitiu análises descritivas e temáticas. A extração foi manual e consistia em divergências resolvidas por consenso. A avaliação da qualidade metodológica adaptou-se aos diferentes desenhos de estudo (modelagens, experimentos, revisões), conforme recomendado para revisões interdisciplinares. A síntese combinou análise quantitativa descritiva com análise temática qualitativa, baseada em categorias predefinidas (eficácia, riscos, governança, metodologia) e códigos emergentes. Dada a heterogeneidade metodológica, optou-se por uma síntese narrativa estruturada como principal abordagem.

Reconhecem-se limitações, como viés de base de dados (busca restrita ao Portal CAPES), viés de publicação (exclusão de literatura cinzenta) e heterogeneidade dos estudos. Medidas mitigadoras incluíram dupla extração, documentação transparente e estratificação por tipo de estudo. Essas limitações foram registradas e consideradas na interpretação dos resultados. O processo seguiu princípios éticas de transparência, atribuição de fontes e honestidade intelectual, com atenção especial aos impactos sociais e distributivos identificados na literatura.

## 3 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Dos 119 estudos analisados, predominam modelagens acopladas a operações experimentais; ensaios longos e randomizados são raros, o que limita a atribuição causal entre semeadura e mudanças observadas na precipitação (FILIOGLOU, 2020; MAZZETTI; GEERTS; XUE, 2023). No que tange aos agentes nucleantes, o iodeto de prata (AgI) aparece como o mais empregado nos estudos revisados, seguido por agentes higroscópicos e por aplicações com gelo seco em contextos controlados. Relatos operacionais e estudos de caso frequentemente apontam incrementos locais de precipitação em situações favoráveis, porém a magnitude e a replicabilidade desses efeitos variam consideravelmente entre regiões e regimes atmosféricos, evidenciando forte dependência

das condições microfísicas e sinóticas (Geerts & Rauber, 2022; Ma et al., 2021; FONSECA, 2022; WEHBE, 2021).

Geograficamente, identificam-se agendas regionais distintas. A China aparece com produção robusta e orientação estratégica muitas vezes articulando sementeira com políticas de segurança hídrica enquanto os EUA privilegiam agendas aplicadas ligadas a mitigação de granizo e aumento pontual de chuva para reservatórios. Em países do Oriente Médio (ex.: Emirados Árabes Unidos; ALMHEIRI, 2021, 2023; BRANCH, 2024) e na Índia (ex.: projetos CAIPEEX), as iniciativas combinam investimento operacional e pesquisa, mas também reportam incertezas metodológicas e limitações de série temporal que dificultam conclusões definitivas. Estudos em regiões como Coreia do Sul e Etiópia ilustram a diversidade de contextos climáticos e demandas que moldam os desenhos experimentais. (ALMHEIRI, 2021; ALMHEIRI, 2023; BRANCH, 2024; PRABHAKARAN; MURUGAVEL, 2018; Park; Kang; Kim, 2023).

Quanto à eficácia técnica, os achados convergem para um quadro de potencial condicional: em condições microfísicas adequadas, intervenções bem desenhadas podem aumentar a probabilidade de precipitação ou reduzir o granizo, mas os resultados não são universais nem facilmente generalizáveis. Muitos estudos reportam incrementos estatisticamente significativos em séries específicas, porém a heterogeneidade de métricas (por exemplo, percentuais de aumento, mudanças em acumulados, variações no espectro de tamanho de gotas) e a curta duração de várias séries observacionais fragilizam a robustez das inferências. Em outras palavras: promissor, mas incerto. (FILIOGLOU, 2020; Yamashita et al., 2021; Ro et al., 2022). Um ponto metodológico recorrente é a dificuldade de atribuição causal. Ensaios que não controlam adequadamente a variabilidade natural do clima ou que usam delineamentos não aleatorizados tendem a superestimar efeitos ou a produzir resultados inconclusivos. Assim, autores defendem a adoção de protocolos experimentais mais rigorosos incluindo amostragens mais longas, maior densidade de observação in situ e desenho que permita contrafactuals plausíveis combinados com modelagem de alta resolução para testar hipóteses microfísicas. (FILIOGLOU, 2020; Khatri, Pokharel & Strong, 2020; Geerts & Xue, 2021).

A literatura também evidencia preocupações socioambientais e distributivas. Ganhos em uma bacia hídrica podem implicar perdas em áreas adjacentes por efeito de redistribuição espacial da precipitação; essa dimensão redistributiva, associada a considerações de justiça hídrica e governança, é frequentemente subestimada nas análises puramente técnicas. Autores como FONSECA (2022) e WEHBE (2021, 2023) alertam para a necessidade de integrar avaliações de impacto socioeconômicas e de governança nas avaliações de eficácia, uma vez que decisões operacionais de sementeira acarretam externalidades potenciais e dilemas interestatais. (FONSECA, 2022; WEHBE, 2021; WEHBE, 2023).

A heterogeneidade regional também se traduz em agendas de pesquisa distintas: enquanto alguns países priorizam otimização operacional para usos imediatos (abastecimento, controle de granizo), outros enfatizam a compreensão microfísica e a modelagem para reduzir incertezas científicas (Geerts & Rauber, 2022; Ma et al., 2021). Essa divisão tem implicações práticas: intervenções fortemente orientadas a resultados imediatos tendem a aceitar maiores incertezas científicas, aumentando o risco de controvérsias públicas e políticas, especialmente em contextos em que o regime hídrico é politicamente sensível. (Herman & Sovacool, 2024; Al Homoud et al., 2021). Alguns estudos de grande porte (p. ex. experimentos na Índia — CAIPEEX IV — e análises extensas em zonas temperadas) destacam tanto avanços técnicos quanto limites claros: mesmo quando detectam efeitos positivos, os autores costumam ressaltar a pequena magnitude relativa em relação à variabilidade interanual e a necessidade de replicação em

diferentes condições meteorológicas. Valjarević et al. (2020), por exemplo, ilustram o problema da curta série temporal disponível em muitos contextos europeus, o que compromete a inferência robusta sobre tendências. (Valjarević et al., 2020; Yamashita et al., 2021).

#### **4 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

As evidências compiladas nesta revisão indicam que a semeadura de nuvens é uma tecnologia relevante e aplicada com fins diversos - incremento de precipitação, aumento de neve em bacias montanhosas, atenuação de granizo e redução de nevoeiros - impulsionada por agendas operacionais de gestão hídrica em contextos regionais específicos. Os estudos demonstram potencial técnico condicionado a janelas meteorológicas e parâmetros microfísicos bem definidos, com resultados variáveis conforme agente nucleante, regime de nuvens e metodologia aplicada. Do ponto de vista metodológico, predomina a combinação entre modelagem (WRF e experimentos LES) e observação (radares, ceilômetros e pluviometria), estratégia que permite caracterizar janelas operacionais sem eliminar a necessidade de ensaios de campo bem delineados. A heterogeneidade metodológica entre estudos, contudo, dificulta generalizações amplas e exige cautela na extrapolação de resultados entre regiões climáticas distintas.

Geográfica e institucionalmente, programas nacionais com forte apoio público (China e Emirados Árabes Unidos) concentram recursos e escala operacional, enquanto outros contextos (EUA, Índia, Coreia) combinam iniciativas estatais, programas universitários e fornecedores privados. Esta configuração determina capacidades técnicas, prioridades de pesquisa e continuidade operacional, evidenciando que o desenvolvimento tecnológico está condicionado por arranjos de financiamento e governança locais. A síntese aponta lacunas recorrentes: (i) ensaios de campo com delineamentos mais robustos e amostras temporais prolongadas; (ii) integração sistemática entre modelagem de alta resolução e observações instrumentais; (iii) comparações diretas entre agentes nucleantes; e (iv) monitoramento de efeitos secundários e externalidades ambientais. Para políticas públicas, recomenda-se enfoques prudentes: alinhamento de programas com metas claras de monitoramento, protocolos padronizados de dados e investimento em capacidades locais. A institucionalização de processos transparentes e diálogo entre cientistas, gestores e comunidades afetadas surge como requisito para legitimar intervenções e avaliar relações custo-benefício em contextos específicos.

## 5 REFERÊNCIAS

- ALENCAR, José de. *Iracema*. Disponível em: <http://www.culturatura.com.br/obras/iracema.pdf>. Acesso em: 21 set. 2025.
- ALMHEIRI, K. B. et al. Study of Impact of Cloud-Seeding on Intensity-Duration-Frequency (IDF) Curves of Sharjah City, the United Arab Emirates. *Water*, v. 13, n. 23, p. 3363, 2021. DOI: 10.3390/w13233363.
- ALMHEIRI, K. B. et al. A Review of Hydrological Studies in the United Arab Emirates. *Water*, v. 15, n. 1850, 2023. DOI: 10.3390/w15101850.
- BRANCH, O. et al. Scaling artificial heat islands to enhance precipitation in the United Arab Emirates. *Earth System Dynamics*, v. 15, p. 109–129, 2024. DOI: 10.5194/esd-15-109-2024.
- COSTA, Angelo Brandelli; FONTANARI, Anna Martha Vaitses; ZOLTOWSKI, Ana Paula. **Como escrever um artigo de revisão sistemática: um guia atualizado**. Porto Alegre: [s.n.], [2020].
- CORRY, Olaf; KORNBEBCH, Nikolaj. Geoengineering: a new arena of international politics. In: CHANDLER, David; MÜLLER, Felix; ROTHE, Daniel (org.). *International Relations in the Anthropocene: New Agendas, New Agencies and New Approaches*. Cham: Palgrave Macmillan, 2021. p. 95–122. DOI: 10.1007/978-3-030-53014-3\_6.
- FILIOGLOU, M. et al. Optical and geometrical aerosol particle properties over the United Arab Emirates. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 20, p. 8909–8922, 2020. DOI: 10.5194/acp-20-8909-2020.
- FONSECA, R. et al. Assessment of the WRF Model as a Guidance Tool Into Cloud Seeding Operations in the United Arab Emirates. *Earth and Space Science*, v. 9, e2022EA002269, 2022. DOI: 10.1029/2022EA002269.
- GEERTS, Bart; RAUBER, Robert M. Glaciogenic Seeding of Cold-Season Orographic Clouds to Enhance Precipitation: Status and Prospects. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 103, n. 12, p. E2373–E2387, dez. 2022. DOI: 10.1175/BAMS-D-21-0279.1.
- GOMES, Magno Federici; REIS, Eler da Silva. Indução de chuvas: desregulação e conflitos de interesse. *Pixels*, ano III, v. I, p. 167–190, jan./jun. 2021.
- HERMAN, Kyle S.; SOVACOOOL, Benjamin K. Applying the multi-level perspective to climate geoengineering: Sociotechnical bottlenecks for negative emissions and cloud seeding technologies. *Energy Research & Social Science*, v. 115, p. 103637, 2024. DOI: 10.1016/j.erss.2024.103637.
- HUANG, Q. et al. A numerical simulation of rain enhancement by ground-based cold cloud seeding with liquid propane over the Loess Plateau, China. *Atmospheric Research*, v. 211, p. 1–13, set. 2018. DOI: 10.1016/j.atmosres.2018.05.013.
- KHATRI, K. B.; POKHAREL, B.; STRONG, C. Development of hydrologically-based cloud seeding suspension criteria in the Western United States. *Atmospheric Research*, 2021. DOI: 10.1016/j.atmosres.2021.105437.
- MA, J.-H. et al. Different Effect of Cloud Seeding on Three Dam Basins, Korea. *Water*, v. 15, n. 14, p. 2555, 2023.
- MAZZETTI, T.; GEERTS, B.; XUE, M. A Numerical Evaluation of the Impact of Operational Ground-Based Glaciogenic Cloud Seeding on Precipitation over the Wind River Range, Wyoming. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 62, n. 4, p. 489–510, abr. 2023.

PARK, M.-G.; KANG, H.-S.; KIM, Y.-J. A Study on the Effectiveness of SCD Seeding Fog Dissipation Mechanism Using LiDAR Sensor. *Fluids*, v. 8, n. 185, 2023. DOI: 10.3390/fluids8060185.

RO, Y. et al. Estimation of the Total Amount of Enhanced Rainfall for a Cloud Seeding Experiment: Case Studies of Preventing Forest Fire, Drought, and Dust. *Advances in Meteorology*, v. 2023, Article ID 5478666, p. 1–18, 2023. DOI: 10.1155/2023/5478666.

TANIKA, L. et al. Who or what makes rainfall? Relational and instrumental paradigms for human impacts on atmospheric water cycling. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, v. 63, n. 101300, jun. 2023. DOI: 10.1016/j.cosust.2023.101300.

VALJAREVIĆ, A. et al. Cloudiness and water from cloud seeding in connection with plants distribution in the Republic of Moldova. *Applied Water Science*, v. 12, n. 262, 2022. DOI: 10.1007/s13201-022-01784.

WEHBE, Y. et al. Analysis of aerosol–cloud interactions and their implications for precipitation formation using aircraft observations over the United Arab Emirates. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 21, p. 12543–12560, 2021.

WEHBE, Y. et al. Rethinking water security in a warming climate: rainfall enhancement as an innovative augmentation technique. *npj Climate and Atmospheric Science*, v. 6, n. 171, 2023. DOI: 10.1038/s41612-023-00503-2.

WONDIE, M. Modeling cloud seeding technology for rain enhancement over the arid and semiarid areas of Ethiopia. *Heliyon*, v. 9, e14974, 18 p., 2023.

YAMASHITA, K. et al. Physical Properties of Background Aerosols and Cloud Condensation Nuclei Measured in Kochi City in June 2010 and Its Implication for Planned and Inadvertent Cloud Modification. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, v. 102, n. 3, p. 353–363, jun. 2024. DOI: 10.2151/jmsj.2024-016.

YAN, Y. et al. A study on the effect of glaciogenic cloud seeding in the arid agricultural region of Northwest China. *Atmospheric Research*, v. 203, p. 288–298, abr. 2018. DOI: 10.1016/j.atmosres.2017.12.015.

ZHANG, G. et al. A case study of a ground-based AgI seeding operation over the Taihang Mountains, China. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, v. 160, p. 57–65, jul. 2017. DOI: 10.1016/j.jastp.2017.04.004.

ZHAO, H. et al. The effect of AgI seeding on a mixed-phase stratiform cloud in Inner Mongolia, China. *Atmospheric Research*, v. 201, p. 232–241, fev. 2018. DOI: 10.1016/j.atmosres.2017.10.024.

ZHENG, W. et al. Charged Particle (Negative Ion)-Based Cloud Seeding and Rain Enhancement Trial Design and Implementation. *Water*, v. 12, n. 6, p. 1644, jun. 2020. DOI: 10.3390/w12061644.