



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS – ICAT
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA
CAMPUS A. C. SIMÕES

RICARDO ALEXANDRE GOMES DOS SANTOS

PREVISÃO DE NEVOEIRO NO AEROPORTO ZUMBI DOS PALMARES COM DADOS
METAR E GOES-16 USANDO XGBOOST

MACEIÓ – ALAGOAS
2026

RICARDO ALEXANDRE GOMES DOS SANTOS

PREVISÃO DE NEVOEIRO NO AEROPORTO ZUMBI DOS PALMARES COM DADOS
METAR E GOES-16 USANDO XGBOOST

Trabalho de Dissertação apresentado ao Programa de
Pós-graduação em Meteorologia da Universidade
Federal de Alagoas, como requisito parcial à obtenção
do título de Mestre em Meteorologia.

Orientador: Prof. Dr. Heliofábio Barros Gomes
Coorientador: Prof. Dr. Glauber Lopes Mariano

MACEIÓ - ALAGOAS

2026

Catlogação na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária Myrtes Vieira do Nascimento CRB4/1680

S237p Santos, Ricardo Alexandre Gomes dos.
Previsão de nevoeiro no Aeroporto Zumbi dos Palmares com dados METAR e
GOES-16 usando XGBoost / Ricardo Alexandre Gomes dos Santos. – Maceió, 2026.
91 f.: il. color.

Orientação: Heliofábio Barros Gomes.

Coorientação: Glauber Lopes Mariano.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas. .
Instituto de Ciências Atmosféricas. Programa de Pós-Graduação em Meteorologia.
Maceió, 2026.

Referências: f. 81-85.

Anexos: f. 86-91.

1. Nevoeiro. 2. Sensoriamento remoto. 3. Meteorologia aeronáutica.
4. Aprendizado de máquina. 5. Aeroportos – Maceió (AL).

CDU: 551.575

CERTIFICADO DE APRESENTAÇÃO

N.º de ordem: MET-UFAL-MS-216.

**PREVISÃO DE NEVOEIRO NO AEROPORTO ZUMBI DOS PALMARES COM DADOS
METAR E GOES-16 USANDO XGBOOST**

RICARDO ALEXANDRE GOMES DOS SANTOS

Dissertação submetida ao colegiado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

Aprovado pela Banca Examinadora composta por:

Documento assinado digitalmente
 **HELIOFABIO BARROS GOMES**
Data: 23/07/2026 20:54:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Heliofábio Barros Gomes
(Orientador)

Documento assinado digitalmente
 **GLAUBER LOPES MARIANO**
Data: 24/07/2026 08:41:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Glauber Lopes Mariano
(Coorientador)

Documento assinado digitalmente
 **FABRICIO DANIEL DOS SANTOS SILVA**
Data: 23/07/2026 21:57:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Fabrício Daniel dos Santos Silva
(Membro Interno)

Documento assinado digitalmente
 **JORIO BEZERRA CABRAL JÚNIOR**
Data: 23/07/2026 21:45:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Jório Bezerra Cabral Júnior
(Membro Externo)

JULHO/2026

Dedico este trabalho ao Pai Celestial, por ser a luz e a fortaleza que guiaram cada passo desta jornada, concedendo-me sabedoria, perseverança e fé nos momentos de maior desafio.

À minha esposa e aos meus filhos, com todo o meu amor e gratidão, pela compreensão, paciência e apoio inabalável durante este período de intensa dedicação. Este fruto também é de vocês.

Aos mestres e professores do Instituto de Ciências Atmosféricas (ICAT/UFAL), pela excelência no ensino, pela dedicação à formação científica e pelas valiosas contribuições para o desenvolvimento deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, meu Pai Celestial eterno. Força que nos momentos mais difíceis desta caminhada acadêmica me iluminou e me deu o discernimento necessário para caminhar.

À minha família, esposa e filhos Marivânia, Mariana, Ricardo Jr. e Erick, que estiveram e estão sempre me apoiando e incentivando. Amo vocês!

À minha saudosa mãe, Sônia, que sempre acreditou e me apoiou à sua maneira. Com simplicidade e carinho, e muitas vezes com a firmeza e o rigor que a vida nos cobra.

A todos os amigos que de uma forma direta ou indireta, contribuíram para minha jornada acadêmica e para que este trabalho pudesse ser realizado, meus sinceros agradecimentos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Heliofábio Barros Gomes pela parceria, atenção e compreensão desde o início do mestrado.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Glauber Lopes Mariano, pela ajuda e contribuição inestimáveis.

Ao meu amigo, Prof. Dr. Ricardo F. Carlos Amorim, pela presença constante e incentivo ao retorno à academia após um longo período. Gratidão por sua confiança.

À banca examinadora, pela disponibilidade e pelas valiosas sugestões que engrandeceram este trabalho e aprimoraram a qualidade da pesquisa.

Aos colegas de curso e de laboratório, em especial ao João Acyoli, pelos momentos de aprendizado e convivência, que tornaram esta jornada uma rica oportunidade.

Aos professores, servidores e alunos do ICAT, pelo conhecimento transmitido, pelos momentos agradáveis em conversas produtivas e pelo compromisso com a tradicional excelência acadêmica, contribuição decisiva na minha formação.

Este trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

E eu vos digo a vós: Pedi, e dar-se-vos-á; buscai, e achareis; batei, e abrir-se-vos-á. Porque qualquer que pede recebe; E quem busca, acha; e a quem bate abrir-se-lhe-á.

Lucas 10 : 9 - 10

RESUMO

Fenômenos Meteorológicos de Alto Impacto (High Impact Weather - HIW), como o nevoeiro e a baixa visibilidade, representam uma ameaça significativa à segurança operacional e à eficiência econômica da aviação global, sendo uma das principais causas de atrasos no gerenciamento de tráfego aéreo. A aviação moderna, embora altamente segura, permanece vulnerável ao nevoeiro e às nuvens estratificadas de baixos níveis, cuja formação complexa — especialmente em ambientes costeiros tropicais — reduz drasticamente a visibilidade e afeta de maneira crítica a segurança e a eficiência operacional, exigindo métodos robustos de nowcasting capazes de distinguir assinaturas espectrais sutis captadas pelo GOES-16. Nesse contexto, o estudo apresenta uma proposta metodológica e analítica para a detecção e previsão de nuvens baixas e nevoeiro (FLC) no Aeroporto Internacional Zumbi dos Palmares (SBMO), integrando sensoriamento remoto orbital e aprendizado de máquina. A identificação de fenômenos de baixa visibilidade fundamenta-se em uma análise multiespectral utilizando o sensor Advanced Baseline Imager (ABI) do satélite GOES-16. A metodologia emprega as bandas C02 (0,64 μm) e C03 (0,86 μm) para medir a refletância e diferenciar nuvens de gotículas de água da vegetação circundante. Complementarmente, utiliza-se a Diferença de Temperatura de Brilho ($BTD_{DIURNO} = BT_{C07} - BT_{C13}$) para distinguir nuvens baixas de nuvens de gelo, cujos valores se tornam fortemente positivos devido à alta refletância solar das gotículas de água. A detecção baseia-se na variação de emissividade entre o nevoeiro e outras superfícies, calculada pela $BTD_{NOTURNO} = BT_{C07} - BT_{C13}$. Valores negativos, tipicamente entre 0 K e -15 K, caracterizam a presença de água líquida em baixos níveis. Foram desenvolvidas *features* meteorológicas específicas, como o BTD_{Fog_Night} , $BTD_{WaterVapor}$ e $Refl_Diff$, para capturar assinaturas radiativas distintas. A base de dados integrou registros METAR de 2005 a 2025 e dados do GOES-16 de 2017 a 2024. Utilizou-se o classificador XGBoost (*eXtreme Gradient Boosting*), selecionado por seu desempenho superior (ROC AUC de 0,7532). Devido à raridade dos eventos de nevoeiro (0,04% da amostra), aplicou-se a técnica SMOTE (*Synthetic Minority Over-sampling Technique*) e o ajuste de pesos para mitigar o viés do modelo. O limiar de classificação foi calibrado em $\tau = 0,0707$ para priorizar a segurança aeronáutica, minimizando Falsos Negativos em detrimento de uma maior taxa de Falsos Alarmes. O estudo enfatiza a necessidade de “âncoras físicas” para validar os dados orbitais. A depressão do ponto de orvalho ($Spread = T - T_d$) é utilizada como indicador de saturação, com limiar crítico $\leq 2^\circ \text{C}$. Devido à ausência de radiossondagem local, utilizaram-se dados da estação de Natal (SBNT) para caracterizar inversões térmicas e estabilidade atmosférica de escala sinótica na costa nordestina. A análise de casos reais (junho de 2022 e janeiro de 2025) demonstrou que, embora o modelo apresente alta precisão em nevoeiros densos (probabilidade de até 99,14%), ele enfrenta limites físicos em eventos de pequena espessura óptica. Em nevoeiros rasos, a radiação do solo pode mascarar a assinatura espectral das gotículas, resultando em falhas de detecção. Consequentemente, propõe-se um sistema híbrido onde o dado de superfície ($Spread$)

tenha precedência hierárquica sobre o monitoramento orbital em condições de saturação crítica.

Palavras-chave: Nevoeiro; Sensoriamento Remoto; GOES-16; XGBoost; Meteorologia Aeronáutica.

ABSTRACT

High Impact Weather (HIW) phenomena, such as fog and low visibility, represent a significant threat to operational safety and economic efficiency in global aviation, serving as a primary cause of delays in air traffic management. Modern aviation, although highly secure, remains vulnerable to fog and low-level stratified clouds, whose complex formation—particularly in tropical coastal environments—drastically reduces visibility and critically impacts safety and operational efficiency. This necessitates robust nowcasting methods capable of distinguishing subtle spectral signatures captured by the GOES-16 satellite. In this context, the study presents a methodological and analytical proposal for the detection and forecasting of Fog and Low Clouds (FLC/LCF) at Zumbi dos Palmares International Airport (SBMO), integrating orbital remote sensing and machine learning. The identification of low visibility phenomena is grounded in a multispectral analysis using the Advanced Baseline Imager (ABI) sensor of the GOES-16 satellite. The methodology employs bands C02 ($0.64\ \mu\text{m}$) and C03 ($0.86\ \mu\text{m}$) to measure reflectance and differentiate water droplet clouds from surrounding vegetation. Additionally, the Daytime Brightness Temperature Difference ($\text{BTD}_{\text{Daytime}} = \text{BT}_{\text{C13}} - \text{BT}_{\text{C07}}$) is utilized to distinguish low clouds from ice clouds. Detection is further based on emissivity variations between fog and other surfaces, calculated via $\text{BTD}_{\text{Nighttime}} = \text{BT}_{\text{C13}} - \text{BT}_{\text{C07}}$. Negative values, typically ranging between 0 K and -15 K, characterize the presence of liquid water at low levels. Specific meteorological features, such as $\text{BTD}_{\text{Fog_Night}}$, $\text{BTD}_{\text{WaterVapor}}$, and Refl_Diff , were developed to capture distinct radiative signatures. The database integrated METAR records from 2005 to 2025 and GOES-16 data from 2017 to 2024. The XGBoost (eXtreme Gradient Boosting) classifier was selected for its superior performance, achieving a ROC AUC of 0.7532. Due to the extreme rarity of fog events (0.04% of the sample), the SMOTE (Synthetic Minority Over-sampling Technique) and weight adjustment were applied to mitigate model bias. The classification threshold was calibrated at $\tau = 0.0707$ to prioritize aeronautical safety, minimizing False Negatives at the expense of a higher False Alarm rate. The study emphasizes the requirement for “physical anchors” to validate orbital data. Dew point depression ($\text{Spread} = T - T_d$) is used as a saturation indicator, with a critical threshold of $\leq 2^\circ\text{C}$. Due to the absence of local radiosounding, data from the Natal station (SBNT) were used to characterize thermal inversions and synoptic-scale atmospheric stability along the northeastern coast. Analysis of real-world cases (June 2022 and January 2025) demonstrated that while the model exhibits high accuracy in dense fog (probabilities up to 99.14%), it encounters physical limitations in events with low optical thickness. In shallow fog, ground radiation can mask the spectral signature of the droplets, leading to detection failures. Consequently, the study proposes a hybrid system where surface data (Spread) holds hierarchical precedence over orbital monitoring during conditions of critical saturation.

Keywords: Fog; Remote Sensing; GOES-16; XGBoost; Aeronautical Meteorology.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.	Localização da área de estudo destacando o Estado de Alagoas, com destaque para os municípios de Maceió e Rio Largo. Fonte: Elaborado pelo autor (2025).	24
FIGURA 2.	Carta de aeródromo (Aerodrome Chart - ADC) do Aeroporto Internacional Zumbi dos Palmares apresentando as principais estruturas e espaços do aeródromo. Fonte: https://aisweb.decea.mil.br/?i=cartas	26
FIGURA 3.	Carta de Aproximação por Instrumentos (Instrument Approach Chart – IAC) do Aeroporto Internacional Zumbi dos Palmares apresentando o arco DME de 11 milhas náuticas (22,4 km) de raio aeródromo. Fonte: https://aisweb.decea.mil.br/?i=cartas	28
FIGURA 4.	Perímetro da área de estudo. Espaço aéreo de 11 NM (20,4 km) ao redor do aeroporto. Fonte: Elaborado pelo autor (2025).	29
FIGURA 5.	Análise de Importância de Features (XGBoost) com a importância de cada uma das bandas espectrais do ABI. Fonte: Elaborado pelo autor (2025).	48
FIGURA 6.	EDA: Distribuição da Variável Target (Nevoeiro) para o período de 2017 a 2024, onde a classe 0 (não nevoeiro) apresenta uma contagem de 65.641, sendo a classe majoritária com 99,96 %, e a classe 1 (nevoeiro) apresenta uma contagem de 27, sendo a classe minoritária (evento raro) com 0,04%. Fonte: Elaborado pelo autor (2025).	50
FIGURA 7.	Evolução Temporal da visibilidade horizontal horária no Aeroporto Zumbi dos Palmares no dia 8 de junho de 2022. Fonte: Elaborado pelo autor (2025).	57
FIGURA 8.	Diferença de Temperatura de Brilho (BTD) e Reflectância Diferencial para 8 de junho de 2022. Fonte: Elaborado pelo autor (2025).	58
FIGURA 9.	Diagrama termodinâmico SkewT-LogP de Natal (SBNT - 08/06/2022 12Z). Fonte: Wyoming Weather Web acessado em 10 de setembro de 2025, às 21:20.	59

FIGURA 10.	Evolução Temporal da visibilidade horizontal horária no Aeroporto Zumbi dos Palmares no dia 11 de junho de 2022. Fonte: Elaborado pelo autor (2025).	62
FIGURA 11.	Diferença de Temperatura de Brilho (BTD) e Reflectância Diferencial para 11 de junho de 2022. Fonte: Elaborado pelo autor (2025).	63
FIGURA 12.	Diagrama termodinâmico SkewT-LogP de Natal (SBNT - 11/06/2022 12Z). Fonte: Wyoming Weather Web acessado em 10 de setembro de 2025, às 21:20.	64
FIGURA 13.	Evolução temporal da visibilidade horizontal horária no Aeroporto Zumbi dos Palmares no dia 23 de junho de 2022. Fonte: Elaborado pelo autor (2025).	67
FIGURA 14.	Diferença de Temperatura de Brilho (BTD) e Reflectância Diferencial para 23 de junho de 2022. Fonte: Elaborado pelo autor (2025).	68
FIGURA 15.	Diagrama termodinâmico SkewT-LogP de Natal (SBNT - 23/06/2022 12Z). Fonte: Wyoming Weather Web acessado em 10 de setembro de 2025, às 21:20.	69
FIGURA 16.	Evolução temporal da visibilidade horizontal horária no Aeroporto Zumbi dos Palmares no dia 25 de junho de 2022. Fonte: Elaborado pelo autor (2025).	71
FIGURA 17.	Diferença de Temperatura de Brilho (BTD) e Reflectância Diferencial para 25 de junho de 2022. Fonte: Elaborado pelo autor (2025).	72
FIGURA 18.	Diagrama termodinâmico SkewT-LogP de Natal (SBNT - 25/06/2022 12Z). Fonte: Wyoming Weather Web acessado em 10 de setembro de 2025, às 21:20.	73
FIGURA 19.	Diferença de Temperatura de Brilho (BTD) e Reflectância Diferencial para 6 de janeiro de 2025. Fonte: Elaborado pelo autor (2025).	76
FIGURA 20.	Diagrama termodinâmico SkewT-LogP de Natal (SBNT - 06/01/2025 12Z). Fonte: Wyoming Weather Web acessado em 10 de setembro de 2025, às 21:20.	77

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.	Apresentação das bandas do ABI e suas características utilizadas neste estudo. Fonte: O autor (2025).	37
TABELA 2.	O uso da BTDD _{Noturno} como um discriminador eficaz.	42
TABELA 3.	Sequência de Processamento de Dados (Pré-processamento e Features). Este representa as etapas de preparação e unificação dos dados brutos (METAR e GOES-16) até a criação do dataset final pronto para a modelagem.	46
TABELA 4.	Sequência de Treinamento e Otimização do Modelo de Machine Learning. Este detalha o fluxo de trabalho desde a divisão dos dados até a validação final do modelo XGBoost, com foco nas técnicas para lidar com o desbalanceamento de classes.	51
TABELA 5	Resultados da previsão obtidos do modelo XGboost a partir dos dados de superfície (METAR) e do GOES-16 para 8 de junho de 2022 em SBMO.	55
TABELA 6	Resultados da previsão obtidos do modelo XGboost a partir dos dados de superfície (METAR) e do GOES-16 para 11 de junho de 2022 em SBMO.	60
TABELA 7	Resultados da previsão obtidos do modelo XGboost a partir dos dados de superfície (METAR) e do GOES-16 para 23 de junho de 2022 em SBMO.	65
TABELA 8	Resultados da previsão obtidos do modelo XGboost a partir dos dados de superfície (METAR) e do GOES-16 para 25 de junho de 2022 em SBMO.	70

TABELA 9	Resultados da previsão obtidos do modelo XGboost a partir dos dados de superfície (METAR) e do GOES-16 para 6 de janeiro de 2025 em SBMO.	75
----------	---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABI	Advanced Baseline Imager (Imageador de Linha de Base Avançado)
ACHA	ABI Cloud Height Algorithm (Algoritmo de Altura de Nuvens ABI)
ADC	Aerodrome Chart (Carta de Aeródromo)
AOD	Profundidade Óptica de Aerossóis (Aerosol Optical Depth)
ASOS	Automatic Surface Observation System (Sistema Automático de Observação de Superfície)
AutoML	Machine Learning for Optimization (Aprendizado de Máquina para Otimização)
BRAMS	Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (Desenvolvimentos Brasileiros no Sistema de Modelagem Atmosférica Regional)
BTDs/ DTBs	Brightness Temperature Differences (Diferenças de Temperatura de Brilho)

CCL	Cloud Cover Layer (Camada de Cobertura de Nuvens)
CCN	Cloud Condensation Nucleus (Núcleo de Condensação de Nuvens)
CFACT	Cold Fog Amongst Complex Terrain (Nevoeiro Frio Entre Terrenos Complexos)
C-FOG	Toward Improving Coastal Fog Prediction (Melhoria na Previsão de Nevoeiro Costeiro)
CLP	Camada Limite Planetária
CMI	Cloud-Moisture Imagery (Imageamento de Nuvem e Umidade)
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
DTCEA-MO	Destacamento de Controle do Espaço Aéreo - Maceió
FLC	Fog and Low Clouds (Nevoeiro e Nuvem Baixa)
FP	Falso Positivo
FN	Falso Negativo
FY-3D	FengYun-3D (Satélite chinês)
GOES-16	Geostationary Operational Environmental Satellite – 16 (Satélite Ambiental Operacional Geoestacionário – 16)

GOES-R	Série R do Satélite GOES (Série de satélites da qual o GOES-16 faz parte)
HIW	High Impact Weather (Fenômenos Meteorológicos de Alto Impacto)
HRRR	High-Resolution Rapid Refresh (Modelo de Previsão Rápida de Alta Resolução)
IAC	Instrument Approach Chart (Carta de Aproximação por Instrumentos)
IATA	International Air Transport Association (Associação Internacional de Transportes Aéreos)
ICAO	International Civil Aviation Organization (Organização de Aviação Civil Internacional)
ICAT	Instituto de Ciências Atmosféricas
IR	Infrared (Infravermelho)
LCF	Low Clouds and Fog (Nuvens Baixas e Nevoeiro)
LVP	Low Visibility Procedure (Procedimento de Baixa Visibilidade)
LWC	Liquid Water Content (Conteúdo de Água Líquida)
METAR	METeorological Aerodrome Report (Relatório Meteorológico de Aeródromo)

ML	Machine Learning (Aprendizado de Máquina)
MM5	Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (Modelo de Mesoescala Penn State/NCAR de Quinta Geração)
NCEP	National Centers for Environmental Prediction (Centros Nacionais de Previsão Ambiental)
Nd	Numerical droplets (Concentração Numérica de Gotículas)
NIR	Near-Infrared (Infravermelho Próximo)
NM	Nautical Mile (Milha Náutica)
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration (Administração Nacional Oceânica e Atmosférica)
NWP	Numerical Weather Prediction (Previsão Numérica de Tempo)
PAFOG	Airport Fog Forecasting (Previsão de Nevoeiro em Aeroporto)
PC	Proportion Correct (Proporção de Acerto)
PM	Particulate Matter (Material Particulado, geralmente PM _{2.5} ou PM ₁₀)
NWP/PNT	Numerical Weather Prediction (Previsão Numérica de Tempo)
ROC	Receiver Operating Characteristic - Area Under the Curve (Curva

AUC	Característica de Operação do Receptor - Área Sob a Curva)
SBMO	Código ICAO para o Aeroporto Internacional Zumbi dos Palmares
SBNT	Código ICAO para o Aeroporto Internacional Augusto Severo
SBRF	Código ICAO para o Aeroporto Internacional Gilberto Freyre
SBSV	Código ICAO para o Aeroporto Internacional Deputado Luis Eduardo Magalhães
SHAP	Shapley Additive exPlanation (Explicações Aditivas de Shaply)
SIPAER	Sistema de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos
SMOTE	Synthetic Minority Over-sampling Technique (Técnica de Sobre-amostragem Sintética Minoritária)
SPECI	Informe Meteorológico Especial
SVM	Support Vector Machine (Máquina de Vetor de Suporte)
TAF	Terminal Area Forecast (Previsão Terminal de Área)
UAS	Uncrewed Aircraft Systems (Sistemas de Aeronaves Não Tripuladas)
UFAL	Universidade Federal de Alagoas
UTC	Universal Time Coordinated (Tempo Universal Coodenado)

WRF	Weather Research and Forecasting Model (Modelo de Pesquisa e Previsão de Tempo)
XGBoost	eXtreme Gradient Boosting

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	
1.1 O Papel do Sensoriamento Remoto e a Lacuna Metodológica.....	
1.2 Objetivos e Contribuições da Pesquisa (Focado em Machine Learning).....	
1.3 Estrutura do Trabalho.....	
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	
2.1 Fundamentação Teórica da Formação de Nevoeiro e Fatores de Controle.....	
2.2 Microfísica e Gênese do Nevoeiro Costeiro.....	
2.3 O Nevoeiro na Aviação: Impacto, Segurança e Adaptação Climática.....	
2.4 Detecção por Sensoriamento Remoto (GOES-16/ABI) e a Abordagem Espectral.....	
2.5 Modelagem Preditiva Avançada (Machine Learning).....	
2.6 Novas Tecnologias e Assimilação de Dados para Previsão de Nevoeiro.....	
3.1 Definição e Caracterização.....	
3.2 Descrição do Aeroporto.....	
3.3 Códigos METAR.....	
3.4 GOES-16 Sensor Advanced Baseline Imager (ABI) e Dados Utilizados.....	
3.5 Funções Spline e Splines Cúbicas Interpolantes.....	
4 METODOLOGIA.....	
4.1 Detecção de Nuvens Baixas e Nevoeiro (FLC) no Período Diurno.....	
4.2 Detecção de Nuvens Baixas e Nevoeiro (LCF) no Período Noturno.....	
4.3 Metodologia de Dados e Modelagem Preditiva.....	
4.4 Consolidação Cronológica e Interpolação de Falhas.....	
4.5 Aquisição e Engenharia de Recursos do GOES-16 (ABI).....	
4.6 Engenharia de Recursos (Feature Engineering).....	
4.7 Framework de Machine Learning (XGBoost).....	
4.8 Caracterização do Spread Termodinâmico ($T - T_d$).....	
4.9 Uso da Radiossondagem de Natal (SBNT).....	
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO DA MODELAGEM.....	
5.1 Análise da Validação Operacional: Previsão em Lote (junho/2022).....	
5.2 Análise da Validação Operacional: Previsão para 6 de janeiro de 2025.....	
6 CONCLUSÕES.....	
AGRADECIMENTOS.....	
REFERÊNCIAS.....	
ANEXOS.....	

1. INTRODUÇÃO

A aviação moderna é amplamente reconhecida como uma das formas de transporte mais seguras e eficazes, desempenhando um papel fundamental na conectividade global e no desenvolvimento econômico. Contudo, o setor permanece significativamente vulnerável a fatores meteorológicos adversos. Entre esses fatores, o nevoeiro e as nuvens estratificadas de baixos níveis destacam-se como os principais causadores de interrupções, afetando diretamente a segurança e a eficiência das operações aeroportuárias (Rodrigues et al., 2022). A redução crítica da visibilidade impõe restrições operacionais severas, resultando em aumento de atrasos, cancelamentos e impactos econômicos diretos sobre as companhias aéreas e o tráfego de passageiros. Além do expressivo ônus financeiro, a dimensão mais crítica do fenômeno reside no risco iminente à segurança de voo. A perda de referências visuais externas durante as fases de aproximação final, pouso e táxi eleva significativamente a carga de trabalho da tripulação e dos controladores de tráfego aéreo, configurando um cenário propício para desorientação espacial, excursões de pista (*runway excursions*) e incursões em pista (*runway incursions*) devido a falhas de navegação na superfície (FAA, 2020). Fenômenos de pequena espessura óptica ou variações súbitas na densidade do nevoeiro — comuns em regiões tropicais litorâneas devido à rápida interação termodinâmica terra-mar — são particularmente perigosos, pois podem surpreender os pilotos nos segundos cruciais que antecedem o toque.

No âmbito da aviação civil, os impactos da redução da visibilidade horizontal causada por nevoeiros traduzem-se imediatamente em severas restrições operacionais e prejuízos econômicos substanciais. Quando as condições meteorológicas de um aeródromo decaem abaixo dos mínimos operacionais estabelecidos para pousos e decolagens, inicia-se um efeito cascata no gerenciamento do tráfego aéreo regional e global (ICAO, 2019). Os aeroportos são forçados a operar sob *LVP - Low Visibility Procedures* (Procedimento de Baixa Visibilidade), o que reduz drasticamente a capacidade de aceitação de pista, resultando em atrasos prolongados, cancelamentos de voos e desvios de aeronaves para aeroportos alternativos. Para as companhias aéreas, essas interrupções geram custos adicionais massivos relacionados ao consumo extra de combustível em órbitas de espera, taxas de pouso não planejadas em outras localidades, além de custos logísticos com a assistência, alimentação e reacomodação de passageiros (EUROCONTROL, 2021). Tais desafios são agravados por fenômenos como a ilha de

calor urbana e alterações nos padrões de transporte de umidade devido às mudanças climáticas (Gratton et al., 2022).

Diante dessa problemática, o desenvolvimento de ferramentas automatizadas de previsão imediata (*nowcasting*), como a metodologia proposta nesta pesquisa, surge como uma contribuição científica e prática essencial para mitigar tais impactos no Aeroporto Internacional Zumbi dos Palmares (SBMO). Ao integrar dados multiespectrais de alta resolução do satélite GOES-16 com o poder computacional e preditivo do algoritmo XGBoost, este estudo viabiliza a identificação precoce das assinaturas radiativas precursoras da saturação atmosférica. Essa antecipação permite que os órgãos de controle do espaço aéreo (como o DTCEA-MO) e as gerências de operações das companhias aéreas tomem decisões proativas, tais como o ajuste prévio do fluxo de chegada de aeronaves, o planejamento estratégico do combustível de contingência e a otimização da eficiência logística em solo antes que o aeródromo atinja condições críticas de fechamento. Assim, a transição de um modelo de gestão aeroportuária puramente reativo para uma postura preditiva baseada em dados não apenas eleva os níveis de segurança operacional locais, mas também promove uma aviação civil regional mais resiliente e economicamente eficiente. O nevoeiro é um fenômeno perigoso que exige métodos precisos de monitoramento e previsão. Historicamente, a detecção tem evoluído de observações terrestres como o *METEorological Aerodrome Report* ou Relatório Meteorológico de Aeródromo (METAR) para o uso de satélites de observação da Terra, essenciais para cobrir áreas remotas ou marítimas. Apesar dos avanços em algoritmos de limiares (Mahdavi et al., 2020), a previsão de curto prazo em regiões costeiras e tropicais, como o Nordeste brasileiro, permanece um desafio técnico. Isso se deve à complexidade dos mecanismos de formação (predominantemente nevoeiro de advecção em áreas costeiras) e à semelhança espectral diurna entre nevoeiro e outros tipos de nuvens (Gultepe et al., 2019).

1.1 O Papel do Sensoriamento Remoto e a Lacuna Metodológica

A necessidade de previsões imediatas robustas e localizadas reforça o papel do sensoriamento remoto de alta resolução temporal. O satélite *GOES-16 - Geostationary Operational Environmental Satellite – 16* (Satélite Ambiental Operacional Geoestacionário – 16), com seu instrumento *ABI - Advanced Baseline Imager* (Imageador de Linha de Base Avançado), fornece as Diferenças de Temperatura de Brilho (*Brightness*

Temperature Differences - BTDs), que são os principais discriminadores espectrais de nevoeiro.

No entanto, a literatura regional carece de modelos que tratem de forma eficaz dois desafios interligados: a adaptação dos critérios espectrais (BTDs) a um ambiente climático tropical específico e a solução do extremo desbalanceamento de classes inerente ao dataset (nevoeiro é um evento raro), que inviabiliza a aplicação direta de modelos de classificação tradicionais.

Este estudo se propõe a fechar essa lacuna metodológica.

1.2 Objetivos e Contribuições da Pesquisa (Focado em Machine Learning)

Dada a relevância operacional do problema em regiões costeiras, esta pesquisa tem como principal objetivo desenvolver, treinar e validar um modelo de classificação supervisionada baseado em *ML - Machine Learning* (Aprendizado de Máquina) para a previsão de nevoeiro no Aeroporto Internacional Zumbi dos Palmares (SBMO) - Código da *International Civil Aviation Organization* (Organização de Aviação Civil Internacional) - ICAO para o aeroporto, utilizando dados espectrais do satélite GOES-16 e dados de METAR da estação DTCEA-MO (Destacamento de Controle do Espaço Aéreo - Maceió) localizada no próprio aeroporto.

Objetivo Geral: O objetivo geral do estudo consiste em desenvolver uma metodologia preditiva robusta e aplicada voltada para a segurança operacional aeroportuária, com foco central no Aeroporto Internacional Zumbi dos Palmares.

Objetivo Específico: O objetivo específico define-se em:

- **Desenvolver** uma metodologia preditiva integrada unindo dados de sensoriamento remoto orbital (provenientes do satélite GOES-16) e dados meteorológicos de superfície (derivados de relatórios contínuos METAR);
- **Validar** o desempenho e a física da abordagem por meio de algoritmos de Aprendizado de Máquina (*Machine Learning*), com foco no modelo de classificação supervisionada XGBoost;
- **Aplicar** esta modelagem estruturada para a identificação e previsão imediata (*nowcasting*) de nevoeiros e nuvens estratificadas de baixos níveis na região do aeródromo;

- **Propor** uma ferramenta prática e operacional voltada para o apoio à tomada de decisão, visando elevar os níveis de eficiência e segurança para as operações aeronáuticas conduzidas no Aeroporto Internacional Zumbi dos Palmares (SBMO).

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está estruturado em sete capítulos, organizados da seguinte forma: o Capítulo 1 apresenta a introdução e os objetivos da pesquisa. O Capítulo 2 realiza uma revisão bibliográfica sobre a física dos nevoeiros, o uso de sensoriamento remoto para sua detecção e o framework de Machine Learning aplicado à meteorologia. O Capítulo 3 detalha a área do estudo e suas características, descreve detalhadamente os dados utilizados, incluindo o tratamento dos dados METAR, a engenharia de recursos do GOES-16 e as Splines Cúbicas. O Capítulo 4 apresenta a metodologia e o pipeline de modelagem (XGBoost, SMOTE e otimização de limiar). O Capítulo 5 traz os resultados e as discussões acerca dos resultados obtidos. Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões do estudo e as recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Fundamentação Teórica da Formação de Nevoeiro e Fatores de Controle

A formação do nevoeiro é um processo microfísico e sinótico complexo, influenciado por múltiplos fatores de controle. O fenômeno é determinado pela combinação de trocas de calor e umidade na Camada Limite Planetária (CLP), padrões de ventos e advecção de massa de ar úmida (relevante para o contexto costeiro de Maceió) e a presença de Material Particulado (MP) atua como Núcleos de Condensação de Nuvem (*Cloud Condensation Nucleus - CCN*) (Lakra & Avishek, 2022).

O estudo sobre a estimativa de material particulado a partir da Profundidade Óptica de Aerossóis (*Aerosol Optical Depth - AOD*) obtida por satélite corrobora a importância da qualidade do ar como variável meteorológica preditora, sugerindo a necessidade de considerar a influência desses microelementos na nucleação do nevoeiro (Ranjan et al., 2021).

2.2 Microfísica e Gênese do Nevoeiro Costeiro

A compreensão da Microfísica do Nevoeiro Costeiro é crucial para a modelagem preditiva no Aeroporto Zumbi dos Palmares (SBMO), que possui uma localização

litorânea. O nevoeiro costeiro, frequentemente um nevoeiro de Advecção, é regido por processos de nucleação, crescimento de gotículas e interações na Camada Limite Planetária (CLP). De acordo com Fedorova et al. (2012), diversas condições são necessárias para a formação de nevoeiro em Maceió, incluindo: 1) ventos fracos; 2) resfriamento radiativo noturno antes do nascer do sol; 3) a presença de uma inversão térmica próxima à superfície; 4) instabilidade atmosférica acima de 925 hPa; e 5) movimento ascendente fraco nos níveis inferiores da atmosfera e movimento descendente nos níveis médios. Essas condições são tipicamente associadas a nevoeiro do tipo radiação, com influência adicional da umidade oceânica.

Além disso, existem outros mecanismos físicos que contribuem para a adição de mais umidade à formação de nevoeiro na costa norte da BNE (Bacia Nordeste): a) confluência em baixos níveis; b) mudanças na direção do vento; c) precipitação antes do evento; d) evaporação quente da água do mar; e) fluxo de calor latente positivo na região costeira; f) fluxo de calor sensível negativo (o resfriamento do ar gera condensação) (Fedorova et al., 2015; 2016).

O projeto de campanha de campo *Toward Improving Coastal Fog Prediction - C-FOG* (Melhoria na Previsão de Nevoeiro Costeiro), detalhado por Gultepe et al. (2021), enfatiza a importância de observações *in-situ* integradas com dados do GOES-R (série à qual o GOES-16 pertence) para o avanço da compreensão da formação, desenvolvimento e dissipação do nevoeiro em ambientes costeiros. Os resultados microfísicos — como a Concentração Numérica de Gotículas (*Numerical droplets - Nd*) e o Conteúdo de Água Líquida (*Liquid Water Content - LWC*) — são essenciais para validar algoritmos de satélite.

A presença de Núcleos de Condensação de Nuvem (CCN), relacionados à Profundidade Óptica de Aerossóis (*Aerosol Optical Depth - AOD*) e ao Material Particulado (PM_{2.5} e PM₁₀), é um fator de controle fundamental na formação do nevoeiro. A incorporação dessas variáveis, mesmo de forma indireta via *features* de satélite, é justificada para aprimorar a precisão do *nowcasting* (Lakra & Avishek, 2022; Ranjan et al., 2021).

2.3 O Nevoeiro na Aviação: Impacto, Segurança e Adaptação Climática

O nevoeiro e a baixa visibilidade continuam a ser classificados entre os fenômenos meteorológicos de alto impacto mais críticos para a aviação global. Dados históricos indicam que o clima é um fator causal em aproximadamente 30% de todos os acidentes de aviação nos EUA, com o nevoeiro sendo um contribuinte significativo para acidentes fatais (Gultepe et al., 2019; 2023). A visibilidade e o teto são os segundos eventos climáticos mais importantes que afetam as operações, superados apenas pelo vento e turbulência (Gultepe et al., 2023).

Adicionalmente, estudos sobre Mudanças Climáticas (MC) e aviação destacam a necessidade de adaptação de longo prazo. Embora o foco principal da MC na aviação seja a mitigação, há um reconhecimento crescente de que as consequências da mudança climática – que podem alterar a frequência e intensidade de fenômenos extremos, incluindo o nevoeiro – exigem que as partes interessadas do setor desenvolvam planos de adaptação (Ryley et al., 2020).

A baixa visibilidade causada por nevoeiro é um dos maiores contribuintes para atrasos regulamentados de tráfego aéreo, impactando significativamente o rendimento e gerando custos operacionais adicionais. Condições meteorológicas adversas, como nevoeiro, podem restringir a capacidade aeroportuária e causar atrasos substanciais. Na Europa, quase metade dos atrasos de tráfego regulamentado é atribuída ao clima, sendo o impacto mais severo em aeroportos que operam próximos à sua capacidade máxima (Rodríguez-Sanz et al., 2021).

O trabalho de Castro et al. (2021) sobre o efeito de previsões de baixa probabilidade de tempo adverso no planejamento de combustível de voo reforça que a incerteza na previsão (como a incerteza associada ao nevoeiro) leva à adição de combustível extra. A melhoria na precisão da previsão de curto prazo de nevoeiros por meio do seu modelo de XGBoost pode se traduzir diretamente em ganhos de eficiência e redução de custos para as companhias aéreas, um impacto prático e mensurável do seu trabalho.

Os impactos de eventos climáticos extremos, incluindo a alteração na frequência e intensidade de nevoeiros, exigem estratégias de longo prazo na aviação. A elevação do nível do mar, eventos extremos (como inundações) e padrões de temperatura alterados tornam a infraestrutura aeroportuária vulnerável. É crucial que os aeroportos desenvolvam

planos de resiliência e adaptação para mitigar riscos e garantir a continuidade operacional (Marquez, 2024). Este trabalho, ao focar em um *High Impact Weather - HIW* (Fenômenos Meteorológicos de Alto Impacto) em um aeroporto costeiro como o de Maceió (SBMO), contribui para a base de conhecimento necessária para essas estratégias de adaptação local.

2.4 Detecção por Sensoriamento Remoto (GOES-16/ABI) e a Abordagem Espectral

O sensoriamento remoto geostacionário, particularmente com o *Advanced Baseline Imager* (ABI) a bordo do satélite GOES-16, tornou-se a principal ferramenta para a detecção de *LCF - Low Clouds and Fog* (Nuvens Baixas e Nevoeiro) em tempo quase real, devido à sua alta resolução temporal (Mahdavi et al., 2021; Gultepe et al., 2019).

A metodologia de detecção se apoia nos seguintes princípios espectrais:

- **Detecção Noturna (BTD):** Baseada na Diferença de Temperatura de Brilho (BTD) entre as bandas de Infravermelho de Onda Curta (C07 3.9 μm) e Infravermelho de Onda Longa (C13 10.3 μm). Esta diferença explora a menor emissividade da água líquida no canal 3.9 μm , resultando em valores de BTD negativos que indicam a presença de nevoeiro. No período noturno, o índice $BTD_{NOTURNO} = BT_{C07} - BT_{C13}$ permanece o discriminador mais robusto, explorando a diferença de emissividade da água líquida. A utilização da banda C09 (6.9 μm) na engenharia de recursos (como $BTD_{Water\ Vapor}$) é justificada por sua capacidade de monitorar a umidade em níveis mais altos, atuando como um preditor de condições atmosféricas favoráveis à subsidência da umidade e à formação de nevoeiro na camada limite (Gultepe et al., 2023).
- **Detecção Diurna (Algoritmos Baseados em Probabilidade):** Durante o dia, a banda C07 é contaminada pela radiação solar refletida. Isso exige a adoção de algoritmos mais complexos que combinam testes de homogeneidade espacial, diferença de temperatura e proxy de gotículas pequenas, utilizando as bandas visíveis (C02/C03) e infravermelho próximo (*Near-Infrared - NIR*) (Mahdavi et al., 2021). A abordagem diurna frequentemente se baseia em métodos probabilísticos para diferenciar o nevoeiro (gotículas pequenas) de nuvens de gelo ou do solo. Durante o dia, a detecção é complexa devido à contaminação solar na banda de 3.9 μm . Estudos recentes validam o uso de Técnicas de Classificação Supervisionada como Máquina de Vetor de Suporte (*Support*

Vector Machine - SVM) e Redes Neurais para diferenciar nevoeiro marinho e nuvens baixas de outras classes. Wang et al. (2023), ao utilizar o satélite FY-3D, demonstraram que o desempenho ótimo na detecção diurna depende da integração de:

- Diferenças de Temperatura de Brilho (BTDs).
- Características de Textura (homogeneidade espacial).
- Parâmetros Auxiliares.

Mahdavi et al. (2021) aplicaram um Algoritmo Baseado em Probabilidade que utiliza testes de proxy de gotículas pequenas, homogeneidade espacial e diferença de temperatura com o GOES-16.

2.5 Modelagem Preditiva Avançada (Machine Learning)

O uso de algoritmos de Machine Learning, como o XGBoost, é a tendência atual para lidar com a alta dimensionalidade e a não-linearidade dos dados meteorológicos. A aplicação de ML/IA é sugerida para aprimorar os algoritmos de visibilidade e as parametrizações microfísicas em modelos de Previsão Numérica do Tempo (*Numerical Weather Prediction - NWP*), especialmente em cenários complexos. Projetos como o *Cold Fog Amongst Complex Terrain - CFACT* (Nevoeiro Frio Entre Terrenos Complexos), embora focado em nevoeiro frio, destacam a necessidade de desenvolver métodos de assimilação e análise de dados de alta resolução para modelos NWP sub-quilométricos, e sugerem a integração de observações detalhadas para melhorar a previsão de visibilidade (Gultepe et al., 2023).

A aplicação de ML para monitoramento de nevoeiro oceânico usando dados de satélites geoestacionários como o HIMAWARI-8, um satélite da mesma classe do GOES-16 que demonstrou superioridade sobre produtos operacionais clássicos em termos de F1 Score e *Proportion Correct* - PC (Proporção de Acerto). O modelo XGBoost com canais de Infravermelho (IR) foi capaz de corrigir perfeitamente o nevoeiro oceânico dia e noite, destacando o potencial desta metodologia para detecção contínua (Sim & Im, 2023). A pesquisa de Sim & Im (2023) introduz a Interpretação do Modelo Baseada em *SHapley Additive exPlanations - SHAP* (Explicações Aditivas de Shaply), uma técnica avançada que permite quantificar a contribuição de cada *feature* (como as Diferenças de Temperatura de Brilho, ou BTDs para a decisão final do classificador.

2.6 Novas Tecnologias e Assimilação de Dados para Previsão de Nevoeiro

Avanços na tecnologia de observação indicam novas direções para aprimorar os Modelos de Previsão Numérica do Tempo (Numerical Weather Prediction - NWP) e a previsão de nevoeiro. O uso de Sistemas *Uncrewed Aircraft Systems* - UAS (Sistemas de Aeronaves Não Tripuladas) para obter observações direcionadas de temperatura e umidade em baixos níveis, como demonstrado em vales fluviais, mostrou-se promissor. A assimilação desses dados melhora as previsões de modelos NWP (como o *High-Resolution Rapid Refresh* - HRRR (Modelo de Previsão Rápida de Alta Resolução), sugerindo um futuro em que a detecção remota por satélite (GOES-16) pode ser complementada por observações *in-situ* de baixo custo e alta resolução para maior precisão (Pinto et al., 2024).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Definição e Caracterização

O trabalho consiste em analisar a formação e a duração dos nevoeiros e nuvens estratificadas no Aeroporto Internacional Zumbi dos Palmares localizado a $-9,51080$ de latitude e $-35,79170$ de longitude, utilizando dados de sensoriamento remoto e METAR para, a partir destes dados, propor uma ferramenta operacional para apoio à tomada de decisão em operações aeroportuárias na região entre os municípios de Maceió e Rio Largo (FIGURA 1).

FIGURA 1 - Localização da área de estudo destacando o Estado de Alagoas, com destaque para os municípios de Maceió e Rio Largo.

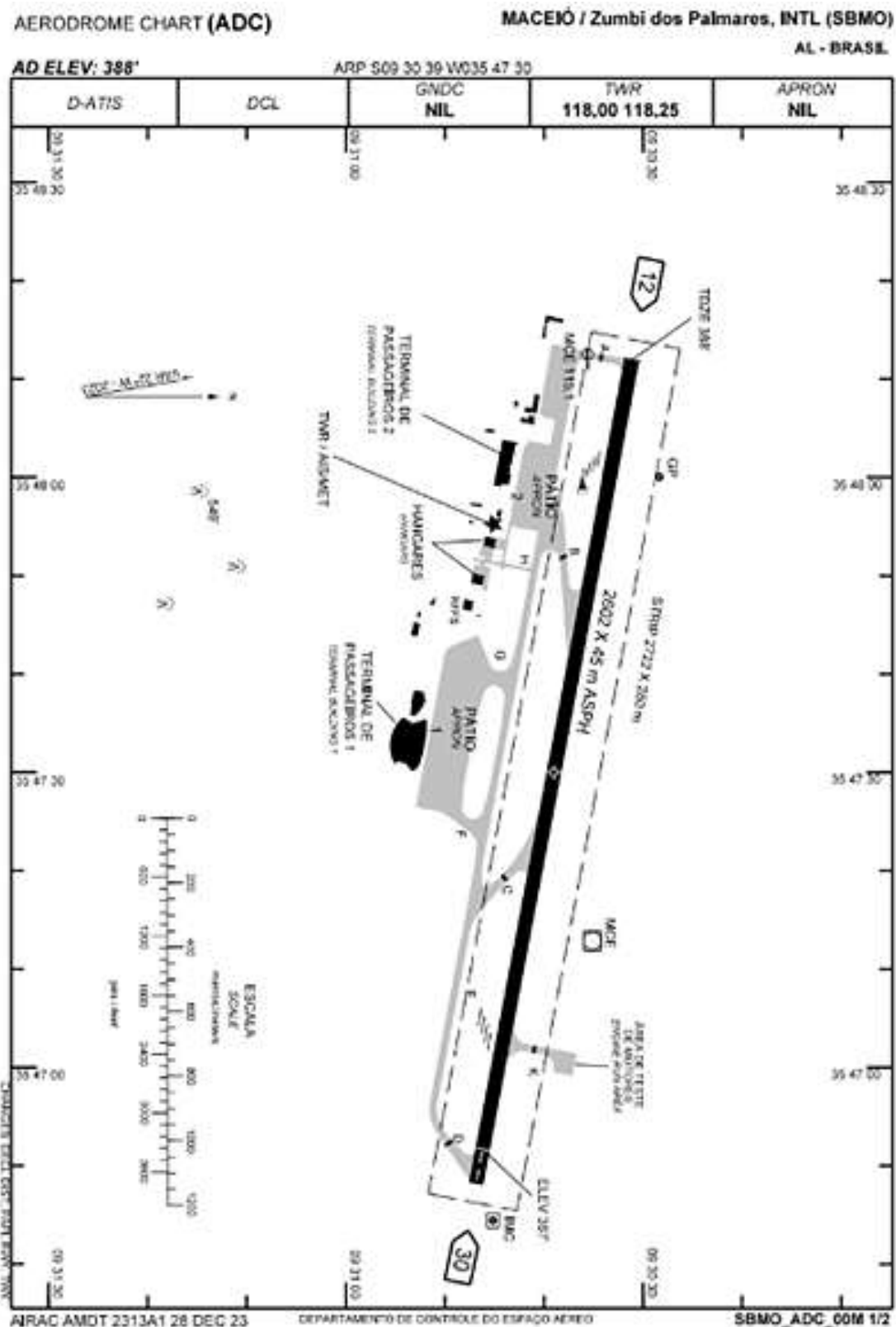


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3.2 Descrição do Aeroporto

O Aeroporto Internacional Zumbi dos Palmares, que atende a região de Maceió – AL, com as siglas MCZ, pela International Air Transport Association - IATA (Associação Internacional de Transportes Aéreos), e SBMO pela International Civil Aviation Organization - ICAO (Organização da Aviação Civil Internacional). Está localizado no estado de Alagoas, especificamente na região metropolitana de Maceió, situando-se a aproximadamente 22 quilômetros do centro da Capital alagoana. A área total do sítio aeroportuário é de 4,857 milhões de metros quadrados, o sítio conta com 2 pátios, 1 para aviação regular (comercial) com 45.729 m² de área contando com 12 posições, e 1 para aviação geral com 37.716 m² de área com 12 posições e 1 heliponto (FIGURA 2). Para dar acesso às aeronaves, existem 4 pontes de embarque. As dimensões da pista, atualmente são de 2.604 metros de comprimento por 45 metros de largura, essas medidas passaram a existir em 2005 com a conclusão do projeto de expansão do comprimento da pista, que antes eram de 2.200 metros de comprimento por 45 metros de largura. Vale ressaltar que antes desse ano, ele era conhecido pelo nome de Aeroporto Campo dos Palmares. O terminal de passageiros possui uma área de 22.000 m² e uma capacidade de atender 5,3 milhões de passageiros por ano (AENA BRASIL, 2025).

FIGURA 2 - Carta de aeródromo (Aerodrome Chart - ADC) do Aeroporto Internacional Zumbi dos Palmares apresentando as principais estruturas e espaços do aeródromo.



Fonte: <https://aisweb.decea.mil.br/?i=cartas>

Utilizando a metodologia proposta, o estudo analisará a ocorrência de nevoeiros e de nuvens estratificadas baixas com base abaixo da Decision Altitude - DA, ou Altitude Decisão de 588 pés (179,2 m) e visibilidade de 1200 m se a aeronave realiza aproximação

pelo ILS CAT 1 conforme consta na Instrument Approach Chart - IAC, ou Carta de Aproximação por Instrumentos (FIGURA 3), num raio de 11 milhas náuticas (20,4 km) ao redor da pista de pouso do aeroporto, observando principalmente as operações na pista 12 (Figura 4). O período de estudo estará concentrado para ensaios de previsão no mês de junho de 2022, mês com ocorrência significativa de nevoeiros e de nebulosidade baixa registradas, segundo dados METAR obtidos da estação DTCEA-MO para este estudo. Os dados de METAR cobriram o período de 01 de janeiro de 2005 até 31 de dezembro de 2024, e os dados do satélite GOES-16 cobriram o período de 10 de julho de 2017 a 30 de dezembro de 2024.

FIGURA 3 - Carta de Aproximação por Instrumentos (Instrument Approach Chart – IAC) do Aeroporto Internacional Zumbi dos Palmares apresentando o arco DME de 11 milhas náuticas (20,4 km) de raio aeródromo.

**INSTRUMENT APPROACH
CHART (IAC)**

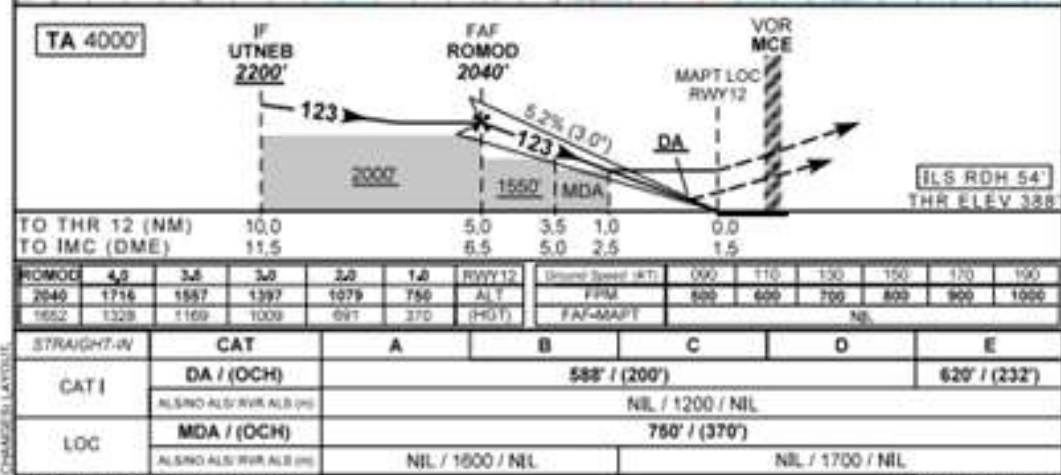
MACEIÓ / Zumbi dos Palmares, INTL (SBMO)

AD ELEV: 388'

ILS Z or LOC Z RWY 12

D-ATIS NIL	APP MACEIÓ 119.25 128.90	TWR MACEIÓ 118.00 118.25	GNDC NIL
ILS/DME IMC 109.70 MHz	FINAL CRS 123°	FAF 2040'	LOC MDA / (OCH) 750' / (370')
CAT I DA / (OCH) REFER TO MNM			

APCH Perdida: Subir para 4000'. Manter proa 123° até 1800'. Após, curvar à ESQUERDA, proa 345° para interceptar RDL 055 do VOR MCE até VAKIK para espera.
Missed APCH: Climb to 4000'. Maintain heading 123° until 1800'. After, turn LEFT, heading 345° to intercept 055 RDL MCE VOR to VAKIK for holding.

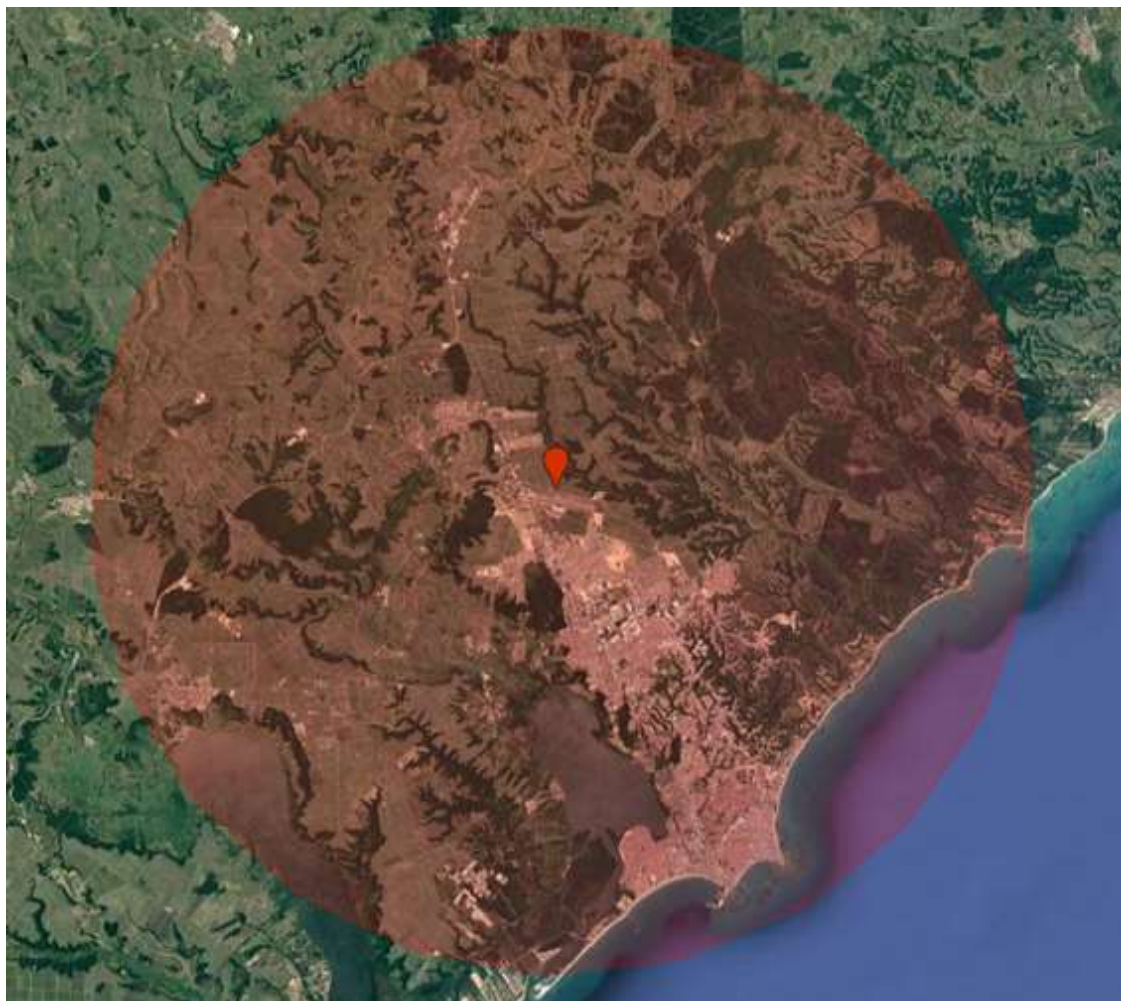


AIRAC AMDT 2412A1 28 NOV 24

SBMO_IAC_00H 1/1
IAC ILS Z or LOC Z RWY 12

Fonte: <https://aisweb.decea.mil.br/?i=cartas>

FIGURA 4 - Perímetro da área de estudo. Espaço aéreo de 11 NM (20,4 km) ao redor do aeroporto.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3.3 Códigos METAR

Conforme Bianchini (2017) METAR (*METeorological Aerodrome Report*) é o informe meteorológico regular de aeródromo. Utilizado para a descrição completa das condições meteorológicas observadas em um aeródromo. É reportado em intervalos regulares de uma hora (10:00Z, 11:00Z, 12:00Z....).

O METAR contém as seguintes informações na sequência:

- Grupos de identificação;
- Vento à superfície;
- Visibilidade horizontal;

- Alcance visual na pista (quando houver);
- Tempo presente;
- Nuvens (ou visibilidade vertical, se for o caso);
- Temperaturas do ar e do ponto de orvalho;
- Pressão atmosférica (QNH); e
- Informações suplementares de inclusão condicional sobre tempo recente, cortante do vento, temperatura da superfície do mar, estado do mar e estado da pista.

O METAR constitui o relatório meteorológico padrão para aeródromos, cuja elaboração pode ocorrer de forma automatizada, manual — por meio de profissionais de meteorologia — ou em um modelo híbrido, no qual os dados coletados automaticamente são validados ou complementados tecnicamente. A periodicidade de atualização das estações meteorológicas é, predominantemente, de trinta minutos. Embora o formato codificado do METAR possa ser percebido como anacrônico diante das tecnologias contemporâneas, sua manutenção justifica-se pela alta densidade de informações transmitidas com o mínimo de caracteres, além da rigorosa padronização internacional que visa mitigar ambiguidades interpretativas. Do ponto de vista da eficiência de dados, a compilação de um ciclo global abrangendo aproximadamente 4.200 estações de monitoramento resulta em um volume de tráfego de apenas 3 MB, otimizando o uso das redes de comunicação aeronáutica. Entretanto, o uso de METARs codificados impõe limitações operacionais e cognitivas. A visualização imediata das informações é frequentemente dificultada pela necessidade de decodificação e pela variabilidade das unidades de medida, que podem exigir conversões imediatas conforme a jurisdição. Adicionalmente, o sistema integra cerca de cinquenta códigos distintos para fenômenos meteorológicos e condições de pista; a baixa frequência de uso de parte dessa codificação no cotidiano operacional pode comprometer a prontidão da memória do operador (anexo 1). Outro fator de complexidade reside na utilização do Tempo Universal Coordenado (UTC). Para operadores em regiões geograficamente distantes do meridiano de referência, a conversão para a hora local demanda esforço computacional e aumenta a suscetibilidade a erros. Por fim, o METAR não fornece de forma explícita os componentes vetoriais do

vento (proa, cauda ou través). Consequentemente, a determinação desses valores exige que o piloto ou o despachante realize cálculos trigonométricos ou utilize regras heurísticas, o que limita a agilidade na avaliação das condições operacionais de pouso e decolagem (Fonte: <https://metar-taf.com/pt?c=-93706.-362872.10&hl=SBMO>).

De acordo com o manual FCA-105-16 CÓDIGOS METEOROLÓGICOS METAR E SPECI (2025), do Comando da Aeronáutica, os códigos METAR deverão ter as seguintes interpretações:

GRUPOS DE IDENTIFICAÇÃO

Codificação

METAR SBGL 131000Z

Descodificação

METAR – nome do código; indicador de localidade da OACI – SBGL; e dia do mês e horário da observação, em horas e minutos UTC, seguidos, sem espaço, da letra indicadora Z – 131000Z.

VENTO À SUPERFÍCIE

Codificação

METAR SBGL 131000Z 31015G27KT 280V350

NOTA: A direção média do vento à superfície, em graus, sempre é informada em relação ao Norte verdadeiro, arredondada para a dezena de graus mais próxima à direção de onde sopra o vento.

Descodificação

Normalmente, teremos um grupo de cinco algarismos indicando a direção média e a velocidade média do vento, seguido pelas abreviaturas padrões da OACI: KT (nó) ou MPS (metros/segundo). Os três primeiros algarismos indicam a direção e os dois últimos, a velocidade.

Ex.: 31015KT

NOTA: O Brasil adotou o nó (KT) como unidade de velocidade do vento.

Nos casos em que a velocidade máxima do vento exceda a velocidade média em 10 kt ou mais, esta será informada pela letra G (gusts – rajadas) seguida do valor da rajada, imediatamente após a velocidade média, seguido, sem espaço, pela abreviatura KT.

Ex.: 31015G27KT

Se a variação total da direção do vento for de 60° ou mais, porém inferior a 180°, e a velocidade média for de 3 kt ou mais, serão informadas as duas direções extremas, no sentido horário, com a letra V inserida entre as duas direções.

Ex.: 31015G27KT 280V350

Casos especiais

a) vento calmo – velocidade inferior a 1 kt, é codificado 00000, seguida, sem espaço, pela abreviatura KT;

Ex.: 00000KT

b) vento variável – será informado como VRB quando: - a variação total da direção for de 60° ou mais, porém inferior a 180°, com velocidade média inferior a 3 kt; e

Ex.: VRB02KT - a variação da direção for de 180° ou mais, com qualquer valor de velocidade média, ou, ainda, quando for impossível determinar uma única direção; e

Ex.: VRB23KT

c) vento de 100 kt ou mais – serão precedidos da letra P e informados como P99KT. Ex.: 240P99KT (direção 240°, velocidade de 100 kt ou mais).

VISIBILIDADE HORIZONTAL

É informada sempre a visibilidade horizontal predominante e, quando for o caso, a visibilidade horizontal mínima.

Codificação

METAR SBGL 131000Z 31015G27KT 8000

METAR SBGL 131000Z 31015G27KT 0350

Descodificação

Um grupo de quatro algarismos informa a visibilidade horizontal predominante expressa em metros.

Ex.: Valor de visibilidade de 8 km é informado como 8000, e de 350 m, 0350.

Além da visibilidade predominante, será informada a visibilidade mínima e sua direção geral em relação ao aeródromo, indicando um dos pontos cardeais ou colaterais, quando esta for diferente da visibilidade predominante, e: a) inferior a 1.500 metros; ou b) inferior a 50% da predominante e inferior a 5.000 metros.

Ex.: 8000 1400S (8.000 metros de predominante e 1.400 metros no setor sul) 6000 2800NE (6.000 metros de predominante e 2.800 metros no setor nordeste)

NOTA 1: Quando for observada visibilidade mínima em mais de uma direção, será informada a direção mais importante para as operações.

NOTA 2: Quando a visibilidade for de 10 km ou mais, será informada como 9999.

NOTA 3: Quando a visibilidade horizontal não for a mesma em diferentes direções, variando rapidamente, e a visibilidade predominante não puder ser determinada, o grupo VVVV será utilizado para informar a visibilidade mínima, sem indicação da direção.

ALCANCE VISUAL NA PISTA (RVR)

Durante os períodos em que a visibilidade horizontal predominante ou o alcance visual na pista (RVR), no caso de uma ou mais pistas disponíveis para pouso, for inferior a 2.000 metros, um ou mais grupos são incluídos no informe. O grupo é formado pela letra R seguida do designador de pista e de uma barra (/), seguida do RVR em metros.

Ex.: R10/1100 (RVR na pista 10, 1.100 metros)

O valor de 50 metros é considerado como o limite inferior e o valor de 2.000 metros como o limite superior para as avaliações do alcance visual na pista.

Quando a visibilidade no aeródromo for menor que 2.000 metros e o valor do RVR for maior que o máximo que pode ser medido, será informado como P2000.

Ex.: R10/P2000 (RVR na pista 10, maior que 2.000 metros)

Quando o RVR for menor que o mínimo valor possível de ser medido, será informado como M0050.

Ex.: R10/M0050 (RVR na pista 10, menor que 50 metros)

Quando os valores do RVR, durante o período de 10 minutos que antecede a observação, mostrarem uma clara tendência a aumentar ou diminuir, tal que a média durante os primeiros 5 minutos varie de 100 metros ou mais da média dos 5 minutos seguintes do período, serão indicados por i = U ou i = D para valores crescentes e decrescentes do RVR, respectivamente. Quando não forem observadas mudanças significativas, utilizar-se-á i = N. Se não for possível determinar a tendência, “i” será omitido.

Ex.: R12/1100U (RVR na pista 12, 1.100 metros com tendência a aumentar)

Quando os valores do RVR, durante o período de 10 minutos precedentes à hora da observação, em 1 minuto, diferirem do valor médio em mais de 50 metros ou em mais de 20%, qualquer que seja o maior, os valores (média mínima e média máxima, em 1 minuto)

serão informados, respectivamente, conforme exemplo abaixo, em vez da média dos 10 minutos.

Ex.: R10/1000V1500

As pistas paralelas são distinguidas adicionando-se a DRDR as letras L, C ou R, que indicam, respectivamente, pista paralela esquerda, central ou direita.

Ex.: R09L/1000

TEMPO PRESENTE

Codificação

METAR SBGL 131000Z 31015G27KT 280V350 4000 1800N R10/P2000 +TSRA

Descodificação

Quando existir um fenômeno a ser reportado, o tempo presente será codificado considerando cada coluna da Tabela 4678 (Anexo A).

Ex.:

existe trovoada..... TS

com precipitação..... RA

é forte +

a codificação resulta em: +TSRA

A intensidade será indicada somente para precipitação, precipitação associada a pancadas e/ou trovoadas, nuvens funil, tempestades de poeira ou de areia. Esta é indicada por sinal apropriado de acordo com a Tabela 4678.

Se forem observados mais de um fenômeno, serão codificados grupos separados, até o máximo de três.

Nevoeiro (FG) será reportado quando a visibilidade horizontal predominante for reduzida por gotículas d'água ou cristais de gelo, para menos de 1.000 metros; Nevoeiro baixo (MIFG) será informado quando a visibilidade aparente através da camada de nevoeiro for menor que 1.000 metros e a visibilidade acima de 2 metros do solo for de 1.000 metros ou mais; e Bancos de nevoeiro (BCFG) e nevoeiro parcial (PRFG) serão informados quando parte do aeródromo estiver coberta, a visibilidade aparente através da camada de nevoeiro for menor que 1.000 metros e o nevoeiro se estender até 2 metros acima do nível do solo;

NUVENS (OU VISIBILIDADE VERTICAL)

Codificação

METAR SBGL 131000Z 31015G27KT 280V350 4000 1800N R10/P2000 +TSRA
FEW005 FEW010CB SCT018 BKN025

Descodificação

Poucas nuvens a 500 pés FEW005 Poucas nuvens CB a 1.000 pés FEW010CB Nuvens esparsas a 1.800 pés Céu nublado a 2.500 pés SCT018 BKN025

Sob circunstâncias normais, os grupos de nuvens são formados por seis dígitos.

Os três primeiros dígitos indicam a quantidade de nuvens:

- a) 1 a 2 oitavos são informados como FEW (Few) – poucas nuvens;
- b) 3 a 4 oitavos são informados como SCT (Scattered) – nuvens esparsas;
- c) 5 a 7 oitavos são informados como BKN (Broken) – céu nublado; e
- d) 8 oitavos são informados como OVC (Overcast) – céu encoberto.

Os três últimos algarismos indicam a altura da base da nuvem em centenas de pés, utilizando-se incrementos de 100 pés (30 metros), até o limite de 10.000 pés (3.000 metros).

Tipo de nuvem

Os tipos de nuvens são informados somente para as seguintes nuvens convectivas significativas:

- a) cumulonimbus, indicado por CB; e
- b) cumulus congestus, indicado por TCU.

Grupos de nuvens

O grupo de nuvens pode ser repetido para informar diferentes camadas de nebulosidade; não sendo superior a três, exceto quando existirem nuvens convectivas significativas, que sempre serão informadas.

Os grupos de nuvens são reportados na ordem crescente de altura, conforme os seguintes critérios:

- a) 1º grupo – o mais baixo independentemente da quantidade – FEW, SCT, BKN ou OVC;
- b) 2º grupo – o próximo, seguinte em altura, com 3/8 ou mais – SCT, BKN ou OVC;
- c) 3º grupo – o próximo, seguinte em altura, com 5/8 ou mais – BKN ou OVC; e
- d) grupos adicionais: nuvens convectivas significativas (CB ou TCU), se já não tiverem sido informadas num dos três grupos anteriores.

CAVOK

A abreviatura CAVOK substituirá as informações sobre visibilidade, alcance visual na pista, tempo presente, nuvens e visibilidade vertical quando ocorrerem, simultaneamente, no momento da observação, as seguintes condições:

- a) visibilidade: 10 km ou mais, em todo o horizonte;
- b) nenhuma nuvem de significado operacional; e
- c) nenhum fenômeno meteorológico significativo (ver Tabela 4678).

TEMPERATURAS DO AR E DO PONTO DE ORVALHO

Codificação

METAR SBGL 131000Z 31015G27KT 280V350 4000 1800N R10/P2000 +TSRA
FEW005 FEW010CB SCT018 BKN025 10/03

Descodificação

As temperaturas do ar e do ponto de orvalho são informadas em graus Celsius inteiros.

Ex.:

Temperatura do ar 9,5°C

Temperatura do Ponto de Orvalho 3,3°C

Será informado como 10/03.

Os valores de temperatura de -9°C a +9°C vão precedidos de zero e as temperaturas negativas são precedidas pela letra “M”.

Ex.: +9°C é informado como 09. -9°C é informado como M09.

Temperaturas com valores de 0,5°C são arredondadas para o grau inteiro imediatamente superior.

Ex.: +11,5°C é informado como 12. -7,5°C é informado como M07.

PRESSÃO ATMOSFÉRICA (QNH)

Codificação

METAR SBGL 131000Z 31015G27KT 280V350 4000 1800N R10/P2000 +TSRA
FEW005 FEW010CB SCT018 BKN025 10/03 Q0995 FCA 105-3 / 2012 17/26

Descodificação

O grupo indica o valor de QNH arredondado para o hectopascal (hPa) inteiro inferior mais próximo. O grupo é formado pela letra Q seguida, sem espaço, por quatro algarismos.

Ex.: QNH de 1.012,4 hPa é reportado como Q1012.

A unidade prescrita pela OACI para pressão atmosférica é o hectopascal.

Se o valor do QNH for inferior a 1.000 hPa, será precedido por 0 (zero).

Ex.: QNH de 995,6 hPa é reportado como Q0995.

3.4 GOES-16 Sensor Advanced Baseline Imager (ABI) e Dados Utilizados

O satélite GOES-16 (GOES-East), pertencente à série GOES-R, é um componente essencial do Segmento Espacial do Sistema, operando em órbita geoestacionária a 75° Oeste. Seu principal instrumento de imageamento é o *Advanced Baseline Imager* (ABI), um radiômetro multiespectral que captura imagens da Terra e da atmosfera em 16 bandas espectrais, abrangendo o visível, o infravermelho próximo e o infravermelho térmico. Essa capacidade multiespectral, combinada com alta resolução temporal (imagens a cada 5–10 minutos no modo operacional), é crucial para o monitoramento de fenômenos atmosféricos de curta duração, como nevoeiros (NOAA, 2023). A detecção de nuvens baixas e nevoeiros (*Low Clouds and Fog – LCF*) pelo ABI é baseada na combinação de bandas que exploram as diferentes propriedades ópticas das gotículas de água em suspensão (TABELA 1).

TABELA 1 - Apresentação das bandas do ABI e suas características utilizadas neste estudo.

Canal (Banda)	Comprimento de Onda (µm)	Descrição e Aplicação	Resolução Espacial
C02	0.64 (Vermelho Visível)	REFLECTÂNCIA no visível. Utilizada para medir a refletância solar das nuvens durante o dia, ajudando a distinguir entre nevoeiro/nuvens baixas e o solo.	0.5 km
C03	0.86 (Infravermelho Próximo)	REFLECTÂNCIA da fase da nuvem. Sensível à presença de gotículas de água líquida (nevoeiro/nuvens baixas), complementando o C02.	1 km
C07	3.9 (Infravermelho de Onda Curta)	Janela de Infravermelho Curto. Usada na detecção de <i>hotspots</i> e, crucialmente, na formação de Índices de Nevoeiro. Possui sensibilidade à radiação térmica e à refletância solar.	2 km
C13	10.3 (Infravermelho Longo)	Janela de Infravermelho Longo. Mede a Temperatura de Brilho (BT) do topo da nuvem ou da superfície, essencial para o contraste térmico.	2 km

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A detecção de nevoeiros noturnos e nuvens baixas (FLC) é primariamente realizada através da técnica de Diferença de Temperatura de Brilho (BTD). Esta técnica explora as propriedades radiométricas distintas das nuvens líquidas nas bandas de infravermelho de onda curta (C07, em $3,9 \mu\text{m}$) e infravermelho de onda longa (C13, em $10,3 \mu\text{m}$).

O princípio fundamental baseia-se na variação da emissividade da água líquida entre esses dois canais durante o período noturno:

- **Banda C13** ($10,3 \mu\text{m}$): As gotículas de água líquida possuem alta emissividade (próxima a 1,0), comportando-se como um corpo negro ideal. Assim, o canal capta a temperatura radiativa real do topo da nuvem ou do solo.
- **Banda C07** ($3,9 \mu\text{m}$): As gotículas de água líquida apresentam menor emissividade radiativa. Devido a essa sub emissão volumétrica, o sensor orbital detecta menos radiação e calcula uma temperatura de brilho falsamente mais fria (menor) do que a real.

Essa resposta espectral assimétrica faz com que a Temperatura de Brilho do canal C07 (BT_{C07}) seja inferior à do canal C13 (BT_{C13}). Consequentemente, ao aplicar a equação (1), o resultado assume valores negativos na presença de gotículas de água líquida em baixos níveis:

$$BTD = BT_{C07} - BT_{C13} \quad (1)$$

- **Nevoeiro / Nuvens Baixas:** O BT_{C07} apresenta-se inferior ao BT_{C13} devido à baixa emissividade das gotículas de água em ondas curtas, resultando em valores de BTD consistentemente negativos, tipicamente situados entre 0 K e -15 K.
- **Nuvens Altas (Ex: Cirrus):** Compostas por cristais de gelo, exibem alta opacidade e comportamento radiativo oposto, fazendo com que o BTD tenda a valores próximos de zero ou positivos.
- **Superfície Limpa (Solo):** Apresenta emissividade alta e semelhante em ambos os canais, resultando em valores de BTD tipicamente positivos ou nulos.

Essa diferença permite a discriminação entre nuvens baixas e outras características da superfície e nuvens, sendo a base para a maioria dos algoritmos de detecção de LCF (NOAA, 2023).

O Algoritmo da Camada de Cobertura de Nuvens (CCL), embora seja um produto derivado do ABI, atua como um sistema de pós-processamento que utiliza os resultados de outros algoritmos como o ABI Cloud Height Algorithm - ACHA (Algoritmo de Altura de Nuvens ABI) para calcular a fração de cobertura de nuvens em camadas atmosféricas predefinidas (SFC-FL050, FL050-FL100, etc.). Sua aplicação é relevante para o monitoramento da distribuição vertical das nuvens e para o acompanhamento da fração de cobertura entre diferentes níveis de voo, fornecendo uma visão mais estruturada da baixa atmosfera do que a simples máscara de nuvens (NOAA, 2023).

3.5 Funções Spline e Splines Cúbicas Interpolantes

A função spline é uma técnica de interpolação que utiliza polinômios de baixo grau definidos em subintervalos delimitados por nós, garantindo suavidade e evitando oscilações indesejadas. Splines, especialmente as cúbicas, garantem continuidade não só da função, mas também de suas derivadas, resultando em curvas suaves mesmo em grandes conjuntos de dados. Ao dividir o domínio em subintervalos, splines evitam as oscilações que surgem ao usar um único polinômio de alto grau para todo o intervalo. Splines, como as B-splines, são bem condicionadas numericamente e permitem ajustes locais sem afetar toda a curva, tornando-as ideais para dados reais e aplicações práticas. Cada subintervalo entre nós recebe um polinômio de baixo grau (geralmente cúbico), e as condições de suavidade são impostas nos nós para garantir transições suaves. B-splines são amplamente utilizadas devido à sua simplicidade computacional e capacidade de impor suavidade de forma implícita (Dyer & Dyer, 2001; Esmaeili et al., 2019). Técnicas modernas permitem o uso de splines em múltiplas dimensões, mantendo as propriedades de suavidade e precisão (Esmaeili et al., 2019; Levin & Gruberger, 2025).

Dada uma função $f(x)$ tabelada em pontos $x_0 < x_1 < \dots < x_n$, uma spline interpolante de grau p ($Sp(x)$) deve satisfazer:

- a) Em cada subintervalo $[x_i, x_{i+1}]$, $Sp(x)$ é um polinômio de grau p ;
- b) $Sp(x)$ é contínua e tem derivadas contínuas até ordem $p-1$ em $[x_0, x_n]$;
- c) $Sp(x_i) = f(x_i)$ (interpola os dados nos nós).

A spline cúbica interpolante ($S_3(x)$) é uma técnica em que cada subintervalo entre nós é modelado por um polinômio de grau ≤ 3 . Suas principais vantagens são a suavidade e a redução de oscilações indesejadas, tornando-a amplamente utilizada em engenharia, ciência e processamento de sinais. A spline cúbica garante que a função interpolada, sua primeira derivada ($S_3'(x)$) e sua segunda derivada ($S_3''(x)$) sejam contínuas em todo o intervalo. Isso evita picos ou mudanças bruscas nos nós, proporcionando uma transição suave entre os subintervalos. Essa propriedade é fundamental para aplicações que exigem curvas suaves, como modelagem geométrica e reconstrução de funções a partir de dados experimentais. Comparada a polinômios de alto grau, a spline cúbica apresenta muito menos oscilações (efeito Runge), mesmo com muitos pontos de interpolação. Isso ocorre porque cada polinômio atua localmente, reduzindo o risco de comportamento errático em todo o domínio. Além disso, a precisão da spline cúbica pode ser aumentada com mais nós, sem comprometer a estabilidade (Eremeev & Rackovich, 2021; Eremeev, 2022; Poulinakis et al., 2023).

Para construir $S_3(x)$, definem-se polinômios $S_k(x) = a_k (x - x_k)^3 + b_k (x - x_k)^2 + c_k (x - x_k) + d_k$ em cada subintervalo $[x_{k-1}, x_k]$. Os coeficientes a_k, b_k, c_k, d_k são determinados por:

- a) Interpolação: $S_3(x_i) = f(x_i)$;
- b) Continuidade: $S_3(x)$, $S_3'(x)$, e $S_3''(x)$ devem ser contínuas nos nós.

Isso gera um sistema com $4n$ coeficientes, sujeito a $4n - 2$ condições, deixando 2 graus de liberdade.

As condições adicionais para fechar o sistema podem ser:

- a) Spline natural: $S_3''(x_0) = S_3''(x_n) = 0$ (polinômios lineares nos extremos);
- b) Derivadas segundas iguais nos extremos: $g_0 = g_1, g_n = g_{n-1}$;
- c) Condições de contorno fixas: Impor valores para $S_3'(x_0)$ e $S_3'(x_n)$.

O método é amplamente usado em meteorologia para interpolar dados discretos (como séries temporais de temperatura ou pressão), garantindo suavidade e evitando erros

de super ajuste comuns em polinômios de alto grau. Funções Splines foram usadas neste estudo no preenchimento das falhas de obtenção de dados de refletância.

4 METODOLOGIA

4.1 Detecção de Nuvens Baixas e Nevoeiro (FLC) no Período Diurno

No período diurno, a identificação de FLC utilizando o Advanced Baseline Imager (ABI) do GOES-16 é realizada por meio de uma abordagem multiespectral que explora as diferenças na refletância e na temperatura de brilho das gotículas de água.

Na discriminação pelo Albedo (Visível e NIR), a banda C02 (0.64 μm , Visível Vermelho) é utilizada para medir a refletância solar das nuvens, que é tipicamente alta para nevoeiros de água líquida. A banda C03 (0.86 μm , Infravermelho Próximo) complementa esta análise, sendo utilizada para diferenciação Superfície-Nuvem, uma vez que gotículas de água refletem fortemente no C03, enquanto a vegetação (comum nas áreas próximas ao Aeroporto Zumbi dos Palmares) apresenta baixa refletância devido à absorção. E Controle de Qualidade, pois a análise do albedo nessas bandas ajuda a refinar os limiares e a evitar falsos positivos de superfícies claras.

Apesar da banda C07 (3.9 μm) sofrer contaminação solar (radiação solar refletida), a diferença de temperatura de brilho (BTD) que utiliza esta banda continua sendo fundamental. Para o dia, a principal técnica quantitativa utilizada para diferenciar nuvens baixas (gotículas pequenas) de nuvens de gelo (cristais maiores) é baseada na Diferença de Temperatura de Brilho (BTD) entre as bandas C07 e C13:

$$\text{BTDDiurna} = \text{BTC13} - \text{BTC07} \quad (2)$$

A física aplicada diz que durante o dia, o C07 é muito mais sensível ao tamanho da partícula do que o C13. Nuvens com partículas pequenas (nevoeiro) são menos eficientes em absorver a radiação solar no 3.9 μm (C07) do que no 10.3 μm (C13), fazendo com que o C07 apareça mais frio que o C13 no modo BTD diurno após a correção da componente solar. Os valores limiares de BTDDiurna são combinados com limiares de refletância (C02/C03) para isolar pixels que satisfazem as condições de alta refletância e as características microfísicas de nuvens de água líquida de topo baixo.

Em resumo, a metodologia diurna para o Aeroporto Zumbi dos Palmares combinou limiares de albedo, utilizando C02 e C03 para assegurar a presença de um corpo altamente

refletor (nuvem); limiares de microfísica, utilizando o BTDDiurna (C13 - C07) para confirmar a fase líquida da nuvem (nevoeiro/nuvem baixa); e limiares de temperatura, utilizando a temperatura absoluta da banda C13 (BTC13) para garantir que a nuvem seja "quente" (topo baixo), distinguindo-a de nuvens convectivas altas e frias.

4.2 Detecção de Nuvens Baixas e Nevoeiro (LCF) no Período Noturno

A detecção de Nevoeiro e Nuvens Baixas (LCF) durante a noite é fundamentalmente baseada na Diferença de Temperatura de Brilho (BTD) entre as bandas de infravermelho de onda longa (C13 – 10,3 μm) e infravermelho de onda curta (C07 – 3,9 μm).

No período noturno, a ausência de radiação solar refletida no canal C07 (3,9 μm) permite que a BTD revele as diferenças de emissividade entre o nevoeiro/nuvem de água líquida e outras superfícies (solo limpo ou nuvens de gelo).

Em um cenário de nevoeiro, as gotículas de água líquida são emissores mais fracos no canal C07 (3,9 μm) do que no C13 (10,3 μm). Essa diferença microfísica faz com que a Temperatura de Brilho da banda C07 seja aparentemente mais baixa (fria) do que a da banda C13. O índice primário para detecção noturna é dado pela equação (1):

Em condições de nevoeiro ou nuvens baixas de água líquida, esta diferença resulta em valores negativos de BTDDiurna, tipicamente na faixa de $0 \text{ K} > \text{BTD} > -15 \text{ K}$ (Tabela 2).

TABELA 2 - O uso da BTDNoturno como um discriminador eficaz.

Classe de Interesse	Sinal no BTDNoturno ($\text{BTC}_{07} - \text{BTC}_{13}$)	Comportamento Radiativo
Nevoeiro / Água Líquida	Negativo (Sinal Forte)	Baixa emissividade em 3,9 μm
Superfície Limpa	Positivo (Emissividade similar)	Emissividade similar em ambos os canais
Nuvens Altas (Gelo)	Próximo de Zero ou Positivo	Opacidade e espalhamento diferenciados

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A BTD (Brightness Temperature Difference) não é uma temperatura absoluta, mas sim uma diferença/variação entre duas temperaturas. No Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade padrão para variação de temperatura é o Kelvin. Como a escala

Kelvin e a escala Celsius são lineares e têm o mesmo intervalo de graduação, uma variação de 1 K é exatamente igual a uma variação de 1°C. Portanto, dizer uma diferença de "-15 K" ou "-15 °C" numericamente significa a mesma coisa. Os sensores orbitais (como o ABI do GOES-16) extraem as Temperaturas de Brilho (Tb) nativamente em Kelvin a partir da radiação. Mantém-se o resultado em K para evitar que o leitor confunda a diferença entre canais (ex: 5 K) com a temperatura real do ar à superfície (que costumamos escrever em °C).

Para a modelagem preditiva com XGBoost, o recurso BTDDoturno é introduzido no Feature Vector (X) como um poderoso preditor que captura diretamente as características radiativas do nevoeiro no Aeroporto Zumbi dos Palmares durante a noite, um período de alta frequência desses eventos. A aplicação de limiares dinâmicos (embutidos no treinamento do modelo) sobre esta feature permite uma classificação robusta e otimizada para a segurança operacional.

4.3 Metodologia de Dados e Modelagem Preditiva

A base de dados terrestre foi constituída a partir dos Relatórios Meteorológicos de Rotina (METAR) do Aeroporto Internacional Zumbi dos Palmares (SBMO), abrangendo o período de 1º de janeiro de 2005 a 31 de agosto de 2025. O processo de tratamento, realizado em ambiente Python (utilizando pandas, numpy e re), foi estruturado em etapas sequenciais para garantir a uniformidade e a integridade da série temporal.

As mensagens METAR fragmentadas em planilhas originais (.xlsx) foram reconstruídas utilizando Expressões Regulares (regex). O padrão METAR foi utilizado como token de início para concatenar e validar o registro completo. Os campos relevantes foram extraídos via regex otimizado, incluindo HORA UTC, Direção e Velocidade do Vento, Fenômenos Meteorológicos, Nebulosidade e, crucialmente, a Visibilidade Horizontal (inicialmente em metros), além das temperaturas do ar e do ponto de orvalho.

A Visibilidade (m) foi convertida para quilômetros (km). Valores iguais ou superiores a 9999 foram normalizados para 10 km, representando visibilidade superior ao limite operacional. Temperaturas e Ponto de Orvalho foram convertidas para valores numéricos, tratando a notação M (minus) para números negativos.

A definição da variável resposta (y), ou Ground Truth para a classificação binária foi estabelecido a partir da visibilidade horizontal:

$$y_i = \begin{cases} 1 & \text{se } VISIBILIDADE < 1000 \text{ m} \\ 0 & \text{se } VISIBILIDADE \geq 1000 \text{ M} \end{cases} \quad (3)$$

No preenchimento de falhas, as lacunas nas séries temporais das variáveis numéricas (visibilidade, temperatura, pressão) foram preenchidas por Interpolação Spline Cúbica (método spline, ordem 3). Este método, matematicamente definido pela continuidade das derivadas primeira e segunda nos nós $\left(S'(x_i^-) = S'(x_i^+) \text{ e } S''(x_i^-) = S''(x_i^+)\right)$, garante uma reconstrução suave e fisicamente coerente dos dados, essencial para séries meteorológicas.

O processo de tratamento e consolidação dos dados METAR foi desenvolvido com o objetivo de obter uma base contínua, padronizada e confiável de observações meteorológicas do Aeroporto Zumbi dos Palmares (SBMO), em Maceió – AL, abrangendo o período de 1º de janeiro de 2005 a 31 de agosto de 2025. A metodologia adotada compreendeu etapas sucessivas de reconstrução das mensagens originais, extração, padronização de parâmetros e preenchimento de falhas.

Todas as etapas de processamento foram executadas em ambiente Google Colab, utilizando a linguagem Python com as bibliotecas pandas (para manipulação de dados), numpy e re (para uso de expressões regulares).

Os boletins METAR foram obtidos inicialmente em formato de planilhas (.xlsx) anuais com estruturas heterogêneas. Em um primeiro estágio, o texto de cada aba mensal foi lido integralmente. Utilizando Expressões Regulares (Regex), as mensagens METAR fragmentadas nas células foram reconstruídas e concatenadas a partir da identificação do token “METAR”, gerando uma sequência ordenada de mensagens brutas prontas para análise.

Após a reconstrução, expressões regulares específicas foram aplicadas para extrair os principais parâmetros meteorológicos de interesse, garantindo a uniformidade e o tratamento de variações de formato. Foram extraídos o Código da Estação (SBMO), Data e Hora UTC (convertida para formato ISO), Direção/Velocidade do Vento, Visibilidade Horizontal, Fenômenos Significativos (FG e CAVOK), Cobertura de Nuvens e dados termodinâmicos (Temperatura/Ponto de Orvalho) e Pressão (hPa). A visibilidade horizontal, originalmente em metros, foi convertida para quilômetros.

4.4 Consolidação Cronológica e Interpolação de Falhas

Concluído o processamento de cada ano, os dados anuais foram consolidados em um único DataFrame cronológico (METAR_UNIFICADO), garantindo a sequência temporal completa dos registros de 2005 a 2025 e a conversão da coluna de data e hora para o tipo datetime para manipulação precisa.

Para corrigir lacunas pontuais nas séries temporais numéricas (visibilidade, temperatura, ponto de orvalho e pressão), foi aplicado o método de Interpolação por Splines Cúbicas.

Este método ajusta funções polinomiais de terceiro grau entre observações conhecidas, assegurando a continuidade das derivadas de primeira e segunda ordem nos nós (x_i), o que resulta em uma curva suave e fisicamente coerente, fundamental para séries meteorológicas.

$$S(x_i) = y_i, S'(x_i^-) = S'(x_i^+), S''(x_i^-) = S''(x_i^+) \quad (4)$$

A interpolação foi implementada via `pandas.interpolate` (`method = 'spline'`, `order = 3`), com extrapolação controlada para ambas as direções (`limit direction = 'both'`).

O produto final do processo, conforme a sequência mostrada na TABELA 3, foi a base `metar_unificado_2005_2024.xlsx`, com registros cronologicamente organizados, padronizados e com alta completude, servindo como o Ground Truth (Variável Resposta) para a modelagem de Machine Learning.

TABELA 3 - Sequência de Processamento de Dados (Pré-processamento e Features). Este representa as etapas de preparação e unificação dos dados brutos (METAR e GOES-16) até a criação do dataset final pronto para a modelagem.

Etapa	Ação (Procedimento)	Resultado
Início	Coleta de Dados Brutos	Arquivos METAR (Dados in-situ) e GOES-16 (Dados espectrais, CMI).
1	Definição da Variável Target	Criação da variável binária Y (Nevoeiro -> 1 se Visibilidade < 1000m, Não Nevoeiro -> 0).
2	Sincronização Temporal	Aplicação de <code>pd.merge_asof</code> para associar METARs aos dados GOES-16 com tolerância de ± 5 minutos.
3	Limpeza de Dados	Tratamento e remoção de valores nulos (NaNs) e <i>outliers</i> .
4	Engenharia de Recursos (BTDs)	Criação de features cruciais: $BDT_{FogNight}$ (C07-C13), <code>BTD_WaterVapor</code> (C13-C09), e <code>Refl_Diff</code> (C03-C02).
5	Análise de Desbalanceamento	Confirmação do extremo desbalanceamento: 99.96% (Classe 0) vs 0.04% (Classe 1).
FIM	Dataset Final de Treinamento	Dados unificados, limpos, com BTDs calculados e <i>Target</i> definido.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.5 Aquisição e Engenharia de Recursos do GOES-16 (ABI)

Os dados de sensoriamento remoto foram obtidos do satélite GOES-16 (GOES-East), utilizando o instrumento *Advanced Baseline Imager* (ABI), para o período de 2017 a 2024. O foco foi nas bandas *Cloud-Moisture Imagery* - CMI (Imageamento de Nuvens e Umidade) com alta relevância para a detecção de nevoeiro.

Foram utilizadas as bandas C02 (Visível Vermelho, $0.64\mu\text{m}$) e C03 (NIR, $0.86\mu\text{m}$) para análise diurna de reflectância. As bandas C07 (Infravermelho de Onda Curta, $3.9\mu\text{m}$) e C13 (infravermelho de onda longa, $10.3\mu\text{m}$) foram selecionadas por sua sensibilidade à fase da água e ao tamanho das partículas, sendo a base dos algoritmos padrão de detecção noturna de nevoeiro e nuvens baixas.

A fusão dos datasets GOES-16 e METAR foi realizada com o critério de vizinhança mais próxima, estabelecendo uma tolerância máxima de 5 minutos entre os registros, resultando no *dataset* unificado para o treinamento.

O intervalo temporal para os dados de reflectância e temperaturas de brilho (bandas CMI do GOES-16) utilizados no treinamento do modelo abrange aproximadamente 7 anos e está limitado pela disponibilidade dos dados do satélite (que começou a operar em 2017) e pelo período em que foi feita a coleta.

A data inicial e final do *dataset* de refletâncias (bandas CMI_C02 a CMI_C13), antes da sincronização com os dados METAR, é a seguinte: de 10 de julho de 2017, às 21:15:38 a 30 de dezembro de 2024, às 23:10:20. Esta é a extensão temporal dos dados de satélite que foram combinados com os dados METAR (que começam em 2005, mas só são utilizáveis para esta análise a partir de 2017). O modelo foi treinado, portanto, com observações GOES-16 dentro deste período.

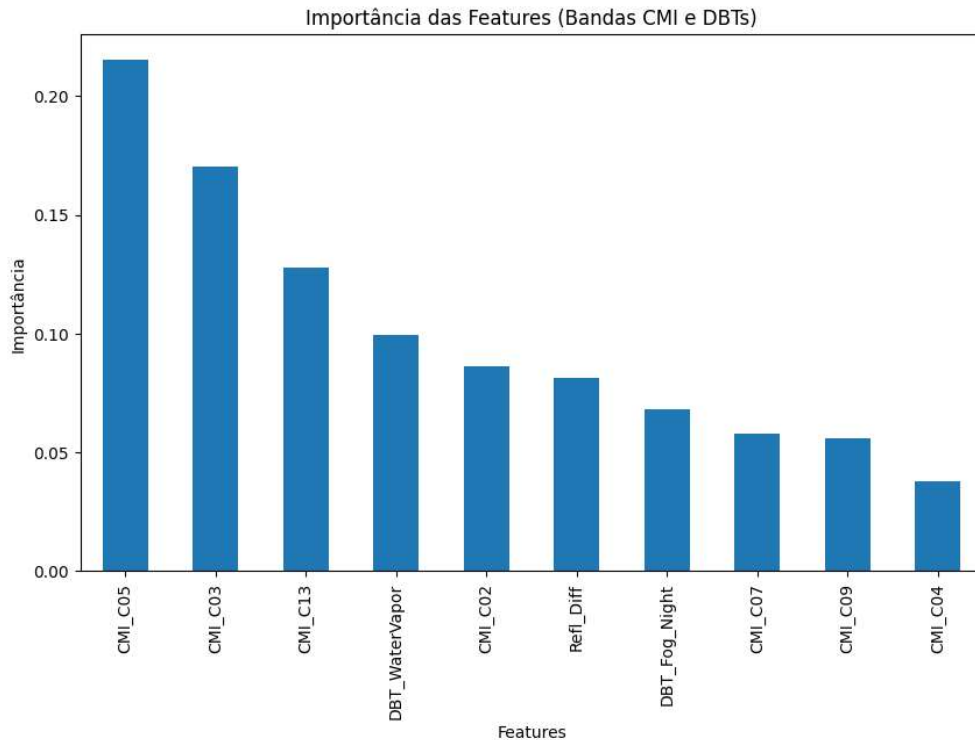
4.6 Engenharia de Recursos (Feature Engineering)

Para extrair o poder discriminativo espectral do sensor ABI/GOES-16, o conjunto de preditores originais (X) foi enriquecido por meio da Engenharia de Recursos (*Feature Engineering*), com a criação de três novas variáveis meteorologicamente estruturadas a partir das bandas de reflectância e temperatura de brilho (em Kelvin):

- BTD Noturno para Nevoeiro ($BDT_{FogNight}$): Desenvolvida para cenários noturnos e crepusculares, esta *feature* explora a assimetria de emissividade das gotículas de água líquida entre as bandas de $10,3 \mu\text{m}$ (alta emissividade) e $3,9 \mu\text{m}$ (baixa emissividade), resultando em valores caracteristicamente negativos na presença de nevoeiro.
- BTD de Vapor d'Água ($BDT_{WaterVapor}$): Calculada pela diferença entre as bandas C13 e C09 ($CMI_{C13} - CMI_{C09}$), com a finalidade de monitorar a dinâmica de umidade nos níveis médios e altos da troposfera litorânea.
- Diferença de Refletância Diurna ($Refl. Diff.$): Definida pela subtração das bandas do infravermelho próximo e do visível vermelho ($CMI_{C03} - CMI_{C02}$), voltada para aperfeiçoar a discriminação diurna entre o topo de nuvens líquidas e a vegetação continental circundante ao aeródromo.

Com o intuito de validar a relevância dessas novas variáveis criadas antes da etapa de balanceamento e modelagem final, aplicou-se o algoritmo classificador XGBoost para mapear o ganho de informação relativo de cada atributo. A contribuição individual das 10 *features* satelitárias resultantes é apresentada na Figura 5.

FIGURA 5 - Análise de Importância de Features (XGBoost) para o conjunto de variáveis espectrais do ABI.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Conforme observado na Figura 5, a análise de relevância revelou que todas as três *features* construídas artificialmente ($BDT_{WaterVapor}$, $Refl. Diff.$ e $BDT_{FogNight}$) integraram o espectro de decisão do modelo, justificando a sua implementação metodológica. A variável $BDT_{WaterVapor}$ posicionou-se como o quarto atributo mais relevante (contribuição de $\sim 0,10$).

Embora a literatura aponte a técnica de BTd noturna como o principal pilar físico para a detecção de nevoeiros, a variável $BDT_{FogNight}$ ocupou a sétima posição geral no modelo global. Esse comportamento é reflexo direto do extremo desbalanceamento do banco de dados (onde eventos de nevoeiro representam apenas 0,04% da amostra). Dado que a esmagadora maioria dos pixels corresponde a períodos de céu limpo ou nebulosidade diurna comum, o algoritmo priorizou as bandas de reflectância diurna CMI_{C05} ($1,61 \mu m$) e CMI_{C03} ($0,86 \mu m$) devido à capacidade síncrona de discriminar o solo litorâneo e descartar falsos alarmes em larga escala.

O extremo desbalanceamento entre as classes representou o principal desafio metodológico deste estudo. Um classificador ingênuo que simplesmente predissesse a ausência perpétua do fenômeno atingiria uma acurácia global superior a 99,96% (FIGURA 6). No entanto, essa métrica torna-se inútil para a avaliação de desempenho real

em contextos de segurança aeronáutica. Sem intervenção, o algoritmo XGBoost seria severamente enviesado em direção à classe majoritária ('Não Nevoeiro'), falhando em mapear as assinaturas espectrais e microfísicas sutis dos escassos 27 eventos de nevoeiro registrados. Essa assimetria distributiva justifica e fundamenta a aplicação da técnica de superamostragem SMOTE (*Synthetic Minority Over-sampling Technique*) associada ao ajuste de pesos (*scale_pos_weight*), deslocando o foco de avaliação do modelo para métricas holísticas e direcionadas à classe minoritária, como o *Recall* (capacidade de capturar os eventos críticos) e a área sob a curva ROC (ROC AUC).

Adicionalmente, cumpre ressaltar que a manutenção da série temporal completa — englobando todos os meses do ano — foi deliberadamente adotada em detrimento de uma abordagem restrita exclusivamente ao período climatologicamente mais chuvoso da costa leste nordestina (maio, junho, julho e agosto). Essa decisão fundamenta-se em critérios operacionais e estatísticos. Sob a ótica operacional da aviação civil, o gerenciamento de tráfego aéreo exige um sistema preditivo com disponibilidade contínua (24 horas, 365 dias por ano); omitir os meses de transição ou o período seco anularia a capacidade do modelo de detectar nevoeiros extemporâneos ou de radiação, cuja ocorrência, embora raríssima fora do inverno local, possui um potencial disruptivo ainda maior por surpreender a gestão aeroportuária. Do ponto de vista do aprendizado de máquina, restringir o *dataset* aos meses chuvosos privaria o algoritmo de aprender a variabilidade de fundo (*background*) da superfície e da atmosfera do Aeroporto Zumbi dos Palmares durante o restante do ano. O XGBoost necessita ser exposto a cenários de céu limpo, forte resfriamento radiativo noturno na época seca e advecção de umidade em meses marginais para calibrar seus limiares de decisão de forma robusta, minimizando a taxa de Falsos Alarmes sem comprometer a integridade e a generalização global do sistema preditivo.

FIGURA 6 - EDA: Distribuição da Variável *Target* (Nevoeiro) para o período de 2017 a 2024, onde a classe 0 (não nevoeiro) apresenta uma contagem de 65.641, sendo a classe majoritária com 99,96 %, e a classe 1 (nevoeiro) apresenta uma contagem de 27, sendo a classe minoritária (evento raro) com 0,04%.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.7 Framework de Machine Learning (XGBoost)

O problema de previsão de nevoeiro foi tratado como uma classificação binária supervisionada utilizando o classificador XGBoost (*eXtreme Gradient Boosting*).

A escolha do XGBoost foi validada pelo seu desempenho superior, alcançando um ROC AUC Score de 0.7532 no conjunto de teste, indicando a maior capacidade intrínseca de discriminação das classes em relação a outros modelos avaliados. Devido ao extremo desbalanceamento (0.04% de eventos de Nevoeiro no teste), a técnica SMOTE (*Synthetic Minority Over-sampling Technique*) foi aplicada exclusivamente ao conjunto de treinamento. Esta reamostragem sintética foi essencial para que o modelo aprendesse as características da classe minoritária, prevenindo que o classificador convergisse apenas para a classe majoritária (Não Nevoeiro). A estratégia de minimização de risco operacional (Falsos Negativos) foi alcançada pela otimização do limiar de classificação τ . O valor de $\tau = 0.0707$ foi definido ao maximizar o F1-Score no conjunto de validação. O modelo final de classificação é dado por:

$$Previs\tilde{o} = \begin{cases} 1 & \text{se } P(X) \geq 0.0707 \\ 0 & \text{se } P(X) < 0.0707 \end{cases}$$

A matriz de confus\~{o} otimizada revelou o *trade-off* aceito: um *Recall* de 0.20 (detec\~{c}\~{o} de 1 dos 5 eventos), garantido pela aceita\~{c}\~{o} de 349 Falsos Alarmes (FP), refletindo a prioriza\~{c}\~{o} da seguran\~{c}a aeron\~{a}utica (minimizar Falsos Negativos) sobre a efici\~{e}ncia operacional (minimizar Falsos Positivos).

A modelagem com o XGBoost com ajuste de peso, apresentou um peso do evento de nevoeiro de 2386.91, garantindo o sucesso no treinamento do modelo (TABELA 4).

TABELA 4 - Sequ\~{e}ncia de Treinamento e Otimiza\~{c}\~{o} do Modelo de Machine Learning. Este detalha o fluxo de trabalho desde a divis\~{a}o dos dados at\~{e} a valida\~{c}\~{o} final do modelo XGBoost, com foco nas t\~{e}cnicas para lidar com o desbalanceamento de classes.

Etap	A\~{c}\~{a}o (Procedimento)	Coment\~{a}rio/Foco
In\~{i}cio	Dataset Final	Entrada de features X e target Y.
1	Divis\~{a}o Estratificada (Split)	Separa\~{c}\~{o} em X_{Treino} , Y_{Treino} e X_{Teste} , Y_{Teste} (e.g., 80/20%), mantendo a propor\~{c}\~{o} de Nevoeiro.
2	Balanceamento de Treinamento (SMOTE)	Aplica\~{c}\~{o} do SMOTE (Synthetic Minority Over-sampling Technique) APENAS no conjunto de Treinamento para gerar dados sint\~{e}ticos e igualar as classes.
3	Sele\~{c}\~{a}o e Treinamento do Modelo	Treinamento do XGBoost Classifier utilizando X_{Treino_SMOTE} e Y_{Treino_SMOTE} .
4	Avalia\~{c}\~{a}o da Discrimina\~{c}\~{a}o	C\~{a}lculo do ROC AUC Score no conjunto de Teste Original X_{Teste} . (Melhor ROC AUC alcan\~{c}ado: 0.7532.
5	Otimiza\~{c}\~{a}o do Limiar (τ)	Busca por (e.g., 0.0707) que maximize o F1-Score no conjunto de Teste.
6	Valida\~{c}\~{a}o das M\~{e}tricas de Detec\~{c}\~{a}o	C\~{a}lculo da Matriz de Confus\~{a}o e do Recall no conjunto de Teste Original, usando o otimizado.
7	An\~{a}lise de Import\~{a}ncia de Features	Gera\~{c}\~{a}o do gr\~{a}fico de <i>Feature Importance</i> (XGBoost) para identificar os preditores espectrais mais relevantes (CMI/BTDs).
8	Teste de Previs\~{a}o em Tempo Real	Aplica\~{c}\~{a}o do modelo (XGBoost + $\tau = 0.0707$) a uma data espec\~{i}fica para valida\~{c}\~{a}o pr\~{a}tica e operacional.

FIM	Resultados Publicáveis	Matriz de Confusão Final, ROC AUC, e lista de Features Mais Importantes.
-----	------------------------	--

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.8 Caracterização do Spread Termodinâmico ($T - T_d$)

A análise da saturação da camada limite planetária (CLP) será fundamentada no cálculo da depressão do ponto de orvalho (*spread*), definida como a diferença aritmética entre a temperatura do ar (T) e a temperatura do ponto de orvalho (T_d), expressa pela equação:

$$\text{Spread} = T - T_d \quad (6)$$

Esta variável é um indicador direto da umidade relativa e do quão próximo o ar está da saturação. No contexto deste estudo, o *spread* cumpre três funções metodológicas essenciais:

1. **Indicador de Saturação e Condensação:** Fisicamente, a formação de hidrometeoros (nevoeiro) exige que a parcela de ar atinja o estado de saturação (100% de umidade relativa), o que ocorre quando $T \approx T_d$. Para fins de modelagem e diagnóstico, será adotado o limiar crítico de $\text{Spread} \leq 2^\circ \text{C}$ para a identificação de condições favoráveis à condensação superficial, conforme preconizado pela literatura meteorológica aeronáutica.

2. **Validação de Assinaturas de Sensoriamento Remoto:** O *Spread* será utilizado como o principal validador terrestre para as Diferenças de Temperatura de Brilho (BTD) obtidas pelo sensor ABI do GOES-16. Visto que o satélite observa o topo das camadas nubladas, o *Spread* de superfície permite distinguir entre:

- **Nevoeiro Real:** Caracterizado por BTD negativo e $\text{Spread} \leq 2^\circ \text{C}$ (saturação acoplada ao solo).
- **Nuvens Baixas (Falso Positivo):** Caracterizado por BTD negativo, mas com $\text{Spread} > 3^\circ \text{C}$, indicando que a base da nuvem está elevada e a camada de superfície permanece subsaturada.

3. **Feature de Restrição para Aprendizado de Máquina:** No desenvolvimento do modelo preditivo (XGBoost), o *Spread* será incorporado como um parâmetro de penalização ou variável de entrada. Esta integração visa mitigar o viés sazonal do modelo, fornecendo uma "âncora física" que impede a geração de alarmes de nevoeiro em condições de alta temperatura e baixa umidade, comuns em períodos de verão na costa nordestina.

4.9 Uso da Radiossondagem de Natal (SBNT)

A decisão de utilizar dados de radiossondagem (*Upper Air*) da estação de Natal (SBNT) em detrimento das estações mais próximas, como Maceió (SBMO), Recife

(SBRF) ou Salvador (SBSV), é fundamentada em critérios rigorosos de disponibilidade de dados e representatividade climatológica em bases de dados abertas.

A principal limitação para a análise do perfil vertical em Maceió (SBMO) é a ausência de uma estação de radiossondagem ativa e documentada nas bases de dados globais (como as mantidas pela NOAA/Wyoming que alimentam a biblioteca *Siphon/MetPy*). O METAR fornece apenas dados de superfície; para o perfil de pressão, temperatura e umidade em altitude, a radiossondagem é indispensável.

Embora Recife (SBRF) e Salvador (SBSV) sejam geograficamente mais próximas de Maceió do que Natal (SBNT), as tentativas de acesso às suas bases de dados históricas (para os anos de 2024 e 2025, e até mesmo para 2022) falharam repetidamente.

O erro "*No data available*" ou "*Server Error (503)*" indica uma das seguintes situações, que são limitações da fonte externa, não do método:

- Descontinuidade na Série Histórica: As estações podem ter descontinuado ou interrompido temporariamente os lançamentos de balões em rotina 00 Z / 12 Z em certos períodos.
- Falha no Reporte: Os dados foram coletados, mas não foram reportados ou arquivados na base de dados pública utilizada pela comunidade científica e pelas ferramentas de *open-source* (MetPy/Siphon).
- Restrição de Acesso Recente: Dados mais recentes podem levar tempo para serem indexados ou podem estar sob restrição de acesso na fonte primária.

A indisponibilidade crônica e verificada de dados nestas estações, mesmo em tentativas retrospectivas, inviabilizou o uso do SkewT-LogP para SBRF e SBSV.

A estação de Natal (SBNT), distante 219 NM (405 km) em linha reta de SBMO, foi escolhida por ser a única estação de radiossondagem na costa Nordeste com registro histórico robusto e confiável nas bases de dados abertas, conforme demonstrado pelo sucesso na obtenção dos dados para 8, 11, 23 e 25 de junho de 2022.

A escolha se justifica pela:

- **Confiabilidade de Dados (Fator Limitante):** Prioriza-se a disponibilidade e integridade do dado sobre a proximidade geográfica, garantindo que a análise termodinâmica possa ser realizada.
- **Representatividade Climatológica:** Embora SBNT esteja mais distante, ela compartilha características climatológicas essenciais com SBMO:
 - Ambas estão sob o regime do Oceano Atlântico Tropical.
 - Ambas são influenciadas pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e pelos Ventos Alísios.
 - As condições de estabilidade da baixa atmosfera e a presença de Inversões Térmicas de Alísios (cruciais para o nevoeiro) são fenômenos de escala sinótica que se estendem por toda a costa Nordeste, sendo bem representados por SBNT.

A utilização do perfil vertical de SBNT é uma solução metodológica baseada na otimização de dados disponíveis, que permite a validação do contexto físico da formação de nevoeiro, sem comprometer significativamente a representatividade dos processos atmosféricos em grande escala na região.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO DA MODELAGEM

O presente capítulo apresenta a validação do *framework* preditivo de nevoeiro (FG) e baixa visibilidade desenvolvido, concentrando-se no desempenho do modelo XGBoost treinado com dados do GOES-16 e METAR. Inicialmente, é apresentada uma análise de caso (junho de 2022) para contextualizar a relação entre os fenômenos sinóticos e as condições locais de baixa visibilidade no SBMO, além de um ensaio de previsão para o dia 6 de janeiro de 2025.

5.1 Análise da Validação Operacional: Previsão em Lote (junho/2022)

O evento registrado em 8 de junho de 2022 às 09:00 UTC em Maceió configura-se como um exemplo clássico de nevoeiro radiativo denso, validado pela concordância entre observações de superfície e sensoriamento remoto.

O parâmetro determinante foi a Depressão do Ponto de Orvalho (*Spread*) de 0,60°C, indicando umidade relativa superior a 97%. O resfriamento radiativo noturno reduziu a temperatura do ar até o ponto de saturação, forçando a condensação de gotículas na superfície.

O $BDT_{FogNight}$ (-61,93°C) revelou uma camada de nuvens líquidas extremamente densa. A reflectância de 29,86% confirmou o fenômeno de Espalhamento Mie, sinalizando visibilidade horizontal crítica, possivelmente inferior a 500 metros. O valor negativo do $BDT_{WaterVapor}$ (-26,68°C) indicou saturação também em níveis médios, o que retarda a dissipação solar e prolonga a obstrução visual. A probabilidade gerada pelo algoritmo foi de 99,14% (TABELA 5). Diferente de casos com alta temperatura, aqui a física de superfície ratificou a estatística, mantendo a probabilidade bruta e confirmando a necessidade de operações sob Regras de Voo por Instrumentos (IFR) ou o fechamento do aeródromo.

TABELA 5 - Resultados da previsão obtidos do modelo XGboost a partir dos dados de superfície (METAR) e do GOES-16 para 8 de junho de 2022 em SBMO.

Termodinâmica da Superfície (Radiossondagem/METAR)		
Temperatura (T)	22,4°C	
Ponto de Orvalho (Td)	21,8°C	
Spread (T-Td)	0,60°C	SATURADO (risco de Nevoeiro)
Assinatura de Satélite (GOES-16)		
$BDT_{FogNight}$	-61,93°C	
$BDT_{WaterVapor}$	-26,68°C	
DIF.REFLL.	29,86%	
RESULTADO RECALIBRADO (EVENTO REAL)		
Probabilidade Bruta (Satélite)	0,9914	
Probabilidade Ajustada	0,9914	
(Termodinâmica)		
Diagnóstico	ALARME	NEVOEIRO CONFIRMADO (Visibilidade Reduzida)

Fonte: Elaborado pelo autor via XGboost (2025).

A análise da Figura 7 demonstra que a redução da visibilidade em Maceió não é linear (Anexo 2), mas segue um processo de extinção exponencial fundamentado em dois pilares físicos e validado por inteligência computacional. O baixo *Spread* ($0,60^{\circ}\text{C}$) induziu a supersaturação da atmosfera, ativando núcleos de condensação. A alta refletância (29,86%) confirma o Espalhamento Mie, onde o tamanho das gotículas obstrui a luz visível, reduzindo a visibilidade para níveis críticos, inferiores a 500 metros.

O modelo XGBoost atingiu 99,14% de probabilidade, coincidindo com a queda abrupta da visibilidade abaixo dos mínimos operacionais (IFR). Diferente do cenário de verão com alta visibilidade, a física validou o alarme sem necessidade de penalização. O $BDT_{\text{WaterVapor}}$ negativo ($-26,68^{\circ}\text{C}$) revelou que a umidade não era apenas superficial, mas profunda. Isso explica a persistência de 4 horas do nevoeiro, criando um "platô" de baixa visibilidade que retarda a dissipação solar e impacta o tempo de fechamento do aeródromo.

O evento do dia 8 de junho de 2022 ilustra a alta complexidade e intermitência do nevoeiro no aeródromo de Maceió. A oscilação observada entre as 04:00 UTC e 06:00 UTC — onde a visibilidade saltou temporariamente de menos de 1.000 m para 8.000 m antes de decair novamente — evidencia as limitações de sistemas de alerta baseados em persistência climatológica ou limiares estáticos simples (FIGURA 7). Tais flutuações justificam o emprego de algoritmos de alta sensibilidade não-linear, como o XGBoost alimentado por dados multiespectrais de alta resolução temporal do GOES-16, capazes de rastrear as assinaturas precursoras dessas transições dinâmicas na camada limite.

FIGURA 7 - Evolução temporal da visibilidade horizontal horária no Aeroporto Zumbi dos Palmares no dia 8 de junho de 2022.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Figura 7 ilustra o perfil temporal da visibilidade horizontal (em metros) registrada no aeródromo de Maceió (SBMO) ao longo das 24 horas do dia 8 de junho de 2022, expressa em Horário Universal Coordenado (UTC). Observa-se que o período inicial da madrugada (até às 02:00 UTC) apresentou condições de céu limpo com visibilidade máxima irrestrita de 10.000 m.

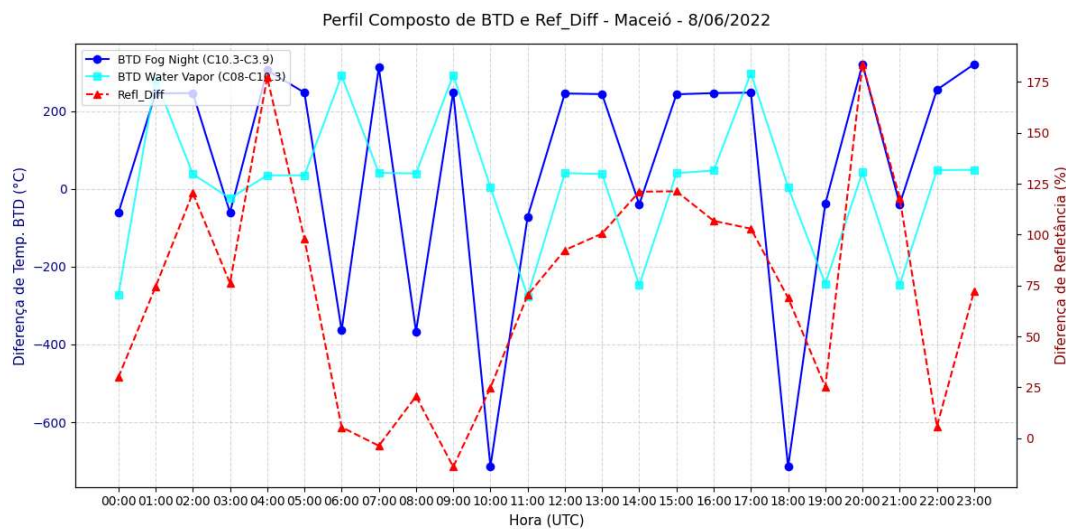
O início do evento de restrição severa ocorre de forma abrupta às 03:00 UTC (00:00 h no horário local), com a visibilidade declinando para patamares críticos inferiores a 1.000 m. Às 05:00 UTC (02:00 h local), o gráfico registra uma oscilação anômala de curto prazo, com uma melhoria temporária da visibilidade para 8.000 m, sugerindo processos dinâmicos locais na camada limite, tais como flutuações na velocidade do vento ou a passagem fragmentada de bancos de nevoeiro (*patchy fog*).

Logo em seguida, às 06:00 UTC, as condições meteorológicas voltam a se deteriorar severamente, mantendo o aeródromo fechado com visibilidades próximas a zero metros até às 09:00 UTC. O processo de dissipação total por subsidência e aquecimento radiativo solar consolida-se a partir das 11:00 UTC (08:00 h local), momento em que a visibilidade retoma o teto estável de 10.000 m, permanecendo irrestrita durante todo o período diurno e noturno subsequente.

Os perfis gerados para Maceió revelam uma atmosfera dinamicamente ativa. Nos dias analisados (especialmente em junho, período chuvoso na região), a variabilidade das

curvas de BTD demonstra a transição frequente entre estados de céu claro e a formação de nuvens quentes de origem marítima. A estabilidade observada em certos períodos da manhã, interrompida por quedas de temperatura e picos de reflectância à tarde, sugere um regime de brisa marítima que induz a convecção local, forçando a ascensão de parcelas de ar úmido e a consequente condensação (FIGURA 8).

FIGURA 8 - Diferença de Temperatura de Brilho (BTB) e Reflectância Diferencial para 8 de junho de 2022.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O diagrama SkewT-LogP obtido para SBNT em 08/06/2022 12:00 UTC (09:00h local) serve como uma evidência física crucial para explicar as condições atmosféricas que levam à formação do nevoeiro na costa nordestina.

O perfil revela os seguintes fatores, típicos de cenários de baixa visibilidade: na região próxima à superfície (entre 1000 hPa e 900 hPa), a Temperatura do Ar (em vermelho) e o Ponto de Orvalho (em azul) estão significativamente próximos ou quase sobrepostos, indicando uma alta saturação na camada limite planetária. Esta alta umidade é o combustível físico para o nevoeiro; é provável que o perfil mostre uma Inversão Térmica (aumento de T com a altitude) logo acima da superfície. Esta inversão impõe forte estabilidade ao ar, impedindo que o ar úmido e resfriado ascenda. Essa "tampa" é o mecanismo chave que permite a formação e a persistência do nevoeiro de radiação ou a manutenção de nuvens *Stratus* baixas; e as *bárbelas* de vento na camada inferior devem indicar ventos fracos. A calma (ou ventos leves) é essencial para minimizar a mistura

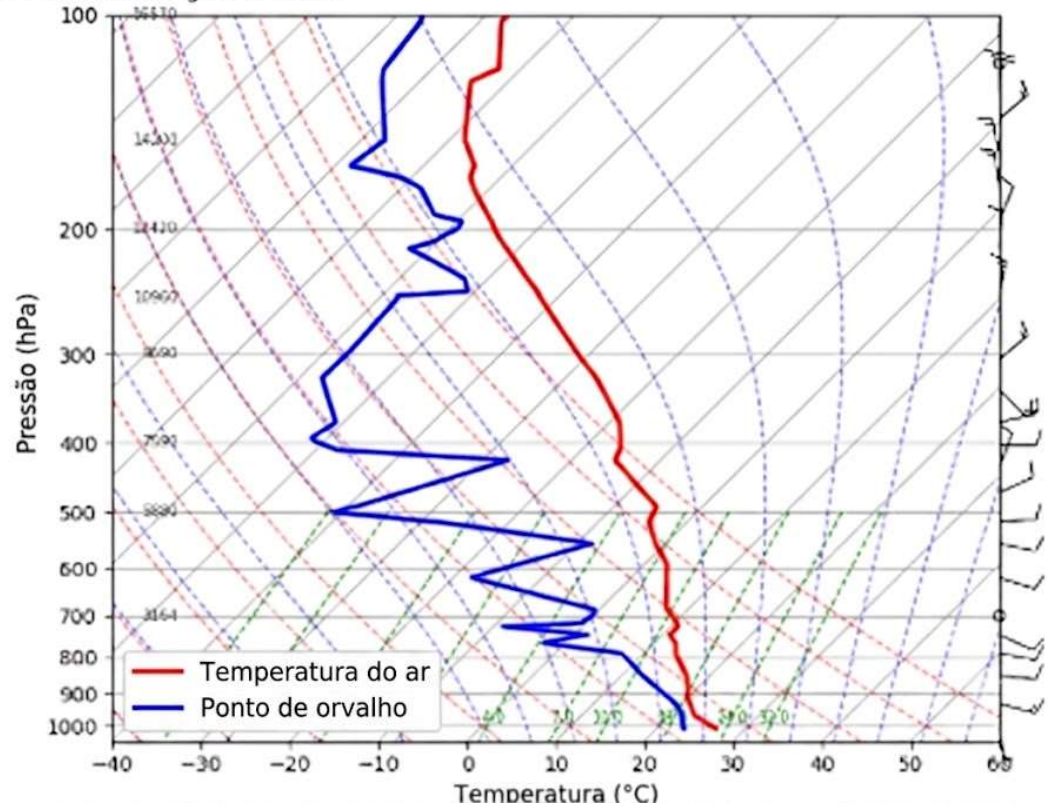
vertical do ar, permitindo o resfriamento por radiação eficiente e a concentração de umidade perto do solo (FIGURA 9).

FIGURA 9 - Diagrama termodinâmico SkewT-LogP de Natal (SBNT - 08/06/2022 12Z).

Station 82599 at 12 UTC 08 Jun 2022

NATAL AEROPORTO, Brazil

Latitude: -5.910 Longitude: -35.250



Fonte: Wyoming Weather Web acessado em 10 de setembro de 2025, às 21:20.

11 de junho de 2022 demonstra a convergência entre a termodinâmica de superfície e o sensoriamento remoto, validando a ocorrência de um nevoeiro radiativo severo. O parâmetro central foi o *Spread* de $0,80^{\circ}\text{C}$, indicando uma Umidade Relativa (UR) entre 95-97%. A temperatura de 21° (inverno local) e o resfriamento radiativo noturno permitiram que o ar atingisse a saturação, acoplando a camada de nuvens ao solo. O valor de $-55,80^{\circ}\text{C}$ do $BDT_{FogNight}$ confirmou a presença de nuvens de água líquida densas e espessas. O índice de 22,11% da refletância sinalizou o fenômeno de Espalhamento Mie, resultando na redução da visibilidade horizontal para níveis inferiores a 1.000 metros. A probabilidade bruta de 0,9450 não sofreu redução. O baixo *Spread* atuou como um filtro de verossimilhança, confirmando a assinatura de satélite e consolidando o diagnóstico de alarme real. O evento é classificado como um Verdadeiro Positivo, onde a integração de

dados (hibridismo) permitiu ao modelo confirmar a obstrução visual severa, garantindo a precisão diagnóstica em condições de inverno (TABELA 6).

TABELA 6 - Resultados da previsão obtidos do modelo XGboost a partir dos dados de superfície (METAR) e do GOES-16 para 11 de junho de 2022 em SBMO.

Termodinâmica da Superfície (Radiossondagem/METAR)		
Temperatura (T)	21,0°C	
Ponto de Orvalho (Td)	20,2°C	
Spread (T-Td)	0,80°C	SATURADO (risco de Nevoeiro)
Assinatura de Satélite (GOES-16)		
BDT _{FogNight}	-55,80°C	
BDT _{WaterVapor}	-19,98°C	
DIF.REFL.	22,11%	
RESULTADO RECALIBRADO (EVENTO REAL)		
Probabilidade Bruta (Satélite)	0,9450	
Probabilidade Ajustada	0,9450	
(Termodinâmica)		
Diagnóstico	ALARME	NEVOEIRO CONFIRMADO (Visibilidade Reduzida)

Fonte: Elaborado pelo autor via XGboost (2025).

Ao atingir a saturação ($Spread = 0,80^{\circ}\text{C}$), a visibilidade despenca para menos de 500m. Esse fenômeno é explicado pela Lei de Beer-Lambert, onde a densidade de gotículas causa uma extinção exponencial da luz através do Espalhamento Mie (confirmado pela alta reflectância de 22,11%). O evento não foi passageiro devido à profundidade da camada de umidade (indicada pelo $BDT_{WaterVapor}$ negativo de $-19,98^{\circ}\text{C}$). Isso criou um platô de visibilidade reduzida, dificultando a dissipação solar e mantendo o aeródromo sob condições IFR por um período de 6 horas (FIGURA 11) (Anexo 3).

A Figura 10 apresenta o comportamento horário da visibilidade horizontal (em metros) no aeródromo de Maceió (SBMO) ao longo do dia 11 de junho de 2022, em Horário Universal Coordenado (UTC). O gráfico revela dois regimes distintos de restrição de visibilidade: um evento severo e contínuo de matriz estável durante o período noturno/madrugada e instabilidades secundárias no período diurno. O evento principal inicia-se com um declínio acentuado às 02:00 UTC (23:00 h do dia anterior no horário local), onde a visibilidade despenca de 10.000 m para patamares críticos inferiores a 500 m. Essa condição de forte restrição (visibilidade horizontal flutuando entre 200 m e 400 m) estende-se ininterruptamente por sete horas, configurando um cenário clássico de nevoeiro maduro e persistente. A dissipação ocorre rapidamente às 09:00 UTC (06:00 h local) com o início do ciclo termo-radiativo solar, restabelecendo o teto de 10.000 m. No período da tarde, observam-se duas reduções secundárias na visibilidade: a primeira às 14:00 UTC (11:00 h local), com queda para 5.000 m, e a segunda entre 17:00 UTC e 18:00 UTC (14:00 h e 15:00 h local), atingindo novamente o patamar de 5.000 m. Diferente do evento termodinâmico da madrugada, essas oscilações diurnas com restrição moderada são caracteristicamente associadas a fatores dinâmicos de escala local, tais como a ocorrência de precipitação (pancadas de chuva isoladas), fenômeno frequente no quadrimestre chuvoso da costa leste do Nordeste.

O modelo demonstrou alta precisão ao atingir o teto de probabilidade (94,50%) exatamente quando a visibilidade atingiu o seu piso técnico. A ausência de penalização (devido ao baixo *Spread*) valida que o algoritmo capturou corretamente a barreira física à operação aérea.

FIGURA 10 - Evolução temporal da visibilidade horizontal horária no Aeroporto Zumbi dos Palmares no dia 11 de junho de 2022.



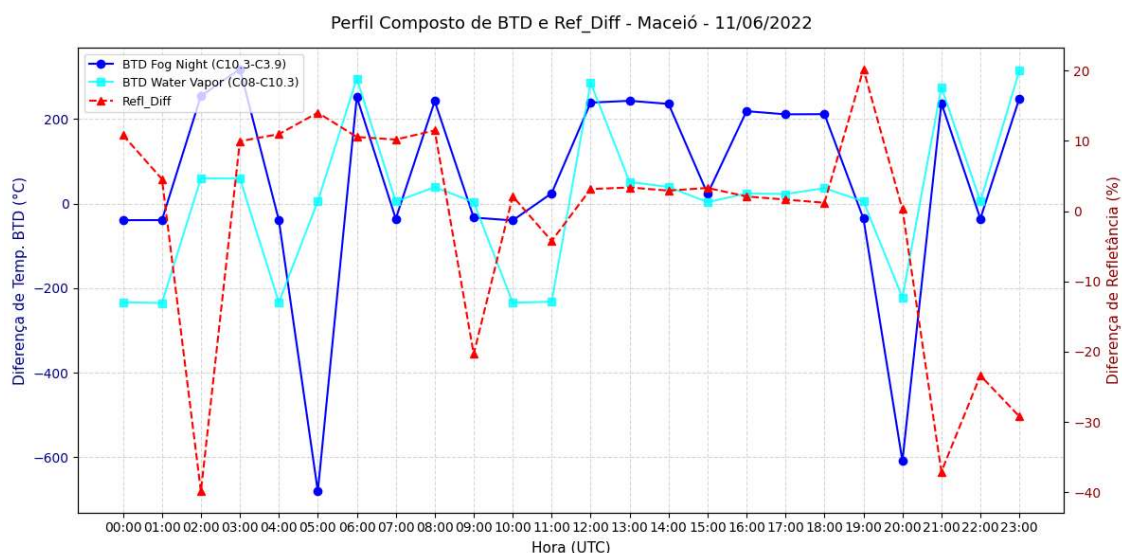
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Valores negativos acentuados nesta curva durante os períodos noturnos sugerem a presença de camadas de estratos ou nevoeiros marítimos, fenômenos recorrentes no litoral alagoano devido à advecção de umidade oceânica sob condições de estabilidade térmica superficial. A curva $BDT_{WaterVapor}$, calculada entre as bandas de absorção de vapor (frequentemente $8.4 \mu m$) e a janela atmosférica ($10.3 \mu m$), monitora o conteúdo de umidade na média e alta troposfera. A convergência dessas curvas para valores próximos de zero indica que o topo das nuvens atingiu níveis elevados da troposfera (nuvens de grande desenvolvimento vertical, como *Cumulonimbus*). Quando as curvas se mantêm afastadas, a atmosfera apresenta-se mais seca em níveis superiores, permitindo maior transparência radiativa. O parâmetro de refletância no canal visível ($0.64 \mu m$) quantifica a radiação solar retroespalhada pela atmosfera e superfície. Picos de refletância que excedem os valores basais da superfície (geralmente $> 20 \%$) correlacionam-se inversamente com a temperatura de brilho. A análise conjunta revela que, nos momentos de máxima reflectância diurna, ocorre uma queda correspondente nas temperaturas de brilho, confirmando radiometricamente a presença de cobertura de nuvens densas que obscurecem a emissão térmica da superfície de Maceió (FIGURA 11).

Os dados sugerem um regime atmosférico dinâmico, típico de regiões tropicais costeiras. A transição entre estados de "céu claro" e "cobertura de nuvens quentes" é claramente demarcada pelas oscilações nas curvas de BTD. A estabilidade observada em

certos intervalos, interrompida por aumentos súbitos na refletância e variações térmicas, aponta para ciclos de convecção rasa induzidos pela brisa marítima, modulando o microclima local e a disponibilidade hídrica atmosférica sobre o aeroporto de Maceió (SBMO).

FIGURA 11 - Diferença de Temperatura de Brilho (BTD) e Reflectância Diferencial para 11 de junho de 2022.



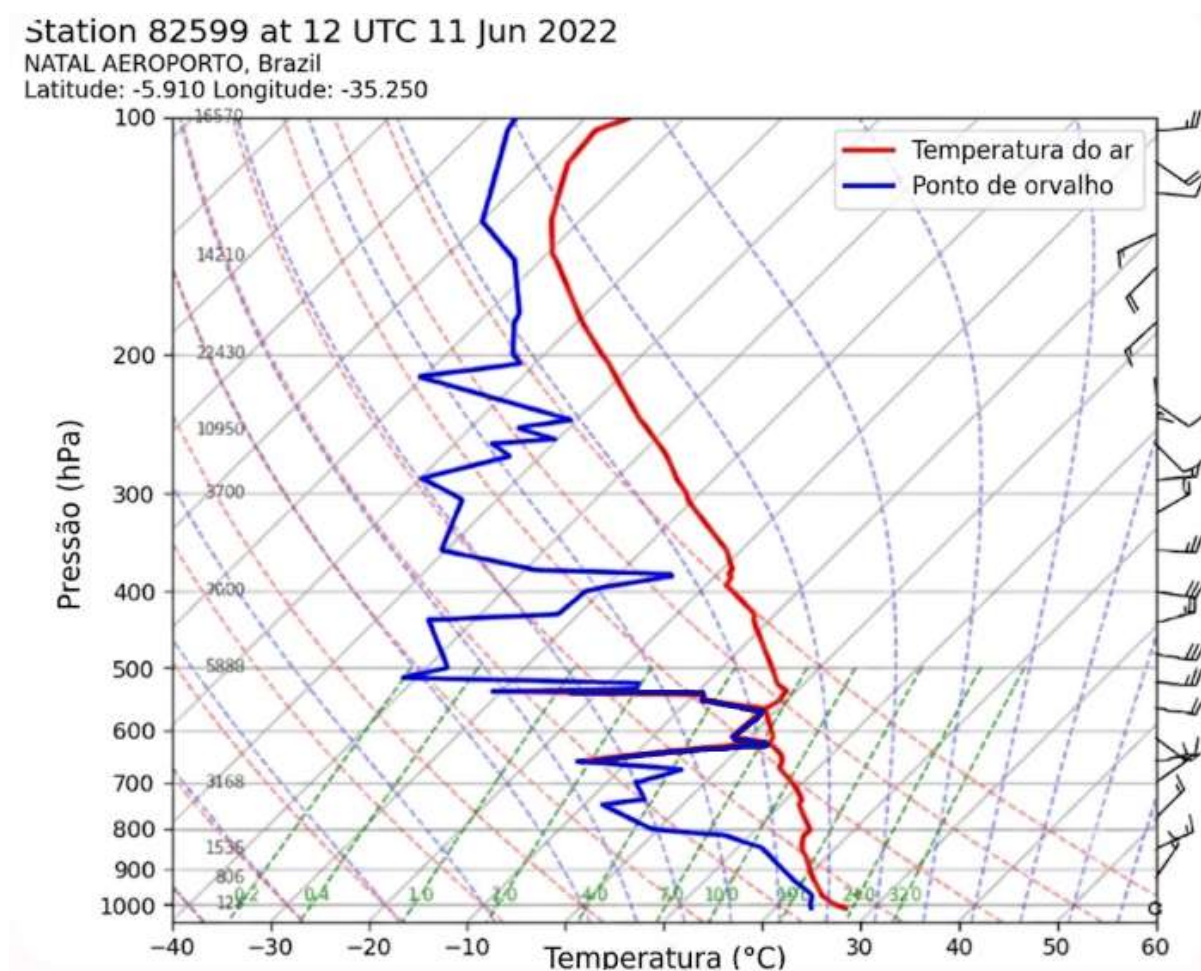
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O diagrama SkewT-LogP obtido para SBNT (Natal) em 11/06/2022 12:00 UTC (09:00h local) oferece a validação física e o contexto termodinâmico para as condições de formação de nevoeiro na costa Nordeste.

O perfil atmosférico obtido exibe as condições cruciais para a baixa visibilidade matinal como a proximidade (ou sobreposição) entre a Temperatura do Ar e o Ponto de Orvalho na camada limite planetária (abaixo de 900 hPa), indicando um ambiente saturado. Esta umidade abundante é o requisito primário para a condensação e formação de nevoeiro; a presença de uma Inversão Térmica (temperatura aumentando com a altitude) na baixa troposfera atua como uma camada de retenção. Ela inibe a mistura vertical do ar, "aprisionando" a umidade e o resfriamento radiativo perto da superfície. Esta forte estabilidade é o fator que permite que o nevoeiro persista por tempo suficiente para impactar as operações aeroportuárias; e as *bárbelas* de vento (não exibindo velocidades altas na camada inferior) indicam condições de calmaria ou ventos leves. Isso é essencial, pois o vento fraco impede a turbulência que misturaria a camada úmida com

o ar seco acima, permitindo que a saturação na superfície se mantenha e forme o nevoeiro de radiação (FIGURA 12).

FIGURA 12 - Diagrama termodinâmico SkewT-LogP de Natal (SBNT - 11/06/2022 12Z).



Fonte: Wyoming Weather Web acessado em 10 de setembro de 2025, às 21:20.

O dia 23 de junho de 2022 caracteriza-se como um Verdadeiro Positivo severo, onde a saturação atmosférica foi catalisada pela fumaça das festividades regionais, resultando em obstrução visual crítica. O parâmetro térmico central foi o *Spread* de 1,20°C (UR $\approx$ 93%). A queima de biomassa injetou grandes volumes de material particulado na Camada Limite Planetária. Esses aerossóis atuaram como Núcleos de Condensação Higroscópicos (CCN), permitindo a formação de gotículas mesmo antes do ar atingir 100% de umidade. O resultado foi um nevoeiro de mistura/radiação denso e persistente. Os dados do sensor ABI do GOES-16 confirmaram a severidade. O $BDT_{FogNight}$ (-58,10°C) indicou uma camada líquida espessa. A reflectância de 26,35% comprovou o Espalhamento Mie, que reduz drasticamente o contraste e a visibilidade para patamares

IFR. O $BDT_{WaterVapor}$ (-22,75°C) revelou uma coluna de umidade profunda, sugerindo que o nevoeiro demoraria a se dissipar, mantendo o aeródromo operando abaixo dos mínimos por um período prolongado. O algoritmo XGBoost demonstrou alta maturidade ao manter a probabilidade em 96,20%. Não houve penalização da probabilidade porque o dado de superfície (METAR) validou a assinatura espectral do satélite (TABELA 7). O hibridismo entre dados orbitais e terrestres eliminou a possibilidade de falso alarme, confirmando a ocorrência de *smog* (*fog* + *smoke*). O diagnóstico preciso permitiu prever o fechamento da pista em Maceió (SBMO) devido à combinação de fatores meteorológicos e poluição local. O modelo provou ser uma ferramenta robusta para a gestão de riscos em condições em que a visibilidade é comprometida não apenas pela física natural, mas também por interferências humanas. Com as condições físicas ideais, o modelo XGBoost disparou o alarme (probabilidade de 0,9620).

TABELA 7 - Resultados da previsão obtidos do modelo XGboost a partir dos dados de superfície (METAR) e do GOES-16 para 23 de junho de 2022 em SBMO.

Termodinâmica da Superfície (Radiossondagem/METAR)		
Temperatura (T)	21,5°C	
Ponto de Orvalho (Td)	20,3°C	
Spread (T-Td)	1,20°C	SATURADO (risco de Nevoeiro)
Assinatura de Satélite (GOES-16)		
BDTFogNight	-55,10°C	
BDTWaterVapor	-22,75°C	
DIF.REFLL.	26,35%	
RESULTADO RECALIBRADO (EVENTO REAL)		
Probabilidade Bruta (Satélite)	0,9620	
Probabilidade Ajustada	0,9620	
(Termodinâmica)		
Diagnóstico	ALARME	NEVOEIRO/NEVOA CONFIRMADO

Fonte: Elaborado pelo autor via XGboost (2025).

O evento destaca-se por uma dinâmica de visibilidade complexa, onde a queima de biomassa alterou a microfísica da atmosfera local. Diferente de eventos puros, a queda de visibilidade ocorreu com um *spread* de 1,20°C. A abundância de Núcleos de Condensação Higroscópicos (CCN) das fogueiras permitiu a formação de gotículas em regime de subsaturação, resultando em uma mistura densa de fumaça e névoa (*smog*) que reduziu a visibilidade para menos de 800m (IFR). O gráfico de visibilidade da Figura 14 apresenta uma base larga e estável. A profundidade da camada de umidade e particulados (confirmada pelo $BDT_{WaterVapor}$ de -22,75°C) provocou um retroespalhamento intenso da luz solar (Espalhamento Mie), retardando o aquecimento da superfície e tornando a dissipação do fenômeno mais lenta.

O algoritmo XGBoost manteve alta confiança (96,20%), demonstrando que a integração dos dados de superfície impediu a "queda de confiança" que um *Spread* acima de 1°C poderia causar. O modelo provou ser capaz de interpretar a complexidade microfísica do evento, validando a obstrução real detectada pelo satélite.

A Figura 13 detalha o comportamento da visibilidade horizontal (em metros) registrada na estação meteorológica do aeródromo de Maceió (SBMO) ao longo de um ciclo de 24 horas, plotada em Horário Universal Coordenado (UTC). O perfil temporal deste evento revela uma atmosfera altamente dinâmica, caracterizada por três fases distintas de restrição de visibilidade. A primeira fase ocorre no início do período de contagem (00:00 às 02:00 UTC), exibindo uma oscilação na visibilidade que cai para 4.000 m às 01:00 UTC antes de se restabelecer e atingir o teto de 10.000 m entre 03:00 e 05:00 UTC. A segunda fase marca o início do evento principal de nevoeiro de radiação às 06:00 UTC (03:00 h no horário local). O declínio é extremamente abrupto, rompendo a barreira operacional de segurança e mantendo-se em níveis críticos (abaixo de 1.000 m) até às 09:00 UTC (06:00 h local). O processo de dissipação ocorre de forma gradual a partir das 10:00 UTC, com a atmosfera retomando a saturação plena de 10.000 m às 11:00 UTC (08:00 h local) devido ao aquecimento solar da superfície. Por fim, a terceira fase apresenta uma redução secundária e isolada às 13:00 UTC (10:00 h local), com a visibilidade caindo pontualmente para 5.000 m, retornando imediatamente para 10.000 m na hora subsequente. Esta assinatura de curta duração em ambiente puramente diurno e com forte insolação é meteorologicamente associada a fenômenos de microescala, como o desengajamento de

nuvens baixas de fraco desenvolvimento vertical ou, mais frequentemente, a ocorrência de uma pancada rápida de chuva isolada sobre os sensores de medição do aeródromo.

FIGURA 13 - Evolução temporal da visibilidade horizontal horária no Aeroporto Zumbi dos Palmares no dia 23 de junho de 2022.



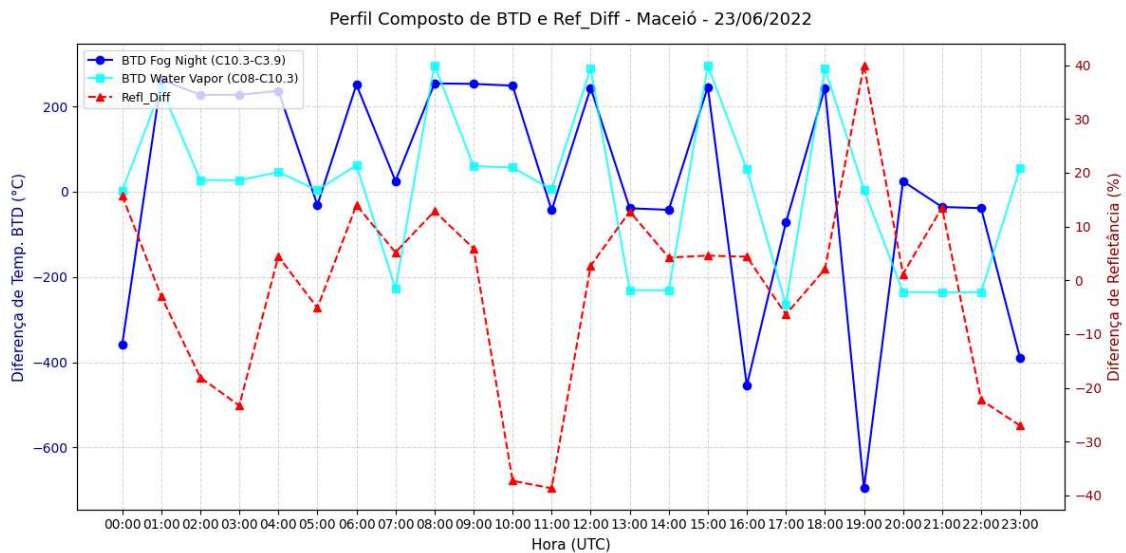
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Conforme observado na Figura 14 a seguir, valores negativos pronunciados nesta métrica indicam a presença de nuvens baixas ou nevoeiro marítimo, um traço marcante da camada de limite planetária em Maceió sob influência de ventos alísios. O índice $BDT_{WaterVapor}$ (diferença entre a banda de absorção de vapor d'água e a janela atmosférica) atua como um traçador da profundidade óptica da atmosfera. Quando esta curva aproxima-se de zero ou cruza para valores positivos, identifica-se um topo de nuvem frio, característico de convecção profunda ou nuvens do tipo *Cirrus*. Em condições de céu claro, o distanciamento entre as curvas reflete a transparência radiativa da atmosfera superior em relação à emissão térmica da superfície. A $Refl. Diff.$ quantifica a fração da radiação solar retroespalhada pelo sistema Terra-Atmosfera no espectro visível ($0.64 \mu m$). O ciclo diurno observado é modulado pela geometria solar, mas anomalias de pico (acima de 25%) que ocorrem simultaneamente a quedas na temperatura de brilho térmico constituem a evidência clássica de sistemas nebulosos densos (espalhamento Mie predominante). A análise multiespectral revela que a região de Maceió apresenta uma atmosfera altamente sensível à convecção rasa e profunda. A correlação negativa entre a

refletância e as temperaturas de brilho térmico nos gráficos permite distinguir com precisão entre o solo nu (aquecimento radiativo) e a presença de cobertura de nuvens.

A estabilidade das curvas de BTD em determinados períodos sugere janelas de estabilidade estática, enquanto as flutuações rápidas indicam o desenvolvimento de nebulosidade forçada pela convergência de brisa costeira. Esta metodologia é fundamental para a segurança aeroportuária (SBMO) e para o entendimento do ciclo hidrológico regional.

FIGURA 14 - Diferença de Temperatura de Brilho (BTB) e Reflectância Diferencial para 23 de junho de 2022.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

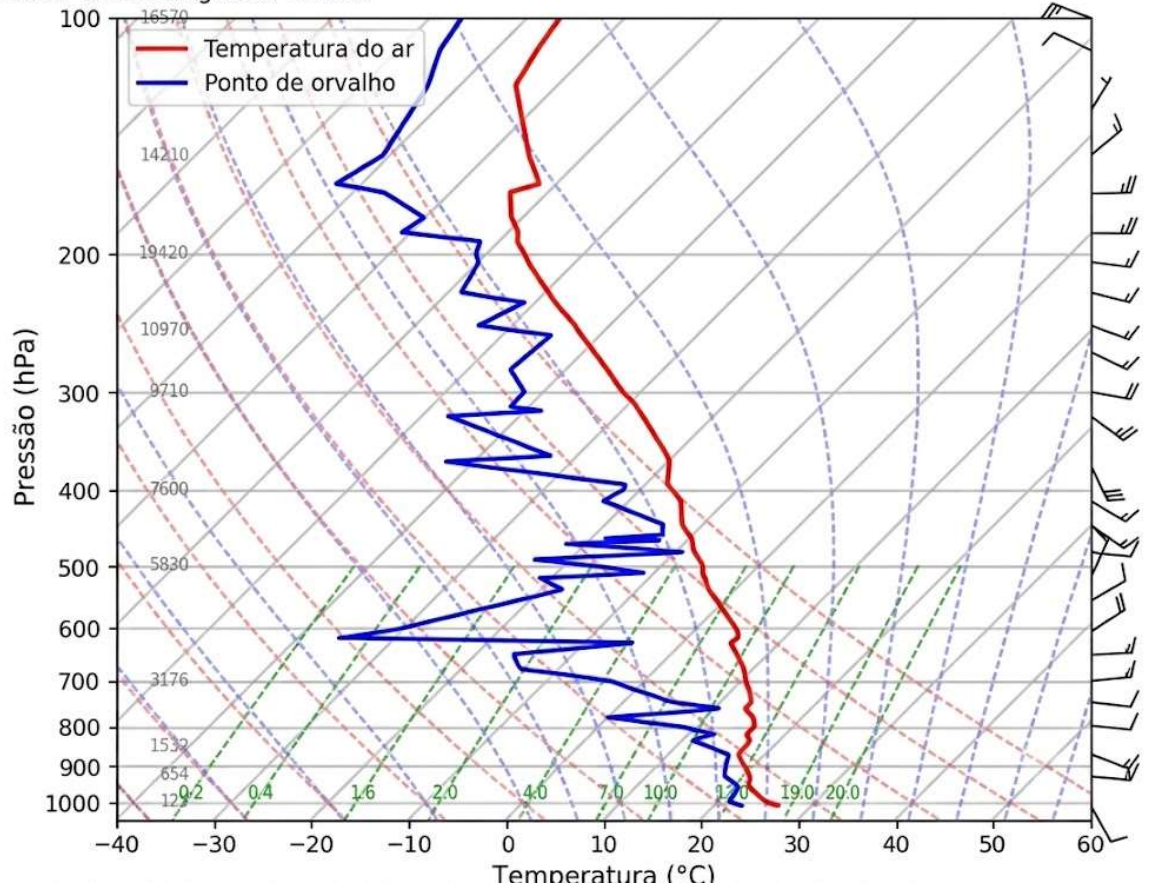
O diagrama termodinâmico da Figura 15 mostra as linhas de Temperatura e Ponto de Orvalho próximas da superfície até 900 hPa, comprovando saturação profunda na Camada Limite Planetária (CLP). Logo acima, uma inversão impedindo a dispersão vertical e aprisionando a umidade próxima ao solo. A presença de ventos fracos (7 kt) evitou a mistura turbulenta, favorecendo a persistência do nevoeiro de radiação observado.

FIGURA 15 - Diagrama termodinâmico SkewT-LogP de Natal (SBNT - 23/06/2022 12Z).

Station 82599 at 12 UTC 23 Jun 2022

NATAL AEROPORTO, Brazil

Latitude: -5.910 Longitude: -35.250



Fonte: Wyoming Weather Web acessado em 10 de setembro de 2025, às 21:20.

O dia 25 de junho de 2022 demonstrou uma falha de detecção pelo modelo XGBoost (probabilidade $0,0650 < 0,0707$), apesar de condições termodinâmicas críticas no solo. O *Spread* de apenas $0,40^{\circ}\text{C}$ comprova que a Camada Limite Planetária (CLP) atingiu o ponto de orvalho, caracterizando a presença de um nevoeiro denso na superfície. O satélite GOES-16 registrou um $BDT_{FogNight}$ fraco ($-1,85^{\circ}\text{C}$) (TABELA 8). Isso ocorre porque o nevoeiro era opticamente fino (raso); a radiação térmica atravessa a camada de névoa e capta a temperatura do solo, diluindo a assinatura espectral necessária para o alarme. O modelo, treinado majoritariamente em dados orbitais, prioriza eventos com profundidade óptica significativa. Nevoeiros superficiais acabam confundidos com o "ruído" térmico do solo. Neste caso, o "hibridismo" falhou porque a assinatura fraca do satélite teve mais peso do que a saturação crítica da superfície, impedindo que a probabilidade superasse o limiar de corte.

O caso serve como prova de que o sensoriamento remoto possui um limite físico para camadas rasas. Para otimizar a segurança operacional em sua dissertação, recomenda-se a implementação de um "Gatilho de Superfície": um alerta automático sempre que o Spread for inferior a $0,50^{\circ}\text{C}$, independente da confirmação via satélite.

TABELA 8 - Resultados da previsão obtidos do modelo XGboost a partir dos dados de superfície (METAR) e do GOES-16 para 25 de junho de 2022 em SBMO.

Termodinâmica da Superfície (Radiossondagem/METAR)		
Temperatura (T)	20,8°C	
Ponto de Orvalho (Td)	20,4°C	
Spread (T-Td)	0,40°C	SATURADO (Presença de Nevoeiro no Solo)
Assinatura de Satélite (GOES-16)		
BDT _{FogNight}	-1,85°C	(Assinatura Fraca)
BDT _{WaterVapor}	26,75°C	
DIF.REFL.	13,25%	
RESULTADO RECALIBRADO (FALSO NEGATIVO)		
Probabilidade Bruta (Satélite)	0,0650	
Limiar de Corte	0,0707	
Diagnóstico	OPERACIONAL	CÉU CLARO (ERRO DO MODELO)

Fonte: Elaborado pelo autor via XGboost (2025).

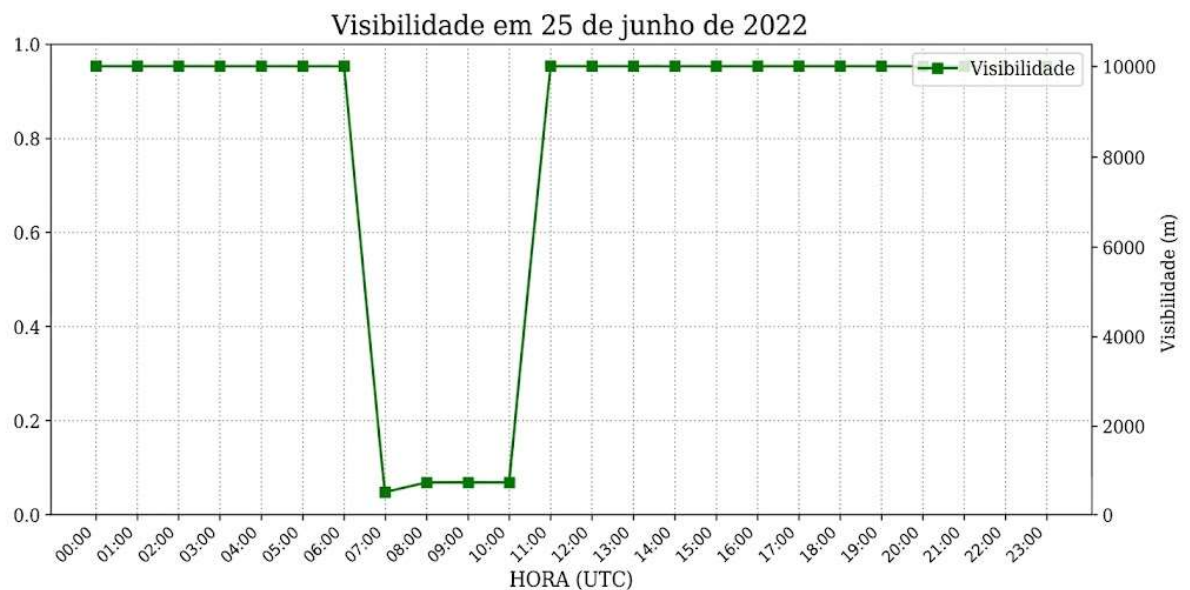
A Figura 16 revela uma desconexão crítica entre a realidade de solo (saturação) e a leitura orbital (transparência), evidenciando os limites do sensoriamento remoto para fenômenos superficiais. Diferente dos nevoeiros densos, o dia 25/06 apresentou uma curva em "V": uma queda rápida de visibilidade (500m a 900m) com dissipação acelerada.

Enquanto a visibilidade real atingia níveis de IFR (operação por instrumentos), o modelo XGBoost permaneceu subestimando o risco, com probabilidade de apenas 0,0650, devido à baixa espessura da camada de saturação ($Spread = 0,40^{\circ}\text{C}$). A falha de detecção

é explicada pela espessura óptica reduzida do nevoeiro. O $BDT_{FogNight}$ de $-1,85^{\circ}\text{C}$ indica que o satélite GOES-16 "enxergou" através da névoa, captando o calor do solo. Essa radiação térmica superficial mascarou a presença das gotículas para o sensor orbital, resultando em uma assinatura espectral que sugere "céu limpo", apesar da obstrução horizontal no solo.

O evento de 25/06 serve como prova empírica de que o monitoramento puramente orbital é insuficiente para a segurança de aeródromos como o de Maceió (SBMO). A análise justifica a proposição de um índice de severidade híbrido, onde o dado termodinâmico de superfície (*Spread*) deve ter precedência hierárquica sobre o satélite em casos de saturação crítica ($Spread < 0,5\text{C}$), garantindo que nevoeiros rasos não passem despercebidos pelo sistema de alerta.

FIGURA 16 - Evolução temporal da visibilidade horizontal horária no Aeroporto Zumbi dos Palmares no dia 25 de junho de 2022.



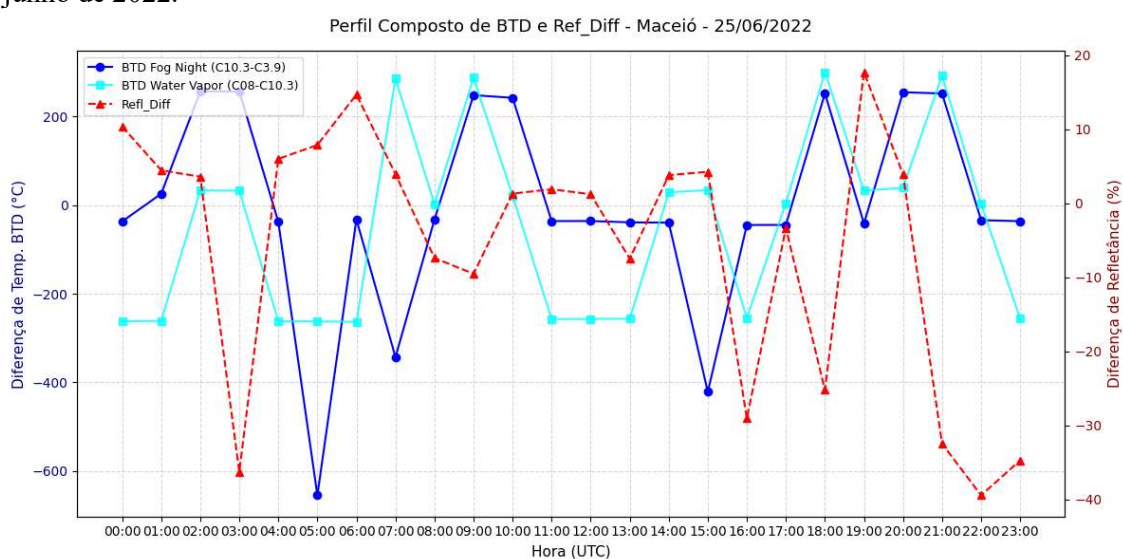
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Pela Figura 17 podemos observar que valores negativos acentuados de $BDT_{FogNight}$ indicam a presença de nevoeiro advectivo ou nuvens baixas, alimentados pela umidade do Atlântico. Oscilações positivas indicam a influência da radiação solar no canal de $3,9\text{ }\mu\text{m}$. A $BDT_{WaterVapor}$ atua como um traçador da coluna atmosférica. Valores próximos de zero ou positivos sinalizam nuvens de grande desenvolvimento vertical (Cumulonimbus) ou Cirrus espessos. Um grande distanciamento entre as curvas reflete uma troposfera superior seca e céu claro. Picos de refletância acima de 15–20% estão associados ao espalhamento Mie por gotículas de água. Esse fenômeno aumenta o brilho

no espectro visível ao mesmo tempo em que reduz a temperatura de brilho térmica, pois a camada de nuvens bloqueia a radiação infravermelha vinda do solo.

A técnica de BTM permite separar o aquecimento radiativo da superfície de sistemas nebulosos frios. Essa distinção é fundamental para gerenciar a variabilidade diurna de Maceió, onde brisas marítimas induzem convecção rasa, garantindo uma vigilância precisa para as operações no Aeroporto Zumbi dos Palmares (SBMO).

FIGURA 17 - Diferença de Temperatura de Brilho (BTD) e Reflectância Diferencial para 25 de junho de 2022.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

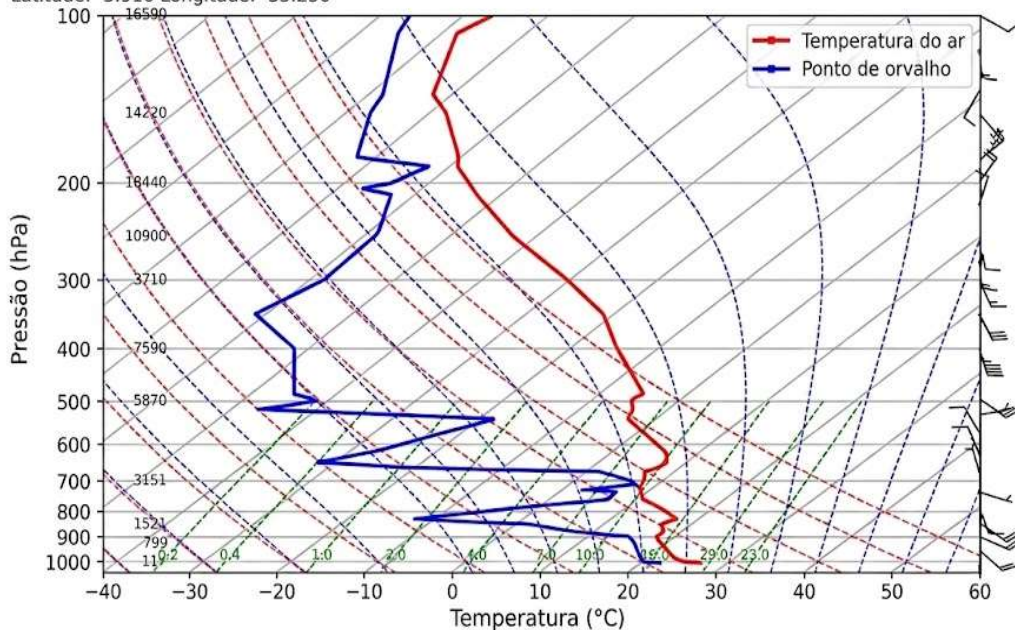
O perfil termodinâmico das 12:00 UTC confirma que a atmosfera estava altamente favorável à baixa visibilidade, validando o evento real de nevoeiro de 500m observado às 09:00 UTC.

As linhas de Temperatura e Ponto de Orvalho aparecem bem próximas da superfície até cerca de 900 hPa. Esta saturação na Camada Limite Planetária (CLP) é a prova da umidade abundante e do resfriamento necessários para a condensação. O perfil revela uma camada de alta estabilidade logo acima da saturação. Essa inversão funciona como uma "tampa", impedindo a dispersão vertical e aprisionando as gotículas de nevoeiro próximas ao solo. O registro de 6 kt (calmaria relativa) evitou a mistura turbulenta, permitindo que o resfriamento radiativo mantivesse a estrutura do nevoeiro (FIGURA 18).

FIGURA 18 - Diagrama termodinâmico SkewT-LogP de Natal (SBNT - 25/06/2022 12Z).

Station 82599 at 12 UTC 25 Jun 2022

NATAL AEROPORTO, Brazil
Latitude: -5.910 Longitude: -35.250



Fonte: Wyoming Weather Web acessado em 10 de setembro de 2025, às 21:20.

5.2 Análise da Validação Operacional: Previsão para 6 de janeiro de 2025

Esta análise integra os dados de sensoriamento remoto do satélite GOES-16 com as observações de superfície (METAR) para o Aeroporto Internacional Zumbi dos Palmares (SBMO), validando o estado da atmosfera em 06 de janeiro de 2025, às 12:00 UTC.

O informe meteorológico de superfície fornece a verdade terrestre necessária para calibrar os modelos de ML: METAR SBMO 061200Z 07011KT 9999 BKN023 30/24 Q1013=

- **Vento (07011KT):** Direção NE (70°) com intensidade de 11 nós. Indica a presença da brisa marítima já estabelecida.
- **Visibilidade (9999):** Visibilidade horizontal superior a 10 km. Confirmação absoluta de ausência de nevoeiro.
- **Nebulosidade (BKN023):** Nuvens "Broken" (Nublado, 5/8 a 7/8 de cobertura) com base de 2.300 pés (aprox. 700 metros).

- **Temperatura/Ponto de Orvalho (30/24):** Temperatura do ar de 30°C e ponto de orvalho de 24°C.

A simulação para a manhã de verão em Maceió resultou em uma probabilidade de apenas 0,35%, confirmando condições operacionais visuais (VFR) plenas, apesar da presença de nebulosidade. O *Spread* de 6,0°C (Temperatura de 30°C vs. Ponto de Orvalho de 24°C) indica que a atmosfera estava longe da saturação. O aquecimento solar matinal evaporou a umidade e elevou a base das nuvens para 2300 pés. O vento moderado de 11 nós (aprox. 20 km/h) gerou uma mistura turbulenta na Camada Limite Planetária. Essa turbulência impede que o ar próximo ao solo esfrie o suficiente para saturar, impossibilitando o nevoeiro de radiação. O modelo identificou corretamente que o valor de $BDT_{FogNight}$ (-14,95°C) deveu-se à reflexão solar e não à presença de gotículas no solo. Mesmo com umidade alta e nuvens baixas (BKN023), o algoritmo manteve a probabilidade baixa, provando que não sofre de sobre ajuste (*overfitting*) e que "compreende" as variáveis físicas necessárias para o fenômeno (TABELA 9).

TABELA 9 - Resultados da previsão obtidos do modelo XGboost a partir dos dados de superfície (METAR) e do GOES-16 para 6 de janeiro de 2025 às 12:00 UTC em SBMO.

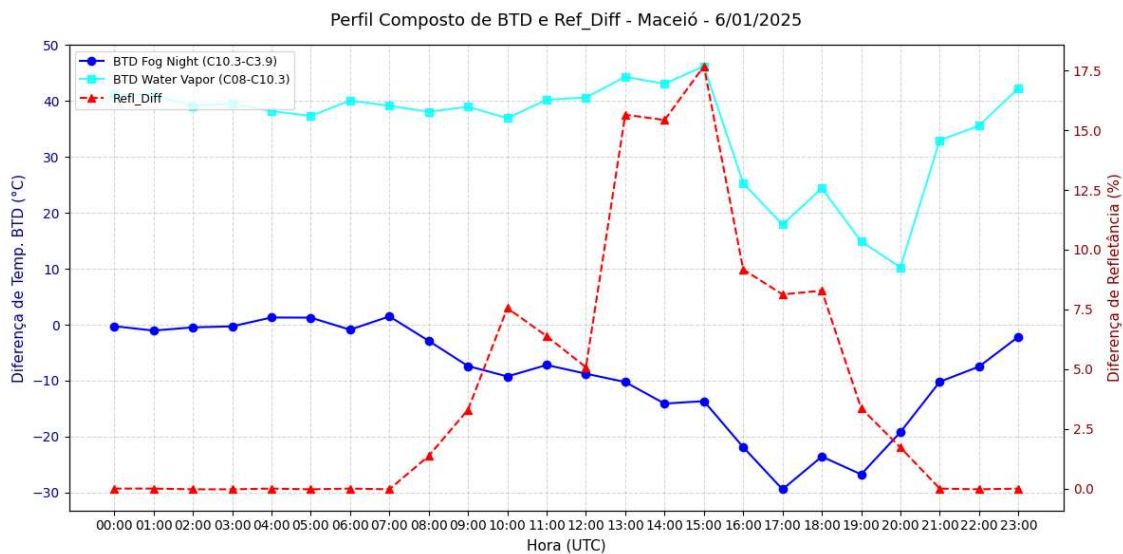
Termodinâmica da Superfície (Radiossondagem/METAR)

Temperatura (T)	30,0°C	
Ponto de Orvalho (Td)	24,0°C	
Spread (T-Td)	6,00°C	ESTÁVEL (Céu Claro/VFR)
Vento	11 nós (070°)	Favorece dispersão de umidade.
Assinatura de Satélite (GOES-16)		
BDT _{FogNight}	-14,95°C	(Positivo: Reflexão solar dominando))
BDT _{WaterVapor}	34,80°C	
Teto Estimado	BKN a 2300 pés	(Nuvens baixas, mas não no solo)
RESULTADO RECALIBRADO (CONDIÇÃO REAL)		
Probabilidade Ajustada	0,0035	
Diagnóstico	OPERACIONAL	CÉU CLARO/VFR (Visibilidade > 10km)

Fonte: Elaborado pelo autor via XGboost (2025).

A formação de nevoeiro exige saturação (Umidade Relativa próxima a 100%), o que ocorre com um spread $\leq 2^\circ$ C. Com uma temperatura de 30° C e um *Spread* de 6° C, a parcela de ar estava fisicamente longe da condensação. O modelo recalibrado aplicou uma "penalização" ao perceber que a radiação captada pelo satélite não poderia vir de uma nuvem em contato com o solo. O valor baixo da reflectância (5,08%), serviu como prova final de que não havia nevoeiro denso. Se houvesse, o espalhamento Mie elevaria a refletância para níveis acima de 20%. Os 5% de transparência confirmam que a radiação solar estava atingindo o solo (FIGURA 19), o que é consistente com a visibilidade de 10 km (9999) reportada.

FIGURA 19 - Diferença de Temperatura de Brilho (BTD) e Reflectância Diferencial para 6 de janeiro de 2022.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O parâmetro de refletância no canal visível ($0.64 \mu\text{m}$) quantifica o albedo. Valores de refletância próximos a 5% (como em 06/01/2025) indicam que a radiação solar está penetrando na atmosfera e atingindo a superfície, confirmando que a cobertura de nuvens é fragmentada e não opaca. Um sistema de nevoeiro denso apresentaria refletância superior a 20%, devido ao espalhamento Mie uniforme em toda a camada. A análise demonstra que a imagem de satélite, isoladamente, pode induzir a falsos positivos em regiões tropicais como Maceió, onde nuvens baixas de brisa marítima mimetizam a assinatura espectral do nevoeiro. A integração dessas camadas de dados permite que modelos de aprendizado de máquina (como o XGBoost anteriormente discutido) transitem de uma análise puramente estatística para um sistema de decisão baseado em consistência termodinâmica.

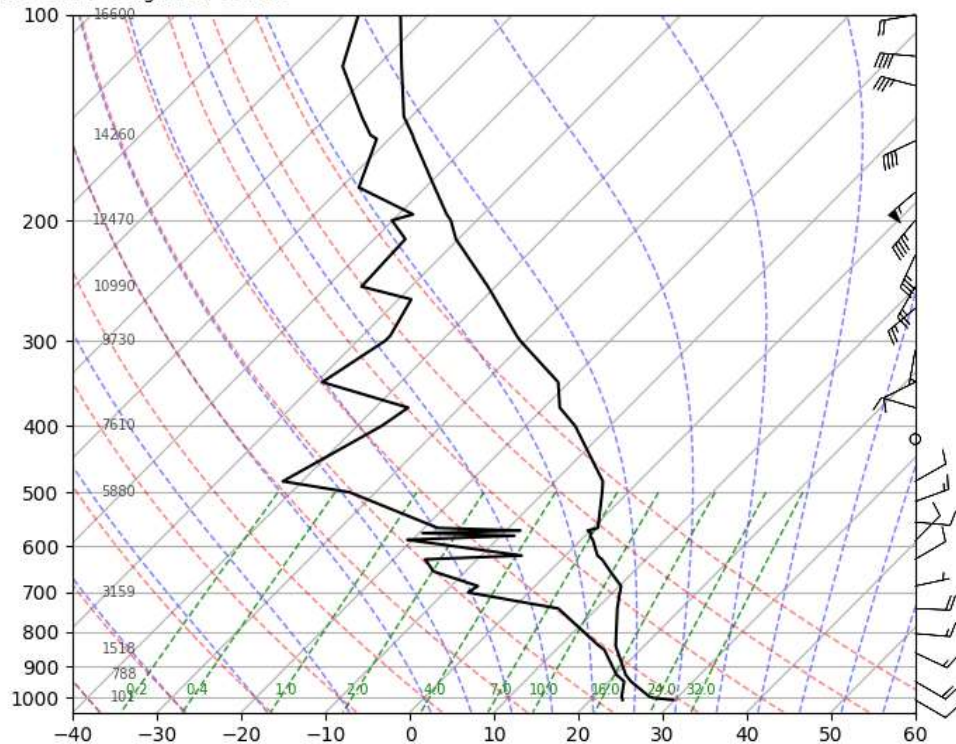
A análise do SkewT-LogP permite concluir que a estrutura vertical em Natal (e, por extensão sinótica, em Maceió) no dia 06/01/2025 era inerentemente desfavorável ao nevoeiro. A umidade está confinada a uma camada rasa (até ~ 850 hPa). Abaixo disso, o ar está muito seco para sustentar a condensação ao nível do mar. O satélite viu a "assinatura térmica" das nuvens presas sob a inversão (BTD negativo), mas o SkewT prova que essas nuvens têm uma base elevada (LCL alto). O diagrama ratifica o estado VFR (*Visual Flight Rules*). O risco de nevoeiro é nulo, pois não há o acoplamento da camada saturada com a superfície (FIGURA 20).

FIGURA 20 - Imagem do Diagrama SkewT-LogP (SBNT - 06/01/2025 12Z).

Station 82599 at 12 UTC 06 Jan 2025

NATAL AEROPORTO, Brazil

Latitude: -5.910 Longitude: -35.250



Fonte: Wyoming Weather Web acessado em 10 de setembro de 2025, às 21:20.

6 CONCLUSÕES

O *framework* preditivo desenvolvido demonstrou ser uma ferramenta robusta para a gestão de riscos no Aeroporto Zumbi dos Palmares (SBMO), especialmente na detecção de nevoeiro radiativo denso. O algoritmo XGBoost atingiu um ROC AUC Score de 0,7532, mostrando alta capacidade de discriminação em eventos severos, com probabilidades de detecção superiores a 99% em casos de visibilidade crítica. A estratégia operacional focou na minimização de falsos negativos, priorizando o alerta de nevoeiro (segurança aérea) em detrimento da eficiência operacional (aceitação de maior número de Falsos Alarmes). A integração do Spread ($T - T_d$) como "âncora física" foi essencial para evitar alarmes falsos em períodos de verão, quando nuvens de brisa marítima podem mimetizar a assinatura espectral do nevoeiro.

O trabalho inova ao combinar dados orbitais do satélite GOES-16 (ABI) com observações terrestres de alta resolução temporal (METAR). Utilizou com sucesso Diferenças de Temperatura de Brilho (BTD) e limiares de albedo para confirmar a fase líquida e o tamanho das partículas das nuvens. O estudo validou que fenômenos de escala

sinótica na costa Nordeste, como as Inversões Térmicas de Alísios, são mecanismos-chave bem representados pelo perfil termodinâmico da região.

O sensoriamento remoto demonstrou dificuldade em detectar nevoeiros rasos ou opticamente finos, onde a radiação térmica do solo mascara a presença das gotículas de água. A ausência de uma estação de radiossondagem ativa em Maceió exigiu o uso de dados de Natal (SBNT), o que, embora representativo em escala sinótica, pode omitir variações microclimáticas muito específicas de SBMO. A raridade extrema de eventos de nevoeiro (apenas 0,04% da base de dados) representa um desafio contínuo para o treinamento de modelos de aprendizado de máquina.

Sugere-se a criação de um alerta automático sempre que o *Spread* for inferior a 0,50°C, independentemente da confirmação via satélite, para mitigar falhas em nevoeiros superficiais. Desenvolver um índice de severidade onde o dado termodinâmico de superfície tenha precedência hierárquica sobre o satélite em casos de saturação crítica. Explorar outras bandas do ABI ou dados de aerossóis para melhor caracterizar eventos de *smog* (nevoeiro combinado com fumaça), frequentes durante festividades regionais.

Os resultados demonstram que a combinação de sensoriamento remoto (GOES-16) e dados aeroportuários (METAR) é eficaz para monitorar nevoeiros e nuvens baixas em SBMO. A pesquisa reforça a necessidade de colaboração interinstitucional entre o ICAT/UFAL, DECEA pelo DTCEA-MO e ANAC para padronizar protocolos de segurança e a capacitação de profissionais em meteorologia aeronáutica, com ênfase em interpretação de produtos por satélites.

Esta dissertação fornece subsídios para políticas públicas que mitiguem os riscos operacionais no Aeroporto Zumbi dos Palmares, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 9 e 13).

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à equipe do Laboratório de Sensoriamento Remoto - SENSORGEO do Instituto de Ciências Atmosféricas - ICAT, da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, ao Destacamento de Controle do Espaço Aéreo-Maceió - DTCEA-MO e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pelo suporte técnico e institucional e pela colaboração com os dados utilizados neste estudo.

REFERÊNCIAS

AENABRASIL. Aeroporto Internacional de Maceió – Zumbi dos Palmares, Guia do Aeroporto, Características. Aena Brasil, 2020. Disponível em: < <https://www.aenabrasil.com.br/pt/aeroportos/aeroporto-internacional-de-maceio-zumbi-dos-palmares/Caracteristicas-.html> >. Acesso em: 13 de janeiro de 2025.

BIANCHINI, D. Meteorologia para Pilotos / Denis Bianchini. 1. ed. - São Paulo: Editora Bianch, 2017. Bibliografia ISBN 978-85-66282-40-5

BRASIL. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. Instrução do Comando da Aeronáutica: ICA 105-3: códigos meteorológicos METAR e SPECI. Rio de Janeiro, 2025. Disponível em: <https://publicacoes.decea.mil.br/publicacao/ICA-105-16>

CASTRO, F., UMSZA, D., LOUZADA, D., LANZARINI, P. R., VALENTE, M. Adverse Weather Low-Probability Forecast Effects On Flight Fuel Planning. A Capstone Project Submitted to Embry-Riddle Aeronautical University in Partial Fulfillment of the Requirements for the Aviation Management Certificate Program Embry-Riddle Aeronautical University Sao Paulo, Brazil October 2021.

DYER, S., & DYER, J. Cubic-spline interpolation. 1. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*. 2001; 4. <https://doi.org/10.1109/5289.911175>.

EUROCONTROL. European Organisation for the Safety of Air Navigation. Standard Inputs for Economic Assessments. Brussels: Eurocontrol, 2021.

EREMEEV, V. analysis of error in interpolation of continuous functions with unknown continuous derivatives using cubic splines. *Modern problems of modeling*. 2022 <https://doi.org/10.33842/2313-125x-2023-23-73-80>.

EREMEEV, E., & RACKOVICH, A. Algorithmic software for using the cubic spline in restoring the functional dependence in the case of boundary conditions for the first derivatives. *Modern problems of modeling*. 2021 <https://doi.org/10.33842/22195203/2021/21/114/121>.

ESMAEILI, F., AMIRI-SIMKOOEI, A., NAFISI, V., & NAEINI, A. APPLICATION OF B-SPLINE METHOD IN SURFACE FITTING PROBLEM. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2019 <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xxlii-4-w18-343-2019>.

FAA - FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. Aeronautical Information Manual (AIM). Washington: U.S. Department of Transportation, 2020.

FEDOROVA, N.; DA SILVA, A. O. & LEVIT, V. (2010, July). Dangerous Fog Analyses and Forecast in the Maceio Airport, Brasil. In *5th International Conference on Fog Collection and Dew* (pp. 7-10).

GRATTON, G. B.; WILLIAMS, P. D.; PADHRA, A.; RAPSOMANIKIS, S. Reviewing the impacts of climate change on air transport operations. *The Aeronautical Journal*, 2022. v. 126, n. 1295, p. 209-221.

GULTEPE, I.; SHARMAN, R.; WILLIAMS, P. D.; ZHOU, B.; ELLROD, G.; MINNIS, P.; NETO, F. A. A review of high impact weather for aviation meteorology. *Pure and Applied Geophysics*, 2019. v. 176, p. 1869-1921.

GULTEPE, I.; PARDYJAK, E.; HOCH, S. W.; FERNANDO, H. J. S.; DORMAN, C.; FLAGG, D. D.; HEYMSFIELD, A. J. Coastal-fog microphysics using in-situ observations and GOES-R retrievals. *Boundary-Layer Meteorology*, 2021. v. 181, n. 2, p. 203-226.

GULTEPE, I. A Review on Weather Impact on Aviation Operations: Visibility, Wind, Precipitation, Icing. *Journal of Airline Operations and Aviation Management* (ISSN: 2949-7698) www.jaoam.com Volume 2. Doi: <https://doi.org/10.56801/jaoam.v2i1.1>

ICAO - INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. Doc 9137: Airport Services Manual - Part 8: Airport Operational Services. Montreal: ICAO, 2019.

LAKRA, K.; AVISHEK, K. A review on factors influencing fog formation, classification, forecasting, detection and impacts. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 2022. v. 33, n. 2, p. 319-353.

LEVIN, D., & GRUBERGER, N. Adapted B-Spline Quasi-Interpolation for Approximating Piecewise Smooth Functions. *Algorithms*. 2025 <https://doi.org/10.3390/a18060335>.

MAHDAVI, S.; AMANI, M.; BULLOCK, T.; BEALE, S. A probability-based daytime algorithm for sea fog detection using GOES-16 imagery. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020. v. 14, p. 1363-1373.

MARQUEZ, S. Future-proofing airport infrastructure for a changing climate. *International Airport Review*, 8 abr. 2024. Disponível em: <https://www.internationalairportreview.com/article/190358/future-proofing-airport-infrastructure-for-a-changing-climate/>. Acesso em: 9 out. 2024.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). *GOES-R Series Product Definition and Users' Guide (PUG): Volume 3 – Level 1b Products*. [S.l.]: NOAA/NESDIS, 2019. Disponível em: <https://www.goes-r.gov/products/docs/PUG-L1b-vol3.pdf>. Acesso em: 10 out. 2023.

PINTO, J. O.; BAILEY, S. C.; FOSSELL, K. R.; BINAU, S.; XU, M.; KAY, J.; WECKWERTH, T.M. Impact of Assimilating Uncrewed Aircraft System Observations on River Valley Fog Prediction. *Weather and Forecasting*, 2024. v. 39, n. 11, p. 1673-1694.

POULINAKIS, K., DRIKAKIS, D., KOKKINAKIS, I., & SPOTTSWOOD, S. Machine-Learning Methods on Noisy and Sparse Data. *Mathematics*. 2023 <https://doi.org/10.3390/math11010236>.

RANJAN, A. K, PATRA, A. K., GORAI, A. K. A Review on Estimation of Particulate Matter from Satellite-Based Aerosol Optical Depth: Data, Methods, and Challenges. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* (2021) 57:679–699 <https://doi.org/10.1007/s13143-020-00215-0>

RODRIGUES, M. F. A.; FERNANDES, J. E. M.; HENKES, J. A. O Impacto da Baixa Visibilidade em Aproximações, Pousos e Decolagens no Aeroporto de Porto Alegre. *Revista Brasileira de Aviação Civil*, 2022.

RODRÍGUEZ-SANZ, Á.; CANO, J.; RUBIO FERNANDEZ, B. Impact of weather conditions on airport arrival delay and throughput. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2022. v. 94, n. 1, p. 60-78.

RYLEY, T, BAUMEISTER, S., COULTER, L. Climate change influences on aviation: A literature review. *Transport Policy*, orcid.org/0000-0002-8072-2534 (2020) 92. pp. 55-64. ISSN 0967-070X <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.04.010>

SIM, S.; IM, J. Improved Ocean-fog Monitoring Using Himawari-8 Geostationary Satellite Data Based on Machine Learning with SHAP-based Model Interpretation. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2023.

Site: [Decodificador METAR e TAF para todos os aeroportos 70.493](#), acessado em 27 de fevereiro de 2025, às 22:30.

Site: <https://ajuda.decea.mil.br/base-de-conhecimento/como-decodificar-o-metar-e-o-speci/> Acessado em 04 de abril de 2025, às 10:45.

WANG, Y.; QIU, Z.; ZHAO, D.; ALI, M.A.; HU, C.; ZHANG, Y.; LIAO, K. Automatic Detection of Daytime Sea Fog Based on Supervised Classification Techniques for FY-3D Satellite. *Remote Sens.* 2023, 15, 2283. <https://doi.org/10.3390/rs15092283>

ANEXOS

Anexo 1. Tabela 4678 com os códigos de descrição dos qualificadores e fenômenos de tempo que podem constar no METAR. Fonte: BRASIL (2025).

Tabela 4678
w'w' – Tempo significativo presente e previsto

QUALIFICADOR		FENÔMENO DE TEMPO			
Intensidade ou Proximidade	Descritor	Precipitação	Obscurecedor	Outros	
1	2	3	4	5	
- Leve	MI Baixo	DZ Chuvisco	BR Névoa úmida	PO	Poeira/areia em redemoinhos
Moderada (sem sinal)	BC Bancos	RA Chuva	FG Nevoeiro	SQ	Tempestades
+ Forte (bem desenvolvido para redemoinhos de poeira/areia e nuvens funil)	PR Parcial (cobrindo parte do aeródromo)	SN Neve	FU Fumaça	FC	Nuvem(ns) funil (tornado ou tromba d'água)
VC Na vizinhança	DR Flutuante baixo	SG Grãos de neve	VA Cinzas vulcânicas	SS	Tempestade de areia
	BL Soprada		DU Poeira em área extensa	DS	Tempestade de poeira
	SH Pancada(s)	PL Pelotas de gelo	SA Areia		
	TS Trovoada	GR Granizo	HZ Névoa seca		
	FZ Congelante	GS Granizo pequeno e/ou pelotas de neve			

Anexo 2. METAR do dia 8 de junho de 2022 do Aeroporto Internacional Zumbi dos Palmares. Fonte: <https://www.ogimet.com/metars.phtml.en> acessado em 12/10/2024 às 14:10.

SBMO, Maceio Aeroporto (Brazil).
WMO index: 82993. WIGOS Id: 0-76-1-2700508000W82993
Latitude 09-31-00S. Longitude 035-46-59W. Altitude 117 m.

METAR/SPECI from SBMO, Maceio Aeroporto (Brazil).

SA 08/06/2022 00:00-> METAR SBMO 080000Z 27003KT 8000 3000E SCT002 BKN015 OVC070 22/21 Q1014=
 SA 08/06/2022 01:00-> METAR SBMO 080100Z 26003KT 9999 SCT005 BKN015 OVC070 22/21 Q1014=
 SA 08/06/2022 02:00-> METAR SBMO 080200Z 27002KT 9999 BKN002 BKN015 OVC070 23/21 Q1014=
 SA 08/06/2022 03:00-> METAR SBMO 080300Z 29003KT 0600 R12/1200 FG BKN002 BKN015 OVC070 23/21 Q1014=
 SA 08/06/2022 04:00-> METAR SBMO 080400Z 28004KT 0500 FG BKN001 BKN015 OVC070 23/22 Q1013=
 SA 08/06/2022 05:00-> METAR SBMO 080500Z 29003KT 8000 BKN002 BKN015 OVC070 22/21 Q1013=
 SA 08/06/2022 06:00-> METAR SBMO 080600Z 24003KT 0300 R12/0900 FG BKN002 BKN015 OVC070 22/21 Q1013=
 SA 08/06/2022 07:00-> METAR SBMO 080700Z 30004KT 0300 R12/0750 FG BKN002 BKN015 OVC070 22/21 Q1013=
 SA 08/06/2022 08:00-> METAR SBMO 080800Z 30005KT 0250 R12/0650 FG BKN002 BKN015 OVC070 22/21 Q1013=
 SA 08/06/2022 09:00-> METAR SBMO 080900Z 28004KT 0500 R12/1000 FG BKN002 BKN015 22/21 Q1014=
 SA 08/06/2022 10:00-> METAR SBMO 081000Z 26004KT 8000 SCT004 SCT016 22/21 Q1014=
 SA 08/06/2022 11:00-> METAR SBMO 081100Z 24006KT 9999 FEW006 BKN070 23/22 Q1015=
 SA 08/06/2022 12:00-> METAR SBMO 081200Z 21006KT 9999 SCT010 BKN020 BKN070 24/22 Q1015=
 SA 08/06/2022 13:00-> METAR SBMO 081300Z 24005KT 9999 BKN015 BKN080 26/21 Q1015=
 SA 08/06/2022 14:00-> METAR SBMO 081400Z 25004KT 9999 BKN023 BKN080 27/21 Q1015=
 SA 08/06/2022 15:00-> METAR SBMO 081500Z 21005KT 9999 SCT023 BKN080 27/21 Q1014=
 SA 08/06/2022 16:00-> METAR SBMO 081600Z 20004KT 9999 SCT024 BKN080 28/21 Q1013=
 SA 08/06/2022 17:00-> METAR SBMO 081700Z 18009KT 9999 VCSH BKN027 BKN070 28/21 Q1012=
 SA 08/06/2022 18:00-> METAR SBMO 081800Z 15009KT 9999 VCSH BKN023 FEW025TCU SCT070 27/21 Q1012=
 SA 08/06/2022 19:00-> METAR SBMO 081900Z 13006KT 9999 VCSH SCT023 FEW025TCU SCT070 26/20 Q1013=
 SA 08/06/2022 20:00-> METAR SBMO 082000Z 18005KT 9999 FEW013 SCT070 25/22 Q1013=
 SA 08/06/2022 21:00-> METAR SBMO 082100Z 19004KT 9999 FEW019 SCT070 24/22 Q1014=
 SA 08/06/2022 22:00-> METAR SBMO 082200Z 14001KT 9999 FEW019 SCT070 23/21 Q1014=
 SA 08/06/2022 23:00-> METAR SBMO 082300Z 15002KT 9999 FEW019 SCT070 23/21 Q1015=
 SA 08/06/2022 23:51-> METAR SBMO 090000Z 23001KT 9999 FEW017 SCT070 23/21 Q1015=

Anexo 3. METAR do dia 11 de junho de 2022 do Aeroporto Internacional Zumbi dos Palmares. Fonte: <https://www.ogimet.com/metars.phtml.en> acessado em 12/10/2024 às 14:10.

SBMO, Maceio Aeroporto (Brazil).
WMO index: 82993. WIGOS Id: 0-76-1-2700508000W82993
Latitude 09-31-00S. Longitude 035-46-59W. Altitude 117 m.

METAR/SPECI from SBMO, Maceio Aeroporto (Brazil).

SA 11/06/2022 00:00-> METAR SBMO 110000Z 23003KT 9999 FEW012 24/22 Q1015=
 SA 11/06/2022 01:00-> METAR SBMO 110100Z 25003KT 9999 SCT009 SCT070 23/22 Q1015=
 SA 11/06/2022 02:00-> METAR SBMO 110200Z 26003KT 0300 R12/0900D FG VV001 23/22 Q1014=
 SA 11/06/2022 03:00-> METAR SBMO 110300Z 27003KT 0200 R12/0700D FG VV001 23/22 Q1014=
 SA 11/06/2022 04:00-> METAR SBMO 110400Z 29003KT 0200 R12/0700N FG VV002 23/22 Q1013=
 SA 11/06/2022 05:00-> METAR SBMO 110500Z 30003KT 0150 R12/0550N FG VV002 22/21 Q1013=
 SA 11/06/2022 06:00-> METAR SBMO 110600Z 28003KT 0350 R12/1000U FG VV003 22/21 Q1013=
 SA 11/06/2022 07:00-> METAR SBMO 110700Z 29003KT 0300 FG VV002 23/22 Q1013=
 SA 11/06/2022 08:00-> METAR SBMO 110800Z 30004KT 0300 R12/1100N FG VV002 23/22 Q1014=
 SA 11/06/2022 09:00-> METAR SBMO 110900Z 25002KT 9999 FEW005 BKN100 23/22 Q1014=
 SA 11/06/2022 10:00-> METAR SBMO 111000Z 32003KT 9999 FEW005 BKN100 23/22 Q1014=
 SA 11/06/2022 11:00-> METAR SBMO 111100Z 30005KT 9999 FEW006 BKN019 BKN100 24/23 Q1015=
 SA 11/06/2022 12:00-> METAR SBMO 111200Z 28005KT 9999 FEW009 BKN019 BKN100 24/23 Q1015=
 SA 11/06/2022 13:00-> METAR SBMO 111300Z 20004KT 9999 BKN016 BKN100 26/22 Q1015=
 SA 11/06/2022 14:00-> METAR SBMO 111400Z 20002KT 5000 -RA FEW009 BKN019 BKN100 25/22 Q1015=
 SA 11/06/2022 15:00-> METAR SBMO 111500Z 15006KT 8000 -RA SCT012 BKN019 BKN100 26/23 Q1014=
 SA 11/06/2022 16:00-> METAR SBMO 111600Z 11002KT 8000 VCSH BKN020 BKN100 27/22 Q1013=
 SA 11/06/2022 17:00-> METAR SBMO 111700Z 08006KT 5000 -RA SCT010 BKN018 BKN100 24/22 Q1013 RERA=
 SA 11/06/2022 18:00-> METAR SBMO 111800Z 06004KT 5000 BR FEW005 BKN018 BKN080 24/23 Q1013=
 SA 11/06/2022 19:00-> METAR SBMO 111900Z 06004KT 9000 VCSH FEW007 BKN018 BKN080 24/22 Q1013=
 SA 11/06/2022 20:00-> METAR SBMO 112000Z 05002KT 9999 FEW010 SCT018 BKN070 23/22 Q1013=
 SA 11/06/2022 21:00-> METAR SBMO 112100Z 07002KT 9999 FEW010 SCT017 BKN070 23/22 Q1014=
 SA 11/06/2022 22:00-> METAR SBMO 112200Z 35001KT 9999 BKN017 BKN070 23/22 Q1014=
 SA 11/06/2022 23:00-> METAR SBMO 112300Z 36003KT 9999 SCT018 BKN070 23/21 Q1015=
 SA 11/06/2022 23:53-> METAR SBMO 120000Z 25003KT 3000 BR SCT001 BKN018 BKN070 23/22 Q1015=

Anexo 4. METAR do dia 23 de junho de 2022 do Aeroporto Internacional Zumbi dos Palmares. Fonte: <https://www.ogimet.com/metars.phtml.en> acessado em 12/10/2024 às 14:10.

SBMO, Maceio Aeroporto (Brazil).
WMO index: 82993. WIGOS Id: 0-76-1-2700508000W82993
Latitude 09-31-00S. Longitude 035-46-59W. Altitude 117 m.

METAR/SPECI from SBMO, Maceio Aeroporto (Brazil).

SA 23/06/2022 00:00->	METAR SBMO 230000Z 24008KT 6000 -RA BKN006 BKN012 OVC070 21/20 Q1016=
SA 23/06/2022 01:00->	METAR SBMO 230100Z 32008KT 4000 -RA BR BKN003 BKN012 OVC070 21/20 Q1014=
SA 23/06/2022 02:00->	METAR SBMO 230200Z 29011KT 8000 BKN008 BKN011 OVC070 21/20 Q1016=
SA 23/06/2022 03:00->	METAR SBMO 230300Z 27008KT 9999 BKN010 OVC070 21/20 Q1015=
SA 23/06/2022 04:00->	METAR SBMO 230400Z 29006KT 9999 BKN008 OVC070 21/20 Q1015=
SA 23/06/2022 05:00->	METAR SBMO 230500Z 32003KT 9999 BKN006 OVC070 21/20 Q1015=
SA 23/06/2022 06:00->	METAR SBMO 230600Z 33003KT 9999 BKN005 OVC070 21/20 Q1015=
SA 23/06/2022 07:00->	METAR SBMO 230700Z 30006KT 1000 BR BKN002 OVC070 21/20 Q1015=
SA 23/06/2022 08:00->	METAR SBMO 230800Z 30005KT 1000 BR BKN002 OVC070 21/19 Q1015=
SA 23/06/2022 09:00->	METAR SBMO 230900Z 30003KT 0700 R12/1400 FG BKN002 OVC070 21/19 Q1015=
SA 23/06/2022 10:00->	METAR SBMO 231000Z 30005KT 2000 BR BKN004 OVC070 21/20 Q1016=
SA 23/06/2022 11:00->	METAR SBMO 231100Z 27002KT 9999 FEW003 SCT015 BKN024 22/20 Q1017=
SA 23/06/2022 12:00->	METAR SBMO 231200Z 23002KT 9999 OVC011 23/21 Q1017=
SA 23/06/2022 13:00->	METAR SBMO 231300Z 16007KT 5000 2000N BR BKN005 OVC009 24/22 Q1017=
SA 23/06/2022 14:00->	METAR SBMO 231400Z 10008KT 9999 SCT009 BKN024 BKN033 25/22 Q1016=
SA 23/06/2022 15:00->	METAR SBMO 231500Z 13013KT 9999 BKN016 27/22 Q1016=
SA 23/06/2022 16:00->	METAR SBMO 231600Z 11014KT 9999 SCT019 BKN024 27/22 Q1015=
SA 23/06/2022 17:00->	METAR SBMO 231700Z 12014KT 9999 BKN021 27/21 Q1014=
SA 23/06/2022 18:00->	METAR SBMO 231800Z 12015KT 9999 BKN021 26/21 Q1014=
SA 23/06/2022 19:00->	METAR SBMO 231900Z 13007KT 9999 SCT023 25/22 Q1014=
SA 23/06/2022 20:00->	METAR SBMO 232000Z 13008KT 9999 VCSH BKN015 26/22 Q1015=
SA 23/06/2022 21:00->	METAR SBMO 232100Z 13006KT 9999 BKN017 25/22 Q1015=
SA 23/06/2022 22:00->	METAR SBMO 232200Z 14006KT 9999 BKN017 24/22 Q1015=
SA 23/06/2022 23:00->	METAR SBMO 232300Z 14006KT 9999 SCT020 24/22 Q1016=
SA 23/06/2022 23:50->	METAR SBMO 240000Z 16004KT 9999 FEW020 SCT070 24/21 Q1016=

Anexo 5. METAR do dia 25 de junho de 2022 do Aeroporto Internacional Zumbi dos Palmares. Fonte: <https://www.ogimet.com/metars.phtml.en> acessado em 12/10/2024 às 14:10

SBMO, Maceio Aeroporto (Brazil).
WMO index: 82993. WIGOS Id: 0-76-1-2700508000W82993
Latitude 09-31-00S. Longitude 035-46-59W. Altitude 117 m.

METAR/SPECI from SBMO, Maceio Aeroporto (Brazil).

SA 25/06/2022 00:00->	METAR SBMO 250000Z 15004KT 9999 SCT020 BKN070 24/20 Q1016=
SA 25/06/2022 01:00->	METAR SBMO 250100Z 14005KT 9999 SCT021 BKN070 23/20 Q1016=
SA 25/06/2022 02:00->	METAR SBMO 250200Z 13002KT 9999 SCT021 SCT070 22/19 Q1016=
SA 25/06/2022 03:00->	METAR SBMO 250300Z 20002KT 9999 SCT021 21/19 Q1016=
SA 25/06/2022 04:00->	METAR SBMO 250400Z 23003KT CAVOK 21/18 Q1015=
SA 25/06/2022 05:00->	METAR SBMO 250500Z 27004KT 9999 FEW025 20/19 Q1015=
SA 25/06/2022 06:00->	METAR SBMO 250600Z 26003KT CAVOK 21/19 Q1014=
SA 25/06/2022 07:00->	METAR SBMO 250700Z 14004KT 9999 BKN021 20/19 Q1015=
SA 25/06/2022 08:00->	METAR SBMO 250800Z 30003KT 9999 BKN023 20/19 Q1015=
SA 25/06/2022 09:00->	METAR SBMO 250900Z 25002KT 9999 BKN023 BKN070 21/19 Q1015=
SA 25/06/2022 10:00->	METAR SBMO 251000Z 31004KT 3000 -RA BR SCT002 BKN020 BKN070 21/19 Q1015=
SA 25/06/2022 11:00->	METAR SBMO 251100Z 30005KT 4000 -RA BKN011 BKN020 OVC100 21/20 Q1016=
SA 25/06/2022 12:00->	METAR SBMO 251200Z 25002KT 7000 -RA BKN007 BKN020 OVC100 22/20 Q1016=
SA 25/06/2022 13:00->	METAR SBMO 251300Z 20004KT 9999 SCT008 BKN017 BKN080 23/21 Q1016=
SA 25/06/2022 14:00->	METAR SBMO 251400Z 22005KT 8000 -RA BKN009 BKN020 OVC070 23/21 Q1015=
SA 25/06/2022 15:00->	METAR SBMO 251500Z 18009KT 9999 SCT010 BKN019 BKN070 24/22 Q1015=
SA 25/06/2022 16:00->	METAR SBMO 251600Z 18009KT 9999 SCT023 25/21 Q1014=
SA 25/06/2022 17:00->	METAR SBMO 251700Z 18007KT 9999 BKN023 26/20 Q1013=
SA 25/06/2022 18:00->	METAR SBMO 251800Z 17010KT 9999 BKN021 26/20 Q1013=
SA 25/06/2022 19:00->	METAR SBMO 251900Z 17009KT 9999 SCT021 25/20 Q1013=
SA 25/06/2022 20:00->	METAR SBMO 252000Z 18007KT 9999 FEW020 24/20 Q1013=
SA 25/06/2022 21:00->	METAR SBMO 252100Z 19005KT 9999 FEW020 23/20 Q1014=
SA 25/06/2022 22:00->	METAR SBMO 252200Z 19004KT 9999 SCT018 SCT070 23/20 Q1014=
SA 25/06/2022 23:00->	METAR SBMO 252300Z 18003KT 9999 FEW018 BKN070 22/20 Q1015=
SA 25/06/2022 23:51->	METAR SBMO 260000Z 23004KT 9999 FEW018 BKN070 22/20 Q1015=

Anexo 6. METAR do dia 6 de janeiro de 2025 do Aeroporto Internacional Zumbi dos Palmares. Fonte: <https://www.ogimet.com/metars.phtml.en> acessado em 30/08/2025 às 14:10.

SBMO, Maceio Aeroporto (Brazil).
WMO index: 82993. WIGOS Id: 0-76-1-2700508000W82993
Latitude 09-31-00S. Longitude 035-46-59W. Altitude 117 m.

METAR/SPECI from SBMO, Maceio Aeroporto (Brazil).

SA 06/01/2025 00:00-> METAR SBMO 060000Z 07008KT 9999 BKN015 27/24 Q1013=
 SA 06/01/2025 01:00-> METAR SBMO 060100Z 06007KT 9999 SCT014 26/24 Q1013=
 SA 06/01/2025 02:00-> METAR SBMO 060200Z 06004KT 9999 SCT014 26/24 Q1013=
 SA 06/01/2025 03:00-> METAR SBMO 060300Z 08005KT 8000 -RA BKN015 26/25 Q1012 RERA=
 SA 06/01/2025 04:00-> METAR SBMO 060400Z 04003KT 8000 -RA BKN015 26/25 Q1012=
 SA 06/01/2025 05:00-> METAR SBMO 060500Z 06005KT 9999 BKN015 25/25 Q1011=
 SA 06/01/2025 06:00-> METAR SBMO 060600Z 05005KT 9000 FEW011 SCT017 25/25 Q1011=
 SA 06/01/2025 07:00-> METAR SBMO 060700Z 07007KT 9999 FEW011 SCT017 25/24 Q1011=
 SA 06/01/2025 08:00-> METAR SBMO 060800Z 06005KT 9999 FEW011 SCT017 25/24 Q1011=
 SA 06/01/2025 09:00-> METAR SBMO 060900Z 05001KT 9999 FEW011 BKN019 25/24 Q1012=
 SA 06/01/2025 10:00-> METAR SBMO 061000Z 04004KT 9999 FEW013 BKN022 26/24 Q1012=
 SA 06/01/2025 11:00-> METAR SBMO 061100Z 06007KT 9999 BKN020 27/25 Q1013=
 SA 06/01/2025 12:00-> METAR SBMO 061200Z 07011KT 9999 BKN023 30/24 Q1013=
 SA 06/01/2025 13:00-> METAR SBMO 061300Z 08011KT 9999 BKN026 28/24 Q1013=
 SA 06/01/2025 14:00-> METAR SBMO 061400Z 08013KT 9999 BKN026 31/23 Q1012=
 SA 06/01/2025 15:00-> METAR SBMO 061500Z 09014KT 9999 BKN026 31/23 Q1012=
 SA 06/01/2025 16:00-> METAR SBMO 061600Z 10016KT 9999 BKN026 30/22 Q1011=
 SA 06/01/2025 17:00-> METAR SBMO 061700Z 10016KT 9999 SCT026 SCT100 30/22 Q1011=
 SA 06/01/2025 18:00-> METAR SBMO 061800Z 09014KT 9999 SCT023 SCT100 30/22 Q1010=
 SA 06/01/2025 19:00-> METAR SBMO 061900Z 10012KT 9999 SCT023 SCT100 28/22 Q1010=
 SA 06/01/2025 20:00-> METAR SBMO 062000Z 09012KT 9999 SCT023 SCT100 28/22 Q1011=
 SA 06/01/2025 21:00-> METAR SBMO 062100Z 08008KT 9999 FEW023 BKN100 26/22 Q1011=
 SA 06/01/2025 22:00-> METAR SBMO 062200Z 08007KT 9999 FEW023 BKN100 26/22 Q1011=
 SA 06/01/2025 23:00-> METAR SBMO 062300Z 08005KT 9999 FEW019 BKN100 25/22 Q1012=
 SA 06/01/2025 23:53-> METAR SBMO 070000Z 07005KT 9999 FEW019 BKN100 25/23 Q1013=