

# Inteligência artificial e mudanças climáticas

*Paulo Artaxo*

*Luciana Varanda Rizzo*

*Luiz Augusto Toledo Machado*

## resumo

IA é cada vez mais imprescindível para o enfrentamento das mudanças do clima. Imagens de satélite e sensores produzem uma quantidade gigantesca de dados a cada segundo, que são compilados e analisados com ferramentas de IA. Modelos de previsão de tempo e modelos climáticos globais, de parametrização física altamente complexa, são explicitamente calculados com IA, que também otimiza as fontes de energia renováveis e as redes de distribuição de energia elétrica. Apesar dessas aplicações, desafios ligados à ética, à privacidade dos dados e ao impacto ambiental do treinamento da IA exigem atenção cuidadosa. O equilíbrio entre tecnologia e ética é crucial para garantir o uso responsável da IA na luta contra as alterações climáticas.

---

**Palavras-chave:** mudanças climáticas; modelos de previsão do tempo; IA e energias renováveis; Amazônia; ética e clima.

## abstract

*AI is increasingly essential for tackling climate change. Satellite images and sensors produce a huge amount of data every second. They are compiled and analyzed with AI tools. Forecast models, weather, and global climate models, with highly complex physical parameterization, are explicitly calculated with AI, which also optimizes energy sources, renewable energy, and electrical energy distribution networks. Despite these applications, challenges linked to ethics, data privacy, and the environmental impact of AI training require careful attention. The balance between technology and ethics is crucial for ensuring the responsible use of AI in the fight against climate change.*

---

**Keywords:** *climate change; weather forecast models; AI and renewable energy; Amazon; ethics and climate.*

**D**entre os vários desafios que nossa sociedade enfrenta atualmente está a questão das mudanças climáticas (IPCC, 2023). A necessidade urgente de reduzir emissões de gases de efeito estufa, e ao mesmo tempo adaptar nossa sociedade ao clima que já mudou, traz desafios socio-

econômicos e científicos importantes, especialmente para países em desenvolvimento (Artaxo, 2012). Esses desafios são complexos, com impactos em nossa estrutura social, econômica e ambiental.

Neste contexto, a inteligência artificial emergiu como uma ferramenta poderosa no esforço global para enfrentar e mitigar os impactos das alterações climáticas (UNDP, 2023). À medida que o nosso pla-

queta enfrenta desafios ambientais sem precedentes, as tecnologias de IA podem ser utilizadas em vários setores para melhorar a nossa compreensão sobre as alterações climáticas, otimizar a utilização de recursos e desenvolver soluções inovadoras para um futuro sustentável.

Um dos grandes desafios da ciência das mudanças climáticas é a complexidade do sistema terrestre, onde tudo está interligado. O clima do planeta depende das trocas de calor que acontecem entre

---

**PAULO ARTAXO** é professor titular do Instituto de Física da USP, coordenador do Centro de Estudos Amazônia Sustentável e vice-presidente da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência (SBPC).

**LUCIANA VARANDA RIZZO** é professora do Instituto de Física da USP.

**LUIZ AUGUSTO MACHADO** é professor visitante do Instituto de Física da USP.

a atmosfera, os oceanos e os continentes. Por exemplo, o aquecimento das águas em uma parte do Oceano Pacífico afeta o padrão de circulação dos ventos, alterando a distribuição de umidade e de calor em toda a zona tropical do planeta, em um fenômeno conhecido como El Niño. Um outro exemplo é o desflorestamento na Amazônia, que tem causado mudanças significativas na temperatura e no regime de chuvas da região, além de afetar o transporte de umidade para as regiões agrícolas do Centro-Oeste do Brasil (Aragão, 2012). Assim, uma mudança local pode ter consequências regionais e até globais. A inteligência artificial pode contribuir para desvelar padrões e interconexões entre processos que ainda não são evidentes devido à complexidade do sistema terrestre.

Com o avanço tecnológico dos últimos 50 anos, a quantidade de dados sobre o sistema terrestre cresceu exponencialmente. Uma gigantesca quantidade de dados é gerada a cada segundo, com medidas de centenas de satélites e redes de observações na superfície, além de produtos de modelagem numérica. É bom ter muitos dados disponíveis, porque isso permite que os cientistas acompanhem as mudanças que têm acontecido no planeta. Porém, essa enorme quantidade de dados não tem significado algum se não for compilada, validada, integrada e reduzida em seu escopo, para ser útil na definição das melhores estratégias no enfrentamento das mudanças climáticas. Uma das principais contribuições da IA reside na sua capacidade de processar grandes quantidades de dados com rapidez. Os cientistas climáticos utilizam métodos e algoritmos de IA para analisar dados climáticos, imagens de satélite e dados de senso-

res, fornecendo informações valiosas sobre padrões e tendências regionais e globais. Os algoritmos de aprendizagem de máquina podem identificar relações complexas em conjuntos de dados climáticos, ajudando a melhorar os modelos e previsões climáticas. Esta melhor compreensão é crucial para que políticas públicas sobre questões climáticas e ambientais sejam elaboradas na melhor ciência disponível, fornecendo soluções para a adaptação climática e estratégias de mitigação.

A IA também é fundamental no monitoramento e gestão sustentável dos recursos naturais. Por exemplo, sistemas alimentados por IA podem analisar dados de satélite para monitorar desmatamento de florestas e mudanças no uso da terra praticamente em tempo real, como, por exemplo, o Dynamic World (Brown et al., 2022; <https://dynamicworld.app>). A IA também é utilizada para avaliar a saúde dos ecossistemas, quantificando riscos associados à dispersão de poluentes, detectando a proliferação de algas em ecossistemas aquáticos, prevenindo a toxicidade de novos compostos ao meio ambiente e dando suporte a projetos de restauração ecológica (Cui et al., 2023). Ao identificar padrões e anomalias, a IA permite esforços de conservação mais eficazes e práticas sustentáveis de gestão de terras.

No domínio das energias renováveis, a IA auxilia na otimização da eficiência e confiabilidade das fontes de energia renováveis. As redes inteligentes de distribuição de energia elétrica, alimentadas por algoritmos de IA, podem gerir a distribuição de energia, prever padrões de demanda e integrar fontes de energia renováveis nas infraestruturas existen-

tes (Thirunavukkarasu et al., 2023). As tecnologias baseadas em IA melhoram o desempenho dos parques solares e eólicos, prevendo padrões climáticos e otimizando a produção de energia em conformidade com a disponibilidade de ventos e radiação solar. Por exemplo, o Centro Nacional de Pesquisas Atmosféricas dos EUA realiza previsões que dão suporte à indústria de energia solar e eólica, contribuindo para mitigar riscos associados a mudanças nas condições atmosféricas em curto e longo prazos (NCAR, <https://ral.ucar.edu/projects/ncars-contribution-to-wind-and-solar-energy-prediction>).

De forma mais geral, a IA pode contribuir para o desenvolvimento de soluções inovadoras para combater as alterações climáticas. Desde a concepção de edifícios mais eficientes em termos energéticos até a criação de tecnologias avançadas de captura de carbono, a IA pode promover a implementação de práticas sustentáveis em muitos processos industriais. A IA pode ser um fator de mudança na agricultura, oferecendo soluções inovadoras para enfrentar os desafios colocados pelas alterações climáticas. À medida que o nosso planeta sofre mudanças nos padrões climáticos, a integração das tecnologias de IA na agricultura torna-se cada vez mais essencial para a produção alimentar sustentável e com baixas emissões. Uma das principais contribuições da IA na agricultura sustentável é na gestão de recursos. O aumento de eventos climáticos extremos está impactando diretamente a produtividade agrícola. Os sistemas alimentados por IA analisam dados climáticos, condições do solo e saúde das culturas em tempo real, fornecendo aos agricultores infor-

mações práticas para tomarem decisões mais bem embasadas. A agricultura de precisão, possibilitada pela IA, permite irrigação direcionada, fertilização precisa e uso otimizado de pesticidas, minimizando o impacto ambiental e garantindo a utilização eficiente dos recursos. Algoritmos de aprendizado de máquina analisam dados meteorológicos históricos, desempenho das colheitas e outros fatores relevantes para prever tendências climáticas futuras. Essa capacidade de previsão auxilia no planejamento da melhor época de plantio e colheita, na administração de rotações de culturas e na mitigação dos riscos associados a eventos climáticos extremos, aumentando, em última análise, a resiliência em face das incertezas climáticas.

A IA contribui para o desenvolvimento de culturas resistentes ao clima através de técnicas avançadas de melhoramento. Ao analisar vastos conjuntos de dados relacionados com a genética e características das plantas, os algoritmos de IA podem identificar marcadores genéticos associados à tolerância a condições climáticas específicas. Essa informação auxilia no desenvolvimento de culturas mais resistentes a seca, pragas e doenças, contribuindo para a criação de ecossistemas agrícolas robustos e sustentáveis. A escassez de água no Brasil Central é uma consequência significativa das mudanças climáticas e é necessário o desenvolvimento de sistemas de irrigação alimentados por IA que ofereçam soluções eficientes de gestão da água. Esses sistemas monitoram os níveis de umidade do solo, as previsões meteorológicas e as necessidades hídricas das culturas para fornecer quantidades precisas de água onde e quando necessário.

Ao minimizar o desperdício de água, a IA ajuda a conservar esse recurso vital e promove práticas agrícolas sustentáveis. No Brasil, estudos da Embrapa (2018) dão suporte a inúmeras iniciativas de aplicação de técnicas de IA na agricultura.

Apesar dessas aplicações promissoras, os desafios permanecem. Considerações éticas, preocupações com a privacidade dos dados e o impacto ambiental do treinamento de grandes modelos de IA são áreas que requerem atenção cuidadosa de nossa sociedade e da ciência. Encontrar um equilíbrio entre os avanços tecnológicos e as práticas éticas é crucial para garantir a implantação responsável da IA na luta contra as mudanças climáticas.

Em conclusão, a integração da inteligência artificial nas iniciativas relativas às alterações climáticas tem o potencial de revolucionar a nossa abordagem aos desafios ambientais. Ao aproveitar o poder analítico da IA, podemos obter conhecimentos mais profundos sobre os padrões climáticos, otimizar a gestão de recursos e desenvolver soluções sustentáveis. No entanto, é imperativo abordar a implantação da IA com um compromisso com considerações éticas e responsabilidade ambiental, garantindo que os benefícios da IA contribuam positivamente para um futuro mais sustentável e resiliente.

## **CONTRIBUIÇÕES DA IA NO APRIMORAMENTO DOS MODELOS CLIMÁTICOS GLOBAIS**

As previsões do tempo e do clima têm sido cruciais na história da humanidade para permitir planejamento agrícola eficaz, salvaguardando contra desastres naturais

e facilitando estratégias e tomada de decisões em diversos setores. Nesse contexto, a necessidade de previsões meteorológicas e climáticas precisas é altamente significativa. Os complexos modelos chamados *Earth System Models* (ESM) integram as interações entre a atmosfera, oceano, ecossistemas terrestres, gelo e biosfera, em que as emissões e absorções naturais e antrópicas são levadas em conta. Em particular, os elos de retroalimentação ou *feedbacks* entre as componentes são extremamente complexos (Kawamiya et al., 2020). O impacto das ações humanas e políticas também tem que ser levado em conta, com toda a sua complexidade.

Os meteorologistas denominam de “revolução silenciosa” uma melhoria gradual, mas constante, na previsão do tempo. Hoje, a previsão de tempo para seis dias é quase tão boa quanto a previsão de três dias de 30 anos atrás. Menos frequentemente do que no passado, tempestades severas ou ondas de calor pegam as pessoas desprevenidas. Essa revolução salvou vidas e dinheiro, mas também tem um custo: milhões de dólares em supercomputadores produzindo essas previsões.

A inteligência artificial está estimulando outra revolução na previsão numérica do tempo (Voosen, 2023). Em poucos minutos, em computadores desktop, sistemas de IA treinados podem agora fazer previsões similares aos melhores modelos tradicionais. A principal agência meteorológica do mundo, o Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo (ECMWF), adotou a tecnologia: recentemente começou a gerar as suas próprias previsões experimentais de IA. Os algoritmos estão permitindo previsões mais

frequentes a liberação de caros recursos computacionais para outros problemas mais espinhosos (Chen et al., 2023).

Os gigantes da tecnologia também estão muito ativos nesta área. O sistema Google DeepMind, usando o modelo GraphCast, e a Huawei, com o modelo Pangu-Weather, são importantes novidades nesta área. O Google tem um modelo meteorológico de IA de curto prazo que faz previsões contínuas de 24 horas tão precisas quanto as de qualquer agência meteorológica. Os modelos meteorológicos tradicionais começam por alimentar um instantâneo das condições atuais, com base em observações de satélites, estações meteorológicas, balões e boias oceânicas, em complexos modelos computacionais que dividem a superfície do planeta e a atmosfera em milhões de grades, com tamanhos de 1 a 10 quilômetros. Em cada ponto dessa grade são resolvidas as leis físicas da dinâmica dos fluidos, termodinâmicas e leis de conservação, com grande custo computacional. Os modelos climáticos podem levar várias horas para serem executados em supercomputadores com milhões de processadores.

Os novos modelos utilizando IA evitam esses complexos cálculos matemáticos em favor do chamado “aprendizado profundo”, ou *deep learning* (Reichstein et al., 2019). Eles identificam padrões de como a atmosfera evolui naturalmente, após extenso treinamento utilizando mais de 40 anos de dados de “reanálise” do ECMWF, que é uma combinação de observações e previsões de modelos de curto prazo que representa a melhor e mais completa imagem do clima passado.

Quando inicializado com um estado inicial da atmosfera com base na mesma

combinação de observações e modelagem, o sistema GraphCast (Lam et al., 2024) pode superar a previsão do ECMWF em até dez dias em 90% de suas metas de verificação, incluindo trajetórias de furacões e temperaturas extremas. O processo de aprendizado de máquina foi extenso, utilizou 32 supercomputadores e quatro semanas para construir o modelo de IA e 36,7 milhões de parâmetros para ser construído. No modelo de IA, o algoritmo final resultante é leve o suficiente para funcionar em menos de um minuto em um único computador desktop. Resultados similares foram observados com o sistema Pangu-Weather, alimentando-o apenas com as observações que fazem parte do modelo meteorológico operacional do ECMWF.

No Brasil, pesquisadores têm aplicado técnicas de IA para realizar previsões de tempo em curto prazo (*nowcasting*). Pesquisadores do Laboratório Associado de Computação e Matemática Aplicada (LAC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe) desenvolvem ferramentas computacionais que permitem prever a ocorrência e a intensidade de tempestades e de relâmpagos com até três horas de antecedência, aplicando técnicas de IA a imagens de radares meteorológicos. Também existem pesquisas no sentido de monitorar riscos de enchentes e alertar os moradores, como o sistema E-Noé, desenvolvido por pesquisadores do Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação (ICMC) da Universidade de São Paulo.

Em breve será possível realizar as chamadas previsões de conjuntos (*ensembles*), uma inovação em previsão meteorológica que ajuda a capturar a incerteza ao executar um modelo várias vezes para criar

uma série de resultados possíveis. Os pesquisadores de IA poderiam seguir a técnica tradicional de ajustar as condições climáticas iniciais com pequenas “perturbações”, ou adaptar as técnicas generativas de IA gerando condições ajustadas dinamicamente. Essas previsões conjuntas poderiam ajudar os modelos de IA a prever melhor eventos extremos, como furacões, cuja previsão de intensidade e trajetória atualmente é um desafio. O GraphCast pode abrir novas direções para outros problemas importantes de previsão geoespaço-temporal, incluindo clima e ecologia, energia, agricultura e atividade humana e biológica, bem como outros sistemas dinâmicos complexos. Simuladores treinados em dados ricos e do mundo real serão cruciais para o avanço do papel do aprendizado de máquina nas ciências físicas.

O potencial desses modelos não se limita à previsão do tempo. Eles não podem prever climas futuros, porque os conjuntos de dados de aprendizado ao longo dos últimos 40 anos não são suficientemente longos para captar tendências de aquecimento global, que estão sujeitas a *feedbacks* complexos de nuvens, gases e aerossóis que podem acelerar ou atenuar as alterações climáticas. Mas poderiam ajudar uma nova geração de modelos climáticos de alta resolução que estão sendo desenvolvidos para funcionar em supercomputadores com nível de processamento das Exascale, as mais recentes máquinas ultrarrápidas. Assim que esses modelos produzirem resultados suficientes para treinamento, a IA poderá realizar previsões climáticas para as próximas décadas ou séculos, de modo muito mais fácil e com precisão similar ou melhor.

## IA EM PESQUISAS AMAZÔNICAS

Por ser a maior floresta tropical do mundo, a Amazônia desempenha um papel importante no equilíbrio climático do planeta. A floresta armazena e remove carbono da atmosfera através da fotossíntese e transpira vapor d’água, influenciando o regime de chuvas. Dessa forma, o clima e a vegetação estão intimamente relacionados (Artaxo et al., 2023). O desflorestamento e as mudanças climáticas diminuem a capacidade da floresta de remover carbono da atmosfera, além de torná-la mais suscetível à degradação. Estudos apontam a existência de um ponto de não retorno, em que a capacidade de regeneração da floresta seria insuficiente para resistir às pressões do desflorestamento e das mudanças climáticas.

Para prever o que pode acontecer com a Amazônia e com o clima no futuro, os cientistas desenvolvem modelos matemáticos que simulam as interações entre a floresta e a atmosfera com base no conhecimento atual. Por exemplo, sabe-se que em dias ensolarados ocorre mais fotossíntese, desde que a vegetação tenha pleno acesso à água e a nutrientes. Esse conhecimento é traduzido em equações matemáticas que constituem um modelo. Apesar dos avanços na ciência, nosso conhecimento ainda é limitado, isto é, não sabemos como toda a variedade de espécies vegetais da Amazônia responde a mudanças de temperatura, nebulosidade, disponibilidade de água, concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico e brotamento de novas folhas. Em outras situações, podemos até ter conhecimento sobre os processos físicos, químicos e biológicos, mas representá-los detalhadamente em modelos matemáticos resultaria em um alto custo computacional.

É nesse ponto que a IA, utilizada em conjunto com modelos matemáticos tradicionais, pode aprimorar as previsões. Técnicas de aprendizagem de máquina podem ser utilizadas para reconhecer padrões, avaliar a sensibilidade de diferentes preditores e identificar relações de causa e consequência ainda desconhecidas. Para isso, é necessário um extenso conjunto de dados, contendo um grande volume de perguntas (preditores) e de respostas corretas (variável-alvo), para que o algoritmo possa aprender.

A IA também pode contribuir para aumentar a disponibilidade de dados sobre a Amazônia. O bioma se estende por 4 milhões de km<sup>2</sup>, sendo que as áreas mais preservadas são de difícil acesso. É um grande desafio manter programas de monitoramento de taxas de fotossíntese, estoques de biomassa e degradação florestal em uma área tão extensa. Algoritmos de IA aplicados a dados de satélite e a dados de modelos climáticos globais têm contribuído para preencher lacunas de observações em áreas de difícil acesso na Amazônia (Jung et al., 2020). Imagens de diferentes satélites têm sido combinadas em modelos de aprendizagem de máquina para estimar parâmetros que indicam o estado de saúde da floresta, como índices de área foliar, estoque de biomassa, entre outros (Estrada et al., 2023).

Outro desafio importante é monitorar a degradação florestal causada pela remoção de árvores de madeira nobre, fogo sob o dossel, efeitos de borda e pequenas estradas de terra. A degradação afeta a capacidade da floresta de remover carbono da atmosfera, além de diminuir a sua resiliência às mudanças climáticas e aos eventos climáticos extremos. É um desafio monitorar a degradação florestal via satélite, pois muitas

vezes o dano ocorre abaixo do dossel da floresta, sendo imperceptível para os sensores. Outras vezes, os sensores via satélite não possuem resolução suficiente para detectar clareiras de poucos metros quadrados de área. Modelos de aprendizagem profunda têm sido bem-sucedidos na identificação de diferentes classes de degradação florestal a partir de dados de satélite em alta resolução espacial (Dalagnol et al., 2023).

Métodos de IA e de visão computacional também têm sido aplicados em dados de uso e cobertura da terra para reconhecer padrões de desmatamento e identificar suas principais causas. Redes neurais convolucionais são utilizadas para prever padrões de desmatamento na Amazônia, produzindo mapas que indicam o risco de que um determinado pixel de floresta evolua para um pixel de desmatamento (Ball et al., 2022). Caracterizar os processos que levam ao desflorestamento e identificar áreas de maior risco são fundamentais para desenvolver, implementar e aprimorar políticas de conservação e manejo de áreas florestais. Dessa forma, o uso de IA pode contribuir para a preservação da floresta amazônica. Outra aplicação interessante é o uso de IA para avaliar a recuperação da biodiversidade em áreas de restauração florestal, com base em informações bioacústicas (Müller et al., 2023).

## CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

O uso de técnicas de IA nas ciências do sistema terrestre é muito promissor, tendo em vista o grande volume e variedade de dados disponíveis para promover

o aprendizado de modelos estatísticos. Em algumas situações, técnicas de aprendizagem de máquina podem representar de maneira eficiente relações complexas entre as diversas variáveis do sistema terrestre, com um custo computacional menor em comparação aos modelos matemáticos tradicionais. Técnicas de IA também são eficientes para reconhecer padrões em imagens de satélite, e muitas vezes podem desvelar novas interações entre variáveis, contribuindo para o avanço do conhecimento.

Entretanto, é importante considerar as limitações das técnicas de IA. Em primeiro lugar, o aprendizado de máquina é construído com base em grandes volumes de dados, que geralmente foram coletados no passado. Assim, os modelos de IA podem reproduzir bem condições já observadas anteriormente, mas podem falhar na representação de situações atípicas ou sob condições de mudança. Nessas situações, os modelos matemáticos tradicionais, baseados em conhecimento físico, podem ter um desempenho superior aos modelos de aprendizagem de máquina. Outro ponto fraco de algoritmos de aprendizagem de máquina convencionais é a dificuldade de extrair conhecimento dos modelos. Muitas vezes, os modelos de IA funcionam como “caixas-pretas”, capazes de fazer previsões acuradas, mas que não explicam por que uma determinada combinação de variáveis contribui para um determinado desfecho. Novas técnicas de IA têm sido desenvolvidas para facilitar a extração de conhecimento e aumentar a precisão e previsibilidade dos modelos estatísticos.

Um artigo recente (Carlsen et al., 2024) demonstra que a inteligência arti-

ficial alcançou um ponto de inflexão, com implicações significativas para a forma como a pesquisa precisa abordar as tecnologias emergentes e como elas impulsionam o desenvolvimento socioeconômico de longo prazo e os cenários de mudanças climáticas. A inteligência artificial é sem dúvida um fator que irá modificar a nossa sociedade, uma vez que ela vai apresentar soluções sem a necessidade de realizar toda uma cadeia de raciocínios sobre o assunto. A IA pode trazer grandes benefícios, que vão desde a democratização de alguns complexos processos como, por exemplo, fazer uma previsão de tempo para os próximos três dias (que hoje normalmente demanda um centro de supercomputação, que corresponde a um investimento de pelo menos US\$ 50 milhões), que poderá ser feita em seu laptop, com igual ou melhor qualidade, utilizando ferramentas como o GraphCast (Lam et al., 2024).

Um ponto a refletir é a capacidade de os modelos de IA conseguirem reproduzir algo que não existe no histórico de dados, algo novo, como os efeitos não lineares das mudanças climáticas, ou o surgimento de novos processos físicos nos quais o sistema não realizou o aprendizado. Contudo, essa limitação não é fundamental considerando-se o enorme número de processos que ainda não conseguimos modelizar, ou seja, entender, permitindo prevê-los mesmo sem o conhecimento científico da complexa interrelação de processos em diferentes escalas. Ao mesmo tempo, preocupa o fato de se aceitar o resultado sem entender por que ele ocorre. É possível que a IA afaste o interesse no entendimento dos processos

em detrimento de respostas rápidas e sem esforços. Qual será a consequência disso? Perderemos o poder de transformar os enigmas da natureza em equações diferenciais e passaremos a aceitar os resultados puramente estatísticos, como hoje é tratada a física quântica?

A IA leva a uma série de questões que podem ser debatidas calorosamente, mas

uma área em que ela atua pode trazer enormes consequências às sociedades – a área que envolve o papel do homem na natureza. A área de ciências sociais é muito mais difícil do que determinar os resultados de processos físicos, químicos ou biológicos. Temos muito o que discutir para normatizar o uso de IA para o bem da sociedade, tarefa mais que necessária.

## REFERÊNCIAS

- ARTAXO, P. "Break down boundaries in climate research". *Nature, World View Section*, v. 481, 2012, p. 239. Disponível em: <http://www.nature.com/news/break-down-boundaries-in-climate-research-1.9844>.
- ARTAXO, P. "Amazon deforestation implications in local/regional climate change". *PNAS - Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 120, n. 50, e2317456120, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.2317456120>.
- ARAGÃO, L. E. O. C. et al. "The rainforest water pump". *Nature*, v. 489, 2012, pp. 217-8. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nature11485>.
- BALL, J. G. et al. "Using deep convolutional neural networks to forecast spatial patterns of Amazonian deforestation". *Methods in ecology and evolution*, v. 13, n. 11, 2022, pp. 2.622-34.
- BROWN, C. F. et al. "Dynamic world, near real-time global 10m land use land cover mapping". *Sci Data*, n. 9, 2022, p. 251. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01307-4>.
- CARLSEN, H. et al. "Chasing artificial intelligence in shared socioeconomic pathways". *One Earth*, v. 7, 2024, pp. 18-22. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2023.12.015>.
- CHEN, L. et al. "Machine learning methods in climate prediction: a survey". Disponível em: <https://www.preprints.org/manuscript/202309.1764/v1>.

- CUI, S. et al. "Advances and applications of machine learning and deep learning in environmental ecology and health". *Environmental Pollution*, 2023.
- DALAGNOL, R. et al. "Mapping tropical forest degradation with deep learning and Planet NICFI data". *Remote Sensing of Environment*, v. 298, 2023.
- EMBRAPA. *Visão 2030: o futuro da agricultura brasileira*. Brasília, 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/documents/10180/9543845/Vis%C3%A3o+2030+-+o+futuro+da+agricultura+brasileira/2a9a0f27-0ead-991a-8cbf-af8e89d62829>.
- ESTRADA, J. S. et al. "Machine learning assisted remote forestry health assessment: a comprehensive state of the art review". *Frontiers in Plant Science*, v. 14, 2023.
- IPCC 2023. *Climate change 2023: Synthesis report*. Contribution of working groups I, II, and III to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate. Genebra, 2023, pp. 35-115. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>.
- JUNG, M. et al. "Scaling carbon fluxes from eddy covariance sites to globe: synthesis and evaluation of the Fluxcom approach". *Biogeosciences*, v. 17, 2020, pp. 1.343-65. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/bg-17-1343-2020>.
- KAWAMIYA, M. et al. "Two decades of Earth system modeling with an emphasis on the Model for Interdisciplinary Research on Climate (Miroc)". *Prog Earth Planet Sci*, v. 7, n. 64, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s40645-020-00369-5>.
- LAM et al. "Learning skillful medium-range global weather forecasting". *Science*, v. 382, 2023, pp. 1.416-21.
- MÜLLER, J. et al. "Soundscapes and deep learning enable tracking biodiversity recovery in tropical forests". *Nature Communications*, v. 14, n. 1, 2023, p. 6.191.
- REICHSTEIN, M. et al. "Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science". *Nature*, v. 566, n. 7.743, 2019, pp. 195-204.
- THIRUNAVUKKARASU, M.; SAWLE, Y.; LALA, H. "A comprehensive review on optimization of hybrid renewable energy systems using various optimization techniques". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 176, 2023.
- UNDP 2023. Disponível em: <https://unfccc.int/news/ai-for-climate-action-technology-mechanism-supports-transformational-climate-solutions>.
- VOOSEN, P. "AI is set to revolutionize weather forecasts". *Science in Depth*, 17/nov./2023.