

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS
ESCOLA POLITÉCNICA E DE ARTES
GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AERONÁUTICAS



**USO DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NO NOWCASTING DE CHUVAS
FORTES E TEMPESTADES**

LARA QUEIROZ TAVARES

GOIÂNIA
2026

LARA QUEIROZ TAVARES

**USO DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NO NOWCASTING DE CHUVAS
FORTES E TEMPESTADES**

Artigo apresentado à Pontifícia Universidade Católica de
Goiás como exigência parcial para a obtenção do grau de
Bacharel em Ciências Aeronáuticas.

Orientador:
Prof. Me. Roberto Márcio dos Santos.

GOIÂNIA
2026

LARA QUEIROZ TAVARES

**USO DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NO NOWCASTING DE CHUVAS
FORTES E TEMPESTADES**

GOIÂNIA–GO, 11/06/2026

BANCA EXAMINADORA

Me. Roberto Márcio dos Santos _____ CAER/PUC-GO
Assinatura

Esp. Tammyse Araújo da Silva _____ CAER/PUC-GO
Assinatura

Esp. Andreluiz da Silva Fernandes _____ CAER/PUC-GO
Assinatura

GOIÂNIA
2026

USO DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NO NOWCASTING DE CHUVAS FORTES E TEMPESTADES

USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE NOWCASTING OF HEAVY RAIN AND STORMS

Lara Queiroz Tavares ¹, Roberto Márcio dos Santos ²

¹Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil, laraqueiroztavares@gmail.com

²Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil, rmarcio@pucgo.edu.br

RESUMO: Eventos meteorológicos, como chuvas fortes e tempestades, historicamente representaram riscos operacionais expressivos, com destaque para o setor da aviação. A necessidade de respostas imediatas impulsionou o *nowcasting*, uma técnica de previsão de curtíssimo prazo. Este trabalho teve como objetivo principal analisar a aplicação da Inteligência Artificial (IA) no *nowcasting* desses fenômenos para a mitigação de impactos operacionais. A pesquisa adotou uma metodologia qualitativa e exploratória, fundamentada em revisão bibliográfica e análise documental. O estudo comparou o desempenho de modelos numéricos tradicionais com arquiteturas preditivas baseadas em IA. Os resultados indicaram que a IA superou os métodos convencionais em agilidade e precisão para escalas locais. O uso de modelos especializados resultou na detecção precoce de sistemas convectivos, o que viabilizou ajustes táticos tempestivos pelo Controle de Tráfego Aéreo. A conclusão do estudo demonstrou que a IA, embora demande alta capacidade computacional e dados robustos, consolidou-se como um complemento tecnológico essencial à modelagem física, pois ampliou a segurança de voo e a resiliência da navegação aérea frente à variabilidade climática.

Palavras-chave: *Inteligência Artificial, Nowcasting, Meteorologia, Segurança.*

ABSTRACT: *Meteorological events, such as heavy rain and storms, historically represented significant operational risks, especially for the aviation sector. The need for immediate responses drove nowcasting, a very short-range forecasting technique. The main objective of this study was to analyze the application of Artificial Intelligence (AI) in the nowcasting of these phenomena to mitigate operational impacts. The research adopted a qualitative and exploratory methodology, based on a literature review and documentary analysis. The study compared the performance of traditional numerical models with AI-based predictive architectures. The results indicated that AI outperformed conventional methods in agility and precision for local scales. The use of specialized models resulted in the early detection of convective systems, which enabled timely tactical adjustments by Air Traffic Control. The conclusion of the study demonstrated that AI, although it demands high computational capacity and robust data, consolidated itself as an essential technological complement to physical modeling, as it increased flight safety and air navigation resilience in the face of climate variability.*

Keywords: *Artificial Intelligence, Nowcasting, Meteorology, Safety.*

1. Introdução

A ocorrência de eventos meteorológicos severos, como chuvas intensas e tempestades, impacta diretamente a segurança e a eficiência de setores estratégicos, com destaque para a aviação. Fenômenos de rápida evolução provocam atrasos operacionais, danos materiais e riscos à integridade de passageiros e tripulações. Diante da crescente variabilidade climática global, o desenvolvimento de ferramentas de monitoramento em tempo real torna-se uma prioridade para a gestão de riscos atmosféricos.

O *nowcasting* surge como uma metodologia de previsão de curtíssimo prazo essencial para a detecção imediata desses fenômenos. Ao contrário dos modelos numéricos convencionais, voltados para escalas de médio e longo prazo, esta técnica utiliza dados de radares e satélites para gerar alertas em intervalos de minutos a poucas horas. No entanto, a complexidade dinâmica da atmosfera e a rapidez com que sistemas convectivos se formam impõem desafios consideráveis aos métodos tradicionais de análise estatística e modelos físicos puramente numéricos.

Nesse cenário, a Inteligência Artificial (IA)¹ apresenta-se como uma tecnologia promissora para superar tais limitações e resolver falhas de precisão em horizontes temporais reduzidos. O uso de redes neurais e técnicas de *deep learning* permite o processamento de grandes volumes de dados e o reconhecimento de padrões complexos que precedem tempestades severas. A integração da IA ao *nowcasting* potencializa a acurácia das previsões e reduz o tempo de resposta, fator determinante para a tomada de decisão em ambientes operacionais críticos.

Este estudo analisa a aplicação da IA no *nowcasting* de chuvas fortes e tempestades, com foco na mitigação de riscos operacionais. O estudo confronta o desempenho de modelos especializados, como o NowcastNet e o PDDN (*Physical-Driven Diffusion Networks*), frente às abordagens meteorológicas convencionais. Além disso, a pesquisa explora casos práticos de implementação desses sistemas e avalia os benefícios da antecipação meteorológica para a segurança e a eficiência da navegação aérea.

¹ É um sistema de engenharia ou baseado em máquina que pode, para um determinado conjunto de objetivos definidos pelo homem, fazer previsões, recomendações ou decisões que influenciam ambientes reais ou virtuais. Os sistemas de IA são projetados para operar com níveis variados de autonomia (Tabassi, 2023).

2. Conceituação de chuvas fortes e tempestades

Condições meteorológicas adversas, como tempestades, ventos fortes e chuvas intensas, representam riscos significativos para o desempenho de aeronaves e a segurança dos voos, além de provocarem atrasos e interrupções operacionais (Wetzel, 2015).

Compreender a diferença entre chuvas fortes e tempestades é, portanto, essencial. Embora frequentemente usados como sinônimos, eles descrevem fenômenos distintos. A Organização Meteorológica Mundial (OMM/WMO, 2022)² define chuvas fortes de forma quantitativa, considerando o volume de precipitação em determinado período, enquanto tempestades envolvem múltiplos elementos atmosféricos, como ventos fortes, descargas elétricas e turbulência.

O caráter quantitativo das chuvas fortes é confirmado em documentos técnicos como o Manual de Observações Meteorológicas de Superfície³, do Canadá, que estabelece 7,6 mm/h como mínimo para precipitação pesada (ECCC, 2023). Em contraste, tempestades resultam de interações complexas na atmosfera. Wallace e Hobbs (2006) explicam que as tempestades estão associadas a fortes gradientes de pressão, além de instabilidade térmica e convecção profunda, o que reforça que sua definição vai além da intensidade da precipitação.

Operacionalmente, essa distinção é relevante. Segundo o Manual de Previsão do Tempo publicado pela Administração Federal de Aviação (FAA, 2024)⁴, chuvas fortes reduzem a visibilidade e podem comprometer a segurança de aeroportos, enquanto tempestades geram riscos adicionais, como descargas elétricas próximas a aeronaves e turbulência severa em voo. Chaibou *et al.* (2025) destacam que a chuva intensa pode ser prevista por modelos numéricos, mas tempestades exigem análise mais ampla, combinando variáveis físicas e dinâmicas da atmosfera. A WMO (2022) classifica tempestades como categoria própria de risco para a aviação.

Apesar das diferenças, há semelhanças. Ambos os fenômenos podem causar alagamentos, deslizamentos de terra e interrupções em serviços básicos, com impactos econômicos e sociais. Estudos indicam que estão frequentemente associados a sistemas

² World Meteorological Organization (WMO).

³ Manual of Surface Weather Observations (MANOBS).

⁴ Federal Aviation Administration (FAA).

convectivos de mesoescala⁵, caracterizados por grande liberação de energia latente (Bustamante, 2010).

Outro ponto de convergência é a dificuldade de previsão. Mudanças climáticas aumentam a frequência e severidade de chuvas fortes e tempestades, pressionando os serviços meteorológicos (Cui, Junior e Hoogewind, 2024; Comissão Europeia, s.d.). Zhang *et al.* (2025a) ressaltam que a inteligência artificial tem se mostrado promissora para melhorar previsões de curto prazo e reduzir impactos de desastres climáticos. O estudo de Joe *et al.* (2025) reforça a importância do *nowcasting*, especialmente na aviação, em que minutos podem fazer a diferença entre atrasos e acidentes.

Ou seja, chuvas fortes diferenciam-se das tempestades por sua definição restrita à intensidade da precipitação, enquanto tempestades englobam fenômenos atmosféricos mais amplos. No entanto, ambos compartilham impactos e desafios significativos para a previsão e gestão de riscos. Compreender essas nuances é fundamental para a ciência e para operações críticas, como a aviação.

3. Participação da IA nos sistemas de previsão do tempo e o uso do *nowcasting*

A inteligência artificial é uma das principais ferramentas usadas em sistemas de previsão meteorológica. De um modo diferente dos métodos tradicionais, que dependem de forma praticamente exclusiva de modelos numéricos e análise estatística, a IA permite analisar grandes volumes de dados fornecidos por radares, satélites e estações meteorológicas automáticas. Essa abordagem possibilita identificar padrões complexos de formação de tempestades e sistemas convectivos que poderiam passar despercebidos em abordagens convencionais (Ravuri *et al.*, 2021).

Além de detectar eventos atmosféricos, a IA contribui para a otimização de modelos existentes. Redes neurais convolucionais e técnicas de *deep learning* ajustam previsões em tempo real baseadas em observações recentes, o que acaba por aumentar a precisão e reduzir o tempo necessário para a emissão de alertas (Das *et al.*, 2024). Orenstein (2025) considera essa capacidade de adaptação um diferencial em situações críticas, como chuvas intensas ou tempestades, em que minutos de diferença podem impactar negativamente operações em setores como a aviação.

⁵ Sistema Convectivo de Mesoescala (SCM) é um conjunto de tempestades que atuam como um sistema. Um SCM pode se espalhar por um estado inteiro e durar mais de 12 horas (NSSL, s.d.).

Outro aspecto a ser considerado é a integração de IA com sistemas de previsão operacionais. Para o autor, modelos híbridos, que se utilizam da combinação de métodos numéricos e inteligência artificial, permitem gerar previsões mais confiáveis em regiões que possuem dados históricos de meteorologia limitados ou condições meteorológicas extremas. Usar a IA possibilita análises detalhadas utilizando métodos com cálculos de probabilidade, deste modo, são fornecidas previsões sobre a ocorrência de eventos, sua intensidade e evolução. Isso aumenta o suporte à tomada de decisão e fortifica a reação mais ágil a desastres climáticos inesperados, como apontado por Zhang *et al.* (2025a).

Segundo os autores, Ravuri *et al.* (2021) e Orenstein (2025) apontam que a IA auxilia nos avanços na personalização das previsões meteorológicas. Plataformas que têm como base de dados a inteligência artificial, podem fornecer alertas específicos para setores industriais, empresas de transporte, operadores de energia e órgãos de defesa civil, ajustando o nível de detalhe e o tempo disponível das informações de acordo com a necessidade do usuário. Essa personalização melhora a eficiência das ações preventivas e facilita o planejamento operacional em tempo real, principalmente em cenários de maior risco.

A participação da IA enfrenta algumas particularidades e, em alguns casos desafios. Por exemplo, a qualidade e a quantidade dos dados de entrada, são influenciadores diretos ao acerto das previsões, o que torna essencial a manutenção de redes de observação robustas e atualizadas. Além disso, eventos raros ou extremos continuam sendo uma dificuldade para modelos baseados em aprendizado de máquina, por isso abordagens híbridas ou complementares são importantes para reduzir incertezas (Das *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2025a).

Apesar desses desafios, a IA ainda mostra sua importância devido a suas potencialidades. A sua capacidade de analisar dados em grande escala, juntar múltiplas fontes de informação e oferecer previsões rápidas, posiciona a inteligência artificial como um dos principais elementos na evolução constante da meteorologia operacional. Seu uso constante promete aumentar a segurança, reduzir riscos e melhorar operações em múltiplos setores, se tornando um destaque como uma das tecnologias mais promissoras para a gestão de eventos meteorológicos severos (Das *et al.*, 2024).

4. *Nowcasting*: conceito, aplicação e aviação

O *nowcasting* é uma metodologia de previsão meteorológica de curtíssimo prazo, normalmente abrangendo horizontes de minutos a algumas horas, que permite monitorar e antecipar eventos atmosféricos de rápida evolução, como chuvas fortes e tempestades (INPE, 2022). Diferente das previsões tradicionais, que utilizam modelos numéricos de média e longa duração, o *nowcasting* integra observações em tempo real, provenientes de radares, satélites e estações meteorológicas automáticas, para gerar alertas imediatos e detalhados (Joe *et al.*, 2025). Essa característica é essencial para reduzir riscos de danos materiais e operacionais em setores sensíveis a eventos climáticos extremos.

A implementação do *nowcasting* envolve uma combinação de técnicas de modelagem numérica de alta resolução, assimilação de dados e análise estatística, isso permite detectar, rastrear e projetar a evolução de sistemas convectivos com maior precisão (Ferreira, 2021). Como tecnologia, a inteligência artificial (IA) tem se mostrado relevante nesse processo, ao realizar a análise de grandes volumes de dados e fazendo o reconhecimento de padrões complexos de formação de tempestades. A utilização de IA potencializa a precisão das previsões e diminui o tempo necessário para a emissão de alertas, o que representa um avanço significativo frente às metodologias tradicionais (Orenstein, 2025; Ravuri *et al.*, 2021).

Além de sua relevância na meteorologia operacional, o *nowcasting* encontra aplicação em diferentes setores. Em gestão de desastres naturais, por exemplo, possibilita a antecipação de eventos extremos, permitindo ações preventivas que minimizam impactos socioeconômicos e salvam vidas (Ayzel e Heistermann, 2025; Zhang *et al.*, 2025a). E ainda, na agricultura, o *nowcasting* auxilia produtores na tomada de decisões sobre irrigação, colheita e proteção de cultivos frente a chuvas intensas ou tempestades localizadas (INPE, 2022). No setor energético, estes sistemas ajudam a prever variações na produção de energia solar e eólica, gerando uma otimização da operação das redes elétricas e reduzindo riscos de instabilidade (Zhang *et al.*, 2025a).

O uso de IA no *nowcasting* tem mostrado resultados promissores, especialmente por meio de técnicas de *deep learning* e redes neurais convolucionais, capazes de identificar padrões de precipitação intensa, granizo e ventos severos com elevada confiabilidade. Estudos comparativos indicam que essas abordagens superam métodos tradicionais em termos de precisão e capacidade de generalização para diferentes regiões e condições meteorológicas (Das *et al.*, 2024). Entretanto, os modelos de IA apresentam limitações, como dependência de grandes volumes de dados históricos, alto custo computacional e incerteza frente a eventos raros ou extremos (Zhang *et al.*, 2025a).

Na aviação, o *nowcasting* se mostra, assim como em outras áreas, um sistema que está em evolução e sendo introduzido de modo progressivo. A previsão imediata de chuvas fortes, tempestades e outros fenômenos severos permite que controladores e pilotos ajustem rotas, horários de decolagem e procedimentos operacionais, o que ocasiona no aumento da segurança e eficiência do tráfego aéreo (FAB, 2025). Sistemas avançados que combinam observações em tempo real e IA permitem a emissão de alertas pontuais e precisos, isso faz com que atrasos sejam reduzidos e riscos operacionais minimizados (Ho e Leung, 2025; INPE, 2022). Assim, o *nowcasting* se mostra como indispensável para a tomada de decisão segura e eficiente na aviação, com tecnologia, inteligência artificial e meteorologia operacional alinhadas.

A identificação precoce de formações meteorológicas severas também se destaca por sua capacidade de antecipar situações meteorológicas que, tradicionalmente, só eram percebidas quando já afetavam a operação, como a formação súbita de células convectivas próximas ao aeroporto, mudanças rápidas de visibilidade ou rajadas de vento significativas (FAA, 2024).

Em centros de controle, essas previsões de curto prazo auxiliam no gerenciamento do fluxo de tráfego, o que permite ajustes de espaçamento entre aeronaves, reorganização de sequenciamento de pousos e decolagens e definição de rotas alternativas para evitar áreas perigosas. Esses ajustes reduzem a probabilidade de arremetidas, cancelamentos e longas esperas em solo, o que otimiza a utilização da infraestrutura aeroportuária e dos recursos operacionais (FAA, 2024).

Estudos internacionais também demonstram que a integração de produtos de *nowcasting* melhora a previsibilidade da operação e reduz a variabilidade causada pelo tempo severo, favorecendo um tráfego mais estável e menos suscetível a perturbações meteorológicas (Joe *et al.*, 2025).

Além disso, aeroportos e centros de meteorologia aeronáutica têm adotado sistemas que incorporam radar Doppler, sensores de vento de alta frequência, ceilômetros e imagens de satélite combinados com algoritmos que projetam a evolução de sistemas convectivos com antecedência de minutos a poucas horas. Esses sistemas são especialmente eficazes para detectar cisalhamento de vento, microexplosões e turbulência em baixa altitude, fenômenos de grande impacto na fase crítica de pousos e decolagens. Isso possibilita a emissão de avisos imediatos para as tripulações e o ajuste de procedimentos operacionais. Ferramentas baseadas em inteligência artificial aumentam ainda mais essa capacidade ao analisar sequências de imagens e prever deslocamentos de

tempestades, oferecendo previsões mais dinâmicas e com maior resolução temporal, o que melhora a confiabilidade das decisões estratégicas e táticas dentro do ambiente aeroportuário (Ravuri *et al.*, 2021).

Nesse cenário, a adoção do *nowcasting* se fortalece como um elemento-chave para uma aviação mais segura e resiliente, principalmente diante do aumento da variabilidade climática global. Sua integração com sistemas de navegação aérea, infraestrutura aeroportuária e processos de decisão colaborativa permite que companhias aéreas, controladores e equipes de solo atuem de maneira antecipada, minimizando interrupções, preservando a segurança operacional e garantindo maior eficiência no uso do espaço aéreo (Burbidge, 2023).

5. Procedimentos Metodológicos

A realização deste estudo ocorre por meio de pesquisa bibliográfica e documental, de natureza qualitativa. A base teórica fundamenta-se na consulta a livros, artigos científicos e repositórios acadêmicos, com destaque para bases como *ScienceDirect*, *Nature*, MDPI, *Natural Hazards and Earth System Sciences* e arXiv. O recorte temático prioriza estudos sobre modelagem atmosférica e arquiteturas de Inteligência Artificial aplicadas à previsão de curto prazo, a exemplo de redes neurais convolucionais e modelos de difusão.

O procedimento de análise das informações segue o método comparativo. O estudo confronta os indicadores de desempenho de modelos de IA especializados em *nowcasting* (como *NowcastNet* e PDDN) com os resultados de métodos numéricos tradicionais e modelos globais. Para essa avaliação, a pesquisa examina métricas estatísticas quantitativas presentes nos estudos de caso selecionados, tais como Acurácia, Índice de Sucesso Crítico (CSI), Probabilidade de Detecção (POD) e Razão de Falso Alarme (FAR).

A etapa final consiste na correlação entre os dados técnicos de performance dos algoritmos e os protocolos de segurança aeronáutica. Essa síntese busca identificar os benefícios operacionais, como a antecipação de alertas de sistemas convectivos, e mapear as limitações existentes em cenários de eventos meteorológicos extremos ou sem precedentes.

6. Resultados e Discussão

A análise comparativa entre os modelos de previsão evidencia a superioridade das arquiteturas de Inteligência Artificial para o *nowcasting* de eventos meteorológicos severos.

Os dados extraídos da literatura indicam que modelos híbridos, como o NowcastNet, apresentam um Índice de Sucesso Crítico (CSI) superior em cenários de precipitação extrema em contraste com métodos numéricos tradicionais, a exemplo do *High-Resolution Rapid Refresh* (HRRR) (Das *et al.*, 2024).

Essa diferença estatística comprova o ganho de precisão em situações críticas. Da mesma forma, redes de difusão como o PDDN registram reduções no erro quadrático médio (RMSE), algo que consolida a eficácia da IA na modelagem de fenômenos de rápida evolução (Wang, Fung e Lau, 2024).

A correlação desses indicadores técnicos com os protocolos de segurança aeronáutica revela impactos operacionais diretos. A emissão de alertas precoces sobre sistemas convectivos, microexplosões e *windshear* viabiliza o redirecionamento tático prévio de rotas e o ajuste no sequenciamento de chegadas em aeroportos de alta densidade (Ferreira, 2021; Ho e Leung, 2025).

Com a assimilação contínua de dados de radares e satélites, a IA transforma a gestão de tráfego aéreo, de modo a minimizar atrasos, afastar aeronaves de áreas de risco estrutural e garantir a continuidade das operações (Parodi *et al.*, 2021).

Apesar dos avanços expressivos, a pesquisa mapeia limitações operacionais inerentes aos sistemas baseados em Inteligência Artificial. A arquitetura desses modelos exige infraestrutura computacional robusta e alta dependência de bases de dados locais de qualidade. Tal fator restringe a implementação em regiões com redes meteorológicas limitadas (Ayzel e Heistermann, 2025).

A previsão de eventos extremos raros ou sem precedentes históricos constitui uma barreira técnica considerável (Zhang *et al.*, 2025b). Nesses cenários específicos, abordagens híbridas, com a união de redes neurais à física atmosférica, surgem como a solução mais adequada para mitigar incertezas e evitar falsos alarmes (Das *et al.*, 2024; Ayzel e Heistermann, 2025).

6.1. Inteligências artificiais existentes e inteligência artificial usada para o nowcasting: um comparativo

As Inteligências Artificiais aplicadas à previsão meteorológica podem ser divididas em dois grupos principais, os modelos genéricos, que são aqueles voltados à previsão de médio e longo prazo, e os modelos especializados de *nowcasting*, projetados para previsões de curtíssimo prazo.

Modelos tradicionais, como o *GraphCast* e o *FourCastNet*, priorizam a previsão global e a previsão em escalas amplas, com horizontes de 6 a 240 horas. Esses modelos demonstram avanços na previsão meteorológica baseada em IA, mas possuem finalidades diferentes em relação ao *nowcasting* (Pathak *et al.*, 2022).

O *FourCastNet*, desenvolvido pela NVIDIA⁶, utiliza operadores neurais de Fourier⁷ para processar grandes volumes de dados meteorológicos globais e produzir previsões de médio prazo entre 6 e 240 horas (Pathak *et al.*, 2022).

O *GraphCast*, criado pelo Google DeepMind, aplica redes neurais de grafos para modelar a atmosfera como uma estrutura totalmente conectada, alcançando previsões de até 10 dias com um desempenho que pode ser comparado ao modelo físico IFS do Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo (Lam *et al.*, 2023).

Já modelos específicos de *nowcasting*, como o PDDN, apresentam intervalos de 15 minutos a 3 horas, com foco em fenômenos locais de rápida evolução, como tempestades, granizo e precipitações intensas (Wang, Fung e Lau, 2024).

Os tradicionais se destacam pela rapidez e capacidade de generalização, mas não são voltados à previsão imediata de eventos severos. Nesse sentido, modelos como o *NowcastNet* e o PDDN se destacam ao operar em horizontes de 15 minutos a 3 horas e priorizar alta resolução espacial, sendo mais adequados para o monitoramento de chuvas intensas e tempestades (Das *et al.*, 2024; Wang, Fung e Lau, 2024).

A principal diferença técnica entre essas abordagens está na resolução espacial e temporal dos dados e na arquitetura de rede. Enquanto os modelos globais utilizam resoluções horizontais de até 25 km e camadas atmosféricas simplificadas, os sistemas de *nowcasting* operam com dados de radar e satélite de alta resolução (1 km ou menos) e

⁶ Empresa Multinacional de tecnologia incorporada.

⁷ Operadores neurais de Fourier (*Fourier Neural Operators – FNOs*) são modelos baseados em redes neurais profundas que utilizam transformadas de Fourier para aprender e aproximar operadores que descrevem sistemas físicos contínuos, permitindo prever campos meteorológicos complexos de forma mais eficiente e generalizável do que métodos tradicionais de aprendizado de máquina (Li *et al.*, 2021).

atualizações quase instantâneas, o que permite capturar estruturas convectivas em escala de minutos (Ayzel e Heistermann, 2025). Além disso, as redes voltadas ao *nowcasting* incorporam mecanismos de *attention* e convoluções tridimensionais capazes de representar padrões dinâmicos complexos, o que melhora a detecção precoce de sistemas convectivos de mesoescala.

Estudos comparativos reforçam essa superioridade em situações de curto prazo. Das *et al.* (2024) demonstraram que o modelo híbrido físico-IA *NowcastNet* superou o modelo numérico operacional *High-Resolution Rapid Refresh* (HRRR) em eventos de precipitação extrema. O *Critical Success Index* (CSI) médio para limiar de 16 mm/h atingiu aproximadamente 0,30, contra 0,04 do HRRR (diferença que evidencia o ganho expressivo de precisão em situações críticas). De forma semelhante, Wang, Fung e Lau (2024) relataram que o PDDN obteve reduções significativas no erro quadrático médio (RMSE) e maior coerência espacial das previsões em comparação com métodos puramente numéricos.

Contudo, os modelos de *nowcasting* enfrentam desafios próprios. Segundo Ayzel e Heistermann (2025), essas arquiteturas apresentam alta dependência de dados de radar de qualidade e demandam grande poder computacional para treinamento, o que limita sua implementação em países com infraestrutura meteorológica restrita. Além disso, eventos raros, como tempestades severas isoladas, ainda representam uma barreira à generalização, exigindo ajustes contínuos de calibração e o uso de modelos híbridos com incorporação de física atmosférica.

Em contraste, modelos de IA genéricos, como os desenvolvidos por Ravuri *et al.* (2021), mostram desempenho mais estável em horizontes longos e contextos globais, mas sua resolução e velocidade de atualização não são adequadas para o *nowcasting* operacional. Assim, enquanto os sistemas globais contribuem para previsões estratégicas e modelagem climática, o *nowcasting* orientado por IA se destaca em respostas imediatas, reduzindo riscos operacionais, especialmente na aviação, na gestão de desastres e na operação de redes elétricas (Zhang *et al.*, 2025a).

De forma resumida, os modelos de IA para *nowcasting* representam uma evolução das abordagens tradicionais ao priorizar rapidez e precisão em escalas locais, mesmo com maior custo computacional e menor estabilidade em horizontes longos. Essa diferenciação os torna complementares aos sistemas convencionais de previsão, compondo um sistema mais robusto e eficiente.

6.2. Casos reais de aplicação do nowcasting na mitigação de riscos na aviação

A fundamentação teórica sobre os modelos de previsão de curto prazo ganha contornos práticos quando observada a aplicação do *nowcasting* em cenários operacionais complexos. A literatura documenta ocorrências e procedimentos em que a antecipação meteorológica imediata foi o fator determinante para a segurança e a continuidade das operações aéreas. A seguir, destacam-se três casos práticos de mitigação de riscos viabilizados por essas tecnologias.

Em 11 de maio de 2019, o Aeroporto de Milão-Malpensa foi atingido por uma linha de instabilidade (*squall line*) de rápida evolução que resultou em precipitação de granizo e exigiu o desvio de oito aeronaves para outros aeroportos (Parodi *et al.*, 2021). A análise deste evento pelo projeto SINOPTICA⁸, vinculado ao programa europeu SESAR⁹, evidenciou a eficácia do *nowcasting* para a mitigação de impactos operacionais. A assimilação contínua de dados de radar de alta resolução e informações de descargas elétricas melhora a previsão desses extremos meteorológicos (Parodi *et al.*, 2021). Operacionalmente, o projeto demonstrou como a integração dessas novas tecnologias de previsão a ferramentas de controle, como o *Arrival Manager* (AMAN), permite que os controladores visualizem o desenvolvimento meteorológico em tempo real e recalculam o sequenciamento de chegadas, evitando que as aeronaves penetrem em áreas de risco estrutural (Parodi *et al.*, 2021).

Devido à sua complexidade geográfica e alta suscetibilidade a condições climáticas extremas, o Observatório de Hong Kong (HKO) desenvolveu o sistema de *nowcasting* SWIRLS (*Short-range Warning of Intense Rainstorms in Localized Systems*)¹⁰. O sistema integra dados de radares, satélites, pluviômetros e sensores de raios. Paralelamente, a operação aeroportuária conta com uma rede sofisticada que inclui radares meteorológicos Doppler de terminal e sistemas LIDAR (*Light Detection and*

⁸ O Projeto SINOPTICA (*Satellite-borne and IN-situ Observations to Predict The Initiation of Convection for ATM*) tem como objetivo o aprimoramento do desempenho de modelos numéricos de previsão do tempo para o *nowcasting* de eventos meteorológicos severos desenvolvidos nas proximidades de aeroportos, de modo a subsidiar o gerenciamento de tráfego aéreo (Parodi *et al.*, 2021).

⁹ O SESAR consiste no pilar tecnológico da política “*Single European Sky*” da União Europeia e em um facilitador essencial da Estratégia de Mobilidade Sustentável e Inteligente da Comissão Europeia. A iniciativa define, desenvolve e implementa tecnologias com o objetivo de transformar o gerenciamento de tráfego aéreo na Europa (SESAR Joint Undertaking, 2026).

¹⁰ Alerta de Curto Prazo de Tempestades Intensas em Sistemas Localizados (SWIRLS).

Ranging)¹¹ para o monitoramento automático e alerta de *windshear* (tesoura de vento) e microexplosões. A mitigação do risco ocorre pela capacidade analítica dessas ferramentas em fornecer alertas dinâmicos e imediatos, garantindo que as tripulações sejam notificadas tempestivamente para realizar arremetidas seguras antes da ocorrência de perda de sustentação em baixa altitude (Ho e Leung, 2025).

No contexto brasileiro, a região Sul apresenta alta incidência de sistemas convectivos severos, o que impacta diretamente as rotas aéreas de alta densidade. Conforme a literatura aplicada, a implementação de metodologias de *nowcasting* nessa região, utilizando a assimilação de dados de radares meteorológicos de superfície e da rede de detecção de descargas elétricas, tem se mostrado altamente eficaz (Ferreira, 2021).

A pesquisa comprova que a integração dessas observações em modelos de previsão de curtíssimo prazo permite rastrear e projetar a evolução física dessas tempestades de forma antecipada. A mitigação de riscos ocorre por meio do redirecionamento tático (*re-routing*). Esta medida de Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo (ATFM) consiste na alteração da trajetória original para contornar condições meteorológicas adversas ou setores saturados. Ao antecipar o bloqueio de aerovias por supercélulas, o Controle de Tráfego Aéreo (ATC) executa esses desvios táticos antes que as aeronaves enfrentem turbulência severa, de modo a garantir a segurança e a integridade total do voo (Ferreira, 2021).

7. Conclusão

A pesquisa demonstra que a integração da Inteligência Artificial ao *nowcasting* transforma a previsão de chuvas fortes e tempestades. A transição de modelos meteorológicos puramente numéricos para arquiteturas baseadas em IA, como redes neurais e modelos híbridos, confere maior agilidade e precisão na detecção de sistemas convectivos de rápida evolução. Os dados analisados confirmam que essa tecnologia atende ao objetivo central de antecipar eventos severos com alta resolução espacial e temporal.

¹¹ LIDAR (*Light Detection and Ranging* (Detecção e Telemetria de Luz)) é uma técnica de sensoriamento remoto ativo utilizada para o mapeamento e levantamento tridimensional de alvos com alta rapidez e confiabilidade (Almeida *et al.*, s.d.).

No contexto aeronáutico, essa evolução tecnológica apresenta implicações práticas indispensáveis. A capacidade de prever fenômenos críticos em curtíssimo prazo otimiza a atuação do Controle de Tráfego Aéreo (ATC) e a aplicação de medidas de Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo (ATFM). Com o acesso a alertas dinâmicos sobre *windshear* e microexplosões, as tripulações executam desvios táticos com antecedência. Essa antecipação preserva a segurança de voo, reduz a ocorrência de arremetidas e otimiza a eficiência da infraestrutura aeroportuária.

A análise dos estudos de caso comprova que a Inteligência Artificial especializada em *nowcasting* atua como um complemento tecnológico essencial, e não como uma substituição imediata da modelagem física (Burbidge, 2023; FAB, 2025). Sob a ótica dos autores, a dependência de dados de radar de alta qualidade e a exigência de infraestrutura computacional robusta ainda configuram desafios concretos para a implementação global de maneira padronizada, especialmente em regiões com redes de observação limitadas.

Portanto, a incorporação dessas ferramentas inovadoras aos centros de controle de área otimiza a tomada de decisão tática e eleva a resiliência da infraestrutura aeroportuária frente à crescente variabilidade climática global (Burbidge, 2023; FAB, 2025). O uso da IA no *nowcasting* consolida um novo paradigma na meteorologia operacional, no qual a adoção de sistemas preditivos avançados configura um passo estratégico fundamental para a mitigação de riscos e para a garantia de um setor aéreo seguro.

8. Referências Bibliográficas

Almeida, Cláudia; Aragão, Luiz; Kampel, Milton; Shimabukuro, Yosio. LIDAR: Divisão de Sensoriamento Remoto. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), [s.d.]. Acesso em: 16 de maio de 2026. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/DSR/areas-de-atuacao/sensores-plataformas/lidar>.

Ayezel, Georgy; Heistermann, Maik. Brief communication: Training of AI-based nowcasting models for rainfall early warning should take into account user requirements. *Natural Hazards and Earth System Sciences (NHESS)*, Göttingen, v. 25, 2025.

Bustamante, Tania Giovanna Caycho. Riscos associados às chuvas intensas: alagamentos e deslizamentos de terra no Brasil. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2010. Acesso em: 01 de outubro de 2025. Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/384U6C5>.

Burbidge, Rachel. Understanding the impact of climate change on aviation. Bruxelas: EUROCONTROL, 2023. Acesso em: 27 de setembro de 2025. Disponível em: <https://www.eurocontrol.int/article/understanding-impact-climate-change-aviation>.

Chaibou, Abdoul Aziz Saidou; Edoh, Kodjo Gboneh Gratien; Gbadamassi, Soliou Kègnidé Adéchinan; Abogo, Marisol Obono Ndong; Saley, Inoussa Abdou; Nooni, Isaac Kwesi; Sanda, Ibrah Seidou; Saley, Moussa Mounkaila; Abro, Muhammad Ilyas; Kaoúgé, Boubacar Moumouni; Baoua, Ousmane; Katiellou, Gaptia Lawan; Manga, Adamou Ousmane; Laouali, Dungall; Kambi, Maixent Olivier Claver. Numerical simulations of a heavy rainfall event in the Sahelian region of Zinder in Niger. Atmospheric Research, v. 327, art. 108398, 2025.

Comissão Europeia. Consequences of climate change. Climate Action, s. d. Acesso em: 01 de outubro de 2025. Disponível em: https://climate.ec.europa.eu/climate-change/consequences-climate-change_pt.

Cui, Wenjun; Junior, Thomas J. Galarneau; Hoogewind, Kimberly A. Changes in mesoscale convective system precipitation structures in response to a warming climate. ArXIV, 2024. Acesso em: 26 de setembro de 2025. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/2406.10410>.

Das, Puja; Posch, August; Barber, Nathan; Hicks, Michael; Duffy, Kate; Vandal, Thomas; Singh, Debjani; Van Werkhoven, Katie; Ganguly, Auroop R. Hybrid physics-AI outperforms numerical weather prediction for extreme precipitation nowcasting. NPJ Climate and Atmospheric Science, v. 7, n. 1, p 2024.

Environment And Climate Change Canada (ECCC). Manual of Surface Weather Observation Standards (MANOBS). Ottawa: Government of Canada, 2022. Acesso em: 01 de outubro de 2025. Disponível em: https://publications.gc.ca/collections/collection_2022/eccc/En56-238-2-2022-eng.pdf.

Força Aérea Brasileira (FAB). Meteorologia: elemento essencial para a segurança da aviação. 2025. Acesso em: 20 de outubro de 2025. Disponível em: <https://www.fab.mil.br/noticias/mostra/43898/CELEBRA%C3%87%C3%83O%20-%20Meteorologia:%20elemento%20essencial%20para%20a%20seguran%C3%A7a%20da%20avia%C3%A7%C3%A3o>.

Federal Aviation Administration (FAA). Aviation Weather Handbook (*FAA-H-8083-28A*). Washington, D.C.: Federal Aviation Administration, 2024. Acesso em: 28 de setembro de 2025. Disponível em: https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/FAA-H-8083-28A_FAA_Web.pdf.

Ferreira, Rute Costa. Uso da assimilação de dados de radar e descargas elétricas na previsão de curtíssimo prazo no sul do Brasil. 2021. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2021. Acesso em: 21 de novembro de 2025. Disponível em: https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/INPE_5ab3fcbcf2fa81b3fac8b0f8508c3584.

Ho, Cheuk-Hang; Leung, Yu-Ting. Weather Forecast Based on Artificial Intelligence. Hong Kong Observatory, 2025. Acesso em: 01 de outubro de 2025. Disponível em: <https://www.hko.gov.hk/en/education/weather/data-and-technology/00728-Weather-Forecast-Based-on-Artificial-Intelligence.html>.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Projeto *Nowcasting*, 2022. Acesso em: 01 de outubro de 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/inpe/pt-br/assuntos/ultimas-noticias/secom-apresenta-projeto-nowcasting>.

Joe, Paul; Ebert, Elizabeth; Keenan, Tom; Wang, J. J.; Duan, Yihong; Isaac, George; Wang, Yong; Kiktev, Dmitry; Li, Ping Wah; Saito, Kazuo; Lee, Gyu Won; Masson, Valéry; Brown, Barb; Onvlee-Hooimeijer, Jeanette; Steinle, Peter; Salio, Paola; Albrecht, Rachel; Wilson, Jim; Roberts, Rita; Sun, Juanzhen; Liang, Feng; Saulo, Celeste; Campetella, Claudia; Goodman, Steve; Conway, Bill; Doyle, Chris; Bélair, Stéphane; Milbrandt, Jason; Leroyer, Sylvie; Montmerle, Thibaut; Pereira Filho, Augusto Jose; Golding, Brian; May, Peter; Seed, Alan; Wang, Yinchun; Michelson, Daniel; Baklanov, Alexander; De Coning, Estelle. Insights from *nowcasting* and mesoscale research working group projects of the world weather research programme. Bulletin of the American Meteorological Society, v. 106, n. 7, 2025.

Lam, Remi; Sanchez-Gonzalez, Alvaro; Willson, Matthew; Wirnsberger, Peter; Fortunato, Meire; Pritzel, Alexander; Ravuri, Suman; Ewalds, Timo; Alet, Ferran; Eaton-Rosen, Zach; Hu, Weihua; Meroze, Alexander; Hoyer, Stephan; Holland, George; Stott, Jacklynn; Vinyals, Oriol; Mohamed, Shakir; Battaglia, Peter. GraphCast: learning skillful medium-range global weather forecasting. Science, v. 382, n. 6677, p. 1416-1421, 2023.

Li, Zongyi; Kovachki, Nikola; Azizzadenesheli, Kamyar; Liu, Burigede; Bhattacharya, Kaushik; Stuart, Andrew; Anandkumar, Anima. Fourier neural operator for parametric partial differential equations. 2021. Acesso em: 12 de outubro de 2025. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/2010.08895>.

National Severe Storms Laboratory (NSSL). Severe weather 101: thunderstorm types. Norman, [s. d.]. Acesso em: 08 de outubro de 2025. Disponível em: <https://www.nssl.noaa.gov/education/svrwx101/thunderstorms/types/>.

Orenstein, Paulo. Previsões climáticas em tempos de inteligência artificial. Instituto de Estudos Avançados da Universidade de São Paulo (IEA-USP), 2025. Acesso em: 01 de outubro de 2025. Disponível em: <https://www.iea.usp.br/midioteca/video/videos-2025/previsoes-climaticas-em-tempos-de-ia>.

Parodi, Antonio; Mazzarella, Vincenzo; Milelli, Massimo; Lagasio, Martina; Realini, Eugenio; Federico, Stefano; Torcasio, Rosa Claudia; Kerschbaum, Markus; Llasat, Maria Carmen; Rigo, Tomeu; Esbrí, Laura; Temme, Marco-Michael; Gluchshenko, Olga; Temme, Annette; Nöhren, Lennard; Biondi, Riccardo. A Nowcasting Model for Severe Weather Events at Airport Spatial Scale: The Case Study of Milano Malpensa. In: 11th SESAR Innovation Days, 2021, Virtual Event. Papers. Brussels: SESAR Joint Undertaking, 2021. Acesso em: 08 de maio de 2026. Disponível em: https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/sid/2021/papers/SIDs_2021_paper_60.pdf.

Pathak, Jaideep; Subramanian, Shashank; Harrington, Peter; Raja, Sanjeev; Chattopadhyay, Ashesh; Mardani, Morteza; Kurth, Thorsten; Hall, David; Li, Zongyi; Azizzadenesheli, Kamyar; Hassanzadeh, Pedram; Kashinath, Karthik; Anandkumar, Animashree. FourCastNet: a global data-driven high-resolution weather model using adaptive fourier neural operators. ArXiv, 2022. Acesso em: 08 de outubro de 2025. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/2202.11214>.

Ravuri, Suman; Lenc, Karel; Willson, Matthew; Kangin, Dmitry; Lam, Remi; Mirowski, Piotr; Fitzsimons, Megan; Athanassiadou, Maria; Kashem, Sheleem; Madge, Sam; Prudden, Rachel; Mandhane,

Amol; Clark, Aidan; Brock, Andrew; Simonyan, Karen; Hadsell, Raia; Robinson, Niall; Clancy, Ellen; Arribas, Alberto; Mohamed, Shakir. Skillful precipitation nowcasting using deep generative models of radar. *Nature*, v. 597, n. 7878, p. 672-677, 2021.

SESAR Joint Undertaking. Discover SESAR. Brussels: SJU, 2026. Acesso em: 16 de junho de 2026. Disponível em: <https://www.sesarju.eu/discover-sesar>.

Tabassi, Elham. Artificial Intelligence risk management framework (AI RMF 1.0). Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2023. (NIST AI 100-1). Acesso em: 19 de outubro de 2025. Disponível em: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ai/NIST.AI.100-1.pdf>.

Wallace, John M.; Hobbs, Peter V. *Atmospheric science: an introductory survey*. 2. ed. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2006.

Wang, Rui; Fung, Jimmy C. H.; Lau, Alexis K. H. Skillful precipitation nowcasting using physical-driven diffusion networks. *Geophysical Research Letters*, Hoboken, NJ, v. 51, n. 24, 2024.

Wetzel, Melanie. *Aviation security impacts of meteorological and climatic disruption*. Embry-Riddle Aeronautical University, 2015. Acesso em: 01 de outubro de 2025. Disponível em: <https://commons.erau.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1136&context=aircon>.

World Meteorological Organization (WMO). *Guide to aviation hazards: precipitation*. Geneva: WMO, 2022. Acesso em: 01 de outubro de 2025. Disponível em: <https://community.wmo.int/site/knowledge-hub/programmes-and-initiatives/aviation/aviation-hazards-precipitation>.

Zhang, Zhan; Song, Qingping; Duan, Mian; Liu, Huadong; Huo, Junhua; Han, Chengbo. Deep learning model for precipitation nowcasting based on residual and attention mechanisms. *Remote Sensing*, Basel, v. 17, 2025a.

Zhang, Zhongwei; Fischer, Erich; Zscheischler, Jakob; Engelke, Sebastian. Numerical models outperform AI weather forecasts of record-breaking extremes. *ArXiv*, 2025b. Acesso em: 01 de outubro de 2025. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/2508.15724>.